

## «УТВЕРЖДАЮ»

И. о. ректора федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Тамбовский  
государственный университет имени  
Г.Р. Державина»

П.С. Моисеев

« 18 » 08 2022 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Загуляева Дмитрия Валерьевича

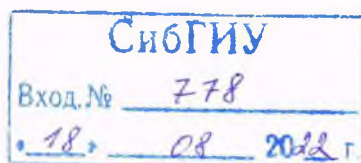
«Модификация структуры и свойств алюминия и доэвтектических силуминов методами электронно-ионно-плазменных и магнитных воздействий», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

### Актуальность диссертационной работы

В связи с широкой распространенностью алюминиевых сплавов и необходимостью улучшения их служебных свойств представленная Загуляевым Д.В. диссертационная работа, посвященная исследованию влияния концентрированных потоков энергии на структурно-фазовые состояния и свойства Al и AlSi сплавов, является весьма актуальной с научно-практической точки зрения.

Создание научных основ комплексной технологии упрочнения алюминия и доэвтектических силуминов методами электронно-ионно-плазменных и магнитных воздействий - одна из важных задач физики конденсированного состояния.

В связи с непрерывно расширяющимся применением алюминиевых сплавов в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении, повышенный интерес к разработке способов их модифицирования вполне понятен и обоснован. Разработка методов электронно-ионно-плазменных воздействий дает возможность управлять изменениями структуры и свойств материала и решить важные проблемы повышения прочности и износостойкости. Технические решения, разрабатываемые в данной работе, соответствуют



направлениям Стратегии НТР РФ. Вышеназванные факты обуславливают высокую степень актуальности диссертационного исследования Загуляева Д.В.

### **Общая характеристика работы**

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 8 разделов, выводов, списка использованных источников. Текст изложен на 330 страницах, включает 25 таблиц, 174 рисунка. Список использованной литературы содержит 290 наименований. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Во введении описана актуальность, поставлена цель и задачи исследования, обозначена научная новизна и практическая ценность исследования, приведены сведения об апробации и использовании результатов в научно-исследовательской и образовательной деятельности, а также в отечественной промышленности.

В первом, обзорном разделе обсуждаются ключевые работы, проведен анализ отечественных и зарубежных научных источников, объектов интеллектуальной деятельности, отражающих современное состояние проблемы модификации структуры и свойств внешними немеханическими источниками энергии.

Во втором разделе описаны методы проведения исследований, в частности, оптическая, электронная и просвечивающая микроскопия и другие микроструктурные методы. Приведены методики пробоподготовки и режимы обработки, для которых проводились исследования.

В третьем разделе представлены результаты исследования влияния магнитного поля величиной до 0,3 Тл на микротвердость Al разной степени чистоты и скорость стационарной ползучести. Исследована фрактография поверхности разрушения Al, полученной при деформировании в режиме ползучести с одновременным воздействием магнитными полями разной величины, а также проведен анализ изменений дислокационной субструктуры в таких условиях.

В четвертом разделе представлены результаты исследований влияния интенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии от 10 до 50 Дж/см<sup>2</sup> с шагом 10 Дж/см<sup>2</sup> и временем импульса 50 и 200 мкс на микротвердость, износостойкость, параметры кристаллического строения, структуру, элементный и фазовый состав сплава АК5М2.

В пятом разделе представлены результаты исследований влияния интенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии пучка электронов от 10 до 50 Дж/см<sup>2</sup> с шагом 10 Дж/см<sup>2</sup>, временем импульса 50 и 200 мкс и от 10 до 35 Дж/см<sup>2</sup> с шагом 5 Дж/см<sup>2</sup>, временем импульса 150 мкс на микротвердость, износостойкость, параметры кристаллического строения, структуру, элементный и фазовый состав сплава АК10М2Н.

В шестом разделе приведены результаты исследования сплава АК10М2Н, подвергнутого импульсному многофазному ионно-плазменному воздействию методом электровзрывного легирования по шести режимам, различающихся массой порошковой навески  $Y_2O_3$  и напряжением разряда.

В седьмом разделе представлены результаты исследований сплава АК10М2Н, подвергнутого электронно-ионно-плазменной обработке, состоящей из последовательного электровзрывного легирования системой Al-Ti- $Y_2O_3$  и обработки сформированного покрытия интенсивным импульсным электронным пучком с плотностью энергии 25 Дж/см<sup>2</sup> и 35 Дж/см<sup>2</sup>. Установлено, что выявленные преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя сплава оказали существенное влияние на механические и трибологические свойства материала.

