

**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 темы исследования**

Листовые алюминиевые сплавы и слоистые композиты на их основе являются наиболее распространёнными материалами для изготовления обшивок авиационной и ракетно-космической техники. Как правило, для производства конечных изделий применяются различные операции листовой штамповки, которые накладывают на штампаемые материалы требования высоких показателей пригодности к этим операциям наряду с обеспечением требований механических свойств и служебных характеристик. Характеристики штампаемости, в отличие от механических свойств, не регламентируются в нормативных документах и не указаны в чертежно-технологической документации, однако именно они обеспечивают необходимую производительность при обеспечении должного качества, соответствия формы и размеров, а также стабильности характеристик в результате хранения и эксплуатации.

В литературе есть работы, демонстрирующие результаты исследований по влиянию режимов получения листов из алюминиевых сплавов на свойства вместе с оценкой размера и формы зерна, изменения фазового состава, размера и формы частиц упрочняющих фаз внутри твёрдого раствора, выделений внутри зон Гинье-Престона, кристаллографической текстуры. При этом не показана доля влияния каждой из особенностей структуры на свойства алюминиевых сплавов, не установлены закономерности влияния упорядочения структуры на их технологические свойства. Таким образом, решение проблемы получения высокой штампаемости листовых алюминиевых сплавов наиболее распространенных систем легирования Al-Mg и Al-Cu-Mg, имеет важное значение для промышленности страны, и проработка темы является актуальной.

Диссертационная работа «Формирование в листах алюминиевых сплавов при термической и деформационной обработке упорядоченной структуры для повышения их штампаемости» Носовой Е.А. направлена на выявление закономерностей влияния сформированной при пластической деформации и термической обработке структуры на технологические

свойства листовых алюминиевых сплавов с применением энтропийной концепции.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность полученных автором результатов исследований обеспечена критическим анализом достаточного количества отечественных и зарубежных литературных источников в выбранной автором области; применением математического аппарата, адекватного поставленным задачам, а также использованием комплекса современных методов исследования свойств и структуры листовых материалов.

Внедрение результатов диссертации в реальный сектор экономики подтверждено документами от производственных организаций (в приложении к диссертации документы представлены).

Научные положения, выводы и рекомендации основаны на применении стандартизованных методик, что позволяет считать их обоснованными и достоверными. Приведённые результаты и выводы диссертации свидетельствуют о достижении поставленной цели и успешном решении сформулированных задач исследования.

### **Анализ новизны результатов, обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Все научные положения и выводы по результатам диссертации обеспечены глубокой проработкой литературного материала, согласованностью полученных теоретических и экспериментальных данных. Работа выполнена на современном научно-методическом уровне.

Научная новизна работы заключается:

- в создании научно обоснованных технических и технологических решений в области формирования упорядоченной структуры листовых алюминиевых сплавов, основанных на полученных закономерностях внесенных изменений при пластическом деформировании и термической обработке, которые обеспечили возможность получения материалов с повышенными характеристиками штампуемости;

- в разработке метода интерпретации реальной структуры листовых алюминиевых сплавов при помощи структурной энтропии, обеспечившим количественную оценку влияния химического и фазового состава сплавов, режима и схемы напряжённо-деформированного состояния, исходного состояния поставки листовых материалов на их способность к последующему деформированию;

- в установлении снижения структурной энтропии в процессе холодной прокатки, связанного с упорядочиванием структуры за счёт кристаллографической текстуры;
- в обнаружении изменения степени упорядочения структуры на этапе возврата и рекристаллизации за счёт уменьшения энтропии по окончании первичной рекристаллизации и увеличения энтропии на этапе собирательной рекристаллизации;
- в разделении стадий старения и структурных превращений, происходящих на его этапах с использованием энтропийного подхода и аппроксимации кривых растяжения;
- в установлении взаимосвязи структурных изменений листовых алюминиевых сплавов, полученных в процессе технологического цикла изготовления деталей методами листовой штамповки, и технологических свойств.

