

## ОТЗЫВ

официального оппонента Овчинникова Владимира Владимировича на диссертационную работу Распоиенко Дмитрия Юрьевича «Влияние мегапластической деформации и термической обработки на структуру и свойства высокопрочных стареющих сплавов на основе Al-Li», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Диссертационная работа Распоиенко Д.Ю. посвящена исследованию влияния мегапластической деформации (МПД) и последующей термической обработки на структурные и фазовые превращения в промышленных сплавах системы Al-Cu-Li-Zr и установлению взаимосвязи между сформированной микроструктурой и механическими свойствами. В работе изучены возможности стабилизации получаемых нано- и микрокристаллических структур. Содержание диссертационной работы, напрямую связано с проблемой получения конструкционных материалов с высокой удельной прочностью за счет формирования в них субмикрокристаллического (СМК) и наноструктурного состояния, обладающего хорошей термической стабильностью в процессе длительного вылеживания, что является актуальной материаловедческой задачей как с научной, так и практической точек зрения.

Диссертация содержит общую характеристику работы, обзор литературы, методическую главу, четыре экспериментальные главы, заключение и список цитируемой литературы из 237 наименований.

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна, практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об опубликованных материалах, а также об апробации работы на конференциях различного уровня.

В обзоре дан подробный анализ имеющейся научной литературы по теме диссертационной работы. Проанализированы современные представления о распаде пересыщенных твердых растворов в сплавах на основе системы Al-Cu-Mg, а также в бинарных и многокомпонентных сплавах системы Al-Li. Особое внимание уделено вопросам формирования СМК- и НК-структур в ходе мегапластической деформации (МПД) чистых металлов и сплавов, а также структурным и фазовым превращениям в этих материалах при последующих термических обработках. В конце первой главы сформулированы цель и задачи исследования.

В главе, посвященной описанию объектов и методов исследования, приведены составы изученных сплавов 1450, В-1469, В-1461, методы и режимы их деформационной и термической обработки, экспериментальные методики исследования микроструктуры и комплекса

механических свойств. Основным методом МПД было выбрано кручение под высоким давлением (КВД). Были применены два вида последующей термической обработки: 1) низкотемпературный изотермический отжиг и 2) длительное вылеживание при комнатной температуре. Для исследования структурного состояния сплавов был использован главным образом метод просвечивающей электронной микроскопии (с целью детального анализа микроструктуры) и, кроме того, методы рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии. Для изучения влияния различных обработок на сопротивление сплавов микропластической деформации были применены методы микро- и наноиндентирования.

Распосиенко Д.Ю. впервые проведено тщательное исследование влияния МПД и последующих термических обработок на структурное состояние и фазовый состав сплава 1450, легированного добавками Sc и Mg. Установлено, что формируемое в результате МПД структурное состояние сильно зависит от величины деформации (числа оборотов). Показано также, что добавки Sc и Mg способствует формированию в нем высокопрочного наноструктурированного состояния, не образующегося в результате МПД сплава, не содержащего Sc с Mg.

Постдеформационные отжиги при 150 и 190 °С, при которых в сплаве одновременно реализуются процессы статической рекристаллизации и распада пересыщенного твердого раствора, позволяют получить в легированном сплаве рекристаллизованную нанокристаллическую или субмикроструктурную структуру. Степень дисперсности и размерная однородность такой структуры определяются режимами деформации и отжига. Показано, что образование в результате МПД в легированном сплаве 1450 НК-, СМК-структуры приводит к изменению последовательности распада пересыщенного твердого раствора при старении с образованием  $S_1$  и  $T_2$ -фаз, несвойственных для МК-состояния при аналогичной термообработке.