В восьмом разделе приведено описание разработанных в ходе выполнения диссертационной работы новых технических решений, заключающихся в регулировании деформационного поведения алюминия за счет воздействия магнитными полями и значительное повышение эксплуатационных характеристик сплавов АК5М2 и АК10М2Н при работе в условиях трения скольжения. Приведен экономический эффект от внедрения предложенных в диссертационной работе технологий на такие промышленные предприятия как АО «Аркони́к СМЗ», АО «РУСАЛ Новокузнецк», ООО «РЕМКОМПЛЕКТ», ООО «ВЕСТ 2002».

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе.

В приложении представлены акты и справки внедрения на промышленных предприятиях, образовательных организации.

#### **Научная новизна и основные результаты диссертационной работы**

В диссертационной работе впервые получены новые результаты о закономерностях, расширяющих представления о влиянии магнитных полей на деформационное поведение Al, механизмах, ответственных за изменение деформационного поведения Al с содержанием примесей Si от 0,0001 до 0,5900 масс.%, Fe от 0,0001 до 0,1470 масс.% при воздействии магнитными полями величиной до 0,3 Тл. Наиболее важными научными результатами диссертационной работы являются следующие:

1. Автором установлена физическая природа и закономерности улучшения механических и трибологических свойств Al-Si сплавов за счет формирования субмикро- и нанокристаллических градиентных структур, возникающих в материалах после электронно-ионно-плазменных воздействий. В ходе исследований выявлено, что основным механизмом, отвечающим за изменение микротвердости и скорости ползучести Al в

условиях действия магнитных полей, является увеличение подвижности дислокаций за счет снижения энергетического барьера в точках их закрепления.

2. Впервые установлено, что электронно-ионно-плазменная обработка AlSi сплавов приводит к кардинальному преобразованию структуры поверхностного слоя материала, заключающемуся в формировании многоэлементного многофазного покрытия с субмикроструктурной структурой, свободного от кремниевых включений и интерметаллидов микронных и субмикронных размеров, характерных для исходного сплава.

3. Автором разработан новый способ управления деформационными характеристиками Al, заключающийся в воздействии магнитным полем величиной 0,3 Тл. Кроме того, предложены рациональные режимы электронно-ионно-плазменных воздействий, позволяющие значительно повысить (в 2-2,5 раза) срок службы деталей и узлов, изготавливаемых из силуминов.

### **Оценка теоретической и практической значимости работы**

Научная значимость диссертационной работы заключается в том, что в ней выявлена физическая природа и закономерности формирования структурно-фазовых состояний, модификации свойств Al и доэвтектических силуминов, подвергнутых электронно-ионно-плазменным воздействиям и установлены физические механизмы упрочнения поверхности легких сплавов комбинированными внешними энергетическими воздействиями.

Кроме того, результаты, представленные в диссертационной работе Загуляева Д.В., дают возможность развивать научные и научно-технические направления в области разработки новых технологических решений по повышению физическо-механических и служебных свойств изделий из сплавов на основе алюминия для их дальнейшего применения в качестве конструкционных материалов, используемых в машиностроении, авиастроении, автомобилестроении.

Практическая значимость работы подтверждена актами и справками об использовании ее результатов при разработке методов и технологий. Они внедрены на заводах АО «Арконик СМЗ», АО «РУСАЛ Новокузнецк» и малых производственных предприятиях ООО «ВЕСТ 2002», ООО «РЕМКОМПЛЕКТ». Результаты работы используются при научно-исследовательской деятельности ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». По результатам работы подготовлено шесть патентов и две монографии.

## **Достоверность результатов и выводов**

Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных положений, выводов и заключений подтверждается большим объемом экспериментальных данных, а также тем, что они получены с использованием различных независимых методических подходов к изучению микроструктуры (рентгеноструктурный текстурный анализ, оптическая, растровая и просвечивающая электронная микроскопии). Это позволило повысить достоверность и надежность полученных результатов за счет сопоставления результатов независимых экспериментов. Достоверность также определяется использованием современных методов математической статистики при постановке экспериментов, современного оборудования при их осуществлении и апробацией результатов исследования в российской и зарубежной печати.

