

На правах рукописи



Малюх Марина Александровна

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ
СИСТЕМЫ Al–Si–Cu
С РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ**

Специальность

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: **Попова Марина Владимировна**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Материаловедение, литейное
и сварочное производство» ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный университет»

Официальные оппоненты: **Кондратьев Сергей Юрьевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы физики и
технологий материалов
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»
(г. Санкт-Петербург)

Меркулова Галина Александровна
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Металловедение и термическая
обработка металлов имени В.С. Биронта»
ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный университет»
(г. Красноярск)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2019 г. в 10⁰⁰ в ауд. 3П на заседании
диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный университет» по адресу: 654007,
г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, д. 42.


Факс (3843) 46-57-92.

E-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на
сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.252.01, д.т.н., профессор



Ольга Ивановна Нохрина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Наукоемкие и высокотехнологичные отрасли промышленности – аэрокосмическая, точные приборо- и машиностроение предъявляют высокие требования к надежности электровакуумной техники. Технический прогресс, в указанных отраслях, в значительной степени связан с созданием новых материалов специального назначения с регламентированным уровнем теплофизических свойств. Одной из актуальных научно-практических задач современного материаловедения является повышение эксплуатационной надежности на основе обеспечения высокой стабильности размеров металлических деталей и изделий при изменении температуры окружающей среды. Кроме того, для работы в условиях нестационарных магнитных полей требуются немагнитные материалы, обладающие высокими эксплуатационными свойствами, в том числе размерной стабильностью в сочетании с низкой плотностью и требуемым термическим коэффициентом линейного расширения (ТКЛР).

Для обеспечения размерной стабильности деталей необходимо, чтобы ТКЛР был малоизменяющимся в интервале температур эксплуатации. Достижения современной электровакуумной техники тесно связаны с успехами в области создания вакуум-плотных спаев металлов со стеклами разных марок. ТКЛР – важнейший параметр, определяющий выбор пары «стекло – металл» при изготовлении согласованных ненапряженных спаев. Необходимо, чтобы ТКЛР металла и стекла мало отличались друг от друга и в рассматриваемых интервалах температур их разница не превышала допустимых пределов.

В настоящее время отсутствует единая теория создания легких сплавов с регламентированными значениями ТКЛР, поэтому новые составы разрабатывают в основном эмпирическим путем.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию проблемы теплового расширения твердых тел и созданию сплавов с заданным ТКЛР посвящены работы зарубежных и российских ученых, таких как Ч. Гийом, П. Шевенар, Р. Вейсс, К. Андрес, П.Г. Стрелков, П.Н. Вьюгов, А.И. Захаров, С.И. Новикова, В.К. Афанасьев, И.Н. Фридляндер, Н.П. Нусс, И.Н. Кидин, М.М. Кантор, В.Г. Пермяков, Н.С. Акулов, В. Делингер, Ю.Н. Таран, Н.И. Варич, А. Кацуки, К. Хонда, С. Миура, Х. Скотт, Х. Масумото и др.

В настоящее время в качестве материалов с низкими значениями ТКЛР используются инвары – сплавы на основе железо-никель. В сплавы инварного класса вводят большое количество дорогих и дефицитных легирующих элементов, таких как никель, хром, вольфрам, ванадий, молибден и др. Кроме того, инвары обладают большой плотностью, что утяжеляет конструкции и приборы. Для повышения весовой отдачи материалов конструкций, их надежности и ресурса необходима разработка новых сплавов, обладающих не только удовлетворительными механическими свойствами, низким ТКЛР, но и малой плотностью.

В области легких сплавов лучшим достижением на сегодняшний день являются спеченные алюминиевые сплавы (САС) на основе системы Al–Si, которые получают методами порошковой металлургии. Для изготовления изделий из этих сплавов используется сложная многоступенчатая технология, предусматривающая применение сверхвысоких скоростей кристаллизации ($v_{\text{крист.}} \geq 10^4$ °C/с), получение и брикетирование порошков и горячее прессование заготовок. При удовлетворительных механических свойствах их ТКЛР не

меньше $13,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, поэтому актуальными являются исследования в области разработки новых легких материалов с регламентированным ТКЛР.

Диссертационная работа выполнена в рамках научной школы «Новые металлические материалы и технология их обработки» под руководством заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора В.К. Афанасьева.