Д.Ю. Распосиенко подробно изучено также влияние МПД и термообработки на фазовые и структурные превращения в закаленном сплаве В-1469. Рассмотрена эволюция микроструктуры образцов сильнодеформированного сплава в зависимости от числа оборотов при КВД. Рост деформации образцов сопровождается фрагментацией структуры и интенсификацией процесса динамической рекристаллизации. Также, в сплаве В-1469 сразу после деформации было обнаружено гетерогенное выделение стабильной фазы  $T_2$ . Выделения стабильной  $T_2$ -фазы по границам фрагментов и динамически рекристаллизованных зерен оказывают сильное барьерное действие, блокируя рост  $\alpha$ -зерен в процессе последующего отжига при 150 °С, что приводит к образованию высокодисперсной НК- структуры. Образование в сплаве В-1469 при деформации наноструктурного состояния приводит к повышению его твердости, приведенного модуля

упругости по сравнению со значениями, характерными для обработки МК- сплава на максимальную прочность и твердость. При этом средняя величина пластичности снижается.

В следующей главе Д.Ю. Распосиенко приводятся полученные им впервые данные о структурно-фазовых превращениях в алюминий-литиевом сплаве 3-го поколения В-1461 после МПД и последующего отжига. Установлена взаимосвязь структурных состояний сплава с его механическими свойствами. Характерная особенность, обнаруженная диссертантом для сплава В-1461, состоит в образовании в нем при МПД наноструктурного состояния с полосчатой структурой. Увеличение деформации способствует активизации динамической рекристаллизации, увеличению дисперсности структуры и усилению интенсивности протяженного полосчатого контраста. Обнаружено гетерогенное образование частиц стабильной  $T_2$ -фазы, вместо фаз  $\delta'$  и  $T_1$  в процессе или сразу после деформации (при естественном старении). Структура отожженного сплава во многом определяется структурными особенностями сильнодеформированного состояния, проявляя структурную наследственность. Установлено, что в состоянии после МПД этот сплав переходит в высокопрочное состояние, которое достаточно стабильно и после проведения отжига. Это новый результат, представляющий как серьезный фундаментальный, так и практический интерес

В последней главе Д.Ю. Распосиенко исследована стабильность структуры и свойств сплавов 1450 и В-1469, подвергнутых МПД (либо МИД и последующему отжигу), в процессе длительного вылеживания. Установлено, что НФр-структура сильнодеформированных сплавов 1450 и В-1469 нестабильна, и при длительном вылеживании она трансформируется в смешанную НК- и СМК- рекристаллизованную зеренную структуру с пониженной дефектностью. В отличие от отожженного состояния, после вылеживания большинство образовавшихся зерен имеют преимущественно неравновесные выпукло-вогнутые границы, и только незначительная часть – более плоские сравнительно равновесные. Доля последних несколько возрастает с повышением деформации.

В то же время впервые достоверно показано что, последеформационный отжиг, обеспечивает достаточно стабильное НК-состояние легированного сплава 1450. Образовавшиеся в результате отжига рекристаллизованные зерна сохраняют свой диаметр и размерную однородность. Практически не обнаруживается также изменений характера распределения стабильных фаз  $T_2$  и  $S_1$  и их объемной доли.

Диссертация Д.Ю. Распосиенко выполнена очень тщательно, написано хорошим языком. Она содержит большое число рисунков, графиков, диаграмм и таблиц, отражающих ее содержание.

В заключении по работе приведены четко сформулированные автором основные результаты и выводы.

Среди наиболее значительных результатов, полученных впервые Распосиенко Д.Ю. в его диссертационной работе, следует отметить следующие:

