

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе



Ю.А. Равикович  
«19» марта 2022 г.

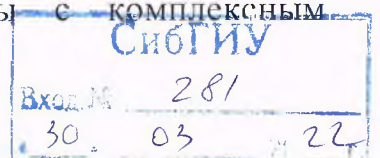
### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертационной работе Арышенского Евгения Владимировича «Механизмы и закономерности формирования текстуры и свойств в деформируемых алюминиевых сплавах при рекристаллизации в процессах термомеханической обработки», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

#### Актуальность работы

Отечественная промышленность потребляет большое количество алюминиевых полуфабрикатов благодаря низкой плотности, высокой пластичности и удельной прочности. Однако при изготовлении алюминиевых полуфабрикатов возникает ряд проблем, одна из которых анизотропия физико-механических свойств, обусловленная кристаллографической текстурой, формирующейся в процессах термомеханической обработки. Анизотропия свойств снижает как технологические, так и эксплуатационные характеристики алюминиевых сплавов, а кроме того, ведет к существенному перерасходу металла. Поэтому её уменьшение является одной из первоочередных задач производства алюминиевых полуфабрикатов. Решение этой задачи основано на разработке научных и технологических принципов управления текстурообразованием на всех стадиях производства изделий из алюминиевых сплавов. Эффективность решения этой задачи зависит от понимания механизмов и закономерностей формирования текстуры при деформации и рекристаллизации.

Несмотря на значительные успехи в изучении физических процессов сопровождающих формирование текстуры в алюминиевых сплавах, остается еще много теоретических и технологических проблем, не позволяющих осуществить надежный контроль формирования текстуры и анизотропии физико-механических свойств алюминиевых сплавов. Эти проблемы связаны с комплексным



характером процессов текстурообразования в алюминиевых сплавах, которые определяют чувствительность текстур деформации и рекристаллизации к легированию, величине энергии образования дефектов упаковки, размеру и распределению интерметаллидных частиц, исходной ориентировке и разориентировке зерен и субзерен. В результате для многих групп алюминиевых сплавов практически не изучены закономерности эволюции текстуры в реальных промышленных процессах термомеханической обработки. Это не дает возможности создать эффективную математическую модель управления процессами текстурообразования на основе надежных корреляционных соотношений между технологическими параметрами и количественными характеристиками текстуры и анизотропии свойств.

В этой связи является актуальной диссертационная работа Е.В. Арышенского, направленная на систематическое исследование закономерностей текстурообразования в деформируемых алюминиевых сплавах и разработке на этой основе математической модели управления текстурой и анизотропией свойств в процессах термомеханической обработки.

### **Общая характеристика работы**

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 приведены актуальность диссертационного исследования, показана научная новизна, приведены основные результаты исследования, положения, выносимые на защиту, а также теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ источников, посвященных особенностям текстуры в алюминиевых деформированных сплавах, механизмов их формирования, как при деформации, так и в ходе рекристаллизации. Вторая часть главы посвящена вопросам моделирования формирования текстуры при термомеханической обработке деформированных алюминиевых сплавов.

Во второй главе приведены методики экспериментов по изучению особенностей микроструктуры, кристаллографической текстуры, размеров и морфологии интерметаллидных частиц и механических свойств. Для исследования текстуры использовали в основном метод EBSD, а также рентгеновские методики построения прямых и обратных полюсных фигур. Для исследования дислокационной структуры и дисперсных интерметаллидных частиц широко использовали растровую и просвечивающую электронную микроскопию.

В третьей главе дано описание алгоритма и вычислительной процедуры разрабатываемой модели формирования текстуры, которая включает модифицированную модель деформации поликристалла по Тейлору, а также модель формирования текстуры рекристаллизации на основе процесса ориентированного роста зародышей.

В четвертой главе приведены результаты изучения влияния термомеханической обработки на механические свойства, размер и количество интерметаллидных частиц и субструктуру. Показана связь этих факторов с мобильностью межзеренных границ и механизмами формирования текстуры при рекристаллизации. Во второй части главы, выявленные в первой части особенности механизмов текстурообразования алюминиевых сплавов разных систем легирования эффективно использовались для исследования и поиска способов управления процессами формирования текстуры при термомеханической обработке в реальных промышленных процессах. В частности, исследованы вопросы распределения текстуры по ширине очага деформации, изучены особенности формирования текстуры в рекристаллизуемых и нерекристаллизуемых алюминиевых сплавах.

