

На правах рукописи



Казиков Михаил Сергеевич

**УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ
ИЗДЕЛИЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 2.6.17
Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель:

Муратов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Носова Екатерина Александровна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедры «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Прохорович Владимир Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, директор научно-исследовательского центра технологий контроля качества ракетно-космической техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт - Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита состоится «22» декабря 2023 г., в 15 час. 30 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 на базе 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, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»:

http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/kazakovms_diss.pdf

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Ракетно-космическая техника играет важную роль в различных сферах деятельности, таких как исследование космоса, обеспечение безопасности государства и достижение ряда коммерческих целей. Конструктивные особенности ракет-носителей и космических аппаратов требуют использования материалов с высокими механическими свойствами и их стабильностью при экстремальных условиях. Алюминиевые сплавы остаются основным конструкционным материалом авиакосмической техники. Объем их применения составляет около 70% от общего количества конструкционных материалов в составе ракеты-носителя по массе. Для дальнейшего развития космического машиностроения требуются новые сплавы, обладающие улучшенным комплексом свойств, а также необходимо совершенствование действующих технологий обработки алюминиевых сплавов.

Для того чтобы повысить свойства алюминиевых сплавов и улучшить их характеристики при использовании в перспективной ракетно-космической технике, необходимо проводить оптимизацию традиционных режимов обработки сплавов. Это позволит получить материалы с более высокой прочностью, устойчивостью к коррозии при пониженных временных и ресурсных затратах.

Одним из наиболее эффективных способов упрочнения алюминиевых сплавов является микролегирование скандием. Этот элемент образует дисперсные частицы, которые значительно повышают прочность и устойчивость к тепловому воздействию. Однако, для достижения максимальных свойств необходимо правильно выбирать режимы термической обработки и деформационного воздействия.

Технология сварки трением с перемешиванием (СТП) становится все более популярной в ракетно-космической технике. Эта технология позволяет соединять алюминиевые сплавы без использования расходных материалов и при этом сохранять их свойства.

Одним из преимуществ СТП является отсутствие деформации материала, что особенно важно при создании космических аппаратов. Также этот метод позволяет соединять материалы разной толщины и формы, что расширяет возможности конструкторов.

Однако, для широкого применения СТП в ракетно-космической технике необходимо провести дополнительные исследования по определению оптимальных режимов сварки для различных типов полуфабрикатов из алюминиевых сплавов (например, скорости вращения инструмента и давления).

Также должно быть проведено сравнение СТП с другими методами сварки, чтобы определить наиболее эффективный метод для конкретных условий. В целом, перспективы применения технологии сварки трением с перемешиванием в ракетно-космической технике выглядят многообещающими и могут привести к созданию более надежных и устойчивых конструкций.

Неразрушающий контроль является важной составляющей качественной СТП. Стоит отметить, что неразрушающий контроль может быть затруднен из-за особенностей этого способа сварки. Некоторые методы контроля могут не давать достаточной информации о состоянии сварного шва, что может приводить к пропуску дефектов и ухудшению качества сварки.

В целом, проблемы неразрушающего контроля и дефекты сварки трением с перемешиванием являются серьезными вызовами для ракетно-космической техники. Однако, с помощью правильной подготовки и контроля процесса сварки, а также отработки рациональных режимов, можно достичь высокого качества сварки и создать надежные конструкции для использования в космической эксплуатации.

На основании вышеописанного были сформулированы цель и задачи исследования.

Цель работы – улучшение структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники совершенствованием режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выявлены особенности кинетики старения термоупрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg и Al-Mg-Si-Cu, применяемых в конструкциях ракетно-космической техники (РКТ), для определения возможностей формирования улучшенных свойств и модернизации традиционных процессов;
2. Установлены особенности влияния структурно-фазового состояния исходных шихтовых материалов на формирование структуры, свойств и дефектов в отливках сплава системы Al-Si-Mg;
3. Выявлены причины изменения микроструктуры, падения пластических свойств и разрушения сварных герметизирующих деталей термостабилизирующих систем космических аппаратов, изготавливаемых из сплава системы Al-Mg-Si;
4. Установлены закономерности влияния температуры на механические свойства экономно-легированного сплава Al-Mg-Sc в отожженном и нагартованном состоянии деформированных полуфабрикатов (плиты, листы, поковки); выполнена оценка коррозионной стойкости и изменения механических свойств во времени;
5. Показано влияние режимов сварки трением с перемешиванием на структуру и свойства сварных соединений катаных полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg-Sc в диапазоне температур от -196 до 200 °C и проведено их сопоставление с уровнем свойств сварных соединений, полученных сваркой плавлением;
6. Определены возможности выявления характерных внутренних дефектов сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием различными методами неразрушающего контроля;
7. Проведена апробация и внедрение разработанных режимов технологических воздействий в условиях действующего производства.

Объектом исследования являются алюминиевые сплавы различных систем легирования, используемые для изготовления изделий перспективной ракетно-космической техники.

Предметом исследования являются структурообразование и изменение свойств алюминиевых сплавов при варьировании режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки.

В диссертационной работе выполнен комплекс металлургических исследований структуры и свойств алюминиевых сплавов, используемых в ракетно-космической технике, которые направлены на повышение качества изделий и эффективности технологических процессов обработки.

Научная новизна:

1. Установлены новые закономерности формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов при варьировании режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки;
2. Установлено влияние структурно-фазового состояния исходных шихтовых материалов на формирование структуры, свойств и дефектов в отливках сплава системы Al-Si-Mg;
3. Изучены особенности кинетики старения сплавов системы Al-Cu-Mg при реализации выдержки после закалки при отрицательной температуре; определены инкубационный период до начала процессов интенсивного упрочнения сплавов и влияние выдержки при отрицательной температуре на механические свойства. Выявлено влияние

ускоренного старения при повышенных температурах на механические свойства и коррозионную стойкость сплава системы Al-Mg-Si-Cu;

4. Установлены причины изменения микроструктуры, падения пластических свойств и разрушения сварных герметизирующих деталей термостабилизирующих систем космических аппаратов, изготавливаемых из сплава системы Al-Mg-Si;

5. Выявлены закономерности влияния температуры на механические свойства экономно-легированного сплава Al-Mg-Sc в отожженном и нагартованном состоянии деформированных полуфабрикатов (плиты, листы, поковки); выполнена оценка коррозионной стойкости и изменения механических свойств во времени;

6. Установлено влияние режимов сварки трением с перемешиванием на структуру и свойства сварных соединений катаных полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg-Sc в диапазоне температур от -196 до 200 °C;

7. Исследованы характерные внутренние дефекты сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, определена степень их влияния на эксплуатационные свойства, а также оценены возможности выявления дефектов методами неразрушающего контроля;

Практическая значимость:

Показано, что традиционные методы подавления образования хрупких пластин железосодержащей фазы в сплаве системы Al-Si-Mg за счет обязательного присутствия в химическом составе сплава Mn, в случае их наследования из исходного материала, неэффективны. Для повышения качества отливок рекомендовано использовать для приготовления шихты чушки с предварительно модифицированной структурой, в которой отсутствуют включения пластин фазы переменного состава $Al_xSi_yFezMn_q$, что позволило снизить уровень брака на 25%.

Выявлена возможность сохранения свежезакаленного состояния для сплавов системы Al-Cu-Mg с последующим формированием оптимальных механических свойств, путем естественного старения. Показана возможность применения режимов ускоренного старения деталей из сплава системы Al-Mg-Si-Cu позволяющая получить высокий уровень механических свойств и коррозионной стойкости при сокращении длительности цикла термической обработки на 65%.

Определены оптимальные параметры изготовления сварных деталей для термостабилизирующих систем, подвергающихся холодной пластической деформации.

Построена зависимость механических свойства деформированных полуфабрикатов из перспективного экономнолегированного сплава системы Al-Mg-Sc и сварных соединений из них от температуры в диапазоне -196 до 200 °C. По результатам ускоренных климатических испытаний, имитирующих хранение в течение 14 лет, выявлено снижение на листовых полуфабрикатах в доленом направлении относительного удлинения отдельных образцов до 32 % и снижение на нагартованных плитах в доленом направлении предела прочности до 10 %. Для сварных соединений СТП имитация хранения в течение 14 лет показала снижение св сварных соединений плит в доленом направлении до 10 %. Продемонстрирована возможность получения сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, с коэффициентом прочности для отожжённых листов из сплава Al-Mg-Sc 90%, а для нагартованных плит из сплава Al-Mg-Sc 85-90%. Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение сплава в реальных конструкциях.

