

## ОТЗЫВ

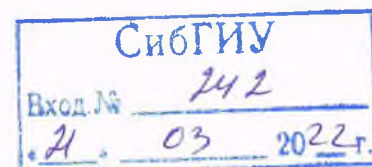
официального оппонента на диссертационную работу  
Арышенского Евгения Владимировича «Механизмы и закономерности  
формирования текстуры и свойств в деформируемых алюминиевых сплавах  
при рекристаллизации в процессах термомеханической обработки»,  
представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических  
наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

### 1. Актуальность диссертационной работы

Алюминиевые листы и ленты являются одним из самых распространённых и во многом незаменимых материалов использующихся в транспортной, аэрокосмической и пищевой отраслях промышленности. Это объясняется сочетанием таких качеств алюминиевых сплавов как высокая пластичность, коррозионная стойкость и свариваемость, отсутствие площадки текучести. Данный набор свойств одновременно сочетается с низкой плотностью и относительно большой прочностью. В то же время производство алюминиевых листов и лент связано с рядом трудностей, одной из которых является анизотропия физико-механических свойств. Причиной её появления в свою очередь является текстура, возникающая в ходе термомеханической обработки.

На формирование текстуры влияет много факторов, основными из которых являются режимы термомеханической обработки и химический состав сплава. Химический состав определяет такие важные для формирования текстуры факторы как, количество и размеры крупных первичных и мелкодисперсных вторичных интерметаллидов, и субзерна, а также мобильности межзеренных границ. Следует отметить, что даже небольшое изменение химического состава в рамках отдельного сплава влияет на механизмы и закономерности формирования в нем текстуры. Это затрудняет создание общих для всех алюминиевых сплавов подходов к управлению формированием текстурой, и снижению анизотропии физико-механических свойств.

Поэтому диссертационная работа Е.В. Арышенского “Механизмы и закономерности формирования текстуры и свойств в деформируемых алюминиевых сплавах при рекристаллизации в процессах термомеханической обработки”, направленная на поиск общих закономерностей и подходов по управлению текстурой в деформируемых алюминиевых сплавах и разработкой модели, описывающей данный процесс, является весьма актуальной как с теоретической, так и с практической, точек зрения.



## 2. Структура и основное содержание работы

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованных источников. Текст изложен на 325 страницах, включает 27 таблиц, 155 рисунков. Список использованной литературы содержит 279 наименований.

**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 первой главе** приведены основные работы, посвященные классификации компонентов текстуры в алюминиевых сплавах, причинам их возникновения и методам изучения. Кроме того, приведен детальный обзор, посвященный вопросам моделирования их эволюции.

**Во второй главе** описаны основные методы проведения исследования, а именно, оптическая, электронная и просвечивающая микроскопия, метод обратно отраженных электронов, испытания на установке Gleeble, лабораторном и промышленном прокатном стане. Приведены методики пробоподготовки и режимы термомеханической обработки, для которых проводились исследования.

**В третьей главе** описана математическая модель позволяющая рассчитывать формирование текстуры в процессах термомеханической обработки алюминиевых сплавов. С одной стороны, модель, позволяет определять количество зародышей рекристаллизации и кинетику её протекания, а также кристаллографическую ориентацию новых зерен, образующихся в её ходе. С другой стороны, модель позволяет рассчитывать изменения основных ориентировок в ходе деформационного акта с помощью Тэйлоровского алгоритма, с полными ограничениями с использованием сложных законов упрочнения.

**В четвертой главе** приведены результаты изучения факторов, влияющих на механизмы формирования текстуры в ходе процессов термомеханической обработки алюминиевых сплавов, таких как межзеренная мобильность, количество и размеры первичных и вторичных мелкодисперсных интерметаллидов. Изучены закономерности формирования текстуры и механических свойств в основных группах деформируемых алюминиевых сплавов в зависимости от режимов термомеханической обработки.

**В пятой главе** приведены технологические рекомендации, по режимам термомеханической обработки, позволяющие получать заданную текстурную композицию и такой важный показатель анизотропии, как фестонистость.