В пятой главе приведены результаты внедрения результатов, полученных в диссертационном исследовании в промышленность на АО “Арконик СМЗ” и ОА “Сеспель”. Описаны режимы термомеханической обработки позволяющие снизить уровень анизотропии алюминиевых полуфабрикатов. Приведены сведения о внедрении результатов диссертационной работы в учебный и образовательный процесс.

В заключении приведены итоги и главные выводы из полученного исследования.

### **Научная новизна**

Принципиально новым представляется подход автора к решению сложнейшей проблемы управления текстурой и анизотропией механических свойств широкого спектра алюминиевых сплавов. Оригинальность этого подхода заключается в том, что автору удалось объединить металлофизические и материаловедческие подходы к этой сложнейшей задаче за счет рационального выбора объектов исследования из наиболее представительных по химическому составу и механизму текстурообразования при деформации и рекристаллизации промышленных алюминиевых сплавов. В результате оказалось возможным использовать выявленные в исследованиях особенности механизмов влияния легирования на формирование субзеренной и дислокационной структуры,



энергию образования дефектов упаковки, динамическую рекристаллизацию сплавов различных систем легирования для разработки и совершенствования технологии получения полуфабрикатов с контролируемой текстурой, а, следовательно, анизотропией свойств.

Важно отметить, что сам по себе отбор представительных сплавов из существующих алюминиевых сплавов оказался возможным только благодаря огромному объему исследований текстуры и анизотропии свойств сплавов различных систем легирования. В качестве примера такого отбора можно привести сплавы 8011, 1570, 5182 и 1565. Сплавы 1570, 5182 и 1565, содержащие ~5% Mg обладают высокой движущей силой рекристаллизации из-за пониженной энергии дефекта упаковки по сравнению с чистым Al (8011). Однако с точки зрения механизма рекристаллизации и текстурообразования при горячей деформации сплавы с одинаковым содержанием магния радикально отличаются друг от друга в зависимости от незначительных добавок других элементов. Так наличие ~0,2%Fe в сплаве 1565 дает дисперсные частицы алюминида железа, эффективно препятствующие рекристаллизации, а ~0,2%Sc в сплаве 1570 образуют нанодисперсные частицы триалюминида скандия, которые увеличивают предел текучести почти на 30% и температуру рекристаллизации более чем на 200°C.

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

Исключительно важным является оригинальное решение задачи управления процессами получения листовых полуфабрикатов с повышенными показателями глубокой вытяжки за счет создания математической модели формирования оптимального соотношения компонентов текстуры прокатки и анизотропии свойств алюминиевых сплавов. Проблема повышения показателей глубокой вытяжки актуальна для всех ГЦК металлов и связана с тем, что в них из-за специфики механизма деформации нельзя в отличие от ОЦК металлов получить компонент текстуры прокатки с плоскостью {111}, параллельный плоскости листа. Известно, что только этот компонент текстуры обеспечивает высокий коэффициент Ланкфорда и соответственно повышенную штампуемость и изотропию свойств в любых направлениях листа, что обеспечивает отсутствие фестонов и разнотолщинности при глубокой вытяжке. Попытки получить текстуру {111} как сдвиговый компонент с помощью асимметричной прокатки (валки разного диаметра) не привели к положительному эффекту. Автору удалось реализовать оригинальный метод получения изотропного листа, основанный на том, что каждый компонент текстуры прокатки алюминиевого сплава (текстура

Cu, Br и S) имеет определенный тип анизотропии, который характеризуется отличающимися друг от друга направлениями максимального и минимального сопротивления деформации. Полученные в работе функциональные зависимости интенсивностей компонентов текстуры от параметров прокатки позволили определить оптимальные условия прокатки, обеспечивающие пониженные характеристики фестонистости и разнотолщинности, что повысило качество и снизило потери материала.

К практической ценности работы можно отнести выявленные закономерности формирования текстуры при различных параметрах деформации, позволившие разработать технологические режимы термомеханической обработки сплавов 6016, 8011, 3104, 5182 и 1565 с общим экономическим эффектом от внедрения 57 млн. рублей на АО “Аркони́к СМЗ”. Результаты диссертационной работы используются в образовательном процессе Самарского Университета и ТУ Фрайберской горной академии, а также научно-исследовательском процессе САМНЦ РАН.