Определены основные виды дефектов, характерных для сварки трением с перемешиванием катаных полуфабрикатов из сплава Al-Mg-Sc, не выявляемые визуально, а также установлена степень их влияния на прочностные характеристики сварного соединения. Рассмотрены особенности неразрушающего контроля данных сварных соединений применительно к изделиям ракетно-космической технике, разработаны рекомендации по применению эхо-импульсного ультразвукового контроля с применением фазированных

антенных решеток и его сочетание с рентгенографией, капиллярным контролем и дифракционным временным ультразвуковым контролем.

Перечисленные разработки прошли апробацию в действующем производстве и внедрены в технологические процессы и операции контроля качества в АО РКЦ “Прогресс”.

Содержание диссертации соответствует областям исследования паспорта научной специальности 2.6.17: п.1.Разработка новых металлических, неметаллических и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, легкой, текстильной, строительной); п.6.Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических эксплуатационных свойств металлических, неметаллических композиционных материалов и функциональных покрытий

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленное влияние режимов технологических воздействий в процессах получения отливок, сварки, деформирования и термической обработки на структуру и свойства алюминиевых сплавов;

2. Закономерности влияния режимов сварки трением с перемешиванием на структуру сварного соединения, классификация внутренних дефектов сварных швов, их влияние на прочностные характеристики, а также оценка особенностей неразрушающего контроля сварных соединений;

3. Установленное влияние температуры в интервале -196°C - 200°C на механические свойства отожженных и нагартованных катаных полуфабрикатов из сплава системы Al-Mg-Sc и сварных соединений из них, выполненных сваркой трением с перемешиванием.

4. Предложения по оптимизации, модернизации и рациональному применению процессов тепловой обработки алюминиевых сплавов для изготовления деталей перспективной ракетно-космической техники;

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных научно-технических конференциях: Актуальные проблемы ракетно-космической техники (г. Самара, 2019 г.), Высокие технологии в машиностроении (г. Самара, 2021 г.), Актуальные проблемы ракетно-космической техники (г. Самара, 2021 г.), Современные материалы, техника и технология (г. Курск, 2021 г.), Пром-Инжиниринг 2022 (г. Сочи, 2022 г.)

Основные результаты диссертационной работы получены автором в рамках проведения исследований в ФГБОУ ВО «СамГТУ» и были использованы в конкурсной работе «Современные технологии получения заготовок и неразъемных соединений из сплавов систем Ti-Al-V и Al-Mg-Sc, применяемых в конструкциях перспективной ракетно-космической техники», удостоенной стипендии Правительства РФ за значительный вклад в создание прогрессивных технологий и разработку современных образцов вооружения, военной и специальной техники в интересах обеспечения обороны страны и безопасности государства.

Достоверность полученных результатов. Выдвинутые в работе практические и теоретические выводы базируются на фундаментальных положениях, сопоставлены с общепризнанными отраслевыми знаниями и информацией, полученной другими авторами и исследовательскими группами. В работе использовалось современное оборудование и методы, аттестованные методики и поверенные средства измерений. Полученные данные

подвергались статистической обработке с определением значений доверительного интервала и дисперсии, что подтверждало их достоверность. Выдвинутые в ходе исследований гипотезы и положения подтверждены натурными экспериментами.

Вклад автора. Соискатель лично выполнял весь комплекс экспериментальных исследований, состоящий из подготовки образцов, проведения механических испытаний во всем исследуемом диапазоне температур и структурных исследований объектов испытаний, обработки экспериментальных данных, а также принимал непосредственное участие в разработках режимов обработок и параметров проведения экспериментов, обсуждении результатов исследований, подготовке научных публикаций и представлении результатов работы на конференциях.

Публикации. По материал диссертации опубликовано 9 публикаций, из них 7 в изданиях, входящих в перечень ВАК, из них 2 публикации в изданиях, соответствующих научной специальности 2.6.17 (категория К2).

Структура и объем работы. Диссертации состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 185 наименований, изложена на 209 страницах и содержит 99 рисунков и 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность исследований и научная новизна, сформулированы цель и задачи работы, ее практическая значимость. Изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации выполнен анализ современного состояния научных исследований и технологических разработках в области алюминиевых сплавов для ракетно-космической техники, на основе которого определены цель и задачи исследования.

Рассмотрены особенности проектирования изделий РКТ и критерии выбора конструкционных материалов. Сделан вывод о необходимости применения материалов с улучшенными свойствами, в том числе при криогенных температурах; применении новых и модернизации традиционных технологий, с целью обеспечения реализации требований, стоящих перед перспективными изделиями.

Проведен обзор научных идей и тенденций в области технологических воздействий при изготовлении ракетно-космической техники с применением алюминиевых сплавов, выявлены актуальные наукоемкие проблемы, требующие проведения исследований с целью их решения.

Выполнен анализ возможностей микролегирования редкоземельными металлами алюминиевых деформируемых сплавов, рассмотрена перспектива их применения в изделиях РКТ. Рассмотрены особенности технологии сварки трением с перемешиванием (СТП), её преимущества перед традиционными видами сварки и перспективы применения в изделиях РКТ, проведён анализ актуальных задач, связанных с неразрушающим контролем сварных соединений, полученных СТП.

Во второй главе диссертации описываются оборудование, исследуемые материалы и методики проведения экспериментов.

Материаловедческий подход к решению проблемы обеспечения высокой работоспособности изделий предусматривает изучение связей между составом, строением и свойствами используемых материалов, закономерностей их изменений вследствие физико-механических и других видов воздействий, а также путей получения материалов, улучшения их свойств и эффективности использования.

В этой связи для достижения цели и решения сформулированных задач работы потребовались взаимосогласованные исследования алюминиевых сплавов различных систем легирования в плане изучения закономерностей формирования их структуры и свойств при используемых технологических и действующих эксплуатационных воздействиях.

Приведен химический состав исследуемых сплавов, изложены методы получения экспериментальных отливок, особенности изготовления заправочных штуцеров и образцов – имитаторов из алюминиевых сплавов для термостабилизирующих систем, режимы и оборудование термической обработки.

Химический состав перспективного сплава системы Al-Mg-Sc (исследованы отожжённые листы, нагартованные плиты и кольцевые поковки) следующий: (масс. %) 4,91 – 5,13 Mg; 0,560 – 0,564Mn; 0,109 – 0,113 Sc; 0,162 – 0,183 Fe; 0,085 - 0,104S; 0,125 – 0,133Cr; 0,026 – 0,037Ti; 0,095 – 0,101Zr; основа Al.

Процесс сварки СТП реализован на установке производства ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель» для получения продольных сварных швов. Для сварки использован нерегулируемый инструмент типа «Pin».

Металлографический анализ микроструктуры проводили с помощью оптического металлографического микроскопа CarlZeiss AxiovertA1. Исследования тонкой структуры сплавов и фрактографический анализ выполнены с помощью сканирующего электронного микроскопа JED-2300 AnalysisStation с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа.

В работе оценивались характеристики механических свойств: пределы прочности и текучести, относительное удлинение, ударная вязкость (испытания на маятниковом копре КМ-5 с определением KCU) в диапазоне температур от -196°С до 200 °С. Испытания на растяжения проведены на разрывной машине УТС-111.2-100-22.

Выполнены коррозионные испытания на расслаивающую (РК), межкристаллитную (МКК) и общую коррозию (ОК). Проведены ускоренные климатические испытания (УКИ) с целью оценки влияния внешних воздействующих факторов окружающей среды (температура и влажность воздуха) на сохраняемость свойств материала в процессе хранения и эксплуатации.

В третьей главе приведены результаты исследования по улучшению структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники совершенствованием режимов технологических воздействий.

С целью обеспечения качества изделий, получаемых литьем в кокиль проведен анализ причин возросшего уровня брака. Установлено, что структурно-фазовое состояние исходного материала наследуется в отливках из сплава Al-Si-Mg и при наличии железосодержащих фаз в виде хрупких пластин (рисунок 1) может оказывать отрицательное влияние на качественные характеристики литых заготовок. Выявленные светлые участки в изломах отливок представляют собой зоны со сглаженным рельефом, которые образовались по хрупкому механизму разрушения (рисунок 2), что связано с наличием в структуре хрупких пластин фазы переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$. Результаты химического анализа методом микрорентгеноспектрального анализа поверхности излома представлены на рисунке 3. Традиционные методы подавления образования хрупких пластин железосодержащей фазы за счет обязательного присутствия в химическом составе сплава Mn, в случае их наследования из исходного материала, не приводят к образованию компактных равноосных полиэдров, которые в меньшей степени оказывали бы негативное влияние. Для повышения качества отливок рекомендуется использовать для приготовления шихты чушек с предварительно модифицированной структурой, в которой отсутствуют включения пластин фазы переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$.

