

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.479.14, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УФИМСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 25.12.2025 г. № 17

О присуждении Бобрук Елене Владимировне, гражданину РФ, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Наномасштабные особенности границ зерен и механизмы низкотемпературной сверхпластичности наноструктурированных сплавов на основе алюминия» по научной специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы принята к защите 16.09.2025 г., протокол № 14, диссертационным советом 24.2.479.14, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32, созданного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1977/нк от 18.10.2023 г.

Соискатель **Бобрук Елена Владимировна**, 23.12.1979 года рождения, в 2002 году соискатель окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» Министерство образования и науки Российской Федерации по специальности «Материаловедение в машиностроение» с присвоением квалификации «инженер».

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов на тему «Особенности структуры и механические свойства ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si, обработанных методами интенсивной пластической деформации» защитила в 2011 году в диссертационном совете Д212.111.05, созданном на базе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Работает в должности ведущего научного сотрудника управления научных исследований и разработок Федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в научно-исследовательском институте физики перспективных материалов и управлении научных исследований и разработок федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Бобрук Елена Владимировна обучалась в очной докторантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по специальности 05.16.08 - Нанотехнологии и наноматериалы (металлургия и материаловедение).

Научный консультант – доктор физико-математических наук, Еникеев Нариман Айратович, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

Найденкин Евгений Владимирович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск), лаборатория физического материаловедения сталей и сплавов, главный научный сотрудник;

Гуткин Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (г. Санкт-Петербург), лаборатория механики наноматериалов и теории дефектов, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией;

Сундеев Роман Вячеславович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет» (г. Москва), профессор кафедры наноэлектроники,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (г. Белгород), в своём **положительном**

отзыве, подписанном Федосеевой Александрой Эдуардовной д.т.н., доцентом, исполняющим обязанностей заведующего кафедрой материаловедения и нанотехнологий и Мироновым Сергеем Юрьевичем, д.ф.-м.н. ведущим научным сотрудником лаборатории механических свойств жаропрочных и наноструктурных материалов, указала, что «Рассмотрев диссертационную работу Бобрук Е.В., считаем, что в представленной работе получен ряд важных и новых экспериментальных результатов, выводы обоснованы и сформулированы корректно. Полученные результаты доказывают возможность существенного расширения диапазона сверхпластичности посредством управления сегрегаций примесных атомов и частиц вторичных фаз на границах зерен в алюминиевых сплавах, подвергнутых интенсивной пластической деформации. Содержание диссертации отражено в достаточном количестве статей, опубликованных в рецензируемых периодических изданиях, входящих в список ВАК, а также в материалах и трудах научных конференций. Автореферат диссертации и публикации диссертанта достаточно полно отражают содержание диссертации. Диссертация и автореферат оформлены в полном соответствии с установленными в ГОСТ Р 7.0.11-2011 требованиями. В целом, по научному уровню полученных результатов, а также своему содержанию и оформлению, представленная диссертационная работа соответствует критериям п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённых Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62). Её автор, Бобрук Елена Владимировна, заслуживает присуждения учёной доктора физико-математических наук по научной специальности 2.6.6 Нанотехнологии и наноматериалы».

Соискатель имеет 65 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 4 патента на изобретение и 54 статьи, в том числе 13 статей – в научных изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, 41 статья в ведущих зарубежных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, из них 33 статьи с квартилем Q1/Q2. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 19,3 п.л., личный вклад соискателя – 12,15 п.л. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации; соискатель ссылается на авторов и источники заимствования.

Наиболее значимые работы: 1. Проявление сверхпластичности при пониженных температурах сплава 1565ч системы Al–Mg в ультрамелкозернистом и наноструктурном состояниях. Е.В. Бобрук, И.А. Рамазанов, В.В. Астанин, Н.Г. Зарипов, В.У. Казыханов, А.М. Дриц, М.Ю. Мурашкин, Н.А. Еникеев. Физика металлов и металловедение. – 2023. – Т. 124, № 8. – С. 771-782. Представлено исследование влияния наноструктурного состояния сплава 1565ч системы Al-Mg-Mn на температурно-скоростные условия протекания сверхпластичности и анализ