Приведен экономический эффект от внедрения предложенных в диссертационную работу технологий на такие промышленные предприятия как АО “Арконик СМЗ” и ЗАО “Сеспель”.

**В заключении** приведены основные выводы по диссертационной работе.

**В приложении** представлены акты внедрения, на промышленные предприятия, образовательные и научно-исследовательские организации.

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

Следующие основные результаты, имеют существенную научную новизну.

1. Разработана комплексная математическая модель, позволяющая рассчитывать формирование текстуры в ходе термомеханической обработке алюминиевых сплавов, как при деформационном воздействии, так и в ходе рекристаллизации. В модели предложены ранее не использующиеся подходы по учету ориентированного роста, а также применен новый метод позволяющий учитывать сложные законы кристаллографического упрочнения.
2. Исследовано влияние термомеханической обработки на размер субзерна, крупные первичные и вторичные мелкодисперсные интерметаллиды, на механические свойства для типовых представителей основных групп деформированных алюминиевых сплавов.
3. Изучены основные механизмы влияния термомеханической обработки в сочетании с размером и количеством интерметаллидов, размеров субзерна на механизмы зародышеобразования и рекристаллизации на примере таких алюминиевых сплавов как 3104, 8011, 5182 и 1565 ч.
4. На примере сплавов 3104 и 8011 изучено распределение текстур по ширине очага деформации в реальных промышленных процессах термомеханической обработки.
5. Изучены закономерности формирования текстуры в процессах термомеханической обработки сплавов 3104, 8011, 5182, 1565ч и 6016 в диапазоне температур 300–500 °С и скоростей деформации 1 – 100 с<sup>-1</sup>.

### **4. Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта**

Полученные в диссертационной работе сведения о закономерностях и механизмах формирования текстуры при термомеханической обработке алюминиевых сплавов позволили раскрыть механизмы влияния размеров субзерен и крупных интерметаллидов на формирование зародышей рекристаллизации и тип текстуры, а также влияние мелкодисперсных частиц на мобильность межзеренных границ, новая модель учитывающая механизм ориентированного роста и позволяющая использовать сложные законы



упрочнения имеют существенную научную ценность для физики конденсированного состояния.

Кроме того, изучение закономерностей формирования текстуры в промышленных процессах термомеханической обработки позволило разработать технологические режимы термомеханической обработки, позволяющей получать такой важный функциональный показатель анизотропии как фестонистость. Сумма эффекта от внедрения предложенных в работе технологий на АО «Аркони́к СМЗ» составила 57 миллионов рублей, ожидаемый экономический эффект на ЗАО «Сеспель» должен составить 6 миллионов рублей. Результаты работы используются при научно-исследовательской деятельности СамНЦ РАН, и образовательной Самарского Университета и ТУ Фрайбергерской горной академии. По результатам работы подготовлено пять патентов и две монографии.

## 5. Замечания по диссертации

1. Недостаточно обоснован выбор конкретных марочных сплавов, на которых проводились основные экспериментальные исследования. В частности, не охарактеризована их структура: состав твердого раствора, количество и размер эвтектических частиц, количество и размер дисперсоидов. Следовало бы привести обобщающую таблицу с характеристиками выбранных сплавов (например, в главе 2), подобную табл. 4.3.
2. В диссертации достаточно много место уделено идентификации частиц вторичных фаз, сделанной на основе микрорентгеноспектрального анализа. Однако не всегда экспериментальные результаты критически проанализированы, поэтому в ряде случаев идентификация фаз представляется неверной, в частности когда появляются фазы с неизвестными формулами, например  $Al_{12}(FeMnCu)_3Si$  (с.156),  $Al_2CuMg_2Si$  (с.170).
3. В табл. 4.1 приведены экспериментальные данные по размерам частиц в ряде промышленных сплавов без указания их фактического состава. Как следует из текста на с.88 («Для проведения эксперимента в кристаллизатор скольжения были вылиты слитки из сплавов А5, Д16, АК4, 3005, 3104, Амц, АМг2, АМг3, 1565ч, 5182,1570, 6016, 6061, В95пч, 8011»), данные сплавы были приготовлены специально для эксперимента, однако их состав не приведен. Поскольку марочные сплавы имеют достаточно большие интервалы по легирующим элементам и примесям, трудно оценить, насколько приведенные значения по параметрам интерметаллидов отражают марочный сплав в целом.