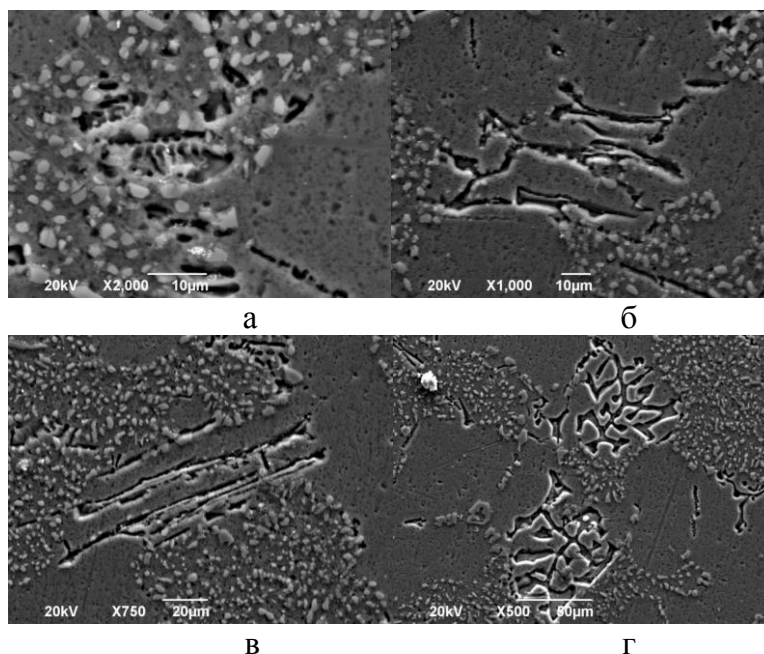


Рисунок 1 – Микроструктура образцов разных плавов: а) выделения кремния; б) фазы $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$; в) области выкрашивания хрупких пластин фаз $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$; г) фаза $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ скелетообразной формы

Для оптимизации цикла технологических переходов между операциями термической обработки и холодной деформации проведены исследования по возможности сохранения структурного состояния сплавов Д1 и Д16, формирующегося в процессе закалки. Установлено, что свежезакаленное состояние листовых заготовок можно сохранить определенное время, помещая их немедленно после закалки в условия отрицательных температур: так при температуре $-10^{\circ}C$ оно сохраняется до 48 часов. Зависимости свойств сплавов от времени выдержки при отрицательной температуре в свежезакаленном состоянии представлена на рисунке 4.

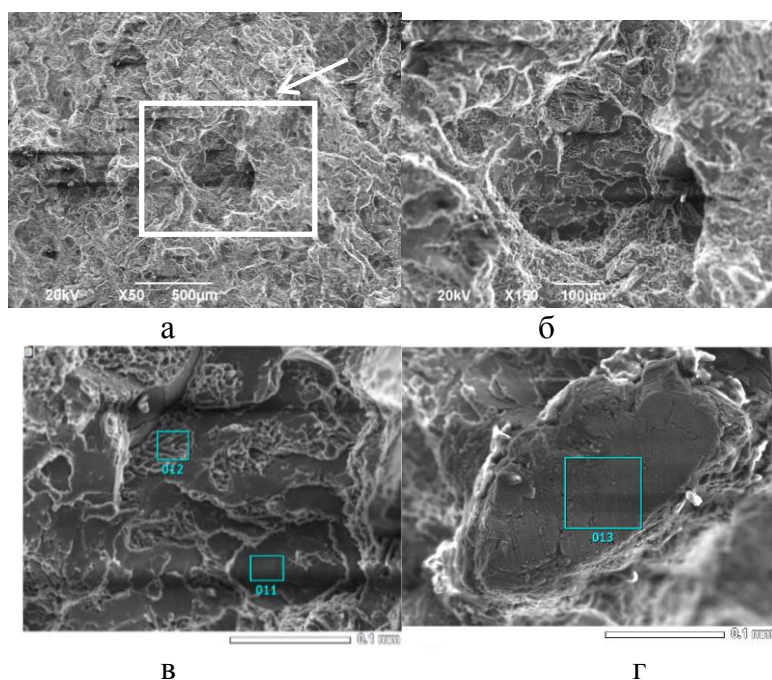


Рисунок 2 – Поверхность излома разрывного образца. а) общий вид поверхности излома; б) участки с гладким рельефом; в) смешанный рельеф; г) крупный сглаженный участок излома

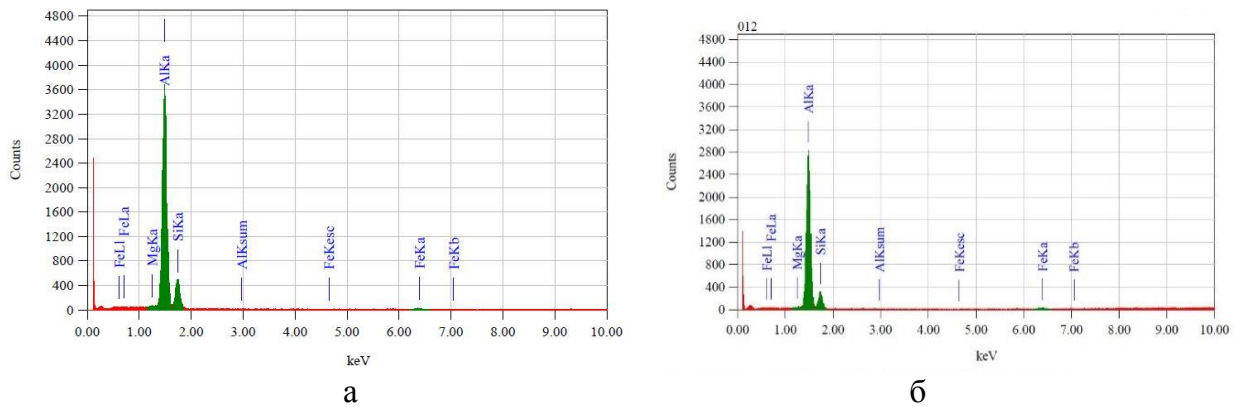


Рисунок 3 – Спектрограмма результатов МРСА с поверхности излома. а) точка 11 (рисунок 2); б) точка 12 (рисунок 2)

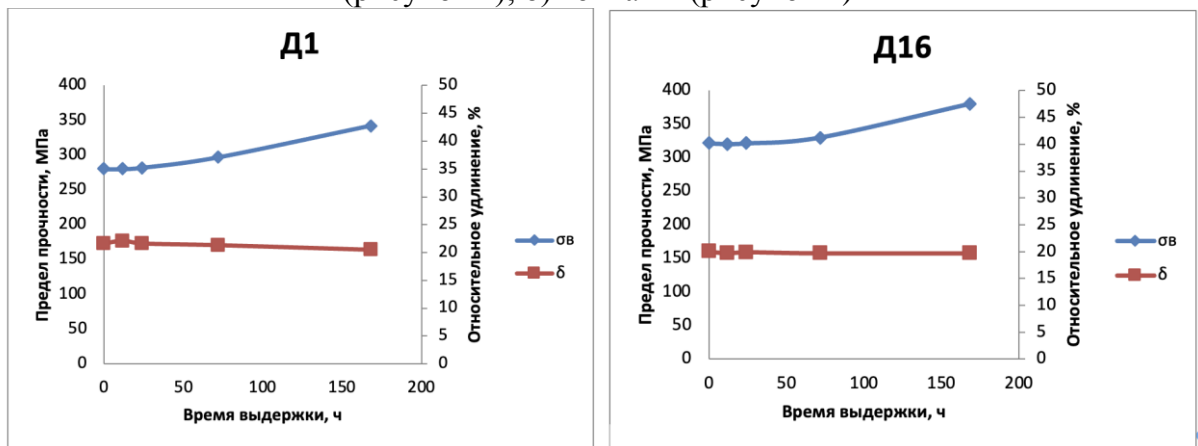


Рисунок 4 - Зависимость свойств сплавов от времени выдержки при отрицательной температуре в свежезакаленном состоянии до начала испытаний

Время выдержки при комнатной температуре (инкубационный период) до начала ускоренного процесса естественного старения после закалки и выдержки при отрицательных температурах, обеспечивающей сохранение свежезакаленного состояния, составляет 3 часа для сплава Д1 и 2 часа для сплава Д16.

Задержка процесса естественного старения выдержкой при отрицательных температурах после закалки алюминиевых сплавов Д1 и Д16 не понижает их конечные механические свойства.