механизма сверхпластичности. **2.** High strain-rate superplasticity of ultrafine-grained Al-Mg-Mn-Zn-Zr alloy. V.V. Astanin, E.V. Bobruk, I.A. Ramazanov, M.M. Abramova, N.G. Zaripov, N.A. Enikeev. *Letters on Materials*. – 2023. – Т. 13. № 4 (52). – С. 408-413. Представлено исследование низкотемпературной сверхпластичности в фольговом сплаве 1565ч системы Al-Mg-Mn, предложена феноменологическая схема трансформации тройных стыков границ зерен: схема последовательного развития кооперированного сдвига и самоорганизации кооперативного зернограницного проскальзывания. **3.** Superplastic behaviour at lower temperatures of high-strength ultrafine-grained Al alloy 7475. E.V. Bobruk, M.Yu. Murashkin, V.U. Kazykhanov, R.Z. Valiev. *Advanced engineering materials*. – 2019. – V.21 (1). – #1800094. Представлено исследование влияния наноструктурного состояния сплава 7475 системы Al-Zn-Mg на температурно-скоростные условия протекания сверхпластичности. **4.** Эволюция микроструктуры и механические свойства металломатричного композита Al-B с ультрамелкозернистой алюминиевой матрицей. Е.В. Бобрук, И.А. Рамазанов, В.В. Астанин. *Физическая мезомеханика*. – 2024. – Т.27. № 4. – С.22-33. Представлено исследование получения многослойного композита по схеме «фольга–волокно–фольга» изотермическим прессованием в режиме низкотемпературной сверхпластичности с наноструктурированной матрицей. **5.** Mechanisms of precipitation induced by large strains in the Al-Cu system. Y. Nasedkina, X. Sauvage, E.V. Bobruk, M.Yu. Murashkin, R.Z. Valiev, N.A. Enikeev. *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 710. – P.736-747. В работе исследованы особенности формирования ультрамелкозернистой структуры Al-Cu сплава с образование частиц упрочняющей фазы и зернограницных сегрегации исключительно вдоль границ зерен. **6.** Al-Mg-Mn-Zn-Zr alloy with refined grain structure to develop Al-B fiber-reinforced metal matrix composites compacted in superplastic conditions. E.V. Bobruk, V.V. Astanin, I.A. Ramazanov, N.G. Zaripov, V.U. Kazykhanov, N.A. Enikeev. *Materials Today Communications*. – 2023. – V. 37. – # 107527. Представлено компьютерное моделирование методом конечных элементов процесса компактирования композита с наноструктурированной Al матрицей. **7.** Mechanism of room-temperature superplasticity in ultrafine-grained Al-Zn alloys. Z. Song, R. Niu, X. Cui, E.V. Bobruk, M.Yu. Murashkin, N.A. Enikeev, Ji. Gu, M. Song, V. Bhatia, S.P. Ringer, R.Z. Valiev, X. Liao. *Acta Materialia*. – 2023. – Т. 246. – #118671. Представлен in-situ эксперимент перераспределения атомов Zn в процессе сверхпластической деформации при комнатной температуре. **8.** Low-temperature superplasticity and high strength in the Al 2024 alloy with ultrafine grains. E.V. Bobruk, M.Yu. Murashkin, I.A. Ramazanov, V.U. Kazykhanov, R.Z. Valiev. *Materials*. – 2023. – Т. 16, №2. – С.727. Представлено исследование влияния наноструктурного состояния сплава 2024 системы Al-Cu-Mn на температурно-скоростные условия протекания сверхпластичности и анализ структуры и свойств после сверхпластичной деформации. **9.** The microstructure and strength of UFG 6060 alloy after superplastic deformation at a lower homologous

temperature. E.V. Bobruk, P.D. Dolzhenko, M.Y. Murashkin, R.Z. Valiev, N.A. Enikeev. Materials. – 2022. – V.15. – #6983. Представлено исследование влияния наноструктурного состояния сплава 6060 системы Al-Mg-Si на температурно-скоростные условия протекания сверхпластичности и анализ механизма сверхпластичности. 10. Проявление низкотемпературной сверхпластичности в наноструктурированных алюминиевых сплавах. Е.В. Бобрук. Наноиндустрия. – 2025. – Т.18. №5. – С.308–318. В статье приведён обзор влияния структурно-фазовых состояний сплавов Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Mn, Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg на эффект сверхпластичности при пониженных температурах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород. Отзыв положительный. Замечания: **1)** не вполне понятен масштаб проявления (статистическая значимость) эффекта образования зернограницных выделений в ходе интенсивной пластической деформации алюминиевых сплавов; **2)** не вполне ясен физический механизм, посредством которого зернограницные выделения обеспечивают интенсификацию процесса зернограницного проскальзывания в ходе сверхпластической деформации; **3)** не вполне понятен физический механизм, посредством которого зернограницные выделения обеспечивают упрочняющий эффект в микроструктурных состояниях, рассмотренных в работе (т.е. с размером зерен от 100 до 700 нм); **4)** можно ли транслировать полученные результаты для других систем алюминиевых сплавов? **5)** не вполне понятен механизм формирования Zn прослоек на неравновесных границах при интенсивной пластической деформации; **6)** не будет ли проявление сверхпластичности при комнатной температуре препятствием для эксплуатации деталей?

2. Оппонента Найденкина Е.В., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории физического материаловедения сталей и сплавов, ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН. Замечания: **1)** Название диссертации не совсем точно отражает содержание работы, поскольку речь в ней идёт преимущественно о влиянии на развитие НТСП в алюминиевых сплавах зернограницных сегрегаций и выделений, а не «наномасштабных особенностей» границ зёрен; **2)** На мой взгляд, в работе недостаточное внимание уделено изучению влияния неравновесных границ зёрен 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 ($T_{\text{деф}} < 0,5T_{\text{пл}}$); **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».

