

На правах рукописи



Носова Екатерина Александровна

**ФОРМИРОВАНИЕ В ЛИСТАХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ УПОРЯДОЧЕННОЙ
СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ШТАМПУЕМОСТИ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет)»

Научный консультант: **Амосов Александр Петрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»

Официальные оппоненты: **Антипов Владислав Валерьевич**, доктор технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Государственный научный центр Российской Федерации, и.о. генерального директора
Бецофен Сергей Яковлевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов»
Курганова Юлия Анатольевна, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", профессор кафедры «Материаловедение» МТ-8.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится 14 октября 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 99.2.039.02 (Д 999.122.02) при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <http://d99912202.samgtu.ru>.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения принять участие в заседании диссертационного совета или прислать свой отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан - _____ 2022 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



А.Р.Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Листовые алюминиевые сплавы широко применяются в различных отраслях машиностроения. Из них изготавливают обшивки самолётов и судов, детали автомобилей и железнодорожных вагонов. Большинство крупногабаритных деталей получают методами листовой штамповки. Качество получаемых деталей, их механические свойства и точность размеров в значительной степени зависят от такого технологического свойства листового материала как штампуемость, то есть способности материала листа выдерживать пластическую деформацию в заданной конфигурации без нарушения сплошности.

Анализ литературных источников показывает, что большинство научных исследований, направленных на повышение штампуемости листовых алюминиевых сплавов, решают в основном вопросы, связанные с формированием определённого размера зерна, фазового состава и кристаллографической текстуры. Термическая и деформационная обработка позволяют изменять средние размеры зерен, осуществить фазовый переход в твердом состоянии и создать преимущественную кристаллографическую ориентировку зерен. Однако имеется трудность прогнозирования величины изменения свойств материала листа при обработке из-за отсутствия методов интерпретации его реальной структуры и ее упорядочения.

Поскольку сам термин «упорядочение» говорит об изменении порядка в системе, то этот тип структурообразования может быть хорошо описан при помощи энтропийного подхода. При наличии возможности расчета изменений структурной энтропии во время распада твердого раствора и наличии информации о взаимосвязи структурной энтропии со свойствами материала, можно рассчитывать их изменение при упорядочении. Это удалось сделать благодаря новой интерпретации структуры материала, предложенной Н.Г. Колбасниковым и С.Ю. Кондратьевым, в основе которой лежит описание структуры материала при помощи структурной энтропии. Однако, несмотря на изученность структурных изменений в металлических сплавах в целом, и в алюминиевых сплавах в частности, остаётся открытым вопрос о влиянии упорядоченности (или энтропии) на механические, физические, служебные и технологические свойства материалов.

Низкую штампуемость листовых алюминиевых сплавов обычно объясняют химическим и фазовым составом, определённым типом кристаллографической текстуры, однородностью зерна или наоборот, разнотекстурностью. Низкая штампуемость листовых материалов проявляется в образовании фестонов, неравномерном утонении, появлении трещин, низких показателях штампуемости. Пригодность тонких листов, многослойных образцов и слоистых композитов к получению деталей методами листовой штамповки зависит от вида операции, которая определяет напряженно-деформированное состояние листового материала. Так, низколегированные сплавы, обладающие неупорядоченной структурой, имеют низкие показатели сопротивления деформированию и высокой пластичностью, хорошую

способность к формоизменению в вытяжных и гибочных операциях. Наряду с этим, низколегированные сплавы могут иметь неравномерное утонение, склонны к локализации деформации и гофрообразованию по причине высокой пластичности и налипания на стальной штамп. Нагартровка листов из пластичных сплавов приводит к анизотропии, что проявляется в появлении фестонов в изделиях, увеличению пружинения и предельного радиуса гибки. Это вызывает необходимость усложнения технологического процесса, увеличения количества переходов, усложнения вида раскроя листов, что снижает коэффициент использования металла. Повышение прочности листового алюминиевого сплава за счёт легирования приводит к снижению пластичности, меньшему налипанию металла на штамп и меньшему гофрообразованию. Однако предельные характеристики формоизменения листового материала резко снижаются.

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. До начала работы над настоящей докторской диссертацией этого не было сделано применительно к решению проблемы повышения штампуемости алюминиевых сплавов за счет создания упорядоченной структуры при термической и деформационной обработке.

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.

Степень разработанности проблемы. Значительный вклад в классические методы формирования кристаллографической текстуры и ее влияния на технологические свойства листов из алюминиевых сплавов внесли известные ученые Ю.М. Арышенский и Ф.В.Гречников, которые дали начало междисциплинарному направлению, объединив феноменологический и кристаллографический подход к формированию требуемой текстуры.

Исследования учёных, проводимые в настоящее время в рамках научных школ Ф.В. Гречникова (Самарский университет) и С.Я. Бецофена (Московский авиационный институт), направлены на получение рациональной анизотропии свойств за счёт формирования компонент текстуры в процессе прокатки и термообработки алюминиевых сплавов. Это позволило существенно увеличить предельные возможности формоизменения листовых материалов. Однако в ряде работ установлено, что способность листовых материалов и композитов на их основе к операциям листовой штамповки напрямую зависит от свойств твёрдого раствора легирующих элементов в алюминии.

Повышение штампуемости деформируемых алюминиевых сплавов за счёт формирования требуемого фазового состава при старении сплавов показано в работах научных школ И.Н. Фридляндера (ВИАМ), В.А. Колачёва (ВИЛС), В.С. Муратова (СамГТУ). Влиянию зёрненной структуры листовых материалов уделялось внимание в рамках рассмотрения процессов рекристаллизации в исследованиях, проводимых последователями научных школ С.С. Горелика (МИСИС) и И.И. Новикова (ИМЕТ). Интерес также представляют работы

научной школы В.И. Никитина (СамГТУ), указывающие на влияние морфологии литой структуры на штампуемость листовых материалов из алюминиевых сплавов. Научные взгляды Н.Г. Колбасникова (СПбГПУ Петра Великого), предполагающие влияние упорядоченности структуры на свойства металлических материалов и сплавов, позволили по-новому взглянуть на формирование структуры листовых алюминиевых сплавов и найти закономерности влияния упорядоченности на штампуемость.

Кроме того, применение в технике и машиностроении композиционных материалов требует решения вопросов, связанных с получением из них конечных изделий с необходимым комплексом свойств. Работы В.В. Антипова (ВИАМ) направлены на формирование структуры и свойств в слоистых металл-полимерных материалах на основе алюминиевых сплавов. Исследования А.Г. Колмакова (ИМЕТ) связаны с формированием градиентной структуры и уникальных служебных свойств в композиционных материалах и изделиях с матрицей из алюминиевых сплавов, а также биметаллических (стале-алюминиевых) материалов, полученных различными методами.

Вместе с тем, вопрос о том, какие из структурных факторов оказывают наибольшее влияние на штампуемость листовых алюминиевых сплавов, остается открытым и вызывает серьёзные споры между материаловедом и специалистами в области классической теории обработки металлов давлением при выявлении оптимальных режимов прокатки и штамповки листовых заготовок. Решению вопроса о влиянии зеренной структуры, степени легирования, состава кристаллографической текстуры, фазового состояния могут способствовать современные средства оценки штампуемости и структурного состояния материалов.

Недостаточная разработанность различных аспектов данной проблемы, теоретическая и практическая значимость ее решения определили выбор темы диссертационного исследования, его цель и задачи.

Цель работы – разработка режимов получения и установление закономерностей влияния упорядоченной структуры на технологические свойства листовых алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления деталей методами листовой штамповки.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка способов количественной оценки размера зерна, разнородности, распределения фаз и кристаллографической текстуры, структурной энтропии, заключающихся в микроструктурном анализе и статистической обработке количественных данных сплавов, принадлежащих к системам легирования Al-Mn, Al-Mg и Al-Cu-Mg.
2. Развитие теоретических основ повышения технологичности листовых алюминиевых сплавов для деталей автомобильной и аэрокосмической отрасли путём формирования упорядоченной структуры в процессе деформационной и термической обработки.

3. Установление закономерностей изменения структуры и свойств листовых алюминиевых сплавов систем легирования Al-Mn, Al-Mg и Al-Cu-Mg при деформировании и термической обработке.

4. Научное обоснование закономерностей и механизма структурообразования при холодной пластической деформации, предварительной и заключительной термической обработке в деформируемых алюминиевых сплавах и их влияния на технологические свойства.

5. Научное обоснование зависимостей технологических свойств листовых алюминиевых сплавов от размера зерна, однородности зёрненной структуры, фазового состава и распределения фаз, кристаллографической текстуры, структурной энтропии.

6. Изучение механизма трансформации упрочняющих фаз в алюминиевых сплавах при термической обработке и пластическом деформировании.

Объекты, методология и методы исследования. Выбор объектов исследования определяется спецификой промышленных предприятий Самарской области, включая ракетно-космическую, авиационную и металлургическую промышленность. В качестве преимущественных объектов теоретического и экспериментального исследования выбраны деформируемые алюминиевые сплавы, обладающие простой однофазной структурой (АД0, АМг1) и сложной многофазной структурой (АМц, АМг2, АМг6, АМг10, Д16, 1420), сформированной в результате литья, прокатки и термической обработки. Исследованные сплавы нашли применение в качестве основных обшивочных материалов авиационной и ракетно-космической техники.

Экспериментальные исследования проводились с использованием оптической металлографии (микроскопы METAM PB34, OXIOVERT с программным обеспечением для проведения геометрических измерений), растровой электронной микроскопии (микроскоп TESCAN VEGA, оснащённый микроанализатором INCA), рентгенографии (рентгеновский дифрактометр ДРОН 7.0 с медным $K\alpha$ -излучением), метода оценки микротвёрдости (приборы ПМТ-3 и HVS1000), метода оценки механических свойств при одноосном растяжении согласно ГОСТ 1487 и ГОСТ 11701 (электромеханические универсальные системы Testometric и Tinius Olsen). Исследование технологических свойств проводилось согласно ГОСТ 10510 (технологические испытания на выдавливание сферической лунки по Эриксену на установке Zwick Roel), ГОСТ 14019 (технологические испытания на изгиб в инструментальном штампе).

Подробно исследованы экспериментальными методами структура и свойства сплавов системы Al-Mg и Al-Cu-Mg, в которых необходимо обеспечить требуемый комплекс технологических свойств, отвечающих требованиям повышения их штампуемости.

Научная новизна работы

1. Созданы научно обоснованные технические и технологические решения в области формирования упорядоченной структуры листовых алюминиевых сплавов, базирующиеся на выявленных закономерностях их преобразования при пластическом деформировании и термической обработке и обеспечивающие

возможность создания материалов с повышенными характеристиками штампуемости.

2. Разработан метод интерпретации реальной структуры листовых алюминиевых сплавов при помощи структурной энтропии, обеспечивающий 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.

3. Установлено, что в процессе холодной прокатки происходит уменьшение структурной энтропии, связанное с упорядочиванием структуры, определяемой преимущественной ориентировкой кристаллографических плоскостей твердого раствора и упрочняющих фаз. При этом последующий отжиг вызывает снижение степени упорядочения структуры на этапе возврата и рекристаллизации, за счёт уменьшения энтропии по окончании первичной рекристаллизации и увеличения энтропии на этапе собирательной рекристаллизации.

4. Впервые показано, что структурная энтропия, рассчитанная на основании аппроксимации кривых растяжения, позволяет разделить стадии старения и структурные превращения, происходящие на его этапах. Предложенный подход позволил провести этот анализ и для этапа зонного старения, как наиболее трудоёмкий с позиции структурного анализа.

5. Установлена взаимосвязь влияния структурных изменений листовых алюминиевых сплавов, полученных ими в процессе технологического цикла изготовления деталей методами листовой штамповки, на технологические свойства.

Практическая значимость результатов.

1. Установлена взаимосвязь структурной энтропии с механическими и технологическими свойствами сплавов, позволяющая 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.

2. Разработаны «Способ количественной оценки неоднородности зёрновой 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 два патента РФ на изобретения и одна база 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 «Дмитровградский 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 - Metallurgy и 15.03.02- Машиностроение и магистров по направлению 22.04.02- Metallurgy.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение (05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)») по

- п.3 Разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций;

- п. 4 Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой;

- п.6 Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях

Высокая степень достоверности результатов работы обеспечивается тщательным анализом имеющихся литературных источников, а также использованием комплекса современных методов исследования свойств и структуры листовых материалов; подтверждается соответствием расчётов результатам натурных испытаний.

Личный вклад автора. Диссертационная работа является результатом многолетней исследовательской работы автора (с 1998 г.) на факультете обработки металлов давлением, инженерно-технологическом факультете Самарского государственного аэрокосмического университета и в Институте ракетно-космической техники Самарского университета (по настоящее время).

Диссертанту принадлежит основная роль в постановке цели, задач исследования, в выборе путей и методов их решения. Все этапы экспериментальной работы проведены при непосредственном участии автора работы. Диссертантом лично разработаны расчётные модели процесса рекристаллизации, проведен консолидированный анализ результатов структурных исследований, интерпретированы результаты свойств и режимов обработки, написаны научные статьи, подготовлены заявки на патенты.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: II, III и IV научно-технических конференциях «Металлдеформ» (г. Самара, 2004, 2009, 2015 г.г.); VII и IX Международной научной конференции «Решетнёвские чтения» (г. Красноярск, 1998, 2005, 2008 г.); VII международной научно – технической конференции «Авиакосмические технологии «АКТ-2006» (г. Воронеж, 2006 г.); Международной молодежной научной конференции «XIV Туполевские чтения» (г. Казань, 2006 г.); IX, X Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Королевские чтения» (г. Самара, 2007, 2009 г.г.), I и II международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы

авиации и космонавтики (Красноярск, 2010, 2012); международной научно-технической конференции «Развитие фундаментальных основ материаловедения легких сплавов и композиционных материалов на их основе для создания изделий аэрокосмической и атомной техники» (Москва, 2013), V и VI Международной конференции «Новые перспективные материалы и технологии их получения» (Волгоград, 2010, 2014 г.г.); III научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении» (Комсомольск-на-Амуре, 2014); научно-технической конференции «Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов» (Москва, 2015); III всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015); I международном конгрессе «Процессы пластического деформирования авиакосмических материалов. Наука, технология, производство» «Металлдеформ-2017» (Самара, 2017); международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2017, 2018» (Севастополь, 2017, 2018).