### **Значимость результатов для науки практики и дальнейшие пути их использования**

Теоретическая значимость и практическая ценность исследования состоит в:

- установлении взаимосвязи структурной энтропии с механическими и технологическими свойствами сплавов, позволившей выявить наиболее значимые особенности структуры, влияющие на штампуемость листов. Разработанная расчетная модель позволяет формировать требуемые структуру и технологические свойства в полуфабрикатах из сплавов систем Al-Mg и Al-Cu-Mg;
- разработке «Способа количественной оценки неоднородности зёрненной структуры листовых металлических материалов», «Способа количественной оценки распределения упрочняющих фаз листовых алюминиевых сплавов» и «Базы данных технологических свойств для слоистых композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов АМг2 и 1420»; получении двух патентов РФ на изобретения и одной базы данных;

Практическая значимость работы подтверждается актами об использовании результатов работы, приложенными к диссертации. Предложенные автором модели и методики являются оригинальными и могут применяться в решении широкого круга научно-технических задач.

### **Анализ содержания диссертации, её завершённость**

Диссертация Носовой Е.А. является законченной самостоятельной научно-квалификационной работой, содержание которой соответствует

поставленной цели исследования. Сформулированные в работе задачи решены, исходя из поставленной цели.

Диссертация состоит из введения пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения; изложена на 321 странице, включает 161 рисунок, 18 таблиц и список литературы из 305 наименований

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы и применения деформационной и термической обработки для обеспечения требуемых технологических свойств в листовых алюминиевых сплавах за счёт формирования упорядоченной структуры. Отражена степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены научная новизна, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность результатов исследований, апробация и объем работы.

**В первой главе** автором выполнен анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных особенностям структуры листовых алюминиевых сплавов и их влиянию на штампаемость. Продемонстрированы способы оценки структуры и свойств материала для различных операций листовой штамповки. Представлена энтропийная концепция пластичности, в которой показаны структурный подход к описанию свойств деформированного металла, формированию структуры при пластическом деформировании, экспериментально-аналитические методы определения структурной энтропии. Рассмотрено влияние толщины листовых заготовок, химического состава, зёренной структуры, фазового состава и кристаллографической текстуры на штампаемость листовых алюминиевых сплавов. Отмечена роль и достижения отечественных и зарубежных исследователей в повышении штампаемости листовых алюминиевых сплавов за счёт формирования в них требуемой структуры.

**Во второй главе** соискателем представлена расчётная модель формирования требуемой зеренной структуры, состава и распределения дисперсных фаз, кристаллографической текстуры и структурной энтропии в сплавах систем Al-Mg (AMг5, АМг6, АМг10) и Al-Cu-Mg (Д16). Разработанная расчётная модель процесса статической рекристаллизации показала возможность формирования в листовых алюминиевых сплавах требуемого однородного размера зерна с учётом химического состава сплава, степени деформации, температуры и продолжительности отжига.

Выявлено влияние исходного размера зерна в раскате из алюминиевых сплавов на размер зерна после рекристаллизации. На основе расчёта энтропии зёренной структуры в процессе рекристаллизации выявлен рост структурной энтропии на этапе первичной рекристаллизации. Проведено сравнение уровня структурной энтропии для двух случаев: затухающей

скорости миграции границ зёрен и постоянной скорости роста зёрен. Расчётным путём установлено формирование в листовых образцах при отжиге наиболее упорядоченной зёрненной структуры с минимальным значением энтропии в finale первичной рекристаллизации.

Установлен преимущественный фазовый состав, образующийся при отжиге алюминиевых сплавов. Выявлен более крупный размер упрочняющих частиц в отожжённых сплавах марок АМг2, АМгб, АМг10, Д16 по сравнению со сплавами АМг10 и Д16 после закалки, и искусственного, и естественного старения. Обнаружена зависимость скорости диффузии магния и меди в алюминии от исходной структуры, внутри которой содержатся легирующие элементы, входящие в состав упрочняющих фаз. Состав дисперсных фаз, выделяющихся при старении сплавов Д16 и АМг10, является результатом низкотемпературных диффузионных процессов, что способствует увеличению неоднородности структуры за счёт одновременного присутствия зон Гинье-Престона и упрочняющих фаз различного состава.