### **По работе имеются следующие замечания:**

1. В разделе 3 приведены данные по результатам измерения физико-механических характеристик алюминия (микротвердость, скорость ползучести). В разделе указано, что обработка материала постоянными магнитными полями приводит к росту значений микротвердости при выдержке алюминия в магнитном поле в течении 2 часов. Каковы температурные зависимости эффекта и степень необратимости в функции от времени экспозиции в поле, кинетика релаксации эффекта после отключения поля разной интенсивности и при разной температуре? Без этих данных невозможно судить ни о микромеханизмах, ни о практической полезности наблюдавшихся эффектов по отношению к относительно чистому алюминию, не говоря уж об алюминиевых сплавах.

2. В этой же главе имеются данные о влиянии магнитного поля на ползучесть алюминия разной степени чистоты. Нигде не анализируется и не объясняется, почему одно и то же поле приводит к снижению микротвердости после экспозиции и в то же время снижению скорости ползучести. Эти данные кажутся несколько противоречащими друг другу или, по крайней мере, требующими подробного анализа и объяснения.

3. В работе использовано несколько различных методов модификации алюминия и его сплавов (магнитное воздействие, воздействие импульсного электронного пучка, ионно-плазменное воздействие, электронно-ионно-плазменное воздействие). Однако отсутствует их сравнение по степени общности (различий) в микромеханизмах, результатах и относительной эффективности этих методов.

4. В разделах 3.1, 4.1 и 5.1 проводилось измерение микротвердости при различных режимах обработки. Данный параметр позволяет определить микротвердость отдельных структурных элементов материала. Полезно было бы оценить стойкость

алюминиевых сплавов к разрушению в целом, например, измерив этим же методом вязкость разрушения ( $K_{Ic}$ ), а не только микротвердость, поскольку упрочнение, как правило, приводит и к охрупчиванию материала.

5. Некоторые приводимые данные и результаты экспериментов (см., например, рис. 5.22, 5.23, 5.24, 6.1, 6.2, 7.30, 7.32 в диссертации и 1а, 2б, 4, 5а, 6, 8, 14 в автореферате) приводятся без указания погрешностей определения. Это затрудняет оценку реально достигаемых результатов модификации, особенно в случаях, когда различия в характеристиках между исходным и модифицированным материалом или модифицированными в разных режимах материалами невелики.

6. В тексте диссертации и автореферата имеются недочеты в синтаксисе и орфографии. Наиболее типичны из первых – пренебрежение запятыми для выделения причастных и деепричастных оборотов.

Отмеченные недостатки носят дискуссионный или уточняющий характер, не оказывают влияния на основные научные и практические результаты и не затрагивают основных положений, вынесенных соискателем на защиту.

### **Заключение**

Автором успешно решены все поставленные задачи, что выражается в основных результатах работы. Выявлено, что основным механизмом, отвечающим за изменение микротвердость и скорости ползучести Al в условиях действия магнитных полей, является увеличение подвижности дислокаций за счет снижения энергетического барьера их закрепления. Загуляевым Д.В. впервые установлено, что электронно-ионно-плазменная обработка AlSi сплавов приводит к кардинальному преобразованию структуры поверхностного слоя материала, заключающемуся в формировании многоэлементного многофазного покрытия с субмикрокристаллической структурой, свободного от кремниевых включений и интерметаллидов микронных и субмикронных размеров, характерных для исходного сплава. Автором разработан способ управления деформационными характеристиками Al, заключающийся в воздействии магнитным полем величиной 0,3 Тл, а также предложены рациональные режимы электронно-ионно-плазменных воздействий, позволяющие значительно повысить (в 2-2,5 раза) срок службы деталей и узлов, изготавливаемых из силуминов.

Результаты работы внедрены в производство со значительным экономическим эффектом, что подтверждается актами внедрения и говорит о высокой практической значимости результатов.

Уровень публикаций результатов диссертационной работы полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Основные

положения диссертации опубликованы в авторитетных отечественных журналах, рекомендованных ВАК и приравненным к ним журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

На основании вышеизложенного, можно заключить, что диссертационная работа Загуляева Д.В. соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» и паспорту специальности 01.04.07, в ней на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и практические рекомендации, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Таким образом, Загуляев Д.В. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа и настоящий отзыв обсуждены и одобрены на научном семинаре НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина» 11 августа 2022 г.

Директор

НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы»

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
университет имени Г.Р. Державина»

Заслуженный деятель науки РФ

д. ф.-м. н., профессор

Индекс Хирша по базам Scopus – 22, WoS – 23, РИНЦ - 35



Ю.И. Головин

Телефоны: 8(4752)53-26-80, 8 960 662 4098

Адреса электронной почты: nano@tsutmb.ru, yugolovin@yandex.ru