Цель работы: Разработка новых составов и способов модифицирующей обработки сплавов систем Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu с регламентированным температурным коэффициентом линейного расширения.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Теоретическое обоснование выбора системы Al–Si–Cu в качестве основы для создания легких сплавов с регламентированным ТКЛР.

2. Экспериментальное исследование влияния кремния (10÷50 %), меди (5÷30 %) и модифицирующих обработок, на структуру, фазовый состав и ТКЛР алюминия марки А7 и сплавов систем Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu.

3. Установление зависимостей и закономерностей влияния скорости охлаждения расплава при кристаллизации и модифицирующей обработки карбонатами щелочноземельных металлов на структуру и ТКЛР алюминия марки А7 и сплавов систем Al–Si и Al–Cu.

4. Установление и научное обоснование механизмов влияния совместного легирования кремнием и медью, в количествах, значительно превышающих предел растворимости этих элементов в алюминии, на структурообразование, фазовый состав и величину ТКЛР тройных сплавов Al–Si–Cu.

5. Разработка для практического применения составов легких сплавов системы Al–Si–Cu с заданными ТКЛР и рекомендаций по областям и условиям их использования.

Научная новизна:

1. Развита теоретическая основа создания легких сплавов системы Al–Si–Cu с регламентированным ТКЛР, содержащих кремний и медь в количествах, многократно превышающих предел растворимости их в алюминии.

2. Получены новые количественные данные, установлены и научно обоснованы зависимости и закономерности влияния скорости охлаждения расплава при кристаллизации на структуру и ТКЛР алюминия марки А7 и сплавов систем Al–Si и Al–Cu.

3. Впервые установлены закономерности и научно обоснован механизм совместного влияния легирования кремнием и медью в количествах, многократно превышающих предел растворимости их в алюминии, на ТКЛР, микроструктуру и фазовый состав сплавов системы Al–Si–Cu.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Систематизированы результаты экспериментальных исследований и зарегистрирована база данных «Тепловое расширение алюминиевых сплавов, легированных кремнием и медью», которая может быть использована для проведения научных исследований в области теплового расширения металлов и сплавов и для совершенствования технологии получения алюминиевых сплавов специального назначения (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620959).

2. Для разработки новых и совершенствования существующих технологий производства алюминиевых сплавов определены зависимости влияния скорости охлаждения расплава при кристаллизации и модифицирующей обработки карбонатами щелочноземельных металлов на ТКЛР.

3. Разработаны новые составы высоколегированных легких сплавов системы Al–Si–Cu, имеющих низкие и стабильные значения ТКЛР в интервале температур 50–250 °С. Новые сплавы по величине ТКЛР конкурируют с железоникелевыми инварами и САС.

4. Получены зависимости влияния температуры эксплуатации на ТКЛР сплава 50% Si–40% Cu–Al.

5. Для различных составов легких сплавов системы Al–Si–Cu с заданными ТКЛР разработаны рекомендации по практическому применению для изготовления деталей и изделий специального назначения.

Реализация результатов:

1. Разработанные сплавы предназначены для производства деталей приборной техники, для которых необходимо сочетание высокой стабильности размеров в широком интервале температур и малого удельного веса. Результаты исследования рекомендованы к промышленному внедрению в условиях АО «РУСАЛ Новокузнецк».

2. Научные и технологические результаты работы внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке магистрантов, обучающихся по направлению подготовки «Материаловедение и технологии материалов».

Методология и методы исследования. Металлографические исследования проводили на различных масштабных уровнях с использованием методов оптической (световой микроскоп *OLYMPUS GX51*) и растровой электронной (микроскоп *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа *Oxford Instruments X-Act*) микроскопии. Газовый анализ осуществляли с помощью лабораторной установки *B-1* методом вакуум-нагрева в соответствии с ГОСТ 21132.1-98 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения водорода в твердом металле вакуум-нагревом». Дилатометрический анализ проводили с использованием дифференциального оптического фоторегистрирующего дилатометра системы *Шевенара*, прибора термомеханического анализа ТМА 402 фирмы «*NETZSCH-Geratebau GmbH*». Рентгенофазовый анализ осуществляли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН 2,0. Плотность определяли на аналитических весах *АДВ-200М*. Определение микротвердости проводили на цифровом микротвердомере модели *HVS-1000A* и полуавтоматическом микротвердомере *Wolpert Group 402 MVD*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность результатов исследований теплового расширения алюминия технической чистоты марки А7 и его сплавов после различных видов модифицирующей обработки.