3. **Оппонента** Гуткина М.Ю., д.ф.-м.н., главного научного сотрудника, зав. лабораторией механики наноматериалов и теории дефектов, ФГБУН Институт проблем машиноведения РАН. Замечания: 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, 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 $ES_{ГЗ}$, связанная с миграцией ГЗ». Может быть, имелся в виду энергетический барьер для скольжения или энергия активации скольжения? При чем тут миграция ГЗ, если речь идёт 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, приведённым на рис. 1.2.1(а) на стр. 54, то получается, что в 3 раза большее содержание цинка в УМЗ сплаве Al-Zn даёт 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 зёрен также обнаружены скопления решёточных дислокаций (Рисунок 4.1б)». 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°C. 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 °C представляется слишком низкой для получения достаточно прочной связи по границе между волокном и матрицей, а полученная объёмная доля волокон 30% слишком мала, чтобы обеспечить те значения прочности и жёсткости композита, которые могут оправдать высокие затраты на его производство.

4. **Оппонента** Сундеева Р.В., д.ф.-м.н., профессора кафедры нанoeлектроники ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет». Замечания: 1) в диссертации в главе 1 и 3 автор проводит наноструктурирование исследуемых сплавов методом кручения под высоким давлением (КВД) при количестве оборотов подвижной наковальни равной 10 оборотам. В диссертации отсутствует обоснование выбора именно 10 оборотов для проведения деформации методом КВД. Кроме того, возникает вопрос, проводились ли параллельные исследования по влиянию величины деформации при КВД на эволюцию структуры и свойств исследуемых сплавов – как при меньшем, так и при большем количестве оборотов подвижной наковальни. 2) Хорошо известно, что при КВД наблюдается неоднородность деформации вдоль радиуса образца, что приводит к структурной неоднородности в образце. Следует пояснить, каким образом данный фактор был учтён в работе, в частности при использовании локальных методов исследования, таких как просвечивающая электронная микроскопия и измерение микротвёрдости и др., а также при последующем анализе полученных данных и формулировании выводов. 3) В работе проводилось наноструктурирование сплавов методами больших пластических деформаций: КВД и РКУП. Однако, в тексте диссертации не представлены значения величины истинной деформации для выбранных режимов деформирования.

Отсутствие данной информации затрудняет сопоставление полученных результатов. 4) В диссертации показано, что легирование цинком Al сплавов с УМЗ структурой приводит к образованию зернограницных прослоек атомов Zn шириной 2-3 нм, которые облегчают зернограницное проскальзывание и способствуют развороту Al зерен. К сожалению, в диссертации подробным образом не обсуждается вопрос влияния размера Zn зернограницных прослоек на реализацию эффекта сверхпластичности в исследуемых сплавах. 5) В главе 1.3.3 представлены результаты испытаний на сжатие микростолбиков диаметром ~ 3 мкм и высотой ~ 10 мкм для сплавов системы Al-Zn. Возникает вопрос о воспроизводимости полученных результатов при переходе на масштаб макрообразцов.

6) В главе 4.5. диссертации (стр. 160) проведены оценки эффективной длины пробега атомов при диффузии (λ) Cu в Al. Автор делает вывод, что в условиях возможного повышения температуры во время КВД до 50 °C значение (λ) будет менее 1 нм, что слишком мало для стимулирования зарождения крупных Cu частиц с высокой плотностью. Однако в ряде работ было показано, что в ходе деформации методом КВД и др. может наблюдаться повышение температуры в образце до 200 K и выше (например, Li, J.G. The Dynamic phase transformation and formation of nanocrystalline structure in SUS304 austenitic stainless steel subjected to high pressure torsion / J.G. Li, M. Umemoto, Y. Todaka, K. Fujisaku and K. Tsuchiya // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2008. – V. 18. – № 7 – P. 577-582). Насколько в этом случае справедливы сделанные расчеты.

7) Автор утверждает (стр. 93), что объемная доля кристаллической η -фазы $MgZn_2$ определена как отношение суммы площадей под пиками η -фазы к сумме площадей под всеми пиками на дифрактограмме в диапазоне углов дифракции. Возникает вопрос, какая точность определения объёмной доли кристаллических фаз в сплавах данным методом, если в работе учитывалось только соотношение между суммарными интегральными интенсивностями рентгеновских линий и не учитывались другие дифракционные параметры, например, линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения и др.? 8) В работе встречаются опечатки и стилистические ошибки (например, на стр. 129-130 текст абзаца дублируется дважды), а также используются не всегда удачные термины, например, «грубая фаза» и др. Текст диссертации изобилует аббревиатурами и некоторые из них не расшифрованы в тексте, например, ВДС и АПТ. Также в диссертации не всегда представлены результаты расшифровки микродифракционных ПЭМ изображений (например, рис 2.3а и др.).