Структура и объем работы. 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 262 наименований, в том числе – 30 публикаций диссертанта.

Научная ценность работы. Разработана расчётная модель формирования упорядоченной зерённой структуры, фазового состава и кристаллографической текстуры с учётом обеспечения низкого уровня структурной энтропии. Установлена количественная зависимость структурной однородности, энтропии, и технологических свойств в сплавах АМг2, АМг5, АМг6, АМг10 и Д16.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты критического анализа, выявленные приоритетные направления формирования требуемых свойств и структуры, в том числе структурной энтропии листовых алюминиевых сплавов при деформировании и термической обработке, применяемых для производства изделий методами листовой штамповки.

2. Результаты экспериментальных исследований структуры, свойств и структурной энтропии листовых алюминиевых сплавов АД0, АМц, АМг2, АМг5, АМг6, АМг10, Д16 и 1420 после деформации, отжига, закалки и старения.

3. Закономерности образования упорядоченной структуры и изменения структурной энтропии в листовых алюминиевых сплавах, предназначенных для получения изделий методами холодной листовой штамповки.

4. Метод интерпретации реальной структуры при помощи структурной энтропии, оценивающий степень упорядоченности зёренной структуры, фазового состава, кристаллографической текстуры, структурной энтропии листовых алюминиевых сплавов АД0, АМц, АМг2, АМг5, АМг6, АМг10, Д16 после деформации, отжига, закалки и старения

5. Результаты расчётной модели и закономерности формирования зёрненной структуры и фазового состава при пластическом деформировании и термической обработке листовых алюминиевых сплавов систем легирования Al-Mn, Al-Mg и Al-Mg-Cu.

6. Результаты разработки способов количественной оценки степени упорядоченности зёрненной структуры, фазового состава, кристаллографической текстуры и структурной энтропии, в многофазных листовых алюминиевых сплавах систем легирования Al-Mn, Al-Mg и Al-Mg-Cu.

Публикации. По теме диссертации опубликовано свыше 40 работ, в том числе 2 монографии, 2 патента РФ, база данных, 11 статей в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, и 14 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 проведен анализ литературных источников, посвященных особенностям структуры листовых алюминиевых сплавов и их влияния на штампуемость. Дано определение штампуемости, охарактеризованы её значение для производства изделий из алюминиевых сплавов, а также способы её оценки для различных операций листовой штамповки. Представлена энтропийная концепция пластичности, в которой показаны структурный подход к описанию свойств деформированного металла, формирование структуры при пластическом деформировании, экспериментально-аналитические методы определения структурной энтропии. Рассмотрено влияние толщины листовых заготовок, химического состава, зёрненной структуры, фазового состава и кристаллографической текстуры на штампуемость листовых алюминиевых сплавов. Отмечена роль и достижения отечественных и зарубежных исследователей в повышении штампуемости листовых алюминиевых сплавов за счёт формирования в них требуемой структуры: С.С. Горелика, И.И. (МИСИС), А.Г. Колмакова (ИМЕТ), В.А. Колачёва (ВИЛС), С.Я. Бецофена (МАИ), И.Н. Фридляндера, В.В. Антипова (ВИАМ), Ю.М. Арышенского, Ф.В. Гречникова, Я.А. Ерисова (Самарский университет), В.С. Муратова, В.И. Никитина (СамГТУ), Н.Г. Колбасникова (СПбГПУ Петра Великого), О. Энглера, Ю. Хирша (Хайдро Алюминий, Германия), У. Донатуса, Г. Томпсона (Университет Манчестера, Великобритания), О. Хоппестада, Б. Холмедала (Тронхейм, Норвегия), Ч. Моя (Университет Сиднея, Австралия).

Во второй главе представлена расчётная модель формирования требуемой зеренной структуры, состава и распределения дисперсных фаз, кристаллографической текстуры и структурной энтропии в сплавах систем Al-

Mg (АМг5, 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, что исходный размер зерна в раскате из алюминиевых сплавов оказывает влияние на размер зерна после рекристаллизации.

Изменение энтропии, вызванной зарождением и ростом новых равноосных зёрен взамен деформированной структуры в процессе рекристаллизации, можно рассчитать, используя формулу для расчёта структурной энтропии: $\Delta S_{струк} = -R \int n_i \ln(n_i) dn_i$, где n_i - доля площади микроструктуры, занятая деформированными и растущими рекристаллизованными зёрнами. Если принять период первичной рекристаллизации за единицу, - для обеспечения условия нормировки, - то зависимость структурной энтропии, связанная с разнотернистостью, будет иметь вид, представленный на рис.1. При продолжительности рекристаллизации более единицы начинается период собирательной рекристаллизации. Черным цветом на рис.1 показана зависимость структурной энтропии при постоянной скорости роста размера зерна, серым – в случае затухающей скорости миграции границ зёрен.

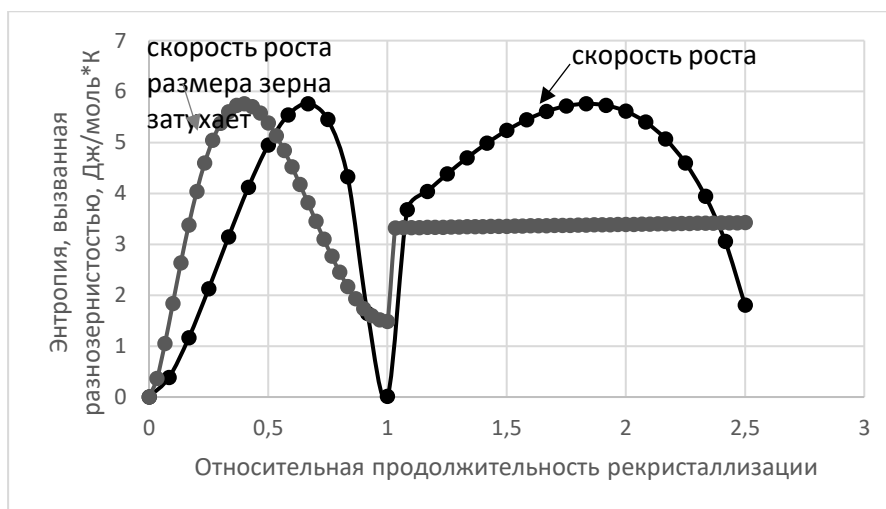


Рисунок 1— Изменение энтропии, вызванной разнотернистостью при протекании рекристаллизации

Из рис.1 видно, что на этапе первичной рекристаллизации происходит рост структурной энтропии, вызванный устранением вытянутых зёрен, образованных в листах при холодной прокатке, и возникновением равноосных рекристаллизованных зёрен. Структурная энтропия, вызванная неоднородностью размера зерна, достигает максимума $\Delta S=5,76$ Дж/моль*К в тот момент, когда продолжительность выдержки при отжиге составляет 0,73 от полной продолжительности первичной рекристаллизации в случае, если скорость роста зёрен постоянна. При затухающем характере скорости роста зерна, относительное время достижения максимума структурной энтропии, вызванной разнотернистостью, составляет 0,4. Далее структурная энтропия

снижается практически до 0 ($\Delta S = 1,4 \cdot 10^{-4}$ Дж/моль*К) при постоянной скорости роста зёрен, но при затухающем характере роста зёрен минимальное значение энтропии составляет 1,48 Дж/моль*К. Продолжение нагрева после завершения первичной рекристаллизации приводит к тому, что отдельные зерна растут, приводя к разнотерности. Энтропия снова начинает повышаться, достигая максимума, и затем снижается, если скорость роста зёрен постоянна. При затухающем характере роста зерна повышение энтропии наблюдается только в начале собирательной рекристаллизации, а затем структурная энтропия практически не меняется. Таким образом, наиболее упорядоченная структура с минимальным значением энтропии формируется в листовых образцах при отжиге в финале первичной рекристаллизации.

Результаты исследования показали, что расчётные значения размеров зёрен совпадают с результатами, полученными экспериментально после прокатки и отжига листовых образцов из сплавов АМг6 и Д16. Отклонения составляют около 7-8%, которые можно объяснить погрешностью измерений, а также тем, что при выборе аппроксимирующих уравнений для получения расчётной модели, коэффициент корреляции с экспериментальными точками не достигал 100% совпадения.

Состав упрочняющих фаз, образующихся при отжиге алюминиевых сплавов, состоит преимущественно из смеси соединений θ (Al₂Cu), S (Al₂CuMg) в сплавах системы Al-Cu-Mg и соединения β (Al₈Mg₅) в сплавах системы Al-Mg. В отожжённых сплавах рассмотренных марок АМг2, АМг6, АМг10, Д16 частицы отличаются более крупным размером, чем в сплавах АМг10 и Д16 после закалки, и искусственного, и естественного старения. Скорость диффузии магния и меди в алюминии зависит не только от температуры нагрева, продолжительности выдержки и разницы концентраций, но и структуры, внутри которой они содержатся. Так, увеличение концентрации меди в алюминии приводит к повышению скорости диффузии независимо от исходной фазы, в то время как магний, находящийся внутри эвтектики, имеет в несколько раз меньшую скорость диффузии, чем магний, находящийся в структуре с доэвтектической концентрацией магния.

Состав дисперсных фаз, выделяющихся при старении сплавов Д16 и АМг10, является результатом низкотемпературных диффузионных процессов, скорость которых на порядок ниже, чем при отжиге. Это способствует увеличению неоднородности структуры за счёт одновременного присутствия зон Гинье-Престона и упрочняющих фаз различного состава. Низкая скорость диффузии легирующих элементов, преимущественно Cu и Mg, в алюминии при температурах старения, которые обычно ниже температуры отжига, приводит к появлению частиц меньшего размера по сравнению с отожжённым состоянием, и они более неоднородно распределены внутри объёма зерна.

При старении сплавов системы Al-Cu выделение интерметаллида состава Al₂Cu, соответствующего стехиометрическому соотношению атомов Al₂Me, приводит к получению наибольших значений структурной энтропии, что согласно теории термодинамики, имеет наибольшую вероятность. Присутствие магния (например, в сплаве Д16) наряду с медью приводит к вероятности

появления интерметаллида Al_2CuMg , имеющего более высокий уровень энтропии, а потому, способствует увеличению структурной неоднородности.

Большие пластические деформации свыше 20% способствуют повышению однородности структуры за счёт формирования преимущественной кристаллографической текстуры (111)<100> при снижении полюсной плотности ориентировок (100)<100> и (110)<100>. В алюминиевых сплавах зёрна с кристаллографическими ориентировками (100) <100> и (100)<110> обладают повышенной склонностью миграции границ при рекристаллизации и увеличению относительной полюсной плотности указанных кристаллографических плоскостей после отжига. Их полюсная плотность после рекристаллизации значительно выше, чем после прокатки и преобладает над другими компонентами. Следовательно, доля зёрен с указанной ориентировкой будет преобладать, отражаясь на снижении уровня структурной энтропии.

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 разнотолщинности в результате рекристаллизации, определены режимы закалки и старения сплавов АМг10, Д16, 1420 для получения необходимого состава и распределения упрочняющих фаз.

Выбраны методики для проведения микроструктурного анализа. Разработаны способы количественной оценки зёрненной структуры и разнотолщинности, а также характера распределения частиц упрочняющих фаз внутри зерна. Проведена оценка областей когерентного рассеяния для изучения влияния блочности структуры на штампуемость. Найдены методики для выявления изменений кристаллографической текстуры.

Для оценки штампуемости в вытяжных операциях листовой штамповки проводились технологические испытания на выдавливание сферической лунки, технологические испытания на глубокую вытяжку цилиндрического стаканчика, определение коэффициентов анизотропии, в том числе коэффициентов поперечной деформации. Выполнена оценка неравномерности утонения с помощью показателя разнотолщинности.

Оценка пригодности листовых материалов к гибочным операциям выполнена с применением технологических испытаний по определению угла упругой отдачи (пружинения), технологических испытаний по определению минимального радиуса гибки. Для повышения достоверности результатов оценки штампуемости применялись комплексные критерии, включающие показатели основных механических свойств и сочетание показателей штампуемости, полученных в результате технологических испытаний.

Для выявления роли упрочняющих фаз при проведении формоизменяющих операций проведен расчёт механических свойств

интерметаллидных фаз с использованием инженерного метода, выполнено исследование микротвёрдости фаз.

Структурную энтропию рассчитывали на основании статистической обработки кривых растяжения:

$$\Delta S_{cmp} = -R \int_{\sigma=0}^{\sigma=\sigma_{max}} f(\sigma^*) \times \ln f(\sigma^*) d\sigma^*$$

, где $R=8,31$ Дж/моль*К – универсальная газовая постоянная, $f(\sigma^*)$ – аппроксимирующая функция кривой растяжения.

Для оценки доли, вносимой различными элементами структуры (химического состава, количества фаз, размера зерна, разнотекстурности, кристаллографической текстуры) в общую структурную энтропию, рассчитанную на основании кривых растяжения, использовались следующие расчётные формулы:

- энтропия химического состава: $\Delta S_{хим.сост} = \sum (c_z * \ln(c_z))$, где c - атомная концентрация элементов сплава, включая основу (алюминий), z – количество элементов;

- энтропия фазового состава: $\Delta S_{фаз.сост} = \sum (f_z * \ln(f_z))$, где f - атомная концентрация фаз, рассчитанная с учётом равновесных и неравновесных диаграмм состояния;

- энтропия, вносимая размером зерна: $\Delta S_{зерн} = \sum (n_z * \ln(n_z))$, где n - количество зёрен в пределах 1 мм²;

- энтропия, вносимая разнотекстурностью, оценивалась $\Delta S_{разнотекстур} = \sum (\beta * \ln(\beta))$, где β -разнотекстурность.

Текстурную энтропию рассчитывали по формуле: $\Delta S_{текст} = -R \sum_{n=1}^{n=m} P_n \ln P_n$, где P - относительная полюсная плотность n -й плоскости, m - количество пиков (кристаллографических плоскостей) на дифрактограмме. При наличии информации о кристаллографической текстуре в виде полюсной плотности различных типов текстуры (Госса, меди, латуни, бестекстурной и др.) для расчёта текстурной энтропии можно применять ту же формулу $\Delta S_{текст} = -R \sum_{n=1}^{n=m} P_n \ln P_n$, где P - полюсная плотность типа текстуры, n – количество типов текстур.