2. Закономерности влияния легирования, последующей обработки сплава и условий кристаллизации на микроструктуру и тепловое расширение двойных алюминиевых сплавов систем Al–Si и Al–Cu.

3. Результаты исследований совместного легирования кремнием и медью, в количествах, многократно превышающих предел их растворимости в алюминии. Установленные зависимости и закономерности влияния микроструктуры, элементного и фазового составов на тепловое расширение сплавов системы Al–Si–Cu.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Материаловедение и термическая обработка металлов и сплавов по пунктам: 1. Изучение

взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм), в том числе диаграммами состояния с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов; 3. Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность научных выводов и результатов основывается на использовании апробированных методов исследования, применяемых в современном металловедении, обеспечивается большим объемом экспериментальных данных и применением известных методик их статистической обработки, не противоречит научным результатам, полученным другими исследователями.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество» (Новокузнецк, 2008 г.); Международной научно-практической конференции «Молодежь и наука: реальность и будущее» (Невинномысск, 2009 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2010 г.); Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2009 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении» (Кемерово, 2015 г.). Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015 г., 2017 г., 2019 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (Новосибирск, 2015 – 2018 гг.).

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментальных исследований по влиянию химического состава и различных видов модифицирующей обработки сплавов систем Al–Si, Al–Cu, Al–Si–Cu на особенности их структурообразования и величину ТКЛР; анализе и обобщении полученных результатов; формулировании положений, выносимых на защиту, выводов и заключения.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в **35** печатных работах, в том числе **9** работах в изданиях, рекомендованных ВАК, в **4** работах, индексируемых в базе данных Scopus, в **1** свидетельстве о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, изложена на 176 страницах, содержит 67 рисунков, 20 таблиц, список литературы из 166 наименований и приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор отечественных и зарубежных научных работ, посвященных факторам, влияющим на тепловое расширение сплавов и направлениям разработки их составов. Представлены данные о существующих в настоящее время промышленных сплавах с минимальным, низким и средним ТКЛР. Систематизированы факторы, влияющие на величину теплового расширения металлических материалов. Проведенный анализ литературных ис-

точников показал, что в настоящее время отсутствует единая теория создания легких сплавов с регламентированными значениями ТКЛР. Показано, что разработка составов новых сплавов и совершенствование технологий их получения требует дальнейших исследований. Исходя из анализа современного состояния вопроса, сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Во второй главе представлены использованные в работе материалы, дана характеристика методов исследования структуры и свойств. В качестве объектов исследования выбрали алюминий технической чистоты, двойные сплавы систем Al–Si и Al–Cu, тройные сплавы системы Al–Si–Cu. Были использованы следующие виды модифицирующей обработки: обработка расплава смесями ($\text{LiH}+\text{Cu}_3\text{P}$), $(\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3)$, продувка расплава водным раствором CuSO_4 и др., обеспечивающими формирование мелкодисперсной структуры сплава; изменение скорости охлаждения при кристаллизации. Термическая обработка сплавов была проведена в муфельных печах типа СНОЛ–3,5.3,5.3,5/3-43.У4,2 в интервале температур 150 – 500°C.

В работе применяли следующие методы исследования структуры и свойств: дифференциальный dilatометрический анализ; измерение плотности; оценка механических свойств материалов; структурные исследования были выполнены с использованием методов световой и растровой электронной микроскопии, особое внимание уделялось методам микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов.

В третьей главе представлены результаты исследований теплового расширения алюминия и сплавов систем Al–Si и Al–Cu. Показано, что за счет обработки расплава смесью карбонатов щёлочноземельных металлов без введения легирующих элементов, возможно снизить ТКЛР алюминия марки А7, до значений, которые имеет сплав, легированный 20 % Si (рисунок 1). Выявлена возможность снижения ТКЛР технического алюминия за счет изменения скорости охлаждения при кристаллизации (рисунок 2).