Операции холодной деформации можно проводить на сплаве Д1 в течение 3-х часов, а на сплаве Д16 в течение 2-х часов после внесения в условия производственного цеха. Для этого время выдержки при отрицательных температурах должно быть не более 48 часов, если температура составляла -10°C , а воздействие холода началось непосредственно после закалки. Зависимость свойств сплавов от времени естественного старения после выдержки (24 часа) при отрицательной температуре в свежезакаленном состоянии представлена на рисунке 5.

С целью сокращения длительного старения и предотвращения коррозионного разрушения деталей в процессе эксплуатации, опробованы режимы ускоренного старения горячедеформированных заготовок из сплава АК6 после закалки. Установлено, что повышение температуры до 175°C позволяет обеспечить после выдержки в течение 3 часов получение механических свойств, соответствующих требованиям ОСТ 1.90073-85 (рисунок 6).

Однако для сплавов системы Al-Mg-Si-Cu характерна склонность к коррозионному растрескиванию, обусловленному постоянно действующими напряжениями., что требует дополнительной проверки обоснованности предлагаемого режима обработки.

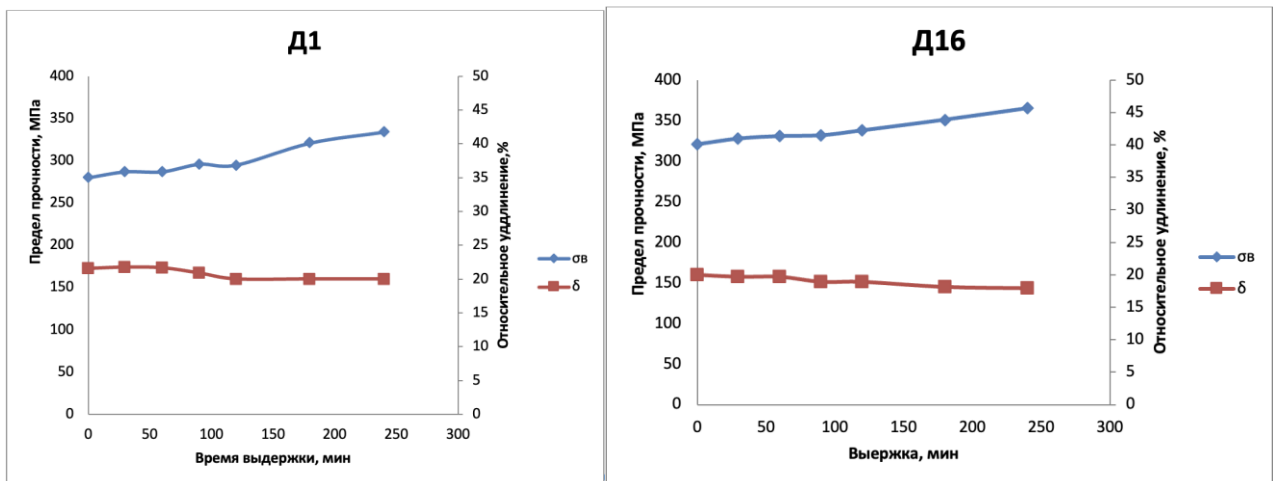


Рисунок 5 - Зависимость свойств сплавов от времени естественного старения после выдержки (24 часа) при отрицательной температуре в свежезакаленном состоянии.

Результаты испытаний на РК, МКК и ОК показали, что стойкость образцов, обработанных по традиционному режиму старения (12 часов при 160 °С), ниже, чем по ускоренному. Так, первые коррозионные точки на образцах с длительным старением появились через 2 суток испытания, а на образцах по ускоренному режиму через 3 суток. Стойкость к РК также выше у образцов, состаренных по ускоренному режиму. Склонность к МКК в целом одинакова для обоих режимов старения. Полученные данные позволяют рекомендовать режим с применением ускоренного старения для промышленной апробации и использования.

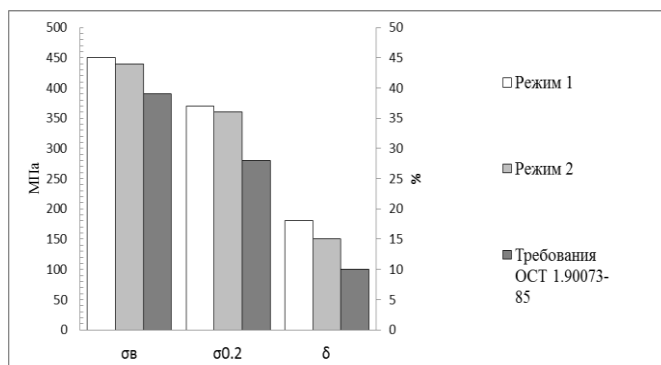


Рисунок 6 - Зависимость механических свойств штамповок из сплава АК6 от режима старения.

В связи с выявленной проблемой неудовлетворительной эксплуатации высокоответственных деталей были исследованы случаи разрушения штуцеров из сплава АД31Т, используемых при заправке и герметизации тепловых труб термостабилизирующих систем космических аппаратов, в процессе их обжатия после окончания заправки. Установлено, что данная проблема обусловлена охрупчиванием сплава в зонах термического влияния сварки.

Повышение твердости в зонах термического влияния для сплава АД31Т вызвано трансформацией зонностаренного состояния сплава в состояние с присутствием выделений фазового типа, что снижает пластичность и деформируемость сплава. Исследования микроструктуры в поляризованном свете показали, что в участках сплава, прилегающих к зонам сварки, зеренная структура сплава не выявляется, в отличие от участков, отдаленных от них (что характерно и для сплава в исходном состоянии).

Интенсификация охлаждения зон термического влияния сварки за счет применения накладных медных теплоемных колец позволяет исключить образование выделений фазового типа и предотвратить появление трещин при сплющивании образцов и обжатии штуцеров.

В четвертой главе представлены результаты исследований микроструктуры, механических свойств в интервале температур от -196°C до 200°C и их сохраняемости в процессе УКИ, а также коррозионной стойкости сплава системы Al-Mg-Sc.

В главе 1 показана перспективность применения сплавов системы Al-Mg-Sc в РКТ. Однако их использование в реальных изделиях невозможно без исследований микроструктуры и свойств промышленных полуфабрикатов, изготовленных в различных условиях деформирования, а также закономерностей трансформации параметров микроструктуры и значений свойств при различных внешних воздействиях.

Характерная структура катаных полуфабрикатов состоит из нерекристаллизованных зерен, вытянутых в направлении деформации (рисунок 7), с характерными для данного сплава крупными интерметаллидами.

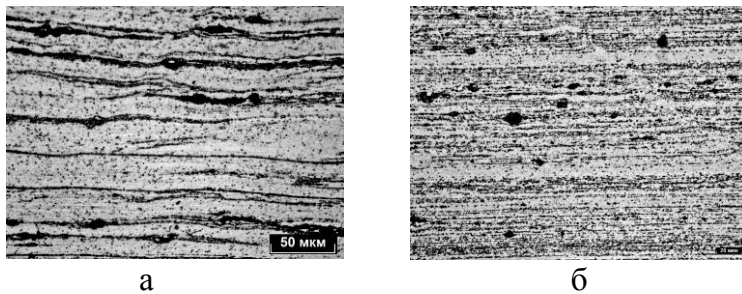


Рисунок 7 - Характерная структура катаных полуфабрикатов: а) плита б) лист

Степень деформации зерен (отношение длины к толщине) увеличивается по мере увеличения обжатия.

При деформации в катаной плите ($\approx 90\%$) сохраняются унаследованные от слитка достаточно грубые границы зерен. Увеличение общей степени деформации в катаном листе от 98 % до 99 % значительно увеличивает площадь поверхности деформированных зерен. Фазы кристаллизационного происхождения на границах зерен приобретают прерывистый характер.

Структура сплава представлена преимущественно твердым раствором $\alpha(\text{Al})$. Также наблюдаются фазы в виде дисперсоидов переходных металлов размером менее 1 мкм (рисунке 8).

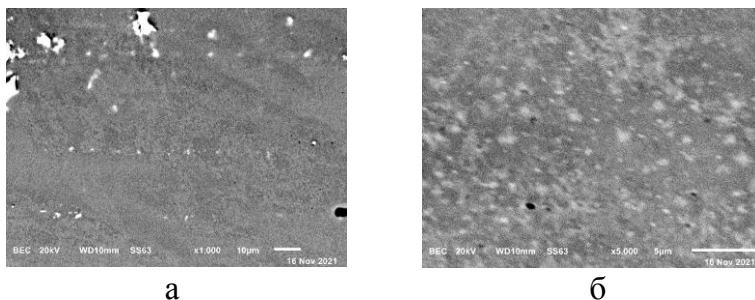


Рисунок 8 - Характерная структура полуфабриката: а) зернограницные фазы на базе алюминия с магнием и кремнием (темные) и с железом и марганцем (светлые); б) дисперсоиды переходных металлов в зерне и на границах зерен.