Все показатели энтропии проходили нормировку, т.е. были отнесены к максимально возможному значению, определяемому согласно данным справочников, нормативных документов или результатов экспериментов.

Для оценки энтропии строения слоистых композитов и многослойных образцов на основе алюминиевых сплавов применяли показатели энтропии многослойности и энтропии объёмной доли связующего. Под энтропией многослойности понимается количество и толщина слоёв металла и связующего. В отсутствие связующего, когда многослойный образец получен соединением слоёв за счёт деформации, энтропия многослойности включает только количество слоёв.

Энтропия многослойности рассчитывалась по аналогии с энтропией смешивания: $\Delta S_{мл.сл.} = -R \sum_{n=1}^{n=m} n * \ln(n)$, где n – общее количество слоёв в композите.

Энтропия объёмной доли рассчитывалась с допущением, что толщина связующего и армирующего материала в слоистом композите одинакова, что

$$\Delta S_{об.доли} = -R \sum_{n=1}^{n=2} n * \ln(n)$$

характерно для композитов типа СИАЛ и GLARE: $\Delta S_{об.доли} = -R \sum_{n=1}^{n=2} n * \ln(n)$, где n – объёмная доля металлического (армирующего) вещества. Если $n=1$, то связующий материал (пластик) отсутствует и весь композит состоит только из чередования слоёв металла. Если $n=2$, то композит состоит из чередования двух материалов.

Для исследования роли структуры сплавов в штампуемости многослойных образцов разработаны режимы и получены образцы совместной прокаткой листовых заготовок из сплава АМц без полимера, а также совместная прокатка образцов из сплавов АМц и 1420 с применением полимера.

В четвёртой главе изучено изменение структуры листовых сплавов после холодной деформации и термообработки. Применение разработанных методик оценки однородности зёрненной структуры позволило установить количественные зависимости между режимами деформирования и термообработки листовых алюминиевых сплавов и разнотернистостью, показанные на рис. 2.

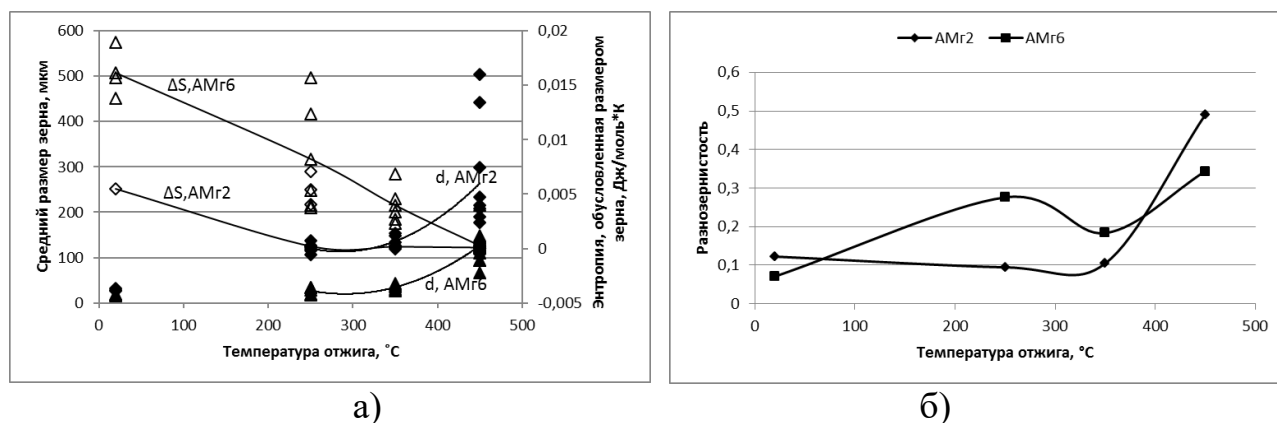


Рисунок 2 – Изменение размера зерна d , энтропии ΔS (а) и разнотернистости (б) в сплавах АМг2 и АМг6 в зависимости от температуры отжига

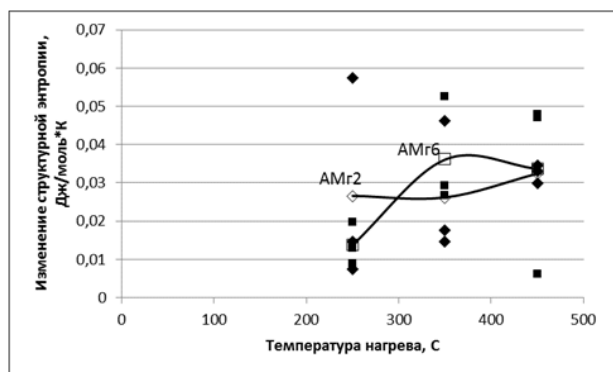
Из рис. 2 видно, с увеличением температуры отжига размер зерна в обоих сплавах монотонно увеличивается. Энтропия, связанная с размером зерна, при этом снижается. Подтверждено влияние исходного размера зерна на величину зерна после рекристаллизации в сплавах АМг2 и АМг6.

Разнотернистость с ростом температуры ведёт себя не монотонно. Наиболее выраженное проявление минимальной разнотернистости у сплава АМг6 наблюдается после отжига при температуре 350°C. У сплава АМг2 изменение разнотернистости с ростом температуры отжига менее заметное. Уменьшение разнотернистости при нагреве сплавов до 350°C может быть вызвано завершением протекания первичной рекристаллизации в сплавах, что приводит к формированию более однородной равноосной структуры.

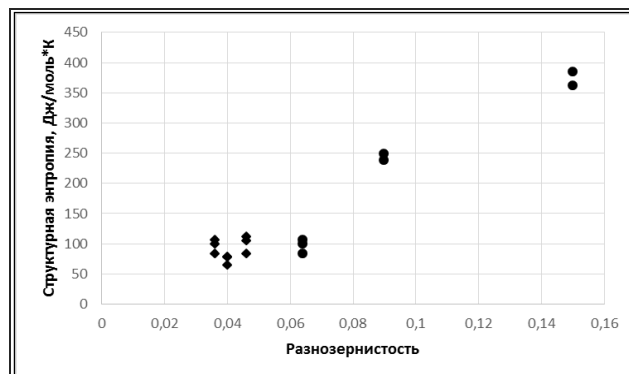
Зависимости структурной энтропии с ростом температуры отжига сплавов АМг2 и АМг6, построенные по кривым растяжения, представлены на рисунке 3. Рост температуры нагрева при отжиге приводит к снижению уровня структурной энтропии. Изначально более высокоэнтропийный сплав АМг6, имеет меньшие

значения структурной энтропии после холодной деформации и нагрева, чем сплав АМг2. Это может свидетельствовать о том, что деформация и нагрев менее легированного сплава вызывают в нем более заметные структурные изменения.

Оценка структурной энтропии по кривым растяжения показала, что увеличение разнотерности сопровождается ростом структурной энтропии (рис.3, б).

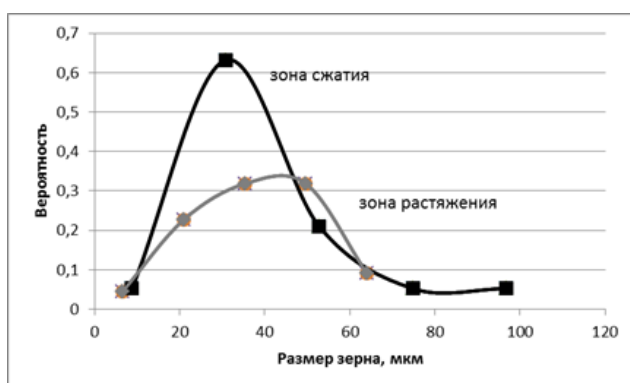


а)

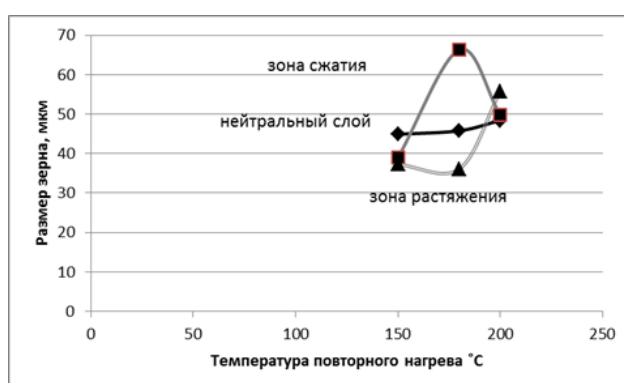


б)

Рисунок 3 – Изменение структурной энтропии в сплавах АМг2 и АМг6 в зависимости от температуры отжига (а) и разнотерности (б)



а)



б)

Рисунок 4 – Изменение плотности вероятности значений размера зерна (а) и размера зерна образцов из сплава АМг10 после гибки и отжига в зависимости от температуры нагрева (б) для образца после закалки, гибки и нагрева при 150°С в течение 30 минут

Характер деформирования оказывает влияние на размер зерна после рекристаллизации: деформирование с преобладанием растягивающих нагрузок приводит к получению более мелкозернистой структуры после отжига по сравнению с сжимающими деформациями (рис.4): пик кривой вероятности распределения смещён к величине зерна около 15 мкм, в то время как для зоны растяжения пик кривой находится в пределах 35...52 мкм.

Анализ размеров областей когерентного рассеяния показал, что блочность зёрненной структуры после деформирования листовых алюминиевых сплавов зависит от исходного состояния термообработки (рис.5): отожжённого или закалённого и состаренного.

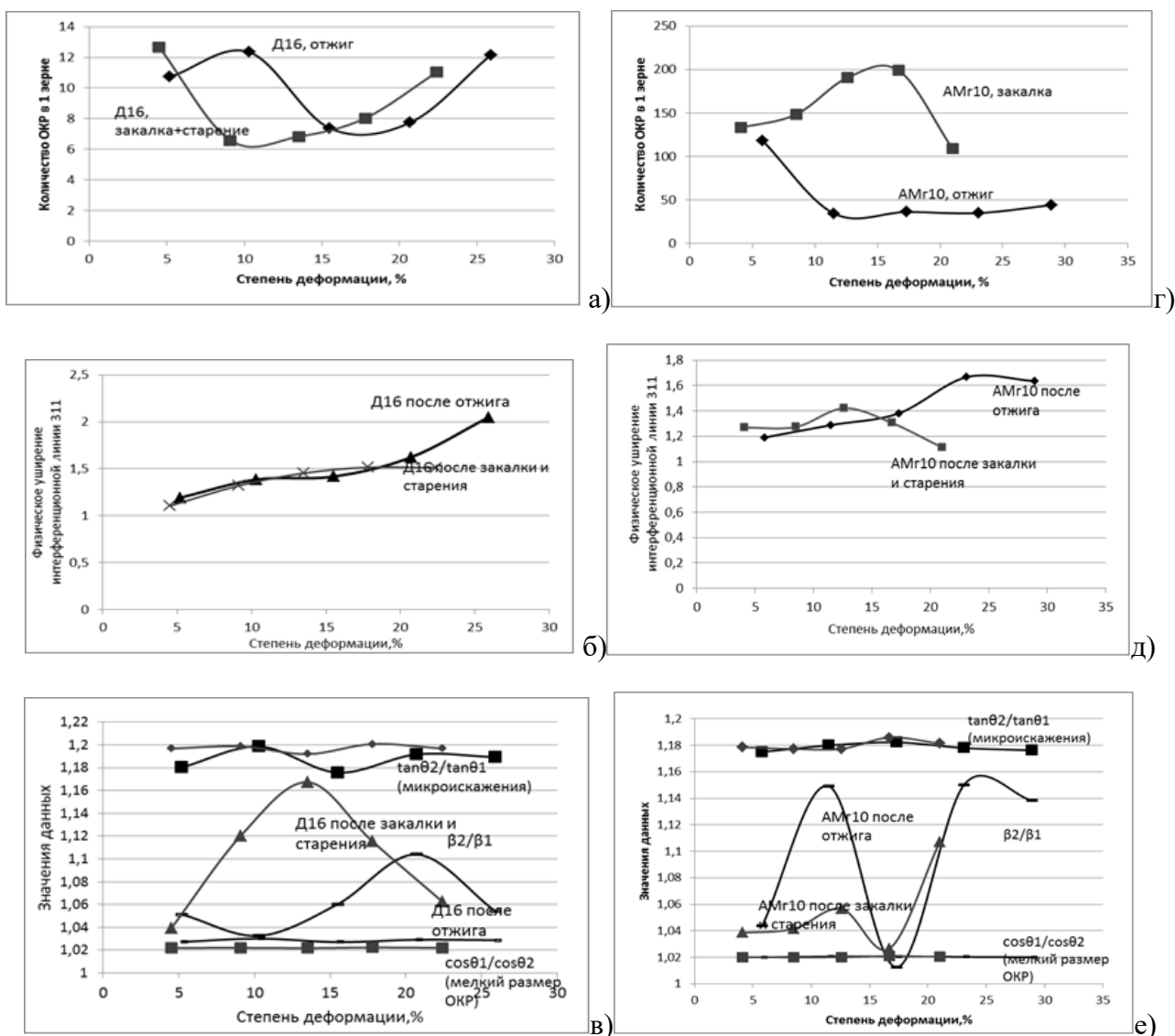
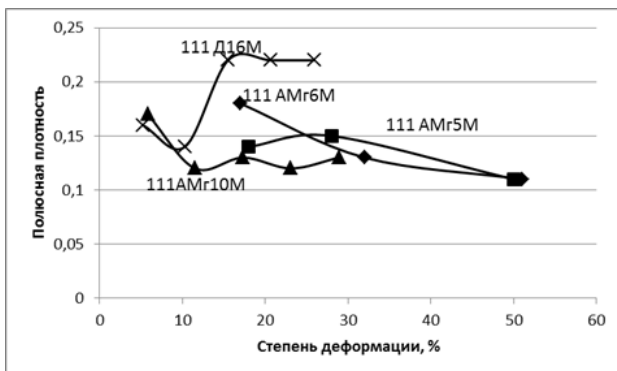


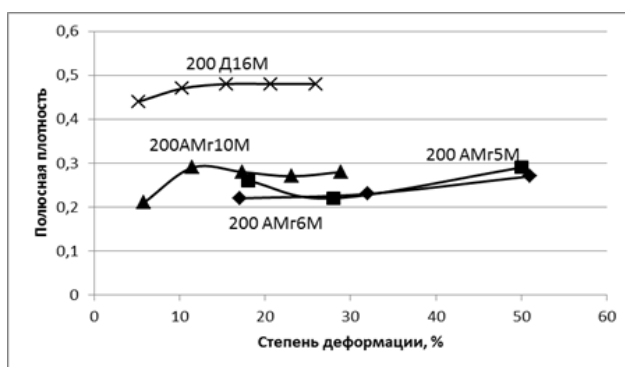
Рисунок 5 – Изменение дисперсности зёрненной структуры (а, г), физического уширения интерференционных линий (б, д) и соотношения физического уширения (в, е) двух порядков отражения от плоскости (311) в сплаве Д16 (а-в) и сплаве АМг10 (г-е) после деформации в отожжённом состоянии (— чёрная линия) и закалённом и состаренном состоянии (—серая линия) в зависимости от степени деформации

На величину физического уширения линий интерференции рентгеновских лучей, которые позволяют рассчитать размер областей когерентного рассеяния, оказывают микроискажения, которые, накапливаясь, приводят к фрагментации зёрненной структуры.