4. Объемные доли частиц, приведенные в табл. 4.1, следовало бы сопоставить со значениями, которые вытекают из соответствующих фазовых диаграмм, в частности, используя расчет в программе Thermo-Calc.
5. Состав сплава 8011, приведенный в табл. 2.1, не соответствует его марочному составу (в нем нет магния, но есть кремний).
6. В работе периодически упоминается энергия дефекта упаковки (ЭДУ), а в таблице № 4.3 приводится разработанный на её основе классификатор, кроме того, приводятся её значения, полученные в работах других авторов. Следовало более подробно раскрыть, что такое ЭДУ в первой главе приведя так же методы её определения для алюминиевых сплавов.
7. Многие подрисуночные подписи не содержат необходимой информации, что заставляет читателя все время обращаться к тексту, например:
  - «Рисунок 4.14 – Крупные интерметаллидные частицы второй фазы в чистом алюминии» *комментарий: правильно «в первичном алюминии технической чистоты марки А5»*
  - «Рисунок 4.29 – Химическая композиция крупных интерметаллидных частиц второй фазы в сплаве 5182» (то же относится к рисункам 4.36, 4.37 и др.) *комментарий: что такое химическая композиция?*
  - «Рисунок 4.53 – Нерекристаллизованная структура сплава после деформации при температуре 400 °С со скоростью 0,1 с<sup>-1</sup>» *комментарий: какого сплава?*
  - «Рисунок 4.67 – Микроструктура горячекатаных полос, прокатанных с высоким и низким трением» *комментарий: какого сплава?*
  - «Рисунок 4.95 – Результаты рентгеноструктурного анализа»? *комментарий: какого сплава? в каком состоянии?*
- и др.
8. Имеются погрешности в таблицах, например в табл. 4.10 не указана размерность толщины проката и скорости прокатки.

Указанные замечания не снижают общую научную ценность и практическую значимость диссертационной работы, которая в целом заслуживает положительной оценки.

## **6. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений соискателя, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных данных гарантируется использованием современного поверенного научно-исследовательского оборудования, методикой постановки эксперимента, учитывающей положения математической статистики, использованием при моделировании неоднократно проверенных положений теории кристаллографической пластичности. Кроме того, все

результаты моделирования прошли апробацию на лабораторном и промышленном оборудовании.

## **7. Соответствие диссертации паспорту специальности**

Научная новизна, актуальность работы, ее практическая ценность, а также положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния пункт 1 - Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления, и пункт 6 - Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

## **8. Соответствие автореферата диссертации**

Автореферат Е.В. Арышенского оформлен в соответствии с требованиями стандартов, полностью и точно отражает содержание диссертационной работы, написан грамотным научно-техническим языком, содержит все требуемые и четко сформулированные положения, и содержит только оригинальную полученную автором информацию.

## **9. Общее заключение по диссертационной работе**

Диссертация “Механизмы и закономерности формирования текстуры и свойств в деформируемых алюминиевых сплавах при рекристаллизации в процессах термомеханической обработки” является оригинальным и законченным квалификационным трудом обладающей большой актуальностью и имеющей высокую научную теоретическую ценность. Практическая ценность работы также подтверждается серьезным экономическим эффектом внедрения. Работа прошла серьезную апробацию как в России, так и за рубежом, на основных научно-технических конференциях по тематике физике конденсированного состояния и процессам термомеханической обработки металлических материалов. Основные положения диссертации опубликованы в авторитетных отечественных журналах, рекомендованных ВАК и приравненным к ним журналах Scopus и Web of Science (в соответствии с Приказом Минобрнауки России от 12 февраля 2018 г. N 99). Кроме того, следует отметить, что Е.В. Арышенский является состоявшимся ученым, имеющим опыт руководства и участия в качестве основного исполнителя крупных научных проектов.



