

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Носовой Екатерины Александровны

«Формирование в листах алюминиевых сплавов при термической и деформационной обработке упорядоченной структуры для повышения их штампуемости»

**на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.6.17. Материаловедение**

Актуальность исследования

Листовые алюминиевые сплавы широко применяются для изготовления деталей оболочек транспортных средств, строительных конструкций, дизайна, различных видов техники. Большинство из этих деталей получают методами холодной листовой штамповки. Для успешной реализации операций листовой штамповки из алюминиевых сплавов в них требуются высокие показатели штампуемости.

Показатели штампуемости листовых алюминиевых сплавов обычно связывают с химическим и фазовым составом, типом кристаллографической текстуры, характером зеренной структуры и выделений. Низкая штампуемость листовых материалов вызывает необходимость усложнения технологического процесса, увеличения количества переходов, усложнения вида раскроя листов, что снижает коэффициент использования металла.

Для одной и той же марки сплава можно сформировать довольно широкий спектр механических и технологических свойств. Это достигается различным структурным состоянием материала листа, которое можно описать при помощи структурной энтропии.

В связи с этим, предлагаемая работа, направленная на выявление наиболее благоприятных для повышения штампуемости механических и технологических свойств и соответственно структуры листовых алюминиевых сплавов с учетом их взаимосвязи с энтропией, является актуальной.

Структура и основное содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения; изложена на 340 страницах, включает 161 рисунок, 18 таблиц и список литературы из 305 наименований и приложения. Результаты работы прошли апробацию на 22 научных конференциях и в достаточной мере освещены в более чем 60 опубликованных работах, в том числе 25 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 статей в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. А также получено 3 патента РФ, 2 на изобретения и 1 на базу данных технологических свойств.

Во **введении** обосновывается актуальность тематики диссертационной работы, поставлена цель, дана оценка научной новизны и практической значимости работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора, методы исследования, апробация результатов работы.

В **1 главе** проведен анализ литературных источников, посвященных особенностям структуры листовых алюминиевых сплавов и их влиянию на штампуемость. Представлена энтропийная концепция пластичности, проанализирован структурный подход к описанию свойств деформированного металла, формирования структуры при пластическом

деформировании, проанализированы экспериментально-аналитические методы определения структурной энтропии. Литературный обзор отражает состояние вопроса по теме диссертации.

Во **2 главе** приведена расчётная модель формирования заданной структуры. Для расчёта размера зерна в алюминиевых сплавах применен термодинамический анализ, выполнена экспериментальная проверка расчётной модели изменения размера зерна в алюминиевых сплавах при рекристаллизации, описано формирование структурно-фазового состояния и кристаллографической текстуры сплавов.

В **3 главе** представлено описание материалов и методов экспериментальных исследований. Приведены режимы деформации и термической обработки сплавов АД0, АД1, АМц, АМг2, АМг5, АМг6, АМг10, Д16, 1420 для получения необходимого размера зерна в результате рекристаллизации, определены режимы упрочняющей термической обработки сплавов АМг10, Д16, 1420 для получения необходимого распределения упрочняющих фаз. Приведены соотношения для расчета вклада в общую структурную энтропию ее составляющих, связанных с различными элементами структуры (химический и фазовый состав, размер зерна, разнотернистость, кристаллографическая текстура).

В **4 главе** приведены результаты исследования влияния на структуру листовых сплавов алюминия холодной деформации и термообработки. Применение разработанных методик оценки однородности зёрненной структуры позволило установить количественные корреляции между разнотернистостью и режимами деформирования и термообработки листовых алюминиевых сплавов. Приведены результаты комплексного исследования влияния режимов деформации и термической обработки на текстуру листовых алюминиевых сплавов, изменение текстурной энтропии, а также на фрагментацию зёрен в листовых сплавах АМг5, АМг6, АМг10 и Д16.

В **5 главе** представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию химического и фазового состава, кристаллографической текстуры, зеренной структуры на штампуемость листовых сплавов АМг2, АМг6, АМг10 и Д16. Рассмотрены также структурные аспекты штампуемости алюминий-полимерных слоистых композитов.

В заключении приведены основные выводы по работе, нормативные ссылки и представлен список цитированной литературы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана концепция структурной энтропии листовых алюминиевых сплавов, основанная на оценке количественных корреляций комплекса механических свойств с интегральными параметрами химического и фазового состава сплавов, режимами деформационной и термической обработки, микроструктурой и кристаллографической текстурой, особенностями упрочняющих интерметаллидных фаз, позволяющая найти оптимальные варианты параметров технологии, обеспечивающих заданный уровень механических свойств.
2. Предложены научно обоснованные критерии и основанные на них технические и технологические решения, обеспечивающие формирование контролируемого комплекса структурных и текстурных параметров листовых алюминиевых сплавов с повышенными характеристиками штампуемости.
3. Выявлен стадийный характер формирования структурной энтропии в процессах прокатки и последующей термообработки листовых алюминиевых сплавов. Показано, что в процессе холодной прокатки происходит снижение структурной

энтропии в связи с переходом от бестекстурного или слаботекстурированного материала к выраженной одно- или двухкомпонентной текстуре. При последующем отжиге происходит снижение степени текстурированности и повышение энтропии, которая может увеличиваться в случае если происходит собирательная рекристаллизация.