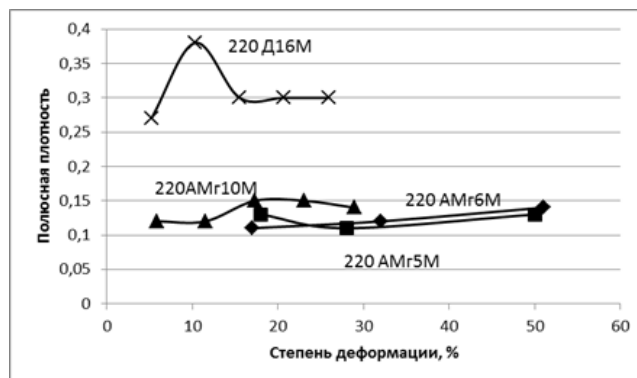
Изучение кристаллографической текстуры сплавов показало, что полюсная плотность одноимённых кристаллографических плоскостей в алюминиевых сплавах с ростом степени холодной деформации зависит от марки сплава (рис.6): чем выше содержание легирующих элементов в твёрдом растворе, тем выше полюсная плотность плоскостей (111), (200) и (220).



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Зависимость полюсной плотности кристаллографических плоскостей а- (111), б- (200), в - (220) в отожжённых сплавах АМг5, АМг6, АМг10 и Д16 от степени деформации

Исходное состояние сплавов перед деформированием оказывает влияние на изменение полюсной плотности: в отожжённом состоянии сплавы в целом показывают монотонное изменение полюсной плотности первых четырёх кристаллографических плоскостей (111), (200), (220) и (311). После закалки и старения наблюдается волнообразное изменение полюсной плотности указанных плоскостей с ростом степени холодной деформации (рис.6).

Положение кристаллографических плоскостей в упрочняющих фазах изменяется в зависимости от степени деформации и исходного состояния сплавов до деформации, что свидетельствует об изменении кристаллографической текстуры упрочняющих фаз при деформировании и может объяснить различие в значениях их микротвёрдости (табл. 1, 2).

Отжиг сплавов АМг5 и АМг6 после холодной прокатки приводит к снижению текстурной энтропии, т.е. рекристаллизация способствует повышению упорядоченности кристаллографической текстуры (рис.7).

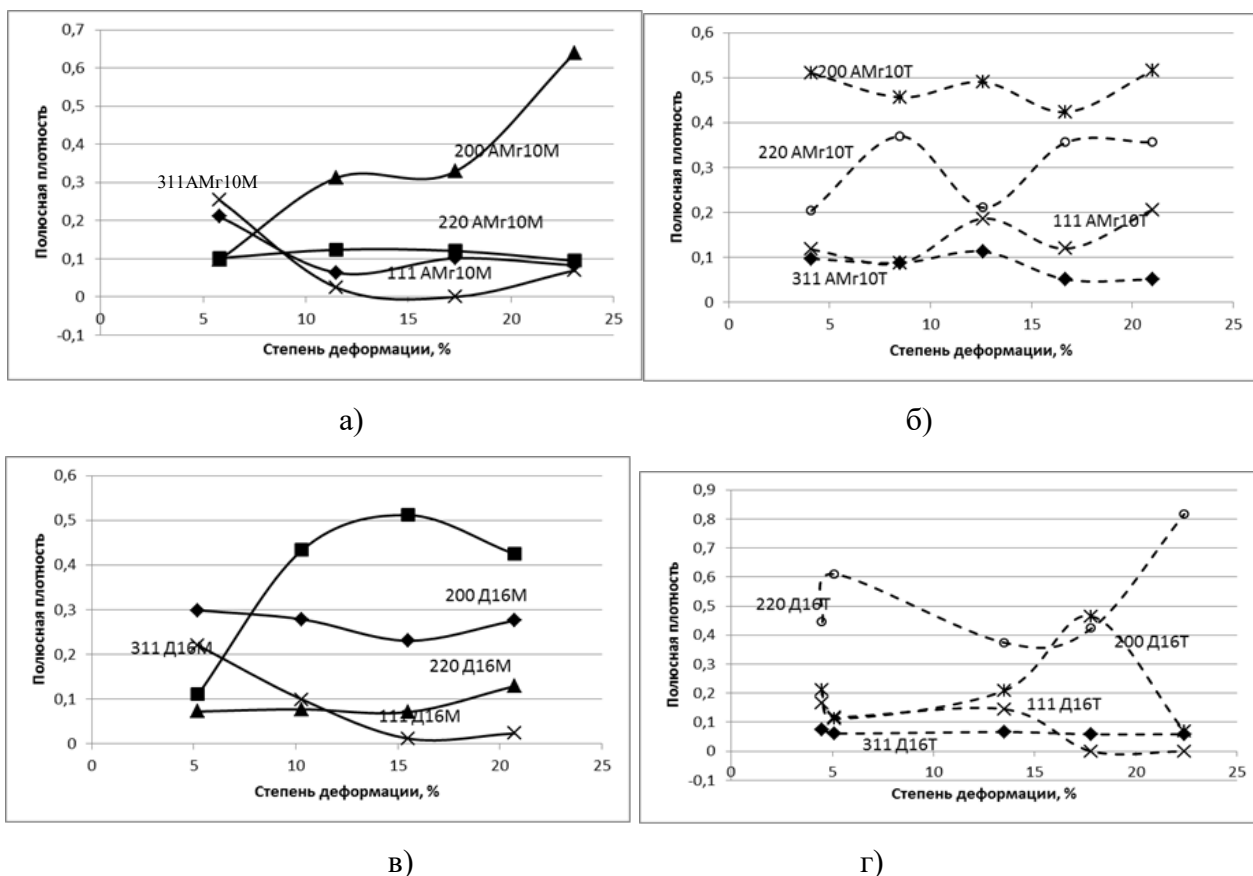


Рисунок 6 – Изменение полюсной плотности плоскостей (111), (200), (220) и (311) в сплаве АМг10 (а, б) и Д16 (в, г) в зависимости от степени деформации в отожжённом состоянии (—М) и после закалки и старения (---Т)

Таблица 1– Средние значения микротвёрдости фаз сплава Д16

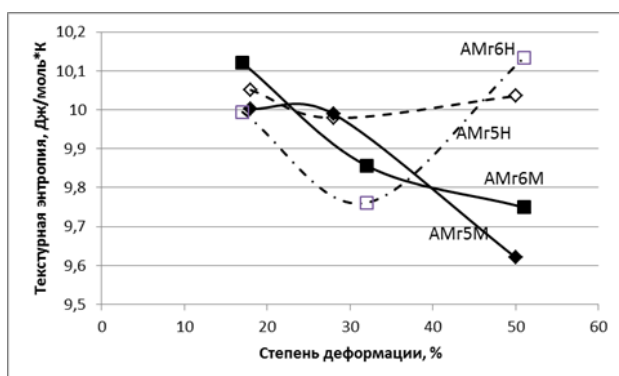
Закалка и естественное старение			Отжиг		
Степень деформации, %	Микротвёрдость Н, кг/мм ²		Степень деформации, %	Микротвёрдость Н, кг/мм ²	
	α-фаза (зерно)	θ-фаза		α-фаза (зерно)	θ-фаза
0	108±10	126±16	0	64,6±4	70,7±4
13,9	112±10	127±1	13,7	68,5±3	72±1
17,2	116±10	134±2	14,8	74±4	80±5
20,3	122±7	134±2	18,4	76±3	80±1
21,8	125±6	137±2	19,4	84±4	90±2
26,3	147±6	145±10	25,3	89±2	90±1

В сплаве АМг5 холодная деформация на начальных этапах приводит к снижению текстурной энтропии, а затем, за счёт увеличения доли влияния искажения кристаллической структуры, приводит к росту текстурной энтропии (рис.7). Поведение текстурной энтропии упрочняющих фаз зависит от степени легирования сплавов. В относительно низколегированных сплавах АМг5 и АМг6 текстурная энтропия β-фазы практически не изменяется при деформировании.

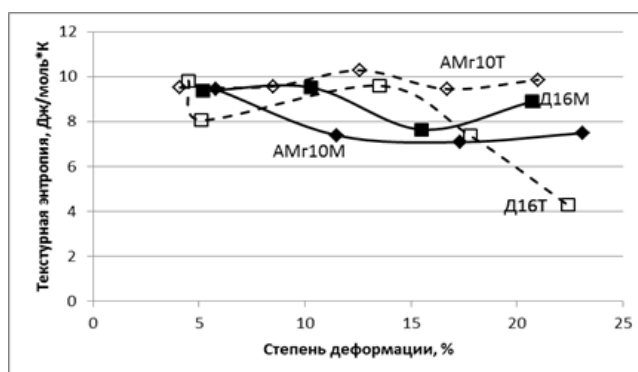
В высоколегированных сплавах АМг10 и Д16 текстурная энтропия упрочняющих фаз зависит от исходного состояния сплавов: в отожжённом состоянии текстурная энтропия упрочняющих фаз увеличивается с ростом степени деформации, а в закалённом и состаренном изменяется незначительно, достигая незначительного максимума (рис.8).

Таблица 2– Средние значения микротвёрдости структурных составляющих сплава АМг10

Закалка				Отжиг			
Степень деформации, %	Микротвёрдость Н, кг/мм ²			Степень деформации, %	Микротвёрдость Н, кг/мм ²		
	α -фаза (зерно)	β -фаза	Граница зерна		α -фаза (зерно)	β -фаза	Граница зерна
0	109±3	110±2	110±2	0	86±1	97±6	83±5
8	109±3	115±13	114±3	8	90±2	98±3	83±5
12,1	116±10	124±5	115±3	12,1	94±1	101±1	100±8
16,1	116±14	126±2	118±2	16,1	96±6	104±6	100±3
20	124±13	128±8	130±10	18,2	106±5	110±7	106±6
21	158±28	129±13	149±16	23,7	119±6	114±10	106±14



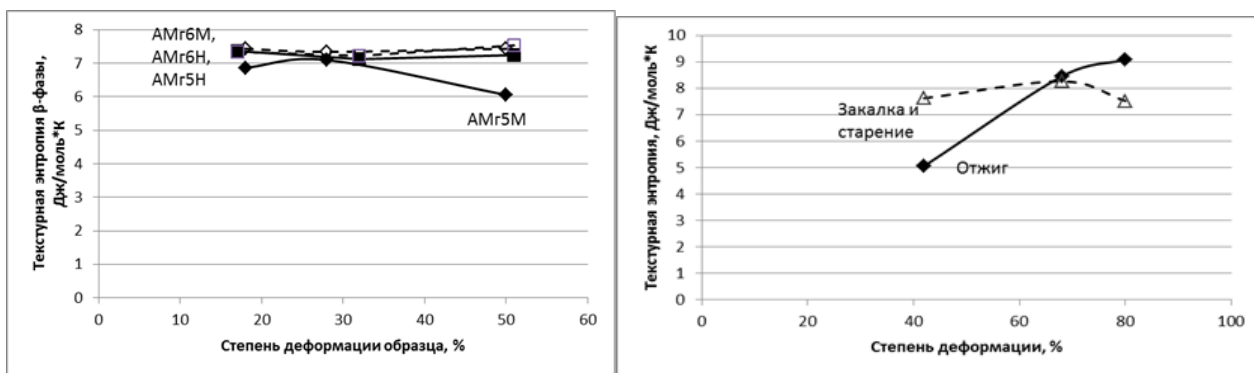
а)



б)

Рисунок 7 - Влияние степени холодной деформации на текстурную энтропию сплавов а) АМг5, АМг6, б) АМг10 и Д16

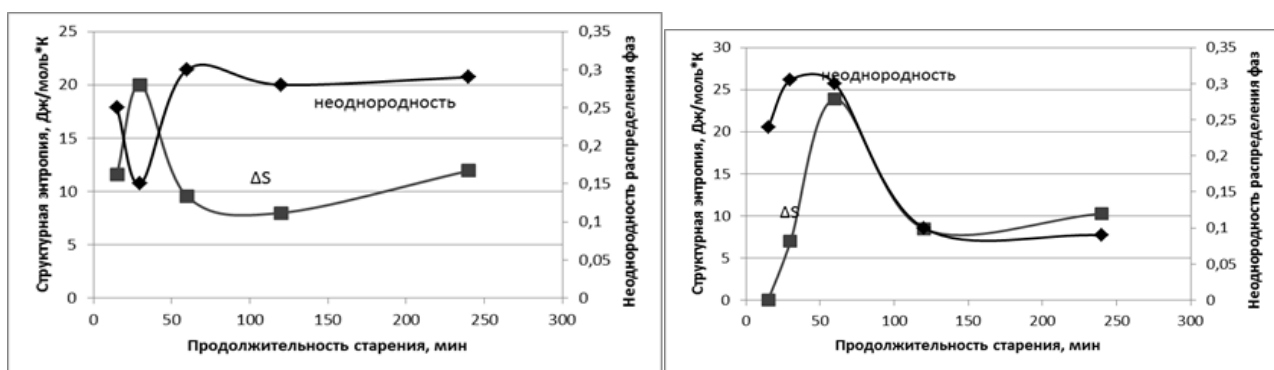
Оценка структурной энтропии на основании кривых растяжения и сопоставление полученных значений с зависимостью предела прочности позволила установить температурные и временные границы стадий старения сплава Д16 (рис.9, г).