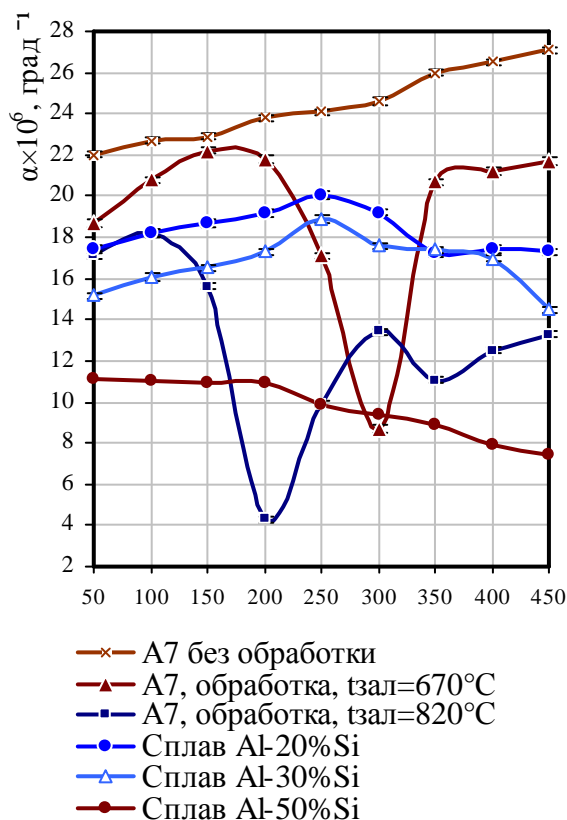


Рисунок 1 – Тепловое расширение технического алюминия, обработанного смесью карбонатов, и сплавов Al–Si

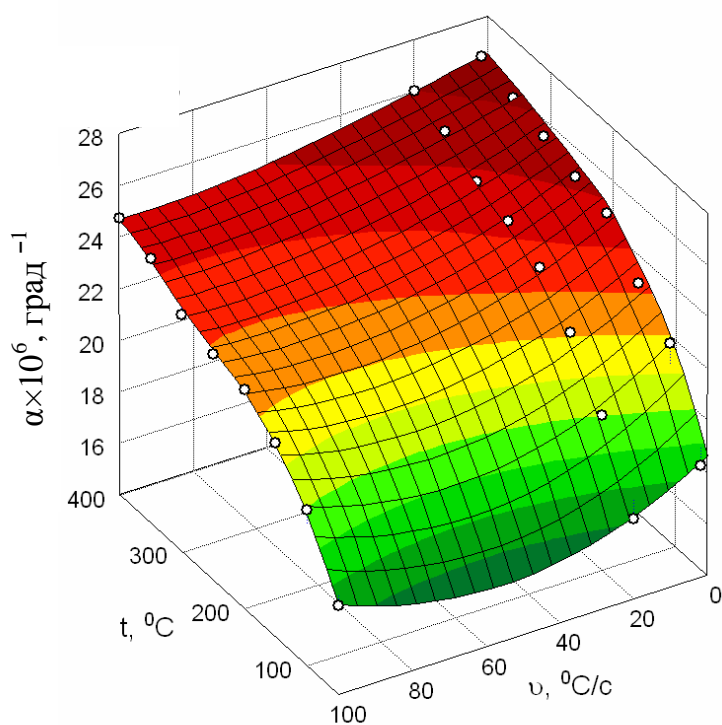
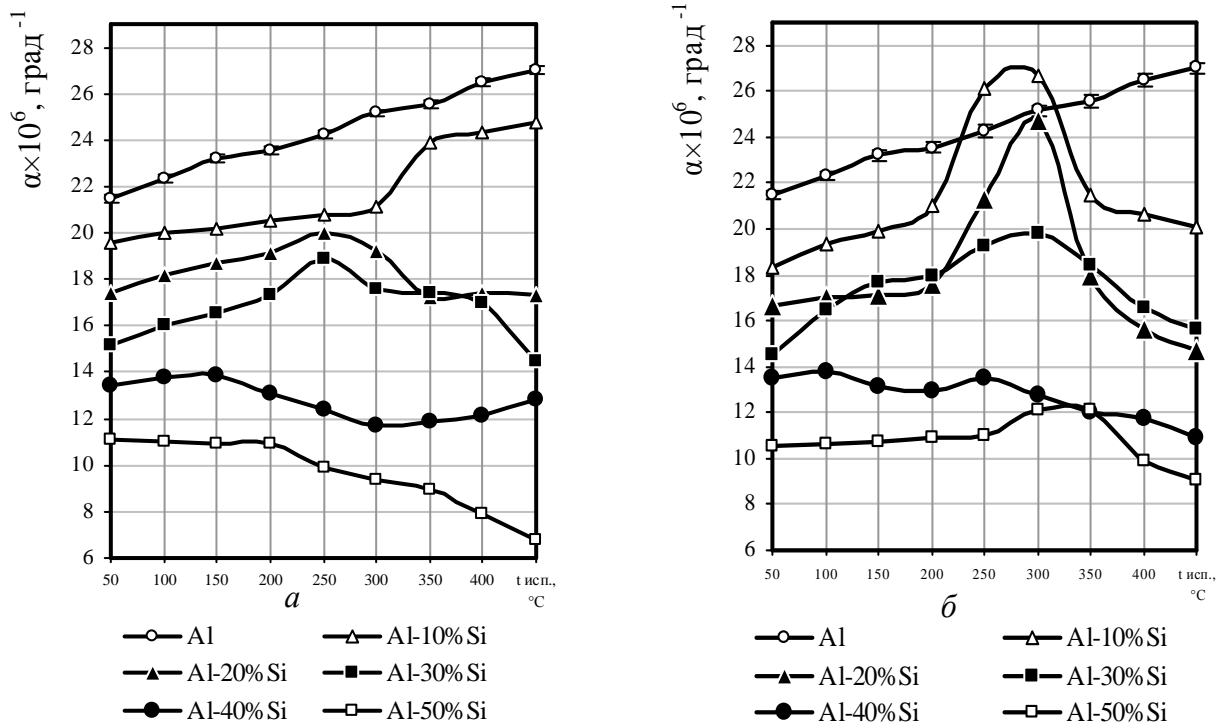