На границах зерен присутствуют фазы алюминия с магнием, по составу близкие к β -фазе (Al_3Mg_2), алюминия с магнием и кремнием, наиболее вероятно, AlMgSi и Al_2MgSi_2 , и сложные фазы на базе алюминия с железом и марганцем, предположительно $\text{Al}_{0,5}\text{Fe}_{0,9}\text{Mn}_{0,6}$, которая может содержать переходные металлы в различных комбинациях. На границах зерен встречаются эвтектика Al-Cu и кремнийсодержащая фаза (рисунок 9).

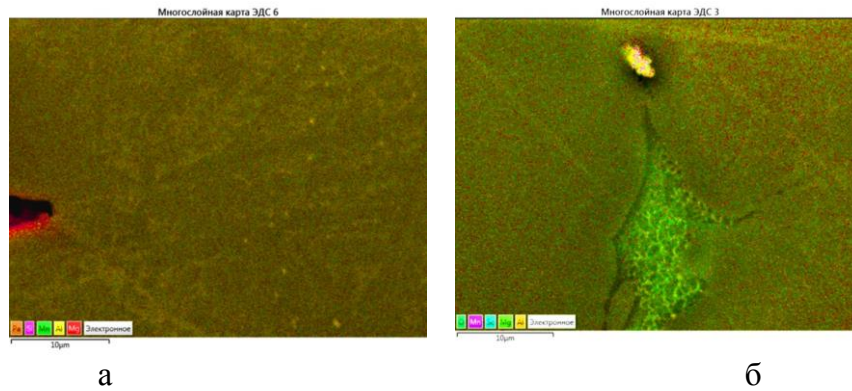


Рисунок 9 - в структуре сплава на границах зерен: а) кремнийсодержащая фаза; б) эвтектика Al-Cu

Полученные зависимости механических свойств от температуры испытаний и вида полуфабриката представлены на рисунках 10 – 12.

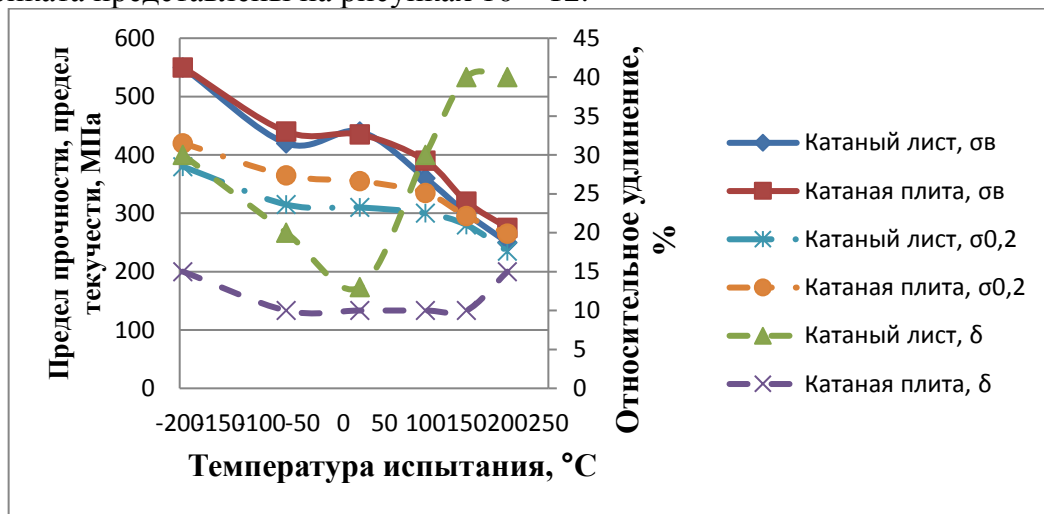


Рисунок 10 - Зависимость механических свойств катаных полуфабрикатов в доленом направлении от температуры испытания

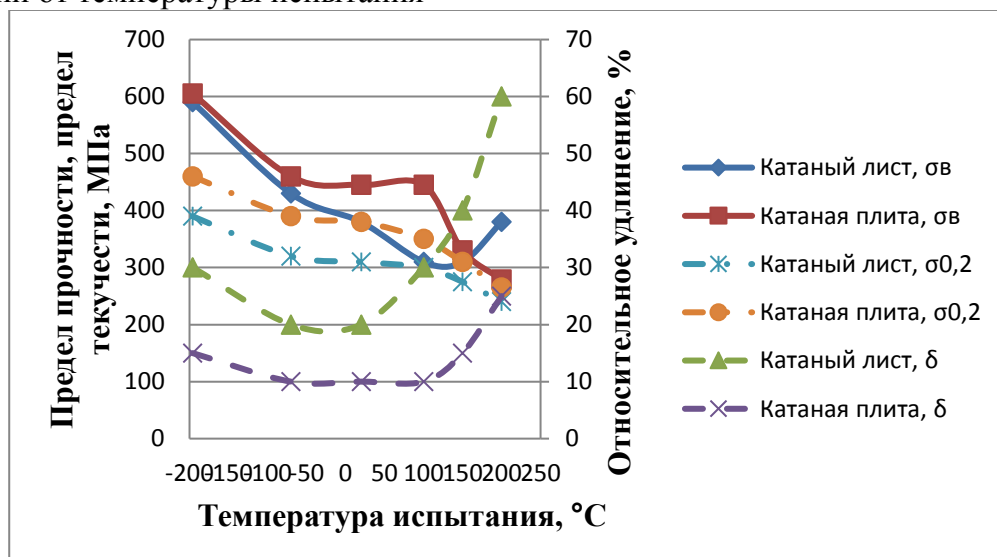


Рисунок 11 - Зависимость механических свойств катаных полуфабрикатов в поперечном направлении от температуры испытания

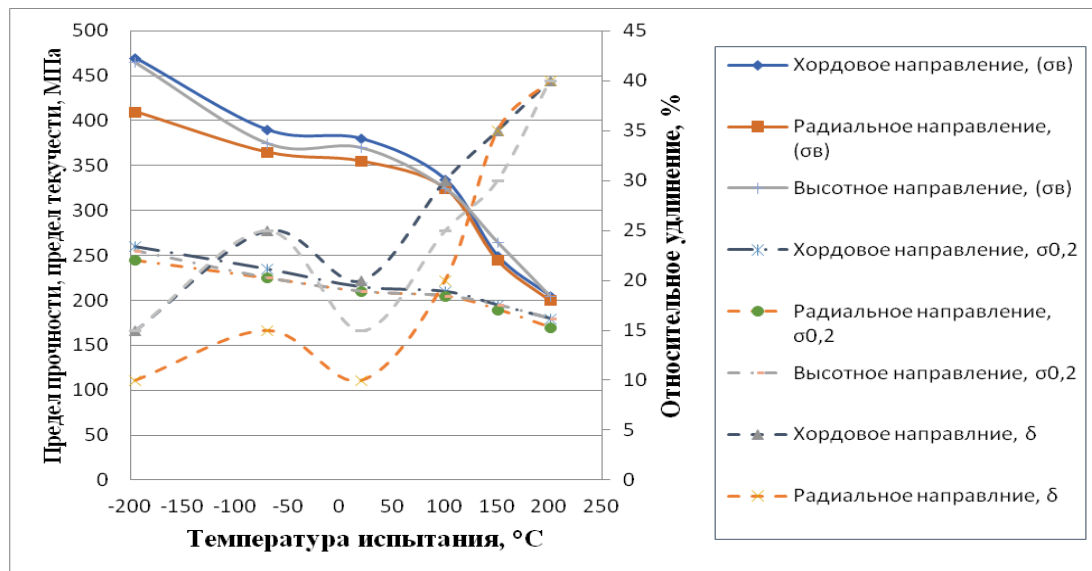


Рисунок 12 - Зависимость механических свойств от температуры испытаний и направления деформации для ковального полуфабриката

Катаные полуфабрикаты из сплава системы Al-Mg-Sc обладают высоким уровнем механических свойств во всем диапазоне температур. σ_v плит при $T_{\text{комн.}}$ в поперечном направлении равен 450 МПа и 440 МПа в долевом направлении. При температуре -196°C - 610 МПа и 550 МПа соответственно. δ плит при $T_{\text{комн.}}$ равно 10% вне зависимости от направления проката, а при -196°C равно 15% и также не зависит от направления проката. σ_v листов при $T_{\text{комн.}}$ в поперечном направлении равен 430 МПа и 440 МПа в долевом направлении. При температуре -196°C - 590 МПа и 550 МПа соответственно. δ листов при $T_{\text{комн.}}$ в поперечном направлении составляет 20% и 13% в долевом направлении, а при -196°C равно 30% и не зависит от направления проката. Нагартованное состояние не оказывает значительного влияния на снижение σ_v , однако уровень пластичности у отожженных листов выше. При этом сравнение $\sigma_{0,2}$ катаных полуфабрикатов показывает, что нагартованные плиты в этом показателе превосходят отожженные листы: 360 МПа и 310 МПа в долевом направлении при $T_{\text{комн.}}$ и 420 МПа, и 380 МПа в долевом направлении при -196°C .