а)

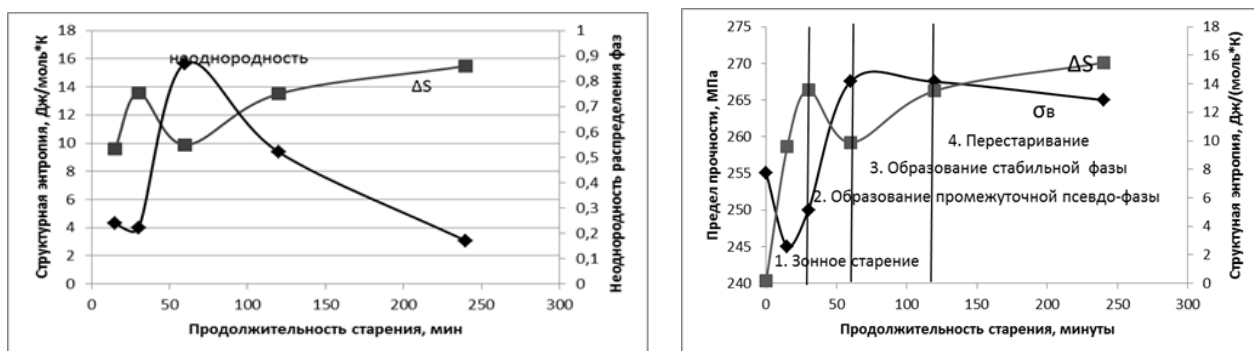
б)

Рисунок 8 - Влияние степени холодной деформации на текстурную энтропию β -фазы в сплавах АМг5, АМг6 (а) и АМг10 (б)



а)

б)



в)

г)

Рисунок 9 – Изменение структурной энтропии в сплаве Д16 и степени неоднородности распределения фаз после старения при температуре: а) 100°C, б) 150°C, в) 200°C, г)-выявление стадий старения

Структурная энтропия и неоднородность распределения упрочняющих фаз изменяются при старении в зависимости от температуры и продолжительности нагрева. При температурах старения 100°C и 200°C зависимости структурной энтропии и неоднородности распределения фаз имеют зеркальных характер, а при температуре старения 150°C – характер изменения структурной энтропии и неоднородности распределения фаз совпадает (рис.9, а-в).

Построение диаграмм Парето (рис.10-15) позволило выявить факторы структуры, оказывающие наибольшее влияние на структурную энтропию. Для

этого анализа потребовался расчёт величины структурной энтропии по каждому фактору влияния (химический и фазовый составы, размер зерна и разнородность, кристаллографическая текстура) в нормированном виде, т.е. рассчитанной величины, отнесённой к максимально возможному значению.

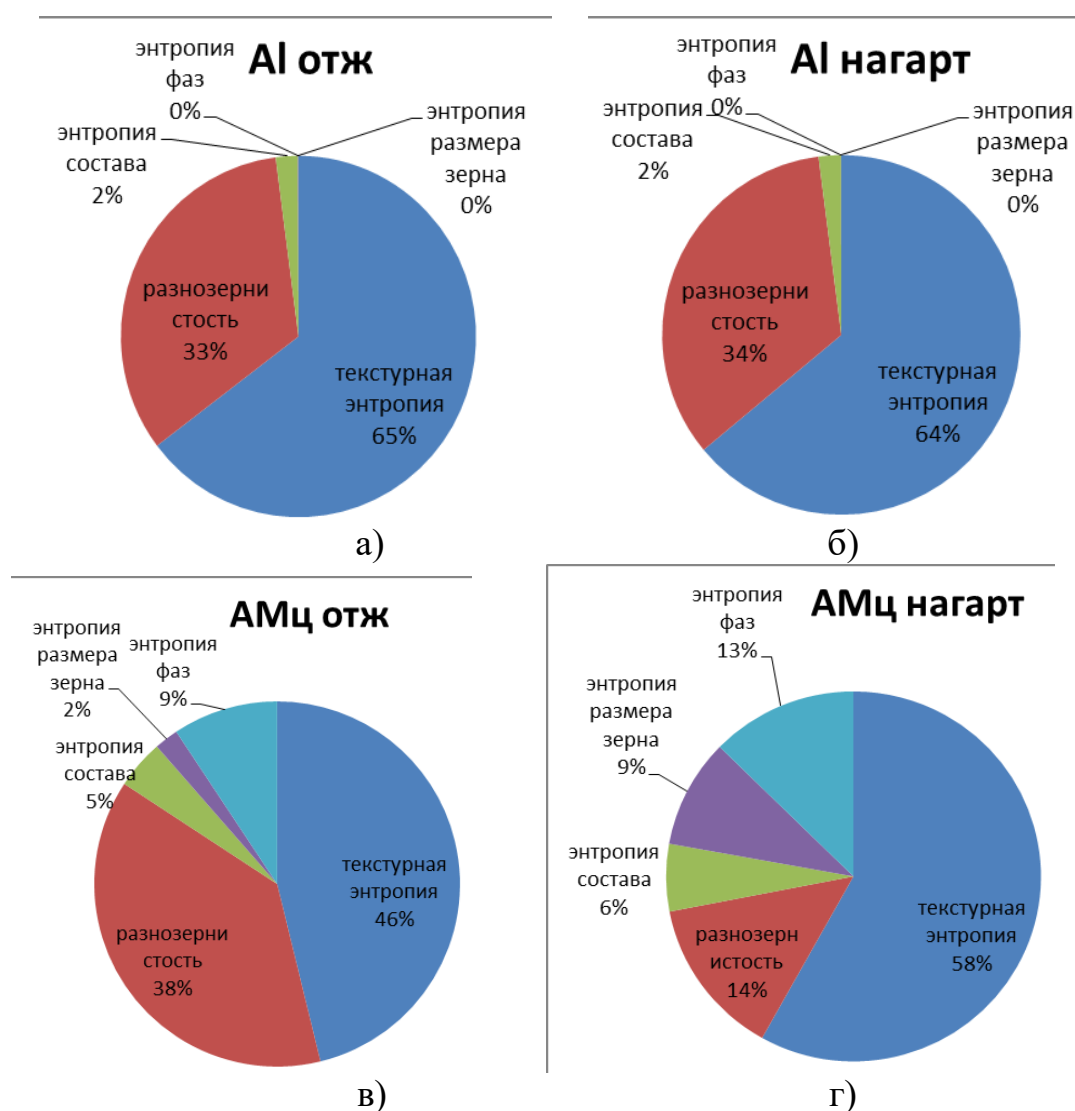


Рисунок 10 – Весовые доли структур в общей структурной энтропии листов из технического алюминия (а,б) и сплава АМц (в, г): в отожжённом состоянии (а,в), в нагартованном состоянии (б,г)

Из рис.10 видно, что для технически чистого алюминия наибольшее влияние на структуру оказывает энтропия кристаллографической текстуры (текстурная энтропия), разнородность и энтропия смешивания (химического состава). Причём ключевой особенностью структуры, составляющей 80% от весовой доли всех факторов, является кристаллографическая текстура. Легирование алюминия марганцем в количестве около 1% приводит к появлению слагаемых энтропии фаз и энтропии размера зерна на круговой диаграмме.

По мере добавления легирующих элементов (рис.10...12) в сплавах АМц, АМг5, АМг6, Д16 и АМг10 возрастает влияние фаз и энтропия размера зерна. Это становится понятным, если учесть, что легирование алюминия марганцем и медью приводит к измельчению зерна, а соответственно увеличению количества зёрен и повышению энтропии. При этом влияние разнотекстурности снижается, т.к. размер зерна становится более однородным. В сплавах АМг5, АМг6, Д16 и АМг10 в отожжённом состоянии ключевыми факторами являются текстурная энтропия и энтропия фаз.

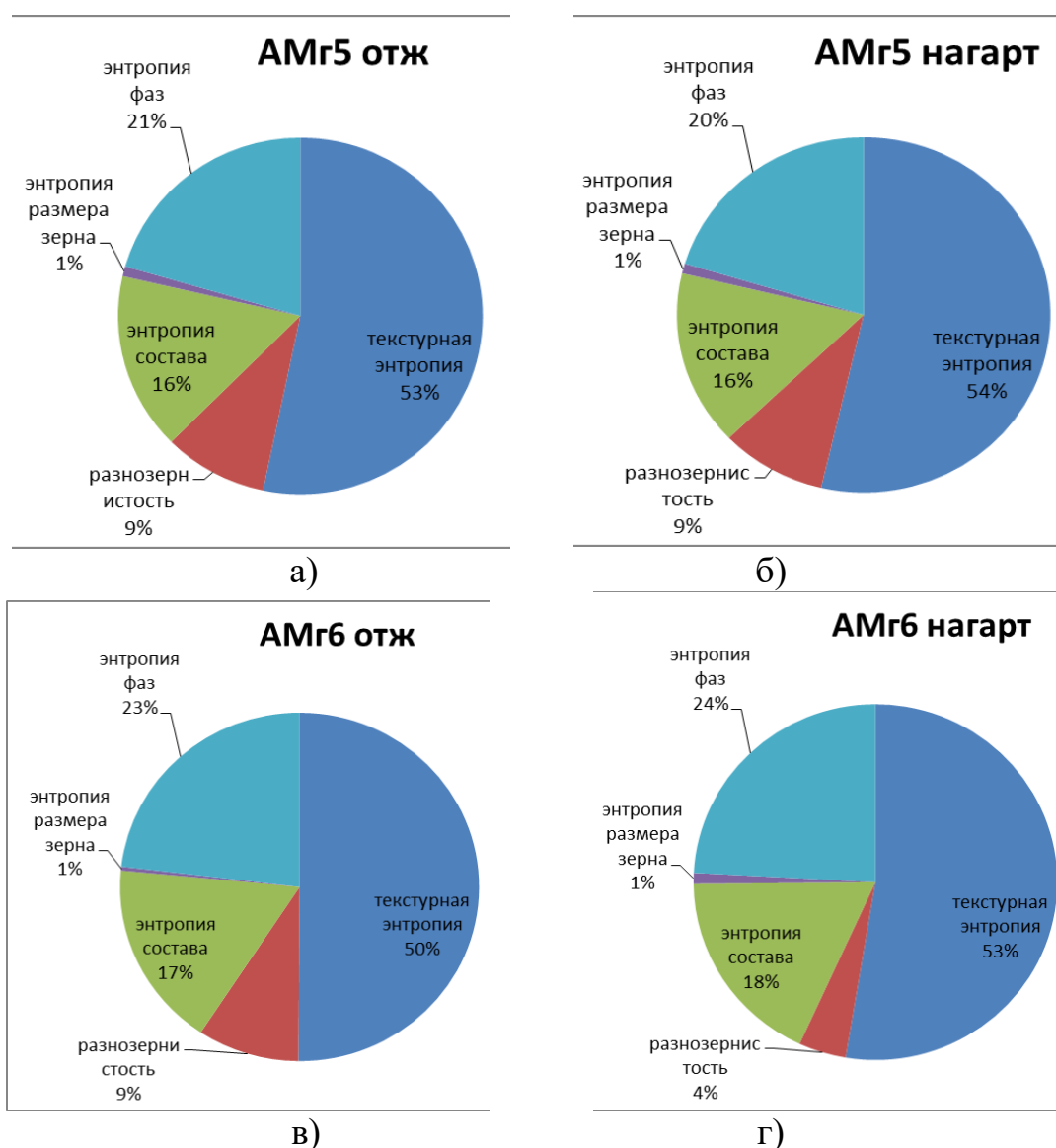


Рисунок 11 – Весовые доли структур в общей структурной энтропии листов из сплавов АМг5 (а,б) и АМг6 (в,г): в отожжённом состоянии (а,в), в нагартованном состоянии (б,г)

Из рисунка 12 видно, что текстурная энтропия в закалённом и естественно состаренном состоянии сплавов АМг10 и Д16 имеет большую долю в суммарной структурной энтропии обоих сплавов, чем в отожжённом состоянии.

Построение обобщённых диаграмм структурной энтропии в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов (рис.13) в сплавах в

отожжённом состоянии показывают, что легирование приводит к росту энтропии смешивания (химического состава) и энтропии фазового состава по мере увеличения содержания легирующих элементов. Точечная диаграмма (рис.13, а) позволяет детально провести анализ изменения каждой энтропии структуры, а диаграмма с накоплением (рис.13, б) – провести анализ изменения доли влияния каждого слагаемого в их сумме.