Рисунок 2 – Влияние скорости охлаждения при кристаллизации на ТКЛР технического алюминия, обработанного смесью карбонатов

Установлено, что кристаллизация, предусматривающая более высокие скорости охлаждения расплава (имитация жидкой штамповки и литье в алюминиевый кокиль) наиболее существенно снижают ТКЛР обработанного алюминия, по сравнению с более медленным охлаждением на асбесте.

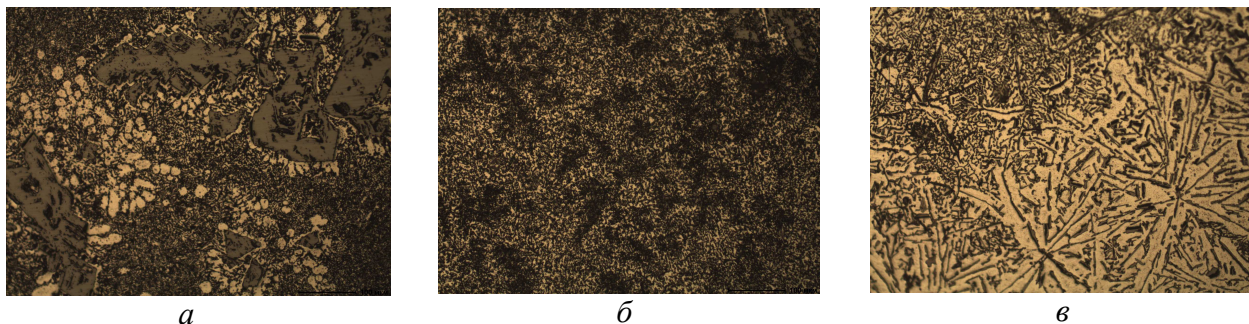
Металлографический анализ сплавов Al–11% Si, закристаллизованных с разной скоростью, показал, что жидкая штамповка способствует диспергированию структурных составляющих сплава. Установлено, что ТКЛР сплавов системы Al–11÷50 %Si с увеличением содержания кремния при температуре испытания $T_{\text{исп}}=50...100^{\circ}\text{C}$, важной для приборной техники, постепенно уменьшается со значений $22 \cdot 10^{-6}$ до $11 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ у сплава Al–50% Si (рисунок 3).