5. **Келлера И.Э.**, д.ф.-м.н., доцент, заведующего лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела, Институт механики сплошных сред УрО РАН - филиал ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр. В отзыве отмечено, что главные новые научные результаты соискателя относятся к особенностям структурно-фазовых превращений на атомном уровне в наноструктурированных сплавах Al-Zn, Al-

Mg-Mn, Al-Zn-Mg-Zr, Al-Mg-Si в процессе деформации в диапазоне значений температур и скоростей деформаций, когда реализуется состояние низкотемпературной сверхпластичности. Замечания: 1) Не находится расшифровка сокращения КТ; 2) На странице 15 использовано незнакомое для автора отзыва выражение «динамическая диффузия атомов» без соответствующего определения; 3) На странице 17 на основе металлофизических данных высказывается гипотеза о “стимулированном диффузией механизме деформации при необычно низких температурах”, для обоснования которой не хватает оценок его реализуемости при заданных концентрациях атомов цинка и скоростях деформации образца. Какие для совместности деформаций требуются значения коэффициентов диффузии и насколько интенсивно в этом процессе должны участвовать решеточные и зернограницные дислокации? На странице 20 для объяснения подобного механизма в другом сплаве появляется модель, анализ результатов которой изложен очень кратко.

6. **Перевезенцева В.Н.**, д.ф.-м.н., профессора, заслуженного деятеля науки РФ, заслуженного профессор ННГУ им. Лобачевского, руководителя научного направления, Институт проблем машиностроения РАН - филиал ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН. В отзыве указано, что работа Бобрук Е.В. выполнена на высоком научном уровне с привлечением современных методов исследований: с помощью рентгеноструктурного анализа, высокоразрешающей просвечивающей и сканирующей микроскопии, в том числе in-situ экспериментов, трёхмерной атомной пространственной томографии. Замечания по автореферату диссертационной работы: 1) Затруднение внутризёрненного дислокационного скольжения (ВДС) частицами второй фазы рассматривается диссертантом как положительный фактор, приводящий к активизации зернограницного проскальзывания (стр.7 автореферата). С этим трудно согласиться, поскольку процессы ЗГП и ВДС в условиях сверхпластичности тесно связаны и взаимообусловлены. Так в ряде публикаций было показано, что подавление ВДС (путём увеличения объёмной доли специальных границ, в частности, когерентных двойников в теле зёрен, препятствующих движению решёточных дислокаций и попаданию их в границы зёрен) приводит к уменьшению коэффициента скоростной чувствительности и, в конечном итоге, к выходу материала из сверхпластического состояния; 2) В диссертационной работе на примере алюминиевых сплавов разных систем легирования установлено, что причиной смещения скоростного интервала сверхпластичности в область более низких температур (при фиксированном размере зёрен) могут быть выделения дисперсных частиц второй фазы на границах и в стыках зёрен. Растворение этих частиц в процессе деформации приводит к диффузионным потокам по границам зёрен, дестабилизирующим атомную структуру границ, уменьшая тем самым сопротивление зернограницному проскальзыванию. Впервые влияние диффузионных потоков примеси по границам зёрен на СПД был систематически

исследовано в работах профессора Колобова Ю.Р. и сотрудников. Было бы уместно, на мой взгляд, упомянуть об этом в разделе «современное состояние проблемы».

7. Поляковой М.А., д.т.н., доцента, профессора кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. В отзыве отмечено, что работа Бобрук Е.В. свидетельствует о высокой квалификации ее автора и демонстрирует серьезное развитие научной проблемы сохранения высокой прочности после формообразующей операции, что имеет важное значение и способствует научно-техническим решениям на предприятиях алюминиевой промышленности России. Замечания: **1)** В работе показано, что в бинарных сплавах Al-Zn образуются тонкие прослойки цинка по границам зерен, а в высоколегированных сплавах системы Al-Zn-Mg - сегрегации атомов Zn. Почему подобных прослоек не обнаружено в высокопрочных сплавах системы Al-Zn-Mg? **2)** Известно, что в сплавах системы Al-Mg с высоким содержанием магния образование по границам зерен частиц вторичной фазы Al_3Mg_2 существенно ухудшает коррозионные свойства. Учтено ли при разработке технологии получения металломатричного композита наличие данной фазы в микроструктуре алюминия?

