

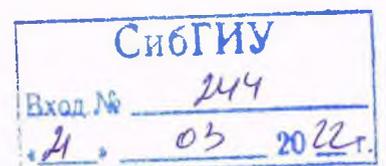
ОТЗЫВ

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

Актуальность темы диссертационного исследования

Алюминиевые сплавы получили широкое распространение во всех видах промышленности, что объясняется их низкой плотностью, высокой удельной прочностью, высокой пластичностью, хорошей коррозионной стойкостью и свариваемостью. Однако для получения этих свойств необходимо контролировать формирование микроструктуры на всех этапах термомеханической обработки. Одним из наиболее ключевых параметров микроструктуры является кристаллографическая текстура, формирующаяся при термомеханической обработке алюминиевых сплавов. Её наличие приводит к анизотропии физико-механических свойств, что снижает технологические возможности при производстве полуфабрикатов, повышает расход металла и уменьшает их эксплуатационные возможности. Для контроля формирования текстуры при термомеханической обработке необходимо понимать механизмы и закономерности её формирования. В тоже время для многих деформированных алюминиевых сплавов отсутствуют сведения об их зернограницной мобильности, влияния термомеханических режимов на образование зародышей алюминиевых сплавов при рекристаллизации, а также их связи с размером и количеством интерметаллидных частиц и субзерен. Также отсутствует единый подход к моделированию формирования текстуры при термомеханической обработке алюминиевых сплавов, что весомо может облегчить разработку новых технологических процессов, позволяющих максимально снизить анизотропию свойств. Таким образом, диссертационное исследование Е.В. Арышенского является актуальным как с теоретической, так и практической точек зрения. Это объясняется тем, что с одной стороны позволит установить механизмы и закономерности формирования текстуры в алюминиевых сплавах при их термомеханической обработке, а с другой – разработать технологические процессы получения алюминиевых полуфабрикатов, имеющих минимальную анизотропию физико-механических свойств.



Научная новизна

Научная новизна диссертации заключается в изучении влияния термомеханической обработки на размеры и количество интерметаллидных частиц для сплавов А5, 8011, 3104, 6016, 1565 ч, 1570, Д16 и В95 и субзерен и механических свойств для сплавов 8011, 5182, 1565ч и 1570; изучении связи межзеренной мобильности с кинетикой рекристаллизации, размером вторичных мелкодисперсных частиц и режимами термомеханической обработки в сплавах, а также преобладающий тип зародышей рекристаллизации в сплавах 1070, 3104, 8011, 5182, 1565ч. В работе исследовано влияние условий трения на распределение текстурной композиции по толщине очага деформации в сплавах 3104 и 8011. Установлены закономерности формирования текстуры при высокоскоростной промышленной термомеханической обработке сплавов 8011, 5182, 1565ч, 3104 и 6016. Также в работе разработана новая модель, позволяющая моделировать режимы при термомеханической обработке деформируемых алюминиевых сплавов, которая включает в себя новый подход, позволяющий учитывать сложные нелинейные законы кристаллографического упрочнения, и новый подход к расчету процесса ориентированного роста.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов определяется использованием современного поверенного оборудования, постановкой и обработкой результатов экспериментов с помощью методов математической статистики, использованием комплексного подхода к исследованию микроструктуры. Это позволило автору сопоставлять результаты, полученные разными методами, большим количеством экспериментов, в том числе и на промышленном оборудовании. Надежность полученных теоретических выводов определяется тем, что они базируются на современных положениях физики конденсированного состояния и физического материаловедения. Адекватность математической модели подтверждается правильностью задания граничных условий и использованием хорошо зарекомендовавшей себя теории кристаллографической пластичности, а также апробацией модели на промышленном оборудовании.

Научная и практическая значимость работы

Теоретическая ценность работы определяется совокупностью полученных результатов по изучению влияния термомеханической обработки алюминиевых сплавов на зернограничную мобильность, образование зародышей новых текстурных компонент в ходе процесса рекристаллизации, а также формирование механических свойств. В работе изучена связь зародышеобразования и движения зеренных границ в процессах рекристаллизации с такими элементами микроструктуры как субзерна и интерметаллидные частицы второй фазы. Научную ценность также представляет собой

универсальная для всех деформируемых алюминиевых сплавов математическая модель, позволяющая рассчитывать эволюцию в них текстуры при их термомеханической обработке. Теоретическую ценность имеют результаты изучения закономерностей формирования текстуры при промышленной термомеханической обработке алюминиевых сплавов.