1. Автором обнаружено, что МПД многокомпонентных Al-Li сплавов 1450, В-1469 и В-1461 приводит к образованию нанофрагментированной (НФр), НК- или смешанной (НФр-и НК-) структуры. Тип структуры определяется полнотой протекающей в ходе МПД динамической рекристаллизации. Установлено, что процессы деформационной фрагментации и динамической рекристаллизации сопровождаются распадом твердого раствора с образованием высокодисперсных равновесных фаз.
2. Показано, что формирующаяся в сплавах после МПД НФр структура нестабильна. При дальнейшем низкотемпературном отжиге (150 °С, 15 ч) либо при длительном вылеживании при комнатной температуре эта структура за счет статической рекристаллизации трансформируется в полностью или частично рекристаллизованную НК-структуру. В целом характер формирующегося в процессе отжига состояния сплава определяется процессами рекристаллизации и распада пересыщенного твердого раствора.
3. Обнаружено, что переход в исследованных стареющих алюминий-литиевых сплавах от МК- в СМК- или НК-состояние приводит к изменению схемы и механизма распада пересыщенного твердого раствора при искусственном и естественном старении. А именно, в сплаве 1450 вместо метастабильных  $\delta'$ ,  $\beta'$  и равновесной  $T_1$  фаз выделяются дисперсные равновесные фазы  $S_1$  и  $T_2$ ; в сплаве В-1469 вместо фаз  $\delta'$ ,  $\beta'$ ,  $T_1$  и  $\Omega - T_2$ -фаза; а в сплаве В-1461 вместо фаз  $\delta'$ ,  $\beta'$  и  $T_1 - T_2$ -фаза.
4. Автором выявлено, что стабильность механических свойств сплавов в процессе длительного (до 2 лет) вылеживания, обусловлена размерной стабильностью рекристаллизованной НК-структуры, а также постоянством объемной доли, характера распределения и состава выделившихся фаз. В свою очередь, высокая фазовая и размерная стабильность структуры сплавов при длительном вылеживании обеспечивается барьерным эффектом образующихся мелкодисперсных равновесных фаз.

В практическом плане важен установленный Д.Ю. Распосиенко факт, заключающийся в том, что в результате рационального легирования и применения метода МПД возможно создание УМЗ-многокомпонентных материалов (легированных по типу изученных в работе высокопрочных алюминий-литиевых сплавов), обладающих высокой термостабильностью неравновесного НС-состояния, обеспечивающего их уникальные свойства.

По материалы диссертации Д.Ю. Распосиенко опубликовано 8 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВФК РФ (а также в 6-ти статьях в переводных версиях этих изданий, индексируемых базами данных Scopus, Web of Science). Результаты

работы доложены на 19 международных и российских научных конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Результаты рецензируемой работы полностью соответствуют исходно поставленным целям и задачам и находятся в необходимом согласии с данными ранее полученными другими авторами.

По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Непонятно на основании чего выбирались режимы низкотемпературных отжигов исследуемых сплавов.

2. В работе отсутствуют данные о структуре и фазовом составе сплавов в исходном (перед МПД) закаленном состоянии, хотя, согласно имеющимся исследованиям, исходная микроструктура существенно влияет на структурные и фазовые превращения при последующей деформации.

3. Хотелось бы выяснить, как методически автор выделял фрагментированную (Фр) и нанокристаллическую (НК) составляющие структуры?

4. При измерении механических свойств деформированного сплава В-1461 зафиксировано немонокотное изменение модуля упругости (табл. 5.1., стр. 123 диссертации), но в тексте диссертации есть только констатация этого факта. Каковы причины наблюдаемого явления?

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки выполненной Д.Ю. Распосиенко диссертационной работы. В ходе выполнения работы автором использованы заслуживающие доверия взаимодополняющие современные методы исследования. С учетом многократного воспроизведения результатов выполненных экспериментов, их тщательной обработки, а также квалифицированной интерпретации полученных данных, надежность и обоснованность сформулированных положений и выводов по работе не вызывает каких-либо сомнений.

Автореферат диссертации написан четко и ясно, его содержание правильно отражает основной материал выполненной работы.

Содержание диссертации соответствует пунктам п. 2 паспорта специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов: «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях», и п. 3: «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера

распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов».

В целом считаю, что диссертационная работа Распоиенко Д.Ю. «Влияние мегапластической деформации и термической обработки на структуру и свойства высокопрочных стареющих сплавов на основе Al-Li», представляет собой оригинальное, весьма трудоемкое законченное научное исследование, имеющее несомненную научную и практическую ценность. Оно полностью удовлетворяет всем требованиям пункта 9 Положения «О присуждении ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Распоиенко Дмитрий Юрьевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:


Главный научный сотрудник  
лаборатории пучковых воздействий  
Института электрофизики УрО РАН,  
доктор физ.-мат. наук, профессор



В. В. Овчинников  
«20» ноября 2017 г.