8. Варюхина В.Н., д.ф.-м.н., профессора, чл.-корр. РАН, научного руководителя ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина». В отзыве отмечено, что работа Бобрук Е.В. выполнена на высоком научном уровне с привлечением современных методов исследований. Замечания: **1)** фактически, пересыщенность твердого раствора означает, что в начальном состоянии он находится в неравновесном состоянии и только в процессе интенсивной пластической деформации (ИПД) переходит в некоторое равновесное состояние с выпадением вторичных фаз. Однако, согласно работе Страумала В.В. (Straumal et al. Acta Materialia 195, 184 (2020)) при решении аналогичной задачи (для раствора серебра в медной матрице) и начальное (до ИПД) и конечное состояния (после ИПД) являются равновесными. О равновесности начального состояния свидетельствует то обстоятельство, что материал перед ИПД подвергался длительному отжигу. В процессе ИПД меняется вся структура материала и система в целом стремится к некоторому универсальному стационарному состоянию с определенным содержанием структурных дефектов, растворенных компонентов и отдельных фаз, а вовсе не потому, что в начальном состоянии раствор был пересыщен. **2)** В автореферате много сокращенной аббревиатуры, что делает его трудно читаемым.

9. Страумала Б.Б., д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника, заведующего лабораторией поверхностей раздела в металлах, ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна РАН. Без замечаний.

10. **Хацаюка М.Ю.**, д.т.н., директора по науке ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики». Замечание: чем обусловлен выбор для исследования двухкомпонентных систем Al-Zn и Al-Cu?

11. **Ситдикова В.Д.**, д.ф.-м.н, старшего эксперта ООО «РН-БашНИПИнефть». Замечания: 1) Стр.14 Почему процесс КВД Al-30Zn сплава при 150°C приводит к полному распаду твердого раствора, а при отжиге РКУП-ПК того же сплава этот процесс не завершается даже при температуре 250°C? 2) Стр. 14 Предложение «Объемная доля фазы Zn при отжиге при 200°C осталась прежней, но частицы заметно выросли». Как соискатель определяла объемную долю фазы Zn? Ведь электронная микроскопия позволяет определить поверхностную долю, а метод рентгенофазового анализа - массовую долю. 3) Стр.15 С помощью метода ДКП (ДОРЭ) соискатель установила, что только базисная (0001) или призматическая {10-10} кристаллографические плоскости фазы Zn на ГЗ выравниваются параллельно ГЗ. Это противоречит данным рисунка 5а, где на ГЗ видны ламели Zn с другими ориентациями: (10-12), (2-1-11), (2-1-14), (3-1-10) и др. 4) Стр.15 Отмечено, что движение дислокаций по базисным (0001) и призматическим {10-10} плоскостям легко активируется в ГПУ материалах. Хотя в литературе (W. Bednarczyk, M. Watroba, M. Jain et al. Materials & Design 229 (2023) 111897) отмечено, что соотношение $CRSS_{basal}:CRSS_{prism}$ для Zn приблизительно 1:15. Это означает, что преимущественно активными должны быть базисные системы скольжения. В связи с этим возникает вопрос: почему в данном случае наблюдается активность также и призматических систем скольжения? 5) Стр. 22 на рис. 11 (страница 22), полученных методом просвечивающей электронной микроскопии, не представлена расшифровка электронограмм. Вероятно, детальный анализ этих данных приведён непосредственно в тексте диссертационной работы. 6) Стр. 25 Полосная фигура (111) (рисунок 14) наноструктурированного сплава Al-Mg-Si существенно отличается от текстуры простого сдвига, которая обычно формируется в металлах с ГЦК решёткой при РКУП-ПК. Необходимо пояснить причины такого расхождения с типичными закономерностями текстурообразования.

12. **Коновалова С.В.**, д.т.н., профессора, проректора по научной и инновационной деятельности, заведующий кафедрой механики и машиностроения ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». Замечания: 1) в диссертации приводятся результаты при разных температурах и скоростях деформации, однако отсутствует подробное объяснение, почему именно эти параметры были выбраны для экспериментов. Без такого обоснования трудно понять, насколько экспериментальные условия близки к промышленным, оптимальны ли они с научной точки зрения и возможно ли обобщение результатов на другие режимы. Дополнительное раскрытие мотивации и характеристик режимов повысит качество исследования и его практическую значимость. 2) В работе хорошо описаны собственные результаты, но отсутствует глубокое сопоставление с последними

публикациями по сплавам схожего состава и по схожим методам укрепления и деформации. Критический обзор литературы и сравнение с конкурентными технологиями позволили бы более явно выявить преимущества выполненной работы и подчеркнуть научный вклад, а также обозначить существующие недостатки и пробелы.

13. **Добаткина С.В.**, д.т.н., профессора, зав. лабораторией металловедения цветных и легких металлов им. ак. А.А Бочвара Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. Замечания: 1) В автореферате не указано количество проходов РКУП для сплавов систем Al-Zn и Al-Mg-Si. 2) В случае сплавов Al-Mg-Mn указано, что исследования проводилось после 6 циклов РКУП-конформ. Не совсем понятно из каких соображений выбрано именно такое количество проходов? Проводилось ли исследование зависимости свойств от другого количества проходов? 3) Исследовал ли диссертант фазовые превращения, протекающие в сплавах в условиях динамических нагрузок, то есть при проведении испытаний на сверхпластичности.