Практическая значимость работы обусловлена режимами термомеханической обработки, позволяющими значительно снизить анизотропию физико-механических свойств и особенно такой её функциональный показатель, как фестонистость. Практический эффект подтверждается внедрением на АО «Арконик СМЗ» и ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». На первом предприятии эффект внедрения составил 1,36 млн. рублей, а на втором общий экономический эффект составил 6 млн. рублей. Кроме того, практическая ценность работы выражена тем, что тема диссертации соответствует критической технологии РФ «Технологии получения и обработки функциональных наноматериалов» и приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ «Индустрия наносистем». Стоит отметить что результаты диссертационной работы получены в рамках двух грантов РФ №№ 18-79-10099 и 18-79-10099-П (продление) «Создание модели расчета эволюции текстуры и структуры на ранних этапах термомеханической обработки алюминиевых сплавов, в том числе добавками переходных металлов» по мероприятию «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными, и гранта 21-19-00548 «Закономерности формирования и эволюция микроструктуры и механических свойств при литье и термомеханической обработке алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si, легированных малыми скандиево-циркониевыми добавкам», а также при выполнении госзадания Минобрнауки №0239-2019-0001. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Самарского университета им. академика С.П. Королева и Технического Университета Фрайберской горной академии, в том числе в программах двойного дипломирования.

Анализ содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованных источников. Текст изложен на 327 страницах, включает 27 таблиц, 155 рисунков. Список использованной литературы содержит 279 наименований.

Во введении приведены основные положения, выносимые на защиту и результаты диссертационной работы, её научная и практическая ценность, обоснована достоверность научных результатов, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе приведен анализ основных источников, посвящённых изучению вопросов возникновения текстур в алюминиевых деформируемых сплавах при их термомеханической обработке, как при горячей деформации, так и в ходе рекристаллизации. Описаны методы интерпретации текстурных исследований, представленных в виде функций распределения ориентировок и прямых полюсных фигур. Большое внимание уделено анализу способов моделирования формирования текстуры как в процессах рекристаллизации, так и деформации. Проанализированы основные подходы к расчету формирования текстуры в алюминиевых сплавах при горячей деформации, среди них метод Тейлора с неполными ограничениями и полными ограничениями, а также LAMEL- и ALAMEL- и GIA-модель. Так же проанализированы подходы к моделированию формирования текстур при рекристаллизации, в частности метод «Монте-Карло», метод автоматического разбиения на ячейки, физико-статистические модели зародышеобразования Г. Готштайна и Э. Ванте.

Во второй главе приведены экспериментальные методики и методы обработки результатов экспериментов. Для изучения воздействия термомеханической обработки на микроструктуру и свойства деформированных алюминиевых сплавов использовались установка Gleeble, промышленный и лабораторный прокатные станы. Для исследования микроструктуры использовалась оптическая, растровая и просвечивающая микроскопии, рентгеноструктурный анализ, а также методы EBSD. С помощью рентгеноструктурного анализа определены основные текстурные компоненты, с помощью EBSD методов проводился анализ размера субструктуры, с помощью оптической микроскопии определялся размер зеренной структуры и степень её рекристаллизации, с помощью методов растровой и просвечивающей микроскопии определялись размеры и количество интерметаллидных частиц.

В третьей главе описаны подходы к моделированию, приведен укрупнённый алгоритм функционирования модели, описано задание её граничных условий. Сама модель состоит из двух частей для расчета формирования текстур при рекристаллизации и горячей деформации, соответственно. Для расчета текстур при деформации использован Тейлоровский подход с неполными ограничениями, разработан специальный алгоритм, позволяющий с одной стороны учитывать сложные нелинейные законы кристаллографического упрочнения, с другой – существенно повысить скорость расчетов. Вторая часть посвящена разработке модели расчетов текстуры при рекристаллизации, для подсчета количества зародышей используется физико-статистическая модель, для расчета движения большеугловых границ используется авторский подход, учитывающий ориентированный рост. Кроме того, в третьей главе представлен интерфейс программного средства, реализующего представленную модель, и апробация модели.

В четвертой главе изложены результаты исследования механизмов и закономерностей формирования текстуры в деформируемых алюминиевых сплавах при их термомеханической обработке. В первой части главы изучены вопросы влияния термомеханической обработки 300–500 °С и скоростей деформации 1 – 40 с⁻¹ на формирование субструктуры и механических свойств для сплавов 8011, 5182, 1565ч и 1570 и подвижности межзеренных границ при превалирующем типе зародышеобразования (в том числе с помощью моделирования) в сплавах А5 8011, 3104, 5182, 1565ч и 1570, а так же на размеры и количество частиц второй фазы в сплавах А5, Д16, 3005, 3104, Амц, АМг2, АМг3, 1565ч, 5182, 1570, В95. Во второй части приведены данные о закономерностях формирования текстуры при промышленной термомеханической обработке сплавов 8011, 3104, 6016, 5182 и 1565ч как экспериментальным путем, так и с помощью моделирования.