Выявлено, что выделение интерметаллидных частиц при старении сплава Д16 приводит к получению наибольших значений структурной энтропии за счёт появления соединения  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Присутствие магния в сплаве Д16 наряду с медью приводит к вероятности появления интерметаллида  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , имеющего более высокий уровень энтропии, и способствует увеличению структурной неоднородности.

Пластические деформации свыше 20% при холодной прокатке способствуют повышению однородности структуры за счёт формирования преимущественной кристаллографической текстуры  $(111)\langle100\rangle$  при снижении полюсной плотности ориентировок  $(100)\langle100\rangle$  и  $(110)\langle100\rangle$ .

**В третьей главе** представлено описание материалов и методов экспериментальных исследований, выполненных в работе. С учётом особенностей структуры и штампуемости листовых алюминиевых сплавов, применяемых в машиностроении в целом, и для получения слоистых композитов на их основе, в частности, разработана методика для реализации экспериментального исследования.

Разработаны режимы деформации и термической обработки сплавов АД0, АД1, АМц, АМг2, АМг5, АМг6, АМг10, Д16, 1420 для получения требуемого размера зерна и разнозернистости, получения необходимого состава и распределения упрочняющих фаз, кристаллографической текстуры.

Приведено описание механических, технологических испытаний и структурных исследований, оценки структурной энтропии. Представлены

расчётные формулы для оценки энтропии структурных особенностей в общей структурной энтропии и влиянии структуры на штампуемость.

Введены понятия энтропии многослойности и энтропии объёмной доли связующего для многослойных образцов из алюминиевых сплавов, полученных совместной прокаткой листовых заготовок из сплава АМц без полимера, а также совместной прокаткой образцов из сплавов АМц и 1420 с применением полимера.

**В четвертой главе** представлены результаты влияния холодной деформации и термообработки на изменение структуры листовых сплавов.

Установлено влияние температуры отжига на размер зерна, разнозернистость и структурную энтропию в сплавах АМг2 и АМг6.

Установлено влияние характера деформирования на размер зерна после рекристаллизации.

Проведён анализ размеров областей когерентного рассеяния и их зависимость от исходного состояния термообработки.

Проведено изучение кристаллографической текстуры сплавов, которое показало, что полюсная плотность одноимённых кристаллографических плоскостей в алюминиевых сплавах с ростом степени холодной деформации зависит от марки сплава.

Изучено положение кристаллографических плоскостей в упрочняющих фазах и его изменение в зависимости от степени деформации и исходного состояния сплавов до деформации, что позволило объяснить различие в значениях их микротвёрдости.

С помощью оценки структурной энтропии по кривым растяжения и зависимостям предела прочности установлены температурные и временные границы стадий старения сплава Д16

На основании диаграмм Парето выявлены факторы структуры, оказывающие наибольшее влияние на структурную энтропию.

**В пятой главе** рассмотрено влияние однородности структуры на штампуемость листовых алюминиевых сплавов. Повышение однородности зёрненной структуры на примере сплавов АМг2 и АМг6 способствует увеличению технологичности сплавов в операциях листовой штамповки.

Установлено, что неоднородность распределения фаз оказывает меньшее влияние на штампуемость по сравнению с составом фаз, формируемым при старении.

Выявлено немонотонное изменение текстурной энтропии после холодной прокатки образцов из сплавов АМг10 и Д16 в закалённом состоянии с ростом степени деформации.

Выявлено отрицательное влияние структурной энтропии на штампаемость на основании сравнения зависимостей структурной энтропии и обобщённого показателя штампаемости.

Установлено пороговое значение толщины фольги при совместной холодной прокатке листов АМг2, ниже которого происходит снижение числа текучести нагартованных и отожженных образцов.