Рекомендуется использование результатов и выводов диссертации на предприятиях машиностроительного и авиастроительного профиля и в учебном процессе при подготовке студентов и аспирантов по укрупненным группам направлений 03.00.00 Физика и астрономия, 15.00.00 Машиностроение, 22.00.00 Технологии материалов.

#### **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 методических подходов к изучению микроструктуры (EBSD, 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 и современного оборудования при их осуществлении. Результативность и достоверность разработанных моделей подтверждается использованием хорошо зарекомендовавшей себя кристаллографической микромеханики для моделирования текстурообразования при деформации и современных аналитических процедур прогнозирования текстур рекристаллизации, а также тестированием результатов моделирования

сопоставлением с результатами полученными экспериментально, в том числе и на промышленных полуфабрикатах.

**По работе имеются следующие замечания:**

1. По неясной причине автор не идентифицирует частицы интерметаллидов в сплаве 1570 как  $\beta$ -фазу ( $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ), при этом количество интерметаллидной фазы в сплаве оценено в 5-7% (стр.165), а сплав содержит 5,6% Mg, поэтому присутствие типичной для магналиев  $\beta$ -фазы в сплаве вполне естественно.

2. Нанодисперсная фаза на рис.4.40 обозначена как  $\text{Al}_3\text{Sc}$  (стр.167), но вероятнее всего это фаза  $\text{Al}_3(\text{Sc},\text{Zr})$ , поскольку в сплаве наряду с 0,26% Sc присутствует 0,07%Zr, который, как известно, может замещать Sc в интерметаллидной фазе с  $\text{L}_{12}$  структурой, что усиливает «антирекристаллизационный эффект» Sc.

3. Кажется излишним использование полного набора сечений ФРО (19 карт), тогда как для идентификации компонентов текстуры прокатки ГЦК сплавов достаточно 2-х сечений ( $\varphi_2=45$  и  $65^\circ$ ), которые можно было бы расположить на одном рисунке для разных сечений листа или разных обжатий, что существенно повысило бы информативность этих рисунков (рис.4.63, 4.70, 4.76 – 4.80).

4. Диссертационная работа в целом хорошо оформлена, при этом встречаются досадные неточности, например, на стр. 25, 26 и на рис.1.9, 1.10 кристаллографические плоскости (100) и (111) обозначены как совокупности направлений ( $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ ) с использованием ломаных, а не круглых скобок. На стр. 141 при обозначении компонентов текстуры прокатки использовали сочетание фигурных скобок для плоскости листа и квадратных для направления прокатки ( $\{158\}[13-2]$  и  $\{23-2\}[-214]$ ), что не корректно, поскольку конкретное направление (квадратные скобки) не может быть параллельным всем плоскостям совокупности, обозначаемой фигурными скобками.

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

**Заключение**

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на множестве авторитетных международных и отечественных научно-технических конференциях, опубликованы в 107 печатных работах, в том числе в 26 статьях в ведущих рецензируемых журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ, а также 37 статьях в WoS и Scopus. Автореферат в

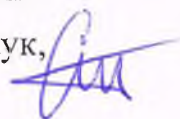


полной мере отражает содержание диссертационной работы и ее основные положения.

В целом диссертационная работа Арышенского Е. В. полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к докторским диссертациям. Диссертация является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований механизмов формирования текстуры в деформируемых алюминиевых сплавах в процессах пластической деформации и рекристаллизации разработаны теоретические положения, позволившие решить комплекс задач моделирования и управления текстурой и анизотропией механических свойств широкого спектра алюминиевых сплавов при термомеханической обработке, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение и которая вносит значительный вклад в развитие страны. Автор диссертации Евгений Владимирович Арышенский заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа и настоящий отзыв обсуждены и одобрены на заседании кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», протокол № 07/22 от 01.03.2022 года.

Профессор кафедры «Технологии и  
системы автоматизированного  
проектирования металлургических  
процессов» доктор технических наук,  
профессор



Бецофен Сергей Яковлевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

Телефон +7(499)141-94-69

Адрес электронной почты [tisaprm@gmail.com](mailto:tisaprm@gmail.com)