Механические свойства поковок существенно ниже, чем у катаных полуфабрикатов. Максимальный уровень свойств наблюдается в высотном направлении. При $T_{\text{комн.}}$ σ_v равен 370 МПа, $\sigma_{0,2}$ 210 МПа, а δ составляет 15%. При -196°C σ_v равен 470 МПа, $\sigma_{0,2}$ 260 МПа, а δ составляет 15%. Испытание ударной вязкости и последующий анализ изломов показывает, что поковки характеризуются высоким уровнем неоднородности и выделением избыточных фаз кристаллизационного происхождения по границам зерен, что связано с низкой степенью проработанности структуры в процессе деформации, что свидетельствует о необходимости совершенствования технологииковки.

Для исследуемого сплава наблюдается одновременное увеличение как прочности, так и пластичности с понижением температуры, что является уникальным сочетанием свойств. Подобный эффект наблюдается в исследуемом сплаве после различных условий деформации и объясняется относительно низкой плотностью дислокаций в сплаве после деформации, что увеличивает ресурс пластичности в исследуемом интервале температур.

Фактографические исследования показывают, что изломы имеют волокнистое строение; на всей поверхности излома видны глубокие ямки и непротяженные расслоения. Однако в образцах с низким значением пластичности излом менее однородный, присутствует большее количество расслоений на всей поверхности излома. Это может являться следствием неоднородности микроструктуры, наличием в ней крупных частиц включений или интерметаллидов, а также их скоплений. Образцы испытанные при -196°C , также имеют вязкий волокнистый излом.

При $T_{\text{комн.}}$ разрушение происходит по вязкому транскристаллитному механизму. Наличие ямочек конической формы на изломе сплава указывает на ограниченное количество центров зарождения микротрещин – при росте нагрузки рост микропор опережал их слияние. При -196°C также наблюдается преимущественно вязкое разрушение. Наличие мелкозернистой структуры, обусловленной технологией проката и влиянием скандия, приводит к уменьшению размера микропор, способных к росту, в результате чего формирование поверхности разрушения этих материалов даже при низкой температуре требует большей пластической деформации.

По результатам механических и УКИ возможно установить 14 летний срок сохраняемости свойств сплава системы Al-Mg-Sc в условиях хранения изделий с учетом возможного снижения механических характеристик: в листах в поперечном направлении δ до 32 %, а в плитах в долевом направлении σ_b до 10 %, $\sigma_{0,2}$ до 20% и $\sigma_{0,2}$ в поперечном направлении до 15%.

Исследование коррозионной стойкости сплава показали, что листы из исследуемого сплава обладают достаточной стойкостью против ОК, коррозии под напряжением, МКК и РК. Для плит выявлена стойкость против ОК, коррозии под напряжением и РК, при этом выявлен склонность к МКК, что связано с напряженным состоянием плит, вызванным нагартовкой при изготовлении полуфабриката. Вдоль вытянутых зерен по краям образцов из плиты наблюдаются как единичные поражения, так и скопления в виде туннельного питтинга и коррозионных язв. Склонность плит к МКК требует учета данного факта и, как следствие, разработки мероприятий по защите поверхности изделий из плит в процессе их изготовления и хранения.

В пятой главе диссертации рассмотрено влияние СТП на структурные изменения сплава Al-Mg-Sc. Оценены механические свойства в диапазоне температур от 200 до -196°C и их сохраняемость при УКИ. Изучено влияние режимов сварки на качество соединений и проведена классификация внутренних дефектов с определением их потенциальной опасности. Рассмотрены вопросы особенностей неразрушающего контроля сварных соединений, выполненных СТП.

Формирование соединения при СТП происходит в условиях, изменяющихся напряженно-деформированного состояния пластифицированного металла, сопротивления деформации различных зон соединения и несвободной усадки.

Макроанализ и микроанализ устанавливает особенности строения сварных соединений, выполненных СТП. В общем случае сварное соединение плит толщиной 25 мм из сплава Al-Mg-Sc включает: ядро, имеющее слоистую структуру; зону основного металла, подверженную объемному сжатию, с ориентированной структурой; зону термического влияния (ЗТВ), прилегающую к зоне термомеханического воздействия (ЗТМВ), вне области объемной деформации; мениск со слоистой, как и ядро, структурой, сформированный потоком энергии трения бурта о поверхность соединяемых кромок; зона термомеханического воздействия под мениском (ЗТМВм).

Особенности структуры определяют возможность возникновения специфических для данного вида сварки дефектов.

Слоистая структура ядра объясняется тем, что стержень сварочного инструмента отделяет с фронтальной поверхности образуемого им канала, слой металла, который фрагментируется в зависимости от конструкции и наклона стержня и пластически перемещается в тыльную зону за канал. Следует отметить, что активное перемешивание пластифицированного металла при этом отсутствует. Перемещаемый слой может быть лишь в большей или меньшей степени фрагментирован. В тыльной зоне за стержнем в условиях объемного сжатия и пластической деформации при температуре до плюс $350-570^{\circ}\text{C}$ происходит формирование сварного соединения. В результате сжатия слои металла

сближаются до расстояния действия межатомных сил, возникают участки (мостики) схватывания.

Сдвиги в процессе пластической деформации способствуют развитию и одновременному образованию новых мостиков, вплоть до полного установления межатомных связей в месте соединения (рисунок 13).

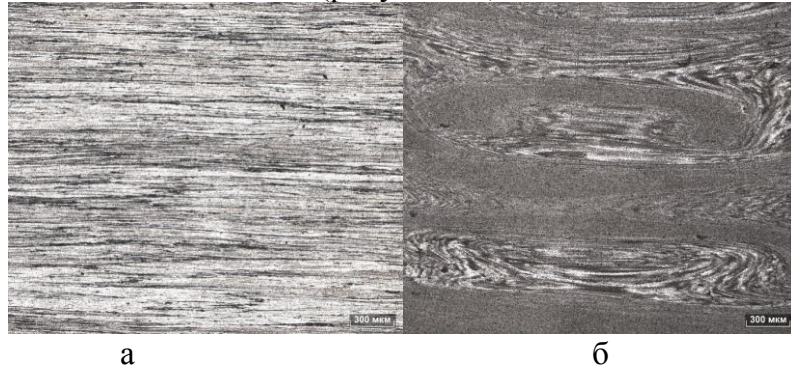


Рисунок 13 - Структура основного металла (а) и ядра сварного шва (б) соединения плит из сплава Al-Mg-Sc толщиной 25 мм.

Исследование сварного соединения с дефектом канального типа выявляет существенную неоднородность сварного шва, разделяющую шов на две зоны – подповерхностную (максимум 2,36 мм от поверхности) и основную (рисунок 14а). При этом можно отметить, что перемешивание в основной зоне осуществляется по оси сварного шва и имеет в целом плотную, хорошо спрессованную «луковичную» структуру. В свою очередь подповерхностная зона шва имеет неплотную и неоднородную структуру с различными центрами перемешивания (рисунок 14б). Видно, что в зоне расположения дефекта не сформировалась плавная переходная структура между сваркой и основным материалом, края несплошности имеют преимущественно прямоугольную или острую форму.

Исходя из выявленной структуры может быть предложена модель формирования шва СТП, предполагающая, что на первом этапе металл в пластичном состоянии формирует две зоны. Первая – основная и она образуется преимущественно под действием деформации от вращения пина; в ней четко прослеживается ось, вокруг которой формируются деформационные U-образные слои, расходящиеся к границам швам с повышенной плотностью на периферии. Вторая – подповерхностная образуется в результате того, что металл, выталкиваемый на поверхность, спрессовывается заплечником пина. Необходимо отметить, что зоны отличны между собой, и это можно объяснить различной степенью деформации и нагартовки, а также разнонаправленностью волокна. На втором этапе, две сформировавшиеся зоны шва, взаимодействуют друг другом как две системы и металл, выталкиваемый на поверхность, уже не формирует подповерхностную зону, а деформирует ее, при этом зоны начинают диффундировать и образуют переходную область.