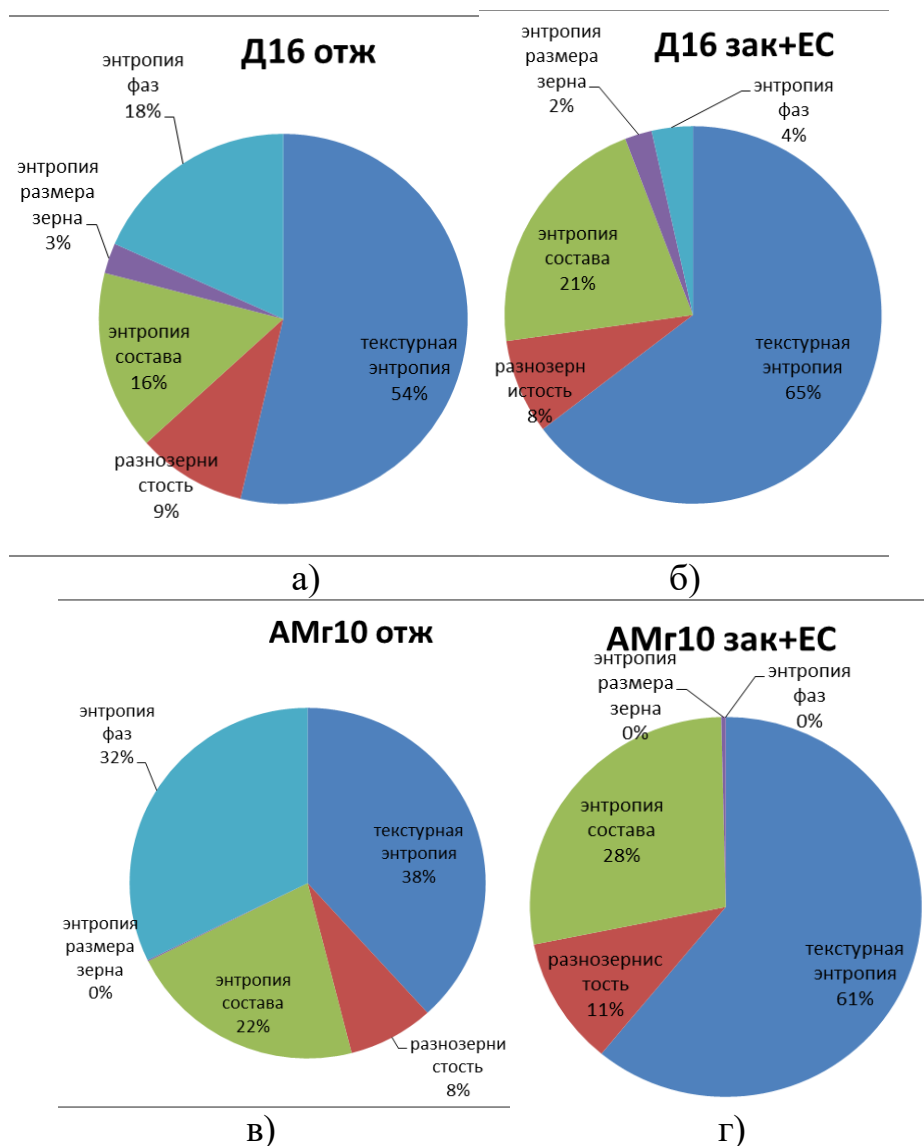
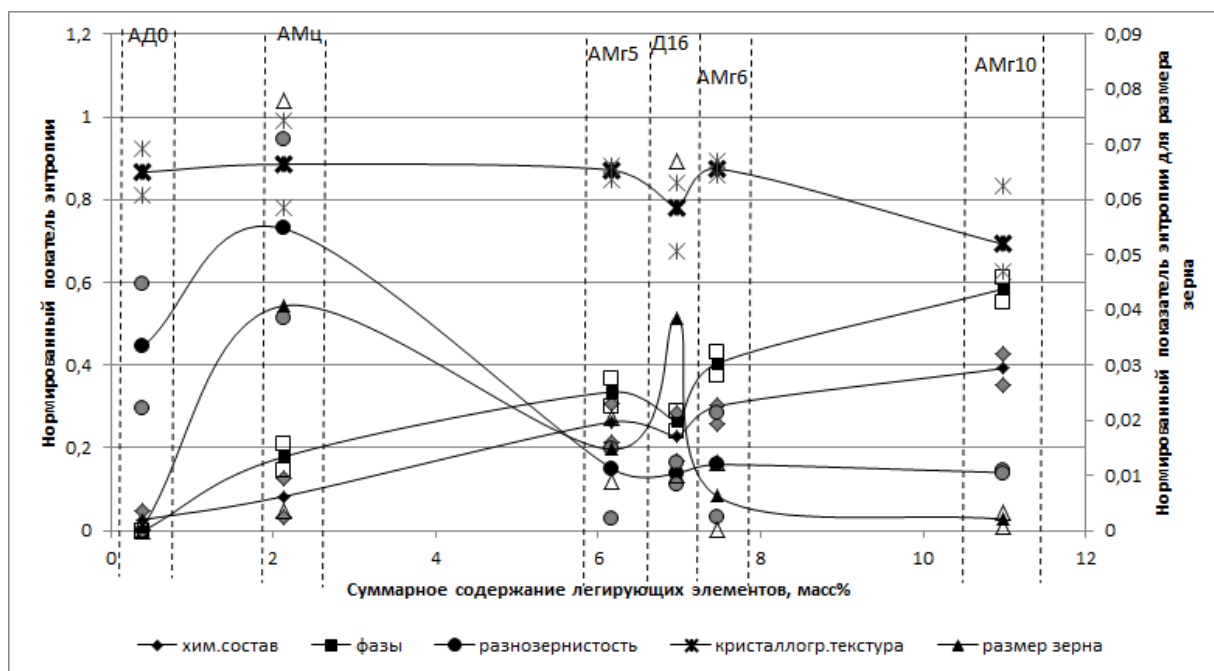
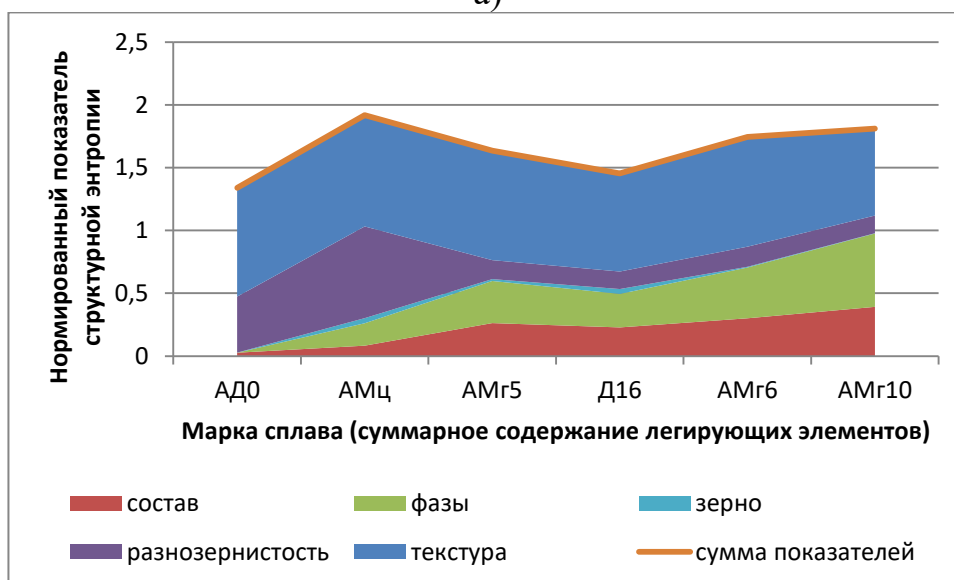


Рисунок 12 – Диаграмма Парето и весовые доли структур в общей структурной энтропии листов из сплавов Д16 (а,б) и АМг10 (в,г): в отождённом состоянии (а,в), в естественно состаренном состоянии (б,г)

Из рисунка 13,а видно, что увеличение содержания легирующих элементов приводит к росту структурной энтропии и вызывает рост энтропии, вносимой количеством упрочняющих фаз. Изменение энтропии, вносимой размером зерна, происходит не только на основании количества легирующих элементов, но и влияния этих элементов на размер зерна. Так, марганец и медь способствуют измельчению зёрненной структуры, что приводит к росту количества зёрен в пределах представительского объёма и вызывает рост энтропии от размера зерна.



а)



б)

Рисунок 13 – Изменение доли структур в общей структурной энтропии листов из исследуемых сплавов в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов: а) точечная диаграмма, б) диаграмма с накоплением

Доля, вносимая размером зерна в общую структурную энтропию, ничтожно мала по сравнению с другими факторами, даже для мелкозернистой структуры в сплавах АМц и Д16, приводящей к повышению значений структурной энтропии, обусловленной размером зерна (рис.13,а). Высокое содержание легирующих элементов в сплавах АМг5, АМг6, Д16, АМг10 приводит к снижению доли энтропии, вносимой разнотерностью. Доля, вносимая кристаллографической текстурой в общую структурную энтропию, с ростом содержания легирующих элементов, изменяется незначительно, но для сплава Д16 наблюдается впадина текстурной энтропии. Таким образом,

химический состав сплавов оказывает влияние на все слагаемые структурной энтропии, видоизменяется и кристаллографическая текстура. При этом роль оказывает не только суммарное содержание легирующих элементов, но и природа этих элементов (медь, марганец, магний).

Вызывает интерес степень соответствия результатов расчёта структурной энтропии, рассчитанной по различным методикам: на основании аппроксимации кривых растяжения и на основании учёта различных структурных факторов. Результаты этого сравнения показаны на рисунке 14.

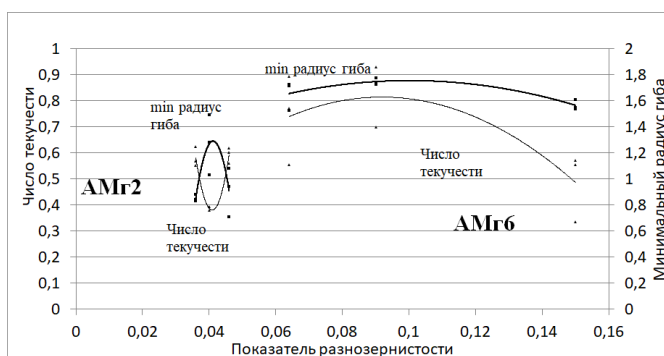


Рисунок 14 – Изменение структурной энтропии листов, рассчитанной по кривым растяжения (■) и с учётом структурных факторов (♦) из исследуемых сплавов в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов

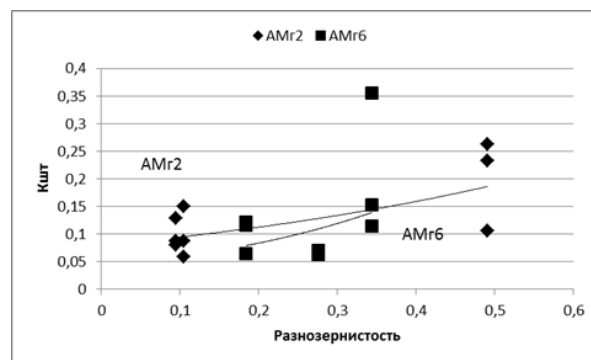
Из рисунка 14 видно, что характер изменения энтропии, значения которой получены по разным методикам, совпадает. Различия в значениях могут быть связаны с тем, что диаграммы растяжения образцов из каждого сплава индивидуальны, в связи с чем их математическая аппроксимация и результаты расчёта структурной энтропии могут иметь значительные расхождения.

В пятой главе рассмотрено влияние структуры и её однородности на штампуемость листовых алюминиевых сплавов. Повышение однородности зёрненной структуры на примере сплавов АМг2 и АМг6 способствует увеличению технологичности сплавов в операциях листовой штамповки (рис.15).

Неоднородность распределения фаз оказывает меньшее влияние на штампуемость по сравнению с составом фаз, формируемым при старении. Выделение фазы S после старения при температуре 100°С и θ -фазы после старения при температуре 200°С приводит к относительно высокой однородности структуры и штампуемости в сплаве Д16. Выделение фаз S и θ одновременно после старения при температуре 150°С снижает штампуемость из-за неоднородности фазового состава (рис.16).

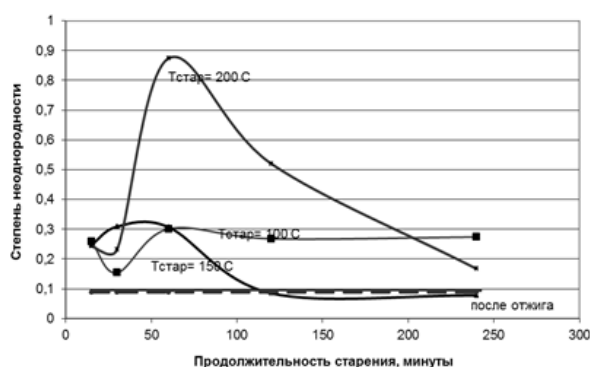


а)

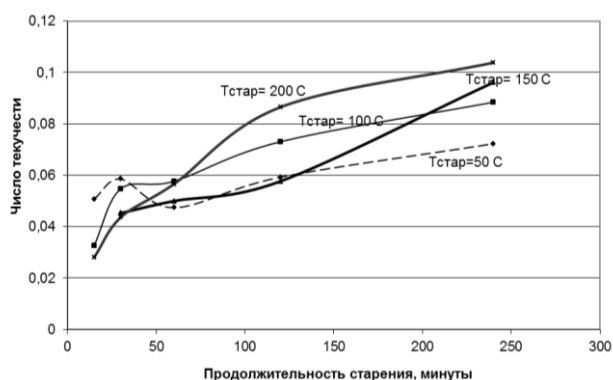


б)

Рисунок 15 – Изменение числа текучести, минимального радиуса гибки (а) и показателя $K_{шт}$ (б) в зависимости от разнородности в сплавах АМг2 и АМг6

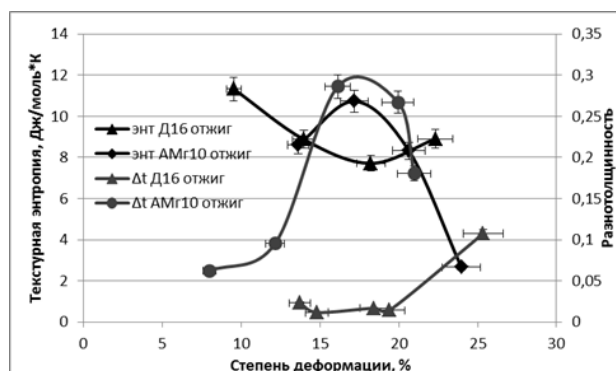


а)

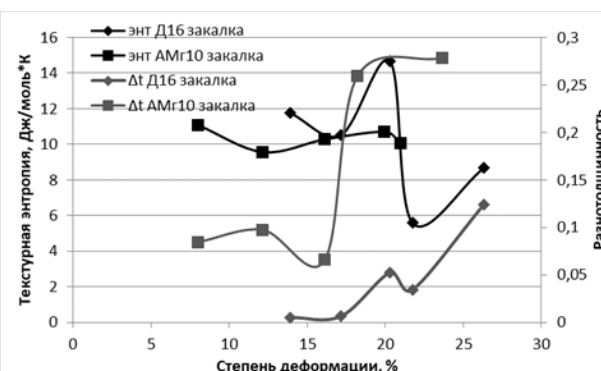


б)

Рисунок 16 - Изменение неоднородности распределения дисперсных фаз (а) и числа текучести (б) сплава Д16 в зависимости от температуры и продолжительности старения.



а)



б)

Рисунок 17 – Изменение разнотолщинности и текстурной энтропии сплавов АМг10 и Д16 в зависимости от степени деформации и исходного состояния перед деформированием

Из рисунка 17 видно, что холодное деформирование приводит к увеличению разнотолщинности обоих сплавов, при этом разнотолщинность более выражена для сплава АМг10 в отожжённом состоянии.

Деформация образцов из сплава АМг10 и Д16 в закалённом состоянии (рисунок 17,б) приводит к снижению текстурной энтропии после деформации с

малыми степенями, затем наблюдается повышение, а после достижения максимальных значений при степени деформации около 20% текстурная энтропия снижается.