В пятой главе на основе полученных данных о механизмах и закономерностях формирования текстуры даны рекомендации по снижению анизотропии физико-механических свойств и достижения такого заданного показателя как фестонистость. Показано за счет чего достигается экономический эффект внедрения. Кроме того, описаны особенности использования результатов работы в научном и образовательном процессе.

В заключении изложены основные выводы диссертации.

В приложении приведены справки о внедрении результатов.

Замечания по работе

1) В первой главе диссертации излишне подробно освещены вопросы моделирования текстур при термомеханической обработке алюминиевых сплавов. В тоже время, возможно целесообразнее было уделить внимание особенностям их формирования в реальных промышленных процессах термомеханической обработки для исследуемых в работе или близких по химическому составу сплавов.

2) Кроме закона Селлараса, описывающего механические свойства от параметров термомеханической обработки при горячей деформации и использованного в данном исследовании, существует ряд других, например предложенные в работах А.В. Третьяков и В.И. Зюзина. Необходимо было дать более подробное объяснение, почему выбран именно закон Селлараса.

3) В рамках работы создано программное средство «Программа gx_tx_fro для расчета температурного режима и преимущественных кристаллографических ориентировок» с представлением в виде функции распределения ориентировок (ФРО) при горячей, многопроходной прокатке алюминиевых сплавов. Однако результаты по расчету текстуры представлены в основном укрупненно в виде объемов PNS, β –

фибера и куба. В то время как расчетные ФРО представлены только в нескольких местах, однако они намного более наглядно выражают текстурную композицию.

4) Результаты экспериментального изучения формирования текстурной и микроструктурной композиции в промышленных процессах термомеханической обработки приведены только для ключевых точек (начало деформации и окончание, проходы в которых проходит рекристаллизация). Хотя этого и достаточно, чтобы понять закономерности формирования текстуры, но для более детального анализа можно было привести данные по зеренной структуре и кристаллографической текстуре для каждого прохода.

5) При воспроизведении результатов рентгеноструктурного текстурного анализа используются в основном ФРО, в то время как прямые и обратные полюсные фигуры встречаются реже, их тоже можно было бы привести в приложении.

6) В четвертой главе представлен только качественный анализ плотности дислокаций, хотелось бы увидеть количественные оценки.

7) На странице 148 говорится об образцах 111 и 1110 и из контекста не совсем понятно откуда берутся такие обозначения, учитывая, что рисунки, на которые ссылается автор, иллюстрируют структуру сплавов 1570 и 1565ч. Также на рисунке 4.8 нет г, вероятно это ссылка на рисунок 4.9 г.

8) Литературный обзор из пункта 5.2. уместнее было бы использовать в качестве обсуждения для сопоставления с полученными результатами, а не в качестве литературной справки, либо перенести данный пункт в главу 1.

9) В автореферате диссертации при описании структуры сплава 1565ч неверно указаны ссылки на рисунок.

Вышеперечисленные замечания не снижают общей высокой оценки результатов, полученных в диссертации, и не ставят под сомнение основные выводы.

Заключение

Представленная работа является завершённым квалификационным трудом. Она написана на высоком научно-техническом уровне. Автореферат и написанные автором статьи полностью раскрывают содержание работы.

В работе полностью достигнута заявленная цель, а именно исследование механизмов и закономерностей формирования текстуры и свойств в деформируемых алюминиевых сплавах при рекристаллизации в процессах термомеханической обработки. Диссертационная работа имеет высокую практическую ценность, по содержанию, цели, задачам и положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния п.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 п. 6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

Диссертационное исследование Е.В. Арышенского соответствует п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 и является научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема установления механизмов и закономерностей формирования текстуры и свойств в деформируемых алюминиевых сплавах при рекристаллизации в процессах термомеханической обработки, имеющей важное хозяйственное значение для алюминиевой промышленности, внедрение которой вносит значительный вклад в развитие страны. Автор диссертации Арышенский Евгений Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Директор ФГБУН Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН,
доктор технических наук
(специальность 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния)
(e-mail: eak@ispms.ru)

Колубаев Евгений
Александрович

Подпись Е.А. Колубаева заверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
кандидат физико-математических наук



Матолыгина
Наталья Юрьевна

Адрес: 634055, г. Томск,
просп. Академический, 2/4

Телефон: +7 (3822) 49-18-81

На обработку персональных данных согласен
«14» марта 2022 г.