4. Впервые показано, что структурная энтропия, рассчитанная на основании аппроксимации кривых растяжения, позволяет разделить стадии старения и структурные превращения, происходящие на его этапах.
5. Показано, что в интерметаллидных фазах алюминиевых деформируемых сплавов формируется собственная текстура, которая усиливается с ростом степени деформации и претерпевает видоизменения при нагреве, что свидетельствует о протекании в них процессов рекристаллизации.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Установлена взаимосвязь структурной энтропии с механическими и технологическими свойствами сплавов, позволяющая выявить наиболее значимые особенности структуры, влияющие на штампуемость листов и на этой основе предложены количественные критерии формирования заданной структуры и технологических свойств в полуфабрикатах из сплавов систем Al-Mg и Al-Cu-Mg.
2. Разработаны «Способ количественной оценки неоднородности зёрненной структуры листовых металлических материалов», «Способ количественной оценки распределения упрочняющих фаз листовых алюминиевых сплавов» и «База данных технологических свойств для слоистых композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов АМг2 и 1420». Получены три патента РФ, два на изобретения и один на базу данных.
3. Результаты диссертации использованы при проектировании и изготовлении штампованных изделий из листовых алюминиевых сплавов на АО «Авиакор-Авиационный завод», ООО «Зетта», ООО «Гидравлика», ПАО ОДК «Кузнецов», ООО «Димитровградский металлургический завод», а также в качестве методических материалов при чтении лекций, проведении лабораторных работ и подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров по направлениям 22.03.02 - Металлургия и 15.03.02- Машиностроение и магистров по направлению 22.04.02- Металлургия.

Замечания по диссертационной работе сводятся к следующему:

1. Следует признать ценным введение автором диссертации критерия текстурной энтропии, однако при этом в расчетах необходимо оценивать вклад ориентировок с учетом их полюсной плотности, т.е. доли зерен с соответствующей ориентировкой. В этой связи не ясно зачем строить зависимости полюсной плотности для первых трех рефлексов, если их полюсные плотности ниже единицы, т.е. доля зерен с такими ориентировками является незначительной.
2. Трудно согласиться с результатами расчета прочностных показателей интерметаллидных фаз (табл.4.2 и 4.3), хотя бы потому, что не понятно за счет чего интерметаллидная фаза одного состава (Θ -фаза, Al_2Cu) может иметь предел текучести 1400 и 4000 МПа в сплавах с различным содержанием меди. Удивляют не только абсолютные значения, но и их разница.

3. Приведенные на стр. 69 расчеты межатомных расстояний для сплавов Al-Mg дают неточные результаты, поскольку использовано соотношение для кубической примитивной решетки, а сплавы с магнием имеют такую же как чистый алюминий ГЦК решетку.
4. На стр.84, 85 и 90 приведена текстура прокатки (111)[100], которой быть не может, поскольку, если плоскость прокатки параллельна плоскости (111), то направление прокатки не может быть [100], т.к. это направление не лежит в плоскости (111).
5. Утверждение, что «Кристаллографическая ориентировка (100) <100> неблагоприятно влияет на штампуемость, а (100)<110> способствует более высокой штампуемости» (стр.90) не точно, во-первых потому, что корректное обозначение этих ориентировок $\{100\}\langle 100\rangle$ и $\{100\}\langle 110\rangle$, а во-вторых, эти ориентировки отличаются поворотом на 45^0 относительно нормали к плоскости листа, т.е. это один и тот же лист и от его поворота относительно нормали изменится только ориентация фестонов относительно направления прокатки, но не сама штампуемость.
6. При расчете полюсной плотности для обратных полюсных фигур (стр.103) интенсивность принято оценивать по площади, а не по высоте рефлекса, хотя последнее допускается. На этой же странице на рис.3.6 б показана ОПФ не для Al с кубической решеткой, а для фазы с тетрагональной решеткой (например Θ -фазы).

Сделанные замечания не затрагивают основных результатов и выводов по работе и не снижают её ценности и общей положительной оценки.

Заключение

Диссертация Носовой Е.А. выполнена на высоком научном и методическом уровне и является законченным научным трудом в области формирования контролируемой структуры в листовых алюминиевых сплавах для обеспечения повышенной штампуемости как самих материалов, так и многослойных образцов на их основе, актуальность которой обоснована возрастающими требованиями к современным материалам, применяемым в конструкциях авиационной, ракетно-космической, транспортной техники.

Полученные результаты диссертационного исследования можно классифицировать как новые, они имеют существенное научное и практическое значение, соответствуют современному научному уровню, описывают законченный этап исследований. Значительный объем испытаний и исследований с применением современных методик подтверждает достоверность основных научных результатов и выводов по работе. Особенно ценно, что результаты работы апробированы не только в лабораторных условиях, но и в производственных условиях.

Название и содержание диссертационной работы соответствуют требованиям паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение (05.16.09 Материаловедение (машиностроение)).

Диссертация хорошо оформлена, иллюстративный материал достаточно четко согласуется с текстом. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание, основные результаты и выводы диссертации.

Считаю, что автором диссертации Носовой Е.А. решена научная проблема повышения штампуемости листовых алюминиевых сплавов путём формирования контролируемой структуры и текстуры при деформационной и термической обработке.

Диссертация на тему «Формирование в листах алюминиевых сплавов при термической и деформационной обработке упорядоченной структуры для повышения их штампуемости» соответствует критериям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 г. № 842. Работа имеет важное народно-хозяйственное значение для развития машиностроения, а её автор Носова Екатерина Александровна заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение. Официальный оппонент, профессор кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов», доктор технических наук (по специальности 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка металлов), докт. техн. наук, профессор



Бецофен Сергей Яковлевич

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

Почтовый адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Тел. 8 (910) 459-95-25

e-mail: s.betsofen@gmail.com.

Подпись Бецофена С.Я. удостоверяю

Начальник УДС МАИ
Т.А.



Handwritten signature

15.09.2022