a – кристаллизация в алюминиевый кокиль, b – жидкая штамповка

Рисунок 3 – Тепловое расширение сплавов Al–Si

Исследования микроструктуры сплава Al–20% Si, выявили более дисперсные выделения кремнистой фазы и гораздо большую долю объема эвтектики при высокоскоростной кристаллизации (рисунок 4).



a – заливка в алюминиевый кокиль, b – жидкая штамповка, c – литье в песчаную форму

Рисунок 4 – Микроструктура сплава Al–20% Si $\times 200$

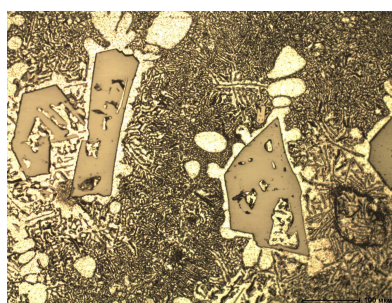
Дальнейшее увеличение содержания кремния в сплавах от 25 до 50% приводит к резкому укрупнению выделений первичного кремния и в меньшей мере проявляется влияние изменения скорости кристаллизации.

В ходе дилатометрических исследований высококремнистых сплавов получен состав на основе 60% Si–40% Al с практически постоянными значениями ТКЛР (таблица 1). Промышленные сплавы инварного типа, применяемые в настоящее время, такие как 52Н, 80НМВ, имеют средние значения ТКЛР в интервале температур от 20 до 400 °С, не превышающие $10,7$ и $12,4 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ соответственно. Тогда как полученный сплав 60% Si–40% Al имеет среднее значение коэффициента линейного расширения $8,8 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ в интервале испытаний от 50 до 450 °С. Важным его преимуществом перед сплавами инварного типа является меньший удельный вес.

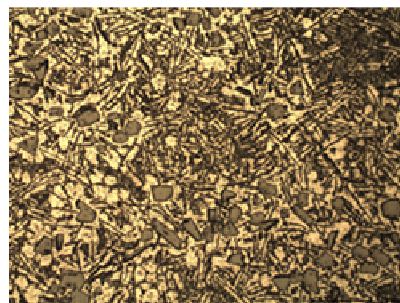
Таблица 1 – Тепловое расширение высококремнистых сплавов

Сплав	ТКЛР, $\alpha \times 10^6$ град $^{-1}$ при температуре, °С								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
50 % Si – 50% Al	11,2	11,0	10,9	10,8	9,8	9,2	8,9	8,0	7,8
55 % Si – 45% Al	10,0	9,9	9,8	9,8	9,8	9,2	9,2	9,1	9,0
60 % Si – 40% Al	9,0	8,9	8,5	8,8	8,9	8,9	8,9	9,0	9,0
65 % Si – 35% Al	8,9	8,9	9,0	10,5	10,4	7,9	7,7	7,1	6,0
70 % Si – 30% Al	8,2	8,2	7,9	8,6	9,0	7,4	6,9	6,5	6,0

Для улучшения структуры и обеспечения необходимого комплекса свойств проводили модифицирующую обработку сплавов Al–15÷40% Si смеси веществ, обеспечивающими повышенное содержание кислорода, водорода и азота в расплаве. Металлографический анализ показал, что обработка расплава смесью ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) приводит к уменьшению размеров кристаллов первичного кремния (КПК) до 50–60 мкм, однако происходит огрубление эвтектики (рисунк 5, а). Модифицирование смесью ($\text{LiH} + \text{Cu}_3\text{P}$) формирует мелкодисперсные КПК, размер которых не превышает 20 мкм, и они приобретают более округлую форму, при этом наблюдается укрупнение эвтектической составляющей (рисунк 5, б). Наиболее мелкодисперсная структура формируется после выстаивания расплава в атмосфере водяного пара (рисунк 5, в). В структуре сплава Al–20% Si увеличивается доля эвтектической составляющей и размеры округлых частиц КПК уменьшаются до 5–10 мкм.



а



б



в

а – обработка расплава смесью ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), б – обработка расплава смесью ($\text{LiH} + \text{Cu}_3\text{P}$),
в – обработка расплава водяным паром

Рисунок 5 – Микроструктура сплава Al–20% Si $\times 200$

Выявлено, что обработка расплава водным раствором CuSO_4 снижает ТКЛР сплавов Al–20÷40% Si в низкотемпературном интервале в среднем на 3 – 16% в сравнении со сплавами без обработки. Обработка расплава смесью $(\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3)$ также приводит к снижению ТКЛР сплавов Al–20÷40% Si в рабочем интервале температур. При сравнении свойств сплавов, обработанных смесями $(\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3)$ и $(\text{Cu}_3\text{P} + \text{LiH})$ установлено, что обработка доломитом способствует увеличению предельной степени пластической деформации до разрушения в среднем на 8–25% и одновременному снижению значений ТКЛР в интервале 50÷150 °C.