14. **Орловой Т.С.**, д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории физики профилированных кристаллов отделения физики твёрдого тела ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН. Замечания: 1) Наиболее высокие прочностные свойства исследованных сплавов, проявляющих НТСП, были достигнуты для НС состояний, полученных методом КВД. Насколько разработанные режимы формирования таких НС состояний пригодны для получения крупногабаритных полуфабрикатов (профилей, масштабных деталей сложных форм) в промышленных условиях, учитывая, что методы КВД имеют ограничения по размеру заготовки? Возможно ли получение подобных НС, реализующих одновременно высокую прочность и НТСП другими альтернативными методами, позволяющими получать более крупногабаритные заготовки? 2) Какова долговременная стабильность полученных НС состояний? Можно ли прогнозировать, как изменятся наномасштабные структурные элементы (сегрегации, наночастицы) и, как следствие, свойства материалов при длительной эксплуатации при повышенных температурах (например, 100-150°C), отличных (более низких) от температур СП-формовки?

15. **Исаенковой М.Г.**, д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры физических проблем материаловедения Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт». Замечания: 1) Связан ли механизм перераспределения Zn в пределах зерна с движением решёточных дислокаций? Как влияет дислокационный механизм на величину объёмного и зернограничного коэффициента диффузии при реализации сверхпластичности? 2) Не понятен механизм сверхпластичности, при котором блокируется внутризеренное скольжение и активизируется зернограничное проскальзывание. Ведь последнее реализуется благодаря поглощению границами решёточных дислокаций. Или это не так? 3) Наличие

нерасшифрованных аббревиатур, присутствующих в тексте автореферата, мешает его восприятию.

16. **Белова Н.А.**, д.т.н., профессора, главного научного сотрудника кафедры обработки металлов давлением, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Замечание: известно, что сплавы на базе системы Al-Cu (2xxx серия) характеризуются наиболее высокими прочностными свойствами при повышенных температурах по сравнению с другими марочными деформируемыми сплавами. В связи с этим возникает вопрос, до каких температур сохраняется стабильность структуры таких сплавов после ИПД. В автореферате это не рассмотрено.

17. **Рааба Г.И.**, д.т.н., руководитель лаборатории «Механика градиентных, бимодальных и гетерогенных металлических наноматериалов повышенной прочности и пластичности для перспективных конструкционных применений им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «Магнитогорский Государственный технический университет им. Г.И. Носова». Замечания: 1. Хотелось бы понять какой вклад вносит ВДС, если процесс подавлен частицами и сегрегациями? 2. Как появилась частица Al Zr, если рассматривается система сплава Al-Mg-Mn?

18. **Вершининой Т.Н.**, к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований. Замечания: 1) В автореферате не везде, но встречается отсутствие значения величины ошибки определения различных величин. Например, среднего размера зерна или максимального удлинения. 2) Имеется незначительное количество опечаток и пунктуационных ошибок.

19. **Абросимовой Г.Е.**, д.ф.-м.н., доцента, главного научного сотрудника лаборатории структурных исследований ФГБУП Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна. Замечания: 1) Из текста автореферата не совсем понятно, на каких сплавах проводились исследования. Иногда указаны все компоненты, входящие в состав сплавов, а иногда один или некоторые из компонентов, которые не являются основными легирующими элементами, вовсе опускаются. Между тем, известно, что даже очень маленькое содержание легирующего элемента (т.е. микролегирование) может оказывать существенное влияние на фазовые превращения, и, соответственно, свойства материалов. 2) В тексте автореферата представлено очень много сокращений, которые не везде расшифрованы, что затрудняет чтение автореферата. 3) Не везде представлены условия обработок.

20. **Рогачёва А.С.**, д.ф.-м.н., профессора, главного научного сотрудника лаборатории динамики микрогетерогенных процессов, ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН. Замечания: 1) Если использование бинарных систем Al-Zn и Al-Cu для моделирования более сложных систем Al-Zn-Mg-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si и Al-Mg-Mn вполне логично, то квалификация

Al-Zn-Mg-Zr как «модельной» (с. 6, научная новизна) представляется недостаточно обоснованной в автореферате. 2) Текст автореферата, на мой взгляд, перегружен аббревиатурами: СП, НТСП, ЗГП, ВДС, ММК, УМЗ, ИПД, КВД, РКУП, КТ, КВДКТ, ГЗ, НС и другие сокращения используются настолько часто, что это затрудняет чтение и понимание текста. 3) В автореферате имеются грамматические и пунктуационные ошибки, например, несогласование падежей (с.3 «...электропроводность в ряде НС Al сплавах.» - в ряде сплавОВ; с. 4 «Большой вклад в развитие этого в РФ внесли группой ученых...» - внесла группА ученых).