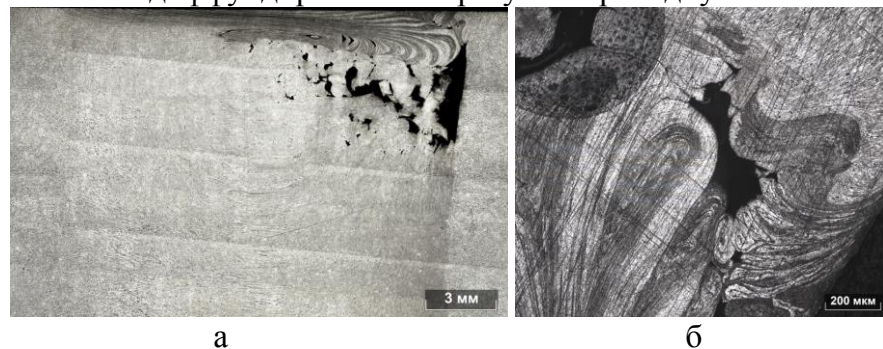


Рисунок 14 - Внешний вид сварного соединения: а) с дефектом; б) фрагмент подповерхностной зоны

Также можно отметить, что для всех швов справедливо вытягивание металла по направлению вращения пина и формирование с противоположной стороны резкой границы. При этом волокно шва перпендикулярно ориентированно относительно проката.

Правильно подобранный режим для изготовления сварных соединений СТП обеспечивает высокие прочностные характеристики и низкую вероятность образования дефектов. В процессе отработки режимов установлено, что для сварки плит толщиной 25 мм из сплава Al-Mg-Sc в нагартованном состоянии для обеспечения плотной однородной структуры могут быть рекомендованы режимы, включающие в себя: скорость перемещения инструмента – 50 мм/мин, скорость вращения инструмента – 150-170 об/мин, угол атаки – 2-3°, усилие прижима – 65-70 кН.

По результатам оценки статических механических свойств установлено, что при $T_{\text{комн.}}$ коэффициент прочности сварного шва, определяемый как отношение предела прочности соединения к пределу прочности основного материала, равен 83%, а при -196°C его значение составляет 90%. Разрушение сварного соединения при этом происходило в зоне основного материала. Такое поведение сплава связано с локальным упрочнением сварного соединения в зоне перемешивания и снижением степени нагартовки в зоне термовлияния. Результаты исследования механических свойств представлены на рисунке 15.

Фрактографический анализ этих образцов показал, что во всем исследуемом интервале температур основным механизмом разрушения является вязкий транскристаллитный. Кроме того, значительно меньший по сравнению с основными материалами размер ямок отрыва свидетельствует о большей устойчивости зоны перемешивания к зарождению и распространению трещин. Данный эффект, по всей видимости, связан с сильным измельчением зеренной структуры зоны перемешивания в процессе сварки.

В процессе проведения ускоренных климатических испытаний установлено, что снижение σ_b сварных соединений плит составляет при сварке трением в долевом направлении до 10 %. При сварке трением плит в поперечном направлении снижение σ_b отсутствует. При сварке трением листов в долевом и поперечном направлении снижение σ_b отсутствует.

По результатам испытаний можно сделать вывод, что металл сварного шва на листе и плите, полученный методом СТП, обладает достаточной коррозионной стойкостью к РК и ОК. Однако после испытаний на МКК сварных соединений на поверхности швов выявлены области коррозионного поражения. Области МКК в виде разветвленной сетки сосредоточены, в основном, в местах стыковки слоев, однако встречаются и на поверхности сварных соединений. Склонность к МКК связана со структурными напряжениями, сформировавшимися в результате деформации при сварке.

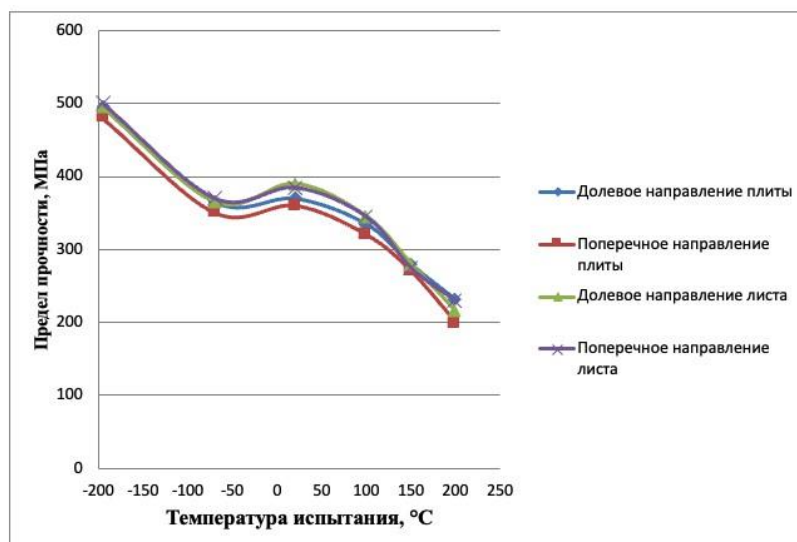


Рисунок 15 - Результаты испытания механических свойств сварных соединений СТП

Анализ структуры сварных швов в процессе обработки режимов сварки трением с перемешиванием позволяет выделить 4 основных типа внутренних дефектов: канальная пора (размер может варьироваться от 0,1 мм до 2 мм); твердое включение (размер варьируется от 0,1 до 3 мм); непровар (размер дефекта от 0,01 мм); Kissing Bond – дефект имеет форму S-образной кривой с частичным слипанием кромок, образуется как начальная стадия непровара или является составляющей частью непровара.

Сравнение механических характеристик и изломов бездефектного образца, разрушившегося по зоне термического влияния, и образцов с канальным дефектом или непроваром, разрушившихся по шву, показывает опасность внутренних дефектов (таблице 1).

Таблица 1 – Влияние дефектов на механические свойства сварного соединения

Направление волокна	Температура, °С	Предел прочности, (σ_v^{CB}), МПа	Примечание
Поперечное	20	360	Без дефекта
		280	Непровар
		330	Канал

Эффективность выявления дефектов опробована с применением следующих методов: рентгенографии, капиллярного контроля, эхо-импульсного ультразвукового метода (ЭИУЗМ) с применением датчика с фазированными решетками, а также ультразвукового дифракционно-временного метода (УЗДВМ).

Рентгенография эффективно выявляет твердые включения и канальные поры с раскрытием больше 0,5 мм. Капиллярный контроль является единственным из опробованных методов, позволяющим выявить дефекты типа KissingBond и непровар с раскрытием менее 0,1 мм. ЭИУЗМ с применением фазированных решеток показывал высокую вероятность выявления дефектов типа твердое включение, канал с раскрытием от 0,1 мм и непровар с раскрытием от 0,1 мм. При этом применение датчиков с фазированными решетками целесообразно применять для толщин от 4 мм и выше, так как обеспечивается возможность провести контроль в одном положении датчика относительно оси шва за счет применением широкого спектра углов. Для контроля толщин от 4 мм и меньше высокую эффективность показал ЭИУЗМ с применением одноэлементного преобразователя с углом ввода 75°. УЗДВМ позволяет эффективно выявлять дефект в центральной зоне шва и для толщин выше 4 мм. Дефекты, располагающиеся у поверхности и у корня шва, имеют низкую вероятность выявления при использовании данного метода.

С учетом существующих ограничений опробованных методов неразрушающего контроля можно рекомендовать ЭИУЗМ с датчиками на фазированных решетках в сочетании с УЗДВМ для проведения сплошного контроля при двухстороннем доступе к сварному соединению, при одностороннем доступе необходимо применять только ЭИУЗМ.

В качестве экспертных методов могут применяться рентгенографический метод для выявления и координации твердых включений, связанных с разрушением сварочного инструмента или затягивания материала подкладки, и капиллярный контроль для выявления непроваров малого раскрытия или дефекта типа KissingBond, связанных с выявлением в процессе визуального контроля факта несоответствия сварочного инструмента по длине, смещения кромок или инструмента относительно оси шва.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в сплавах системы Al-Si-Mg применением традиционных методов улучшения литой структуры, основанных на обязательном присутствии в химическом составе сплава марганца, не удастся предотвратить образование наследуемых из

исходных материалов хрупких пластин железосодержащей фазы. Для повышения качества отливок (исключения в структуре раковин, недопустимой пористости) рекомендуется использовать для приготовления шихты чушек с предварительно модифицированной структурой, в которой отсутствуют включения пластин фазы переменного состава $AlxSiyFezMnq$.