Поскольку обработка расплава в атмосфере водяного пара привела к формированию тонкодисперсной структуры, стала возможной горячая пластическая деформация исследуемых сплавов. Послековки и прокатки было установлено, что горячая пластическая деформация оказывает положительное влияние на механические свойства сплавов, особенно на их пластичность (таблица 2). Причиной такого повышения свойств является дополнительное улучшение структуры после деформации, прежде всего, измельчение и сфероидизация КПК и эвтектических частиц кремнистой фазы.

Таблица 2 – Механические свойства сплавов Al–15÷30 %Si в зависимости от технологии обработки

Технология обработки	Механические характеристики сплавов					
	Al – 15 %Si		Al – 20 %Si		Al – 30 %Si	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
Литой	166	2,2	145	2,0	120	0,5
Прокат	186	0,7	198	0,2	130	0,1
Прокат и отжиг	216	8,2	217	5,6	161	2,3
Ковка	256	6,6	238	5,2	215	3,0

Дилатометрический анализ сплавов Al–15÷30% Si показал, что после проведения горячей пластической деформации ТКЛР возрастает в низкотемпературном интервале испытаний и значительно снижается при высоких температурах. Наибольшее снижение значений ТКЛР наблюдается у сплава Al–30%Si. После деформации средний ТКЛР равен $\bar{\alpha}_{250-450} = 14,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, тогда как средние значения ТКЛР литого сплава составляют $19,3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Исследовали тепловое расширение двойных сплавов системы Al–Cu с содержанием меди от 5 до 30 %. Закономерность изменения ТКЛР сплавов в зависимости от содержания меди и от температуры испытания получена на графике, представленном в виде трехмерной поверхности, построенном в программе StatSoft Statistica 6.0 (рисунок 6).

С помощью полученного графика можно прогнозировать величину ТКЛР сплавов Al–Cu с заданным содержанием меди в зависимости от температуры испытания. Показано, что легирование медью от 5 до 15% приводит к резкому увеличению ТКЛР алюминия при температуре испытания $T_{\text{исп.}} = 300 \text{ °C}$. Дальнейшее увеличение содержания меди до 30% существенно снижает ТКЛР алюминия во всем интервале испытаний. Сравнительный анализ влияния легирования медью и кремнием на средний ТКЛР алюминия показал, что кремний более эффективно его снижает. Существенное различие в снижении наблюдается после легирования кремнием в количестве 15% по сравнению с медью.

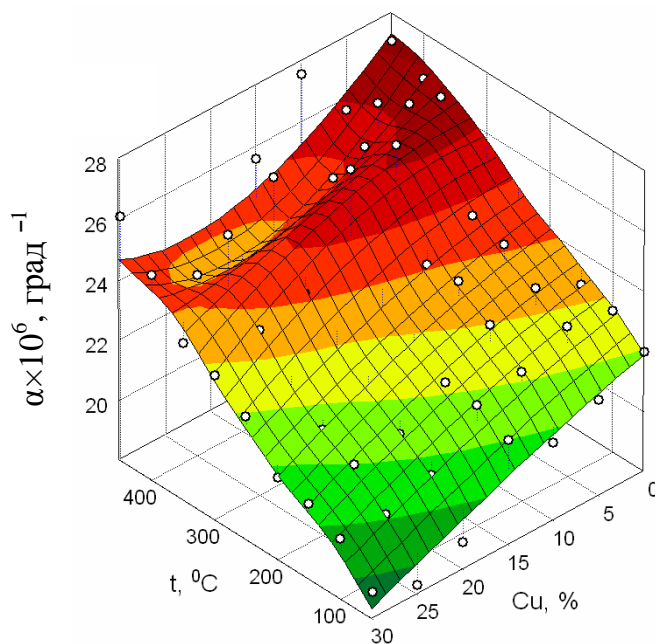