21. **Головина И.С.**, д.ф.-м.н, профессора кафедры металловедения цветных металлов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Замечания: 1) В автореферате не обоснован принцип выбора объектов исследования. 2) Автор называет прослойки в сплаве Al-Zn – цинком, а матричную фазу – зернами Al, при этом согласно фазовой диаграмме, растворимость этих элементов один в другом значительная и пренебрегать не целесообразно. 3) Расчет с использованием конечно-элементного анализа представлен для глубокой вытяжки полученных наноструктурированных заготовок, проводился ли аналогичный анализ для условий сверхпластической формовки, который больше соответствует тематике работы?

22. **Бродовой И.Г.**, д.т.н., профессора, главного научного сотрудника лаборатории цветных сплавов, ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН. Замечания: 1) Не ясно, в каком исходном состоянии до деформации были взяты алюминиевые сплавы разного состава. 2) Для сплавов каких систем возможен распад Al - твёрдого раствора в процессе КВД при комнатной температуре? 3) На какой стадии сдвиговой деформации (степени деформации) начинается деформационное старение Al - твёрдого раствора в сплавах разного состава, и как этот процесс конкурирует с процессом образования УМЗ структуры?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой компетентностью в данной области наук, наличием публикации в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации. Д.ф.-м.н. Е.В. Найденкин является одним из ведущих российских специалистов в области экспериментальных исследований сверхпластичности металлических материалов, д.ф.-м.н. М.Ю. Гуткин – ведущий учёный в области разработки микромеханических моделей пластической деформации, в том числе, сверхпластической, а также теории дефектов и границ раздела в материалах; д.ф.-м.н. Р.В. Сундеев является специалистом по наноструктурным материалам, полученным интенсивной пластической деформацией.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая научная идея, обогащающая научную концепцию снижения температуры реализации сверхпластичности в алюминиевых сплавах за счёт формирования в них методами интенсивной пластической деформации наноструктурированного состояния с учётом перераспределения атомов легирующих элементов с образованием наноразмерных (10-30 нм) частиц вторых/вторичных фаз и зернограницных сегрегаций (с характерной толщиной менее 5-6 нм) в процессе структурно-фазовых превращений;

предложены оригинальные суждения по заявленной тематике, связывающие влияние наночастиц вторичных фаз и сегрегаций атомов легирующих элементов на реализацию низкотемпературной сверхпластичности в различных температурно-скоростных условиях в сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si и Al-Mg-Mn с ультрамелкозернистой структурой;

доказана перспективность использования новых идей по применению индуцированных интенсивной пластической деформацией структурно-фазовых превращений для формирования наноструктурированного состояния в Al сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Mg-Mn, Al-Cu-Mg и Al-Mg-Si, что обеспечивает эффект снижения температуры проявления сверхпластичности;

введены изменённые трактовки старых понятий, касающихся механизмов низкотемпературной сверхпластичности в различных температурно-скоростных условиях по трём разным сценариям в зависимости от типа легирующих компонентов в сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si и Al-Mg-Mn с ультрамелкозернистой структурой и наномасштабными особенностями границ зёрен.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, вносящие вклад в расширение представлений о явлении низкотемпературной и высокоскоростной низкотемпературной сверхпластичности в наноструктурированных Al сплавах с размером зёрен 95-600 нм, полученных методами интенсивной пластической деформации, **расширяющие границы** температурно-скоростных условий её протекания в интервале температур от комнатной до 300°C и скорости деформации от 10^{-2} до 10^{-4} с $^{-1}$;

применительно к проблематике диссертации эффективно использован комплекс существующих передовых методов структурного анализа, в том числе на наномасштабном и атомном уровне, в комбинации с численными методами анализа формирования структурно-фазовых состояний в наноматериалах под воздействием больших степеней деформации и последующей сверхпластической деформации;

изложены идеи и доказательства, расширяющие подходы к получению специальных микроструктур с выделениями наноразмерных частиц вторичных фаз и границами зёрен, содержащими сегрегации атомов легирующих элементов с характерной толщиной менее 5-6 нм, в наноструктурированных сплавах Al для эффективного

управления механизмами деформации и обеспечения повышенного уровня механических свойств;

раскрыты существенные проявления теории, описывающей перераспределение атомов легирующих элементов, растворение и выделение частиц вторых/вторичных фаз в условиях больших пластических деформаций, при помощи полученных экспериментальных данных, в том числе на наномасштабном уровне в процессе in-situ экспериментов, и их анализа при помощи моделирования на атомном уровне;

изучены причинно-следственные связи деформационно-стимулированного распада твёрдого раствора с образованием наноразмерных частиц вторичных фаз и зернограницных сегрегаций в наноструктурированных исследуемых сплавах с особенностями механизмов реализации сверхпластической деформации.