6200016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106  
ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН  
Тел: +7(343)-267-87-74. E-mail: viae05@rambler.ru

*С отзывом ознакомлен*  
*23.11.2017*



*Распоиенко Д. Ю.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертации Распосиенко Дмитрия Юрьевича «Влияние мегапластической деформации и термической обработки на структуру и свойства высокопрочных стареющих сплавов на основе Al-Li», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фамилия, имя, отчество                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Овчинников Владимир Владимирович                                                                                                                          |
| Гражданство                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Российская Федерация                                                                                                                                      |
| Ученая степень (с указанием шифра специальности по которой защищена)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | доктор физико-математических наук,<br>01.04.07                                                                                                            |
| Основное место работы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                           |
| Должность                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией                                                                                                        |
| Наименование подразделения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Лаборатории пучковых воздействий                                                                                                                          |
| Полное наименование организации в соответствии с уставом                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН                                                                                                                      |
| Почтовый индекс, адрес, веб сайт, телефон, адрес электронной почты организации                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 6200016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106,<br><a href="http://www.iep.uran.ru/">http://www.iep.uran.ru/</a><br>+7 (343) 267-87-96<br>admin@iep.uran.ru |
| Список основных публикаций официального оппонента, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                           |
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Овчинников В. В., Махинько Ф. Ф., Гущина Н. В., Степанов А. В., Медведев А. И., Стародубцев Ю. Н., Катаев В. А., Цепелев В. С., Белозеров В. Я. Воздействие ионного облучения на процесс нанокристаллизации и магнитные свойства магнитомягкого сплава <math>Fe_{72.5}Cu_1Nb_2Mo_{0.5}Si_{14}B_9</math> // ФММ. – 2017. – Т. 118. – № 2. – С. 158-166.</li> <li>2. Ovchinnikov V. V., Gushchina N. V., Mozharovsky S.M., Kaigorodova L.I. Low-temperature volume radiation annealing of cold-worked bands of Al-Li-Cu-Mg alloy by 20-40 keV <math>Ar^+</math> ion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 168. 012067.</li> <li>3. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V. Mücklich A. Acceleration of volume decomposition of supersaturated Al + 4 wt.%Cu solid solution under irradiation with <math>Ar^+</math> ions // Phys. Status Solidi B. – 2016. – Vol. 253. – № 4. – P. 770-777.</li> <li>4. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V., Mücklich A. Ion irradiation-induced decomposition of</li> </ol> |                                                                                                                                                           |

- Al + 4 wt. % Cu supersaturated solid solution // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 110. – 012103.
5. Ovchinnikov V.V., Gushchina N.V., Gapontseva T.M., Chashchukhina T.I., Voronova L.M., Pilyugin V.P., Degtyarev M.V. Optimal deformation and ion irradiation models for production of a uniform submicrograin structure in molybdenum // High Pressure Research. – 2015. – № 15. – P. 1-10.
  6. Гущина Н.В., Можаровский С.М., Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Кайгородова Л.И. Влияние облучения ускоренными ионами  $Ag^+$  на структуру, фазовый состав и механические свойства сплава 1960 (Al-Zn-Mg-Cu) после естественного старения // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 9/3. – С. 92-96.
  7. Овчинников В.В., Можаровский С.М., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Исследование возможности радиационного отжига сплава 1424 (Al-Li-Mg-Zn-Mn) пучками ускоренных ионов аргона // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. Т. 57. – № 3/3. – С. 216-219.
  8. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Можаровский С.М., Кайгородова Л.И. Исследование процессов формирования наноразмерных интерметаллидных фаз в сплаве 1441 системы Al-Li-Mg-Zn-Mn в ходе облучения пучками ускоренных ионов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. Т. 56. – № 1/2. – С. 163-166.
  9. Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Соломонов В.И., Гущина Н.В., Кайгородова О.А. Свечение поверхности металлических мишеней при облучении ионами  $Ag^+$  с энергией 5-20 кэВ // ПЖТФ. – 2012. – Том 38. – Выпуск 1. – С. 86-94.

Даю согласие на обработку моих персональных данных и на размещение их в свободном доступе в сети информационно-телекоммуникационной сети “Интернет” и в единой информационной системе.

Официальный оппонент

В.В. Овчинников

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

Е.Е. Кокорина