Сравнение зависимостей структурной энтропии и обобщённого показателя штампуемости (рис.18) показывает, что их характер имеет зеркальную зависимость: рост структурной энтропии вызывает снижение показателя штампуемости, а её снижение – увеличение показателя штампуемости.

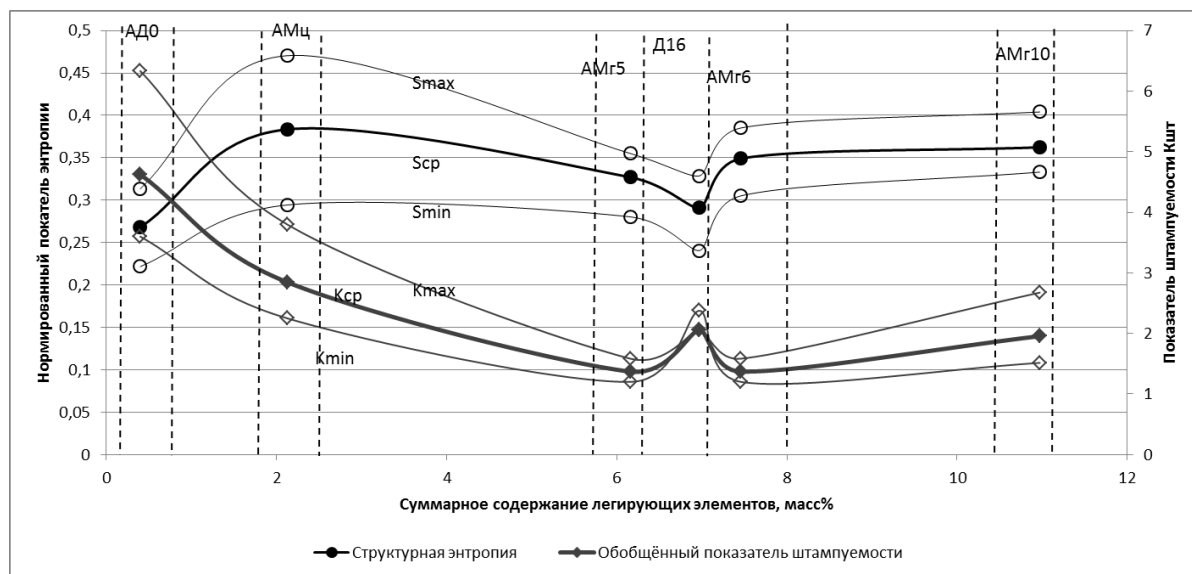


Рисунок 18 - Изменение структурной энтропии алюминиевых сплавов и обобщённого показателя штампуемости $K_{шт}$ с ростом суммарного содержания легирующих элементов

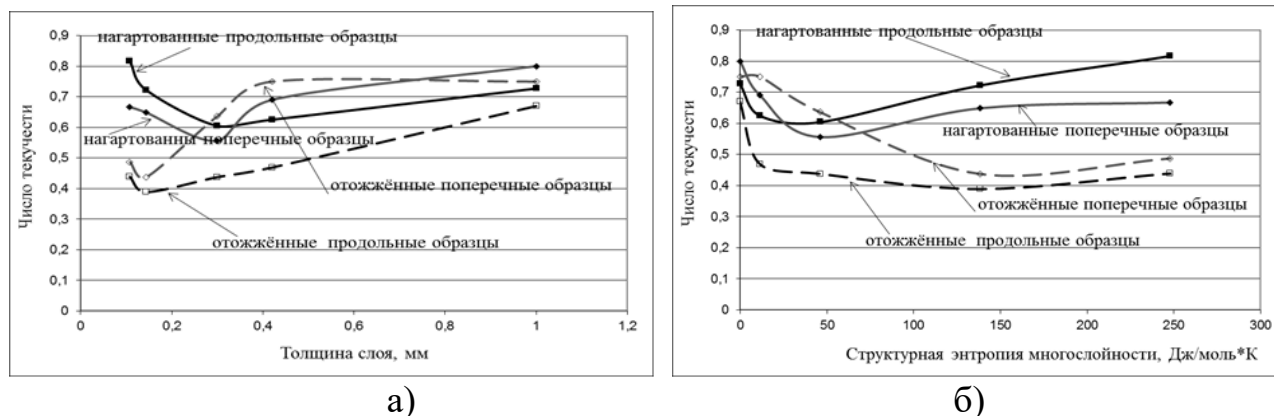
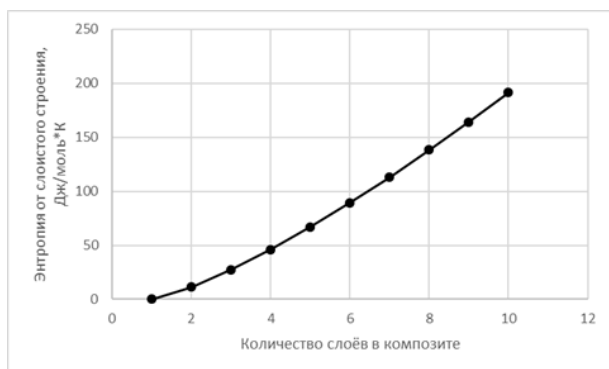
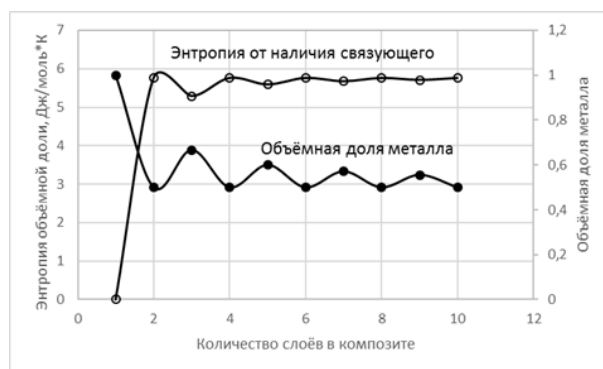


Рисунок 22 – Влияние толщины ленты (слоя в слоистом композите) (а) структурной энтропии конструкции (б) и на показатели числа текучести

Изучение влияния отдельных слоёв в многослойных образцах на их технологичность (рис.19) показало, что уменьшение толщины фольги от 1,0 до 0,4 мм при совместной холодной прокатке листов АМг2 приводит к снижению числа текучести нагартованных и отожженных образцов.

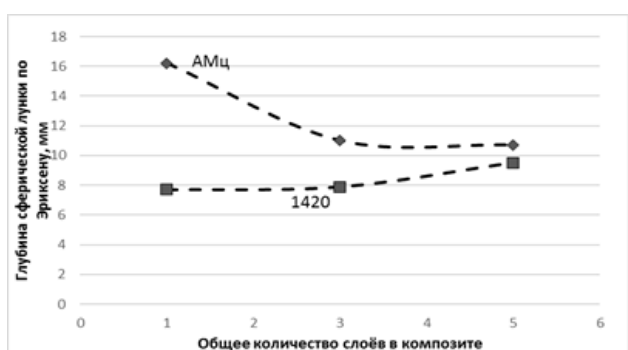


а)

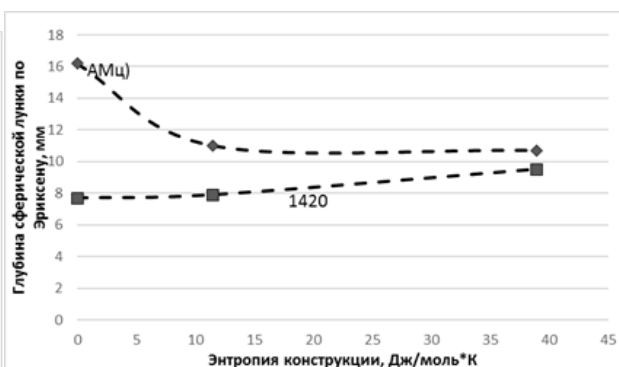


б)

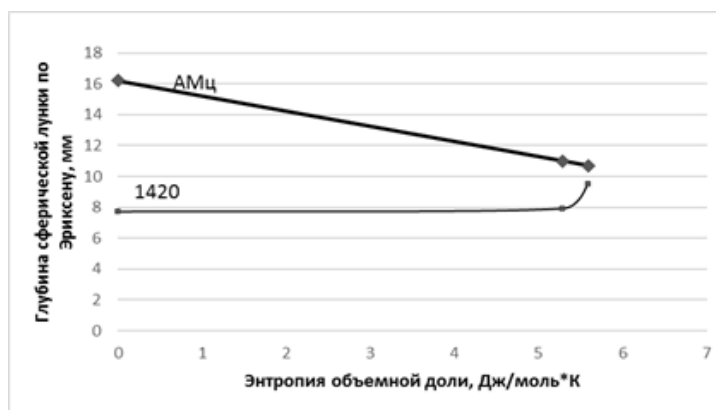
Рис.20 - Зависимость структурной энтропии, вносимой слоистым строением (а) и наличием связующего пластика (б) от количества слоёв в металл-полимерном композите



а)



б)



в)

Рисунок 21 - Зависимость глубины сферической лунки для сэндвичей на основе сплавов АМц и 1420 от количества слоёв (а), энтропии конструкции (б) и энтропии объёмной доли (в)

Несмотря на низкую пластичность многослойных образцов, их число текучести имеет самые низкие значения и хорошую штампуемость, особенно для образцов, толщина отдельных слоёв в которых составляет 0,12-0,14 мм. Показатели анизотропии в отожженном состоянии имеют тенденцию к уменьшению, если толщина фольги достигает значений 0,4 мм и менее.

Холоднокатаные многослойные образцы сохраняют постоянную анизотропию прочностных свойств, если толщина фольги находится в интервале 0,4...1,0 мм.

Схема сборки слоистых композитов на основе алюминиевых сплавов оказывает влияние на их энтропию (рис.20) и штампуемость (рис.21).

Чем больше количество слоёв, тем больше энтропия и ниже показатели предельного коэффициента вытяжки. Увеличение количества вынуждает уменьшать толщину отдельных слоёв, что также снижает штампуемость, как для материалов, изготовленных без добавления пластика, так и с пластиком в качестве соединительного материала.

Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая проблема – повышение штампуемости деформируемых алюминиевых сплавов за счёт получения упорядоченной структуры, имеющая важное значение для развития машиностроения, авиационной и ракетно-космической отрасли промышленности России. Решение задач, поставленных в диссертационной работе, позволило сделать следующие выводы:

1. Предложены способы количественной оценки размера зерна, степени разнотерности, распределения фаз, кристаллографической текстуры и структурной энтропии и предложены современные средства оценки штампуемости листового материала основных алюминиевых сплавов системы Al-Mg и Al-Cu-Mg. Предложенные способы позволили выявить наибольшую долю влияния кристаллографической текстуры на структурную энтропию, которая составляет 38...65% в зависимости от марки сплава и его вида обработки. В отожжённых сплавах эта доля влияния на 5-10% меньше по сравнению с нагартованным состоянием.

2. Решена комплексная проблема формирования упорядоченной структуры листовых материалов из основных алюминиевых сплавов системы Al-Mg и Al-Cu-Mg при термической и деформационной обработке, при помощи специальной энтропийной функции. Экспериментально определены взаимосвязи структурной энтропии с технологическими свойствами листового материала, и элементами структуры, характеризующимися размером зерна, степенью разнотерности, распределением фаз и фазового состава, кристаллографией текстуры и исходной толщиной. Увеличение степени легирования сплавов от технической чистоты до 10% приводит к повышению нормированного показателя структурной энтропии от 0,25 до 0,35, что сопровождается снижением показателя штампуемости материала от 4,5 до 2. Кроме суммарного содержания легирующих элементов на показатели структурной энтропии и штампуемости оказывает влияние система легирования: сплав АМц имеет на 7-10% более высокие показатели структурной энтропии, чем сплав АМг5, а более легированный сплав Д16, имеет на 9-15% меньший уровень структурной энтропии, чем сплав АМг5.

3. Разработаны режимы получения благоприятной зёрненной структуры и фазового состава листа, определяемые химическим составом, степенью деформации, температурой и продолжительностью нагрева, а также исходным

размером зерна. Расчётные зависимости нашли своё подтверждение результатами экспериментов и данными, опубликованными в литературе. Показано, что для достижения благоприятной структуры в сплаве АМг2 требуются на 80-100°С более высокие температуры нагрева при отжиге, чем для сплава АМг6.

4. Определена роль вторичных фаз в упрочнении алюминиевых сплавов и предпринята попытка найти свойства отдельных фаз по данным литературных источников, основываясь на методе суперпозиции. Данный подход показал существенные различия полученных результатов с учетом оценки их равномерного распределения в алюминиевой матрице. В сплаве Д16 структурные составляющие сплава, - твёрдый раствор и частицы упрочняющих фаз, - имеют на 20...30% более высокие показатели микротвёрдости в закалённом и естественно состаренном состоянии, чем в отожжённом. Для сплава АМг10 эта разница составляет 40...50%. Упрочняющая фаза в сплаве системы Al-Mg в среднем на 20...25% имеет более высокие показатели микротвёрдости, чем в сплаве системы Al-Cu-Mg.

5. Установлено, что дисперсность структуры в процессе деформирования листовых алюминиевых сплавов зависит от исходного состояния термообработки: отожжённого или закалённого и состаренного. У отожжённых сплавов АМг5 и АМг6 количество ОКР в одном зерне в 3...5 раз ниже, чем у нагартованных. По мере роста степени холодной деформации до 30% количество ОКР в 1 зерне уменьшается в 2...3 раза. Уменьшение фрагментации зёрен в отожжённом сплаве Д16 начинается при более высоких степенях деформации на 5...7%, чем у закалённого и естественного состаренного. Деформирование закалённого сплава АМг10 вызывает увеличение фрагментации зёрен с ростом степени деформации, в то время как в отожжённом сплаве АМг10 деформация до 10% вызывает уменьшение фрагментации около 3,5...4 раз, и более высокие степени деформации не вызывают значительного увеличения фрагментации зёрновой структуры. На величину физического уширения линий интерференции рентгеновских лучей оказывают влияние микроискажения, которые, накапливаясь с ростом степени холодной пластической деформации, приводят к фрагментации структуры, что отражается на величине размеров областей когерентного рассеяния.