2. Случаи разрушения штуцеров из сплава АД31Т, используемых при заправке и герметизации тепловых труб термостабилизирующих систем космических аппаратов, в процессе их обжарки после окончания заправки вызваны охрупчиванием сплава в зонах термического влияния сварки. Установлена взаимосвязь твердости в зонах термического влияния и трансформации зонносостаренного сплава в состояние с присутствием выделений фазового типа, что снижает пластичность и деформируемость сплава. Для исключения охрупчивания предложено интенсифицировать охлаждение зон термического влияния использованием медных теплосъемных колец.

3. Установлено, что уровень свойств штамповок из сплава системы Al-Mg-Si-Cu определяется степенью распада пересыщенного твердого раствора, которая может достигаться при разных температурах старения. Механические свойства изделий, состаренных по ускоренному режиму (температура старения 175 °С, время выдержки 3 часа), несущественно ниже, чем при старении по типовому режиму (температура старения 160 °С, время выдержки 12 часов): предел прочности ниже на ~ 2,0 %, предел текучести ~ на 5,0%, относительное удлинение – на 17,0 %. При этом режим термической обработки по ускоренному варианту обеспечивает получение характеристик механических свойств, соответствующих требованиям ОСТ 1.90073-85. Образцы, термообработанные по типовому режиму, проявляют меньшую стойкость к расслаивающей и общей коррозии, чем образцы, термообработанные по ускоренному режиму. Для обоих режимов характерна одинаковая стойкость к межкристаллитной коррозии, повреждения от которой расположены по всему периметру поверхности шлифов с максимальной глубиной проникновения 650 мкм.

4. Установлено, что свежезакаленное структурное состояние заготовок и деталей из листовых алюминиевых сплавов Д1 и Д16, обеспечивающее повышенные пластичность и способность к деформации, можно сохранить определенное время, помещая их немедленно после закалки в условия отрицательных температур: так при температуре -10°С оно сохраняется до 48 часов. Время выдержки при комнатной температуре (инкубационный период) до начала ускоренного процесса естественного старения после закалки и выдержки при отрицательных температурах, обеспечивающей сохранение свежезакаленного состояния, составляет 3 часа для сплава Д1 и 2 часа для сплава Д16. Задержка процесса естественного старения выдержкой при отрицательных температурах после закалки алюминиевых сплавов Д1 и Д16 не понижает их конечные механические свойства. Операции холодной деформации можно проводить на сплаве Д1 в течение 3-х часов, а на сплаве Д16 в течение 2-х часов после внесения в условия производственного цеха. Сохранение свежезакаленного состояния позволяет оптимизировать временные параметры технологии, сочетающей закалку и холодную деформацию.

5. Выявлено, что полуфабрикаты (плиты, листы, поковки) из алюминиевых сплавов, экономно легированных скандием, обладают высоким комплексом механических свойств в интервале температур от -196°С до 200°С и, с учетом тенденции к уменьшению цены на скандиевые лигатуры и хорошей технологичностью при обработке давлением, являются наиболее перспективными материалами для промышленного освоения и внедрения в ракетно-космической отрасли взамен традиционного сплава АМг6. Структура исследуемого сплава Al-Mg-Sc определяется условиями деформации, реализуемыми при различных условиях формообразования. При этом при использовании нагартованных плит необходимо обеспечивать защиту от воздействия агрессивной среды, ввиду склонности данных полуфабрикатов к межкристаллитной коррозии. По результатам УКИ установлено,

что полуфабрикаты при сроке хранения 14 лет проявляют снижение механических характеристик: в листах в поперечном направлении относительного удлинения до 32 %, а в плитах в долевом направлении предела прочности до 10 %, предела текучести до 20% и в поперечном направлении предела текучести до 15%.

6. Сварные соединения сплавов системы Al-Mg-Sc, полученные методом сварки трением с перемешиванием, обладают высокой коррозионной стойкостью и механическими свойствами, которые не зависят от направления волокна и способа получения полуфабриката в условиях комбинированной обработки. Выявлены внутренние специфические дефекты СТП, которые можно разделить на 4 типа: канал, твердое включение, непровар, Kissing Bond, а также проанализированы условия их образования. Качество сварных соединений СТП зависит от давления на инструмент, условий разогрева и теплоотвода, а также от качества и конструкции сварного инструмента и оснастки. Для сварки плит толщиной 25 мм из сплава Al-Mg-Sc в нагартованном состоянии для обеспечения плотной однородной структуры могут быть рекомендованы режимы, включающие в себя: скорость перемещения инструмента – 50 мм/мин, скорость вращения инструмента – 150-170 об/мин, угол атаки – 2-3°, усилие прижима – 65-70 кН. Для сварных соединений СТП из сплава Al-Mg-Sc возможно обеспечить прочность не менее 90% от исходного состояния для листов и 85-90% для нагартованных плит, что превышает уровень механических свойств, который может быть обеспечен аргоно-дуговым методом сварки. По результатам ускоренных климатических испытаний подтверждена возможность установить 14 летний срок сохраняемости свойств сварных соединений СТП исследуемого сплава в условиях хранения. Для сварных соединений из листов и плит необходимо обеспечивать защиту от воздействия агрессивной среды, ввиду склонности данных полуфабрикатов к межкристаллитной коррозии. Вероятность образования структурных дефектов сварного шва определяется технологическими режимами СТП, при этом даже дефекты, имеющие незначительные размеры и разориентировку, существенно понижают конечные механические свойства. Рациональное сочетание методов неразрушающего контроля, включающее эхо-импульсный методом с датчиком на фазированных решетках совместно с дифракционно-временным методом, позволяет эффективно контролировать качество сварных соединений в изделиях, получаемых по особо важным критичным технологиям. В случае выявления при визуальном контроле факта отклонения от технологического процесса сварки, в качестве экспертных методов должны применяться метод рентгенографии и капиллярный контроль, позволяющие расширить возможности ультразвуковых методов в части выявления дефектов малого раскрытия и их точной координации.

Список публикаций по теме диссертации:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Казаков, М.С. Влияние технологически режимов изготовления штампованных заготовок на прочностные свойства деталей ракетно-космической техники/ В.С. Муратов, М.С. Казаков // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). -2021. - №6. - С.281-287.
2. Казаков, М.С. Технологичность сплавов системы Al-Mg-Si при изготовлении тонкостенных трубчатых изделий с использованием сварки и обжатия //В.С. Муратов, М.С. Казаков //Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). - 2021. - №8. - С.348-353.
3. Казаков, М.С. Влияние выдержки при отрицательных температурах после закалки на процессы последующего старения сплавов системы Al-Mg-Cu //В.С. Муратов, М.С. Казаков //Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). - 2022. - №1. - С.37-41.

4. Казаков, М.С. Влияние ускоренного старения на механические свойства и коррозионную стойкость сплавов системы Al-Cu-Mg-Si / В.С. Муратов, М.С. Казаков // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). - 2022. - №6. - С.271-276.

5. Казаков, М.С. Влияние структурно-фазового состояния исходного материала шихты на качественные характеристики отливок из сплава Al-Si-Mg / В.С. Муратов, М.С. Казаков // Безопасность техногенных и природных систем. - 2023. - №3. - С.67-76. (Журнал соответствует научной специальности 2.6.17, **ВАК, К2**)

6. Казаков, М.С. Влияние режимов сварки трением с перемешиванием на структуру сварного соединения нагартованного алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc / В.С. Муратов, М.С. Казаков // Сварка и диагностика. - 2023. - №4. - С.45-50. (Журнал соответствует научной специальности 2.6.17, **ВАК, К2**)

Другие публикации

7. Казаков, М.С. Перспективы применения алюминиевых сплавов легированных РЗМ в конструкциях ракетно-космической техники / М.С. Казаков // Сборник статей VII Всероссийской научно – технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2021. -С.339-343

8. Казаков, М.С. Особенности изготовления заправочных штуцеров из алюминиевых сплавов для термостабилизирующих систем / В.С. Муратов, М.С. Казаков // Современные материалы, техника и технологии, 2021. - №5 (38). - С.39-45.

9. Казаков, М.С. Технологические свойства алюминиевого сплава 1310Т при сварке и обжатии // В.С. Муратов, М.С. Казаков // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Высокие технологии в машиностроении». – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2021. – С.238-242

Научное издание

Казаков Михаил Сергеевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева»

(протокол № 16 от «9» октября 2023г.)

Формат 60x84 1/16. Набор компьютерный

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.