проведена модернизация существующих численных методов для описания распада твёрдого раствора в сплавах Al-Zn с ультрамелким зерном и закономерностей перераспределения атомов Zn в область границ зёрен в процессе деформационно-термической обработки, обеспечивающих получение новых результатов по теме диссертации, а именно, описывающих снижение температуры проявления сверхпластичности до комнатной за счёт стимуляции зернограницного проскальзывания прослойками Zn толщиной 2-3 нм по границам Al зёрен.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается патентами на изобретение, а также актом использования результатов диссертационной работы.

определены температурно-скоростные условия реализации эффекта низкотемпературной сверхпластичности в Al сплавах с сохранением высокой прочности после формообразующей операции, что позволяет рассматривать их потенциальное применение на предприятиях Al промышленности России для получения листового полуфабриката с повышенной прочностью до температур 250-300°C;

создана система практических рекомендаций на основе моделирования методом конечных элементов и физического эксперимента по режиму формирования композита, состоящего из наноструктурированной матрицы из сплава Al-Mg-Mn и непрерывных высокопрочных волокон, в условиях сверхпластичности при температуре 300°C;

представлены методические рекомендации по практическому использованию результатов анализа деформационно-индуцированных структурно-фазовых превращений с образованием вторичных фаз и зернограницных сегрегаций для получения наноструктурированных сплавов с улучшенным комплексом прочности и пластичности; предложен способ получения деталей сложной формы из наноструктурированного сплава Al-Zn-Mg.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании центра коллективного пользования «Нанотех» и уникальных научных установках для интенсивной пластической деформации Института физики перспективных материалов Уфимского университета науки и технологий; на оборудовании Сиднейского и Руанского университетов, Университета имени Лоранда Этвёша (in-situ эксперименты, сканирующая просвечивающая электронная микроскопия и пространственная атомная томография; часть термических исследований, наноиндентирование и сжатие микростолбиков).

теория построена на известных общепризнанных теоретических представлениях и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по деформационно-стимулированному распаду твёрдого раствора с образованием наноразмерных частиц и зернограницных сегрегаций в Al сплавах в наноструктурированном состоянии в результате интенсивной пластической деформации и последующей изотермической прокатки. Также результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах по физике металлов и материаловедению, что обеспечивает высокий уровень валидации полученных экспериментальных данных и теоретических выводов;

идея базируется на анализе собственных практических данных и обобщении передового опыта ведущих отечественных и зарубежных учёных в области получения и исследования объёмных наноструктурных материалов;

использован сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований по рассматриваемой тематике структурных-фазовых превращений с образованием наноразмерных частиц вторичных фаз и зернограницных сегрегаций в условиях интенсивной пластической деформации в Al сплавах, а также температурно-скоростных условий протекания сверхпластичности в ультрамелкозернистых материалах, установленных различными научными группами.

установлено качественное соответствие авторских результатов изучения закономерностей и природы структурно-фазовых превращений в Al сплавах в результате интенсивной пластической деформации данным, представленным в независимых источниках по теме диссертации, сделанные выводы не противоречат современным научным представлениям, изложенным в публикациях и докладах других авторов.

использованы апробированные современные методики для сбора и обработки экспериментальных данных, в том числе с использованием прецизионного оборудования, современных пакетов обработки результатов исследования.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке основной идеи и общей цели исследований, организации и выполнении экспериментальных работ, составляющих основу диссертации; проведении анализа экспериментальных и теоретических данных,

обобщении, подготовка основных публикаций по теме исследования; формулировании цели и задачи, научных положений, обосновании выводов данной работы; в совместных с коллегами из Сиднейского университета (Австралия) расчётах по моделированию структурно-фазовых превращений на атомном уровне и эксперименте «in-situ»; в совместном с коллегами из Руанского университета (Франция) анализе результатов пространственной атомной томографии, а также в совместном с коллегами из Университета имени Лоранда Этвёша (Венгрия) анализе результатов наноиндентирования и сжатия микростолбиков. Личное участие проявилось также в апробации результатов исследования на российских и международных конференциях и семинарах. Под руководством соискателя в рамках РНФ проектов совместно с научной группой на основе режимов обработки, полученных путем моделирования методом конечных элементов изготовлены металломатричные композиты с наноструктурированной матрицей, показавшие высокие прочностные свойства.

В ходе защиты диссертации критические замечания высказаны не были, заданы вопросы уточняющего и конкретизирующего характера. Соискатель ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию.

На заседании 25.12.2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Бобрук Елене Владимировне учёную степень доктора физико-математических наук за решение важной научной проблемы по расширению диапазона температурно-скоростных условий реализации сверхпластичности путём получения наноструктурных элементов в алюминиевых сплавах с сохранением высокой прочности после формообразующих операций, что имеет важное хозяйственное значение и способствует научно-техническим решениям на предприятиях алюминиевой промышленности России для получения листового полуфабриката с повышенной прочностью в интервале температур от комнатной до 300 °С.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета

И. о. учёного секретаря
диссертационного совета



Валиев Руслан Зуфарович

Дударева Наталья Юрьевна

25 декабря 2025 года