6. Показано, что структурная энтропия и неоднородность распределения упрочняющих фаз изменяются при старении дуралюмина в зависимости от температуры и продолжительности нагрева. При температурах старения 100°С и 200°С зависимости структурной энтропии и неоднородности распределения фаз имеют зеркальный характер, а при температуре старения 150°С – характер изменения структурной энтропии и неоднородности распределения фаз совпадает.

7. Показано, что в интерметаллидных фазах алюминиевых деформируемых термически упрочняемых сплавов формируется собственная текстура, которая усиливается с ростом степени деформации и претерпевает видоизменения при нагреве, что свидетельствует о протекании процессов рекристаллизации внутри интерметаллидов.

8. Установлено, что неоднородность распределения фаз оказывает меньшее влияние на штампуемость по сравнению с составом фаз, формируемым при старении. Выделение фазы S после старения при температуре 100°C и θ -фазы после старения при температуре 200°C приводит к относительно высокой однородности структуры и штампуемости сплава Д16. Выделение фаз S и θ одновременно после старения при температуре 150°C снижает штампуемость из-за неоднородности фазового состава. При этом оценка структурной энтропии на основании кривых растяжения позволила установить температурные и временные границы стадий старения сплава Д16.

9. Показано, что наличие слоистой структуры композитов по сравнению с монолитной оказывает в 50...70 раз большее влияние на уровень структурной энтропии, чем объёмная доля составных частей. Увеличение количества слоёв от 1 до 5 приводит к повышению структурной энтропии от 0 до 40 Дж/моль*К и снижению показателя предельного коэффициента вытяжки на 8-12%, и повышению упругого пружинения в 1,5...2 раза. При этом показатели анизотропии в отожженном состоянии имеют тенденцию к уменьшению, если толщина фольги достигает значений 0,4 мм. Это значение толщины принято как предельная толщина листов из алюминиевых сплавов системы Al-Mg и Al-Cu-Mg.

10. 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 в Самарском университете на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения.

Основное содержание изложено в следующих работах:

Монографии

1. Гречников, Ф.В. Алюминиевые сплавы. Упрочнение структурных составляющих при пластическом деформировании / Ф. В. Гречников, Е. А. Носова - LAP Lambert Academic Publishing GmbH&Co, Saarbrücken. - 2012. - 98 с.

2. Носова, Е.А. Структура и штампуемость алюминиевых сплавов / Е.А. Носова - М.: Издательство «Эдитус», 2019 – 172 с.

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК:

3. Гречников Ф.В. Перспективы промышленного производства высокомагниевого алюминиевого деформируемого сплава Ф.В. Гречников, В.В. Уваров, Г.В. Черепок, Е.А. Носова. Известия Самарского научного центра РАН. - 2000. – Т.2. - №1. - С. 146-148.

4. Уваров В.В. Влияние повторного нагрева на механические и технологические свойства листового алюминиевого сплава с повышенным содержанием магния / В.В. Уваров, Е.А. Носова, В.С. Уварова // Вестник

Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2003.-№1 (3).- С. 120-122.

5. Гречников Ф. В. Влияние термической обработки на деформацию отдельных фаз в сплавах АМг10 и Д16 / Ф. В. Гречников, Е. А. Носова, О. Г. Савельева // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнёва. Часть II. – Красноярск. – 2009.– №1 (22). – С. 87 – 90.

6. Носова Е.А. Штампуемость трех и пятислойных алюминий-полимерных композитов / Е.А. Носова, Н.В. Луконина, М.И. Храмова, М. Хархаш, Х. Палковски // Конструкции из композиционных материалов - 2016.- №3(143). - С. 30-37.

7. Носова Е.А. Анизотропия листовых полуфабрикатов из алюминиево-магниевого сплава / В.В. Уваров, Е.А. Носова // КШП. ОМД. - 2008. №5. - С. 8-9.

8. Гречников Ф.В. Экспериментальное исследование показателей анизотропии от деформации / Ф.В. Гречников, В.В. Уваров, Е.А. Носова // Заготовительные производства в машиностроении. - 2008. - № 7. - С. 19-21.

9. Носова Е.А. Исследование влияния деформации и термической обработки на уровень остаточных макронапряжений и физического уширения линий интерференции рентгеновских лучей в листовых сплавах АМг5, АМг6, АМг10 и Д16 / Е.А. Носова // Вестник СамГТУ. - 2017№3(55).- С.168-178.

10. Носова Е.А. Исследование влияния однородности зеренной структуры на показатели пригодности к операциям листовой штамповки сплавов АМг2 и АМг6 / Е.А. Носова, А.А. Фадеева, М.А. Стародубцева // Известия вузов. Цветная металлургия. - 2019. - №3. - С.47-54.

11. Луконина Н.В. Моделирование процесса гибки трехслойного алюминий-полимерного композита с использованием программного комплекса ANSYSLS-DYNA / Н.В. Луконина, М.И. Храмова, Черников Д.Г., Е.А. Носова // КШП. ОМД. - 2018. - №4.- С.35-40.

12. Носова Е.А. Исследование энтропии кристаллографической текстуры листовых алюминиевых сплавов после деформации и термической обработки / Е.А. Носова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2019. - Т. 16. - № 2. - С. 269-274.

13. Носова Е.А. Исследование влияния вида аппроксимирующей функции кривых растяжения на структурную энтропию листовых алюминиевых сплавов // Е.А. Носова, Н.В. Селиверстова (Луконина) // Ползуновский вестник. 2020.- №1. - С. 114-118.

14. Трибунский А.В. Исследование эволюции размеров и количества интерметаллидных частиц при производстве листов и лент из алюминиевого сплава 6016 / А.В. Трибунский, Е.В. Арышенский, Е.А. Носова, В.Ю. Чинов // Технология металлов. - 2020. - №5. - С.46-53.

15. Носова, Е.А. Применение энтропийного подхода для оценки доли влияния структурных особенностей на штампуемость алюминиевых сплавов / Е.А. Носова, А.П. Амосов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2022. - Т. 19. - № 1. - С. 93-105.

Публикации в журналах из баз цитирования Scopus, Web of Science:

16. Savel'eva O. G. A study of the anisotropy of properties of sheet semiproducts from alloy AMg10 / F.V.Grechnikov, E. A. Nosova, O.G.Savel'eva // «Metal science and heat treatment». – Springer New York Consultants Bureau. - 2009. - № 7-8 (51). – 326-329.

Гречников Ф. В. Изучение анизотропии свойств листовых полуфабрикатов из сплава АМг10 / Ф. В. Гречников, Е. А. Носова, О. Г.Савельева // МИТОМ. – Москва.– 2009. – №7(649). – С.10– 13 (*Издание, рекомендованное ВАК РФ*).

17. Nosova E.A. Effect of strain on the anisotropy coefficient of sheet alloys AA2024, Ti-2Al-1Mn, Titanium Grade 2, steel X10CRNITI18-9 / E.A. Nosova, F.V. Grechnikov // Key Engineering Materials. - 2016. - Т. 684. - С. 366-370.

18. Nosova E. Dimensional changes of Al-10Mg alloy grains after quenching, deformation, and reheating / E. Nosova, S. Konovalov // AIP Conference Proceedings – 2017- 1909 - 020153

19. Nosova E. Multi-cycle rolled aluminum alloy 3103 sandwiches: mechanical properties and stamp ability / E. Nosova, Ya. Erisov, F. Grechnikov // MATEC Web of Conferences – 2017.- 129 - 02021

20. Grechnikov F. V. Effect of Composition and Distribution of Phases after Aging on Stamp Ability for Aluminum Alloy D16 (AA2014) sheets / F. V. Grechnikov, E. A. Nosova // Russian Journal of Non-Ferrous Metals – 2017.- Vol. 58.- No.6.- P. 625.

Гречников Ф.В. Влияние состава и распределения дисперсных фаз при старении на штампуемость листов из сплава Д16 / Ф.В. Гречников, Е.А. Носова // Известия вузов. Цветная металлургия. - 2017. - №5. - С.60-68 (*Издание, рекомендованное ВАК РФ*).

21. Nosova E.A. Research of sheet thickness effect on mechanical and technological properties of Al-1%Mn aluminium alloy / E.A. Nosova , N.V.Seliverstova, M.I. Khramova et al. // Int. J. of Nanotechnology. — 2018. — Vol. 15. Issue 4-5. — P. 324-332.

22. Tribunskiy A. Effect of manganese and magnesium content and conditions of annealing on mechanical properties and cracking formation during bending of aluminum alloy AA3005 / A. Tribunskiy, E. Nosova , V.Aryshenskiy // Solid State Phenomena. — 2018. — Vol. 284 SSP. — P. 476-482

23. Lukonina N.V. The effect of annealing on mechanical properties, the number of fluidity, and the size of coherent scattering regions in AMg1, AMg5, and AMg6 alloys / N.V. Lukonina, E.A. Nosova, FV. Grechnikov // Solid State Phenomena. — 2018. — Vol. 284 SSP. — P. 470-475

24. Nosova E. Research of structural entropy of sheet aluminium alloys depending on annealing temperature / E. Nosova, F. Grechnikov , N. Lukonina // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 224.- P. 03005

25. Nosova E.A. Application of the Entropy Approach for Analyzing the D16 Alloy Aging Stages / E.A. Nosova // Metal science and heat treatment. 2020. — Vol. 62. Issue 5-6. — P. 376-379

Носова Е.А. Применение энтропийного подхода для анализа стадий старения сплава Д16 / Е.А. Носова // МиТОМ. - 2020. - № 6 (780). - С. 22-26. (издание, рекомендованное ВАК РФ).

26. Mikheev, V.A. Research on the influence of deformable sheet aluminum alloy rheological behavior on stretch forming process limits / V.A. Mikheev, E.A. Nosova, R.De. Alvarenga, M.M. Demidova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Krasnoyarsk, Russia, 2021. - С. 12013.

Патенты и база данных

27. Патент РФ № 2628815 G01N33/20. Способ количественной оценки неоднородности зёрненной структуры листовых металлических материалов / Е.А. Носова, Н.В. Луконина, М.И. Храмова.; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва // 201612175; Заявл. 01.06.2016; Оpubл. 22.08.2017.

28. Патент РФ № 2694212 МПК G01N 33/20 C22F 1/04. Способ количественной оценки распределения дисперсных фаз листовых алюминиевых сплавов / Носова Е.А., Гречников Ф.В., Солоднева М.И., Селиверстова Н.В., Коновалов С.В.; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва // 2018103010, Заявл. 25.01.2018; Оpubл. 09.07.2019

29. Патент РФ № 2018620180 База данных технологических свойств для слоистых композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов АМЦ и 1420 / Е.А. Носова, Н.В. Луконина, М.И. Храмова; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва // 2017621429 Заявл. 05.12.2017; Оpubл. 01.02.2018.

Публикации в других изданиях:

30. Носова Е. А. Влияние термической обработки на деформацию отдельных фаз сплава АМг10 / Е. А. Носова, О. Г. Савельева// Материалы XII международной научной конференции «Решетнёвские чтения»– Красноярск – 2008. – С. 227 – 229.

31. Савельева О. Г. Влияние холодной пластической деформации на упрочнение фаз и разнотолщинность сплавов АМг10 и Д16 / Савельева О. Г., Носова Е. А.// Труды 3-й международной научно-технической конференции «Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования «Металлдеформ-2009». Том 1. – Самара – 2009. – С.140-145.

32. Давыдова Е.М. Исследование остаточных напряжений в двухфазных алюминиевых сплавах / Е.М. Давыдова, Е.А. Носова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2010. - Т. 1. - №6. С.- 115-117.

33. Носова Е.А. Получение и исследование многослойных листов из сплава АМц / Е.А. Носова, Я.А. Ерисов // Сборник докладов конференции. ФГУП ВИАМ. - 2015. - С. 17.

34. Носова Е.А. Применение термодинамического анализа к расчету размера зерна в сплаве АМГ6 / Е.А.Носова, Гречников Ф.В. // В сборнике: Будущее машиностроения России Сборник докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. - 2015. - С. 278-281.

35. Гречников Ф.В. Исследование текстуры интерметаллидов в сплавах типа АМг и Д16 / Ф.В. Гречников, Е.А. Носова // Сборник докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения выдающегося ученого-металловеда, академика РАН И.Н. Фридляндера. - 2013. - С. 29.

36. Гречников Ф.В. Исследование влияния рекристаллизации на характер нагартовки сплавов АМг и Д16 / Ф.В. Гречников, Е.А. Носова // Международный научно-исследовательский журнал. - 2013. - №5-1(12).- С. 85-89.

37. Гречников Ф.В. Исследование влияния предварительной термообработки на изменение текстуры интерметаллидов при прокатке сплавов типа АМг и Д16 / Ф.В. Гречников, Е.А. Носова // Все материалы. Энциклопедический справочник. - 2014. - №2. - С. 23-27.

38. Макарова О.А. Исследование влияния упорядоченности структуры на механические и технические свойства двухфазных алюминиевых сплавов / О.А. Макарова, Е.А. Носова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. - 2012. - Т. 1. - №8. - С. 120-121.

39. Nosova E.A. Effect Of Quenching Temperature On Structure And Mechanical Properties Of Aluminium Alloy With High Magnesium Content Al-10% Mg / E.A. Nosova, A.V.Kirillova // Life Science Journal 2014. — № 11 (9). — P. 805-809

40. Nosova E.A. Influence Of The Coherent Diffraction Areas Sizes On The Mechanical Properties And Formability Of Aluminium Alloys Al - 10% Mg And Al - 5% Cu - 2% Mg (2024) / E.A. Nosova, A.A. Kuzina // Life Science Journal.- 2014.- No. 11(9) - P.712 – 717

Личный вклад автора. В представленных работах, большинство из которых выполнено в соавторстве с другими исследователями, автором определены основные идеи и направления проводимых исследований [1-40], предложены и обоснованы новые методы исследования структуры и свойств полученных материалов [28-40], новые технические и технологические решения [22-27], осуществлено планирование опытов и обработка полученных данных [1-40] исследований, а также исследований ученых и специалистов в области обработки и исследования листовых алюминиевых сплавов и композитных образцов на их основе [1-40].

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета

Д 99.2.039.02 (Д 999.122.02)

ФГБОУ ВО «СамГТУ» (протокол № 6 от 27.06.2022 г.)

Формат 60 x 84/16. Бумага ксероксная. Печать оперативная.

Объем – 2,0 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № ____.

ФГБОУ ВО «СамГТУ»

Отдел типографии и оперативной печати

443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244