Выявлена зависимость между количеством слоёв в многослойных образцах, структурной энтропии и показателями предельного коэффициента вытяжки.

**В заключении** представлены основные выводы и результаты работы.

В целом работа изложена технически грамотным языком. Каждая глава содержит важные результаты научных исследований и сопровождается развернутыми выводами. Общее оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

#### **Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертации, качество оформления автореферата**

Автореферат и опубликованные Носовой Е.А. печатные работы в целом отражают основные положения диссертационной работы, соответствуют её содержанию и задачам исследования, раскрывают положения научной новизны. Авторефератложен в объёме, достаточном для понимания сути проведённых исследований и оформлен в соответствии с требованиями.

### **Анализ качества оформления диссертации**

Представленный в диссертации материал логично структурирован, изложен технически грамотно.

#### **Замечания по диссертации и автореферату**

В качестве замечаний можно сформулировать следующее:

1. При анализе текстурной энтропии расчёты проведены на основе суммирования пиков, часть из которых может принадлежать упрочняющим фазам, следовательно, и в текстурной энтропии участие фаз в структуре играет роль, т.о. учёт влияния фазового состава и текстурной энтропии не совсем корректен. Автором не уточнено, выполнялось ли разделение интерференционных пиков в зависимости от фазы.
2. В главе 5 диссертации и автореферата приведены исследования влияния энтропии состава и строения слоистых материалов на основе алюминиевых сплавов, однако вывод сделан с акцентом на свойства

базовых сплавов, но не учтена их структурная энтропия, о которой идёт речь в предыдущей главе.

3. При анализе влияния характера распределения упрочняющих фаз отсутствует конкретика, связанная с применяемым увеличением. Предлагается выбирать увеличение в зависимости от размера зерна, т.е. зерно должно попадать в поле зрения целиком. Это не совсем корректно, т.к. размер зерна и размер частиц – не связанные между собой особенности структуры.
4. Для полученных микроструктур сплавов АМг6 и Д16 после холодной прокатки и рекристаллизационного отжига (рисунки 2.10 и 2.11) оценка структурной энтропии от размера зерна и его однородности проводится только на качественном уровне, хотя ранее в расчётной модели представлена методика для количественной оценки структурной энтропии для анализа процесса рекристаллизации и представлена её зависимость на рисунке 2.9.

Указанные замечания носят уточняющий характер, не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертации и не снижают положительную оценку работы.

#### **Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней**

- по п. 10 Положения о порядке присуждения учёных степеней – диссертация подготовлена в виде рукописи, написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, а также приведены сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.
- По п.11 Положения о порядке присуждения учёных степеней – основные результаты диссертации в полной мере отражены в 16 научных работах автора, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук (перечень ВАК), в 9 статьях (Scopus и Web of Science), 2 патентах и 1 базе данных.
- По п.14 Положения о порядке присуждения учёных степеней – автор работы правомерно ссылается на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов, использованных в диссертационной работе.

- По п.9 Положения о порядке присуждения учёных степеней – диссертация Носовой Екатерины Александровны на соискание учёной степени доктора технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований предложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения актуальной научно-технической задачи получения повышенных показателей штампаемости в листах алюминиевых сплавов путём создания упорядоченной структуры в результате деформационной и термической обработки, внедрение которых при производстве штампованных изделий из алюминиевых сплавов вносит значительный вклад в развитие страны, что отвечает требованиям п.9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, а её автор диссертации Носова Екатерина Александровна заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

**Официальный оппонент**

Курганова Юлия Анатольевна,  
Доцент, доктор технических наук по специальности 05.16.06 — Порошковая  
металлургия и композиционные материалы, профессор кафедры  
«Материаловедение» МТ-8

Курганова Юлия Анатольевна  
«28 » июня 2022

Должность, учёную степень, учёное звание  
Кургановой Юлии Анатольевны заверяю



Адрес: 105005, г.Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1.,  
телефон +7 (499) 263-6309, E-mail: kurganova\_ya@mail.ru.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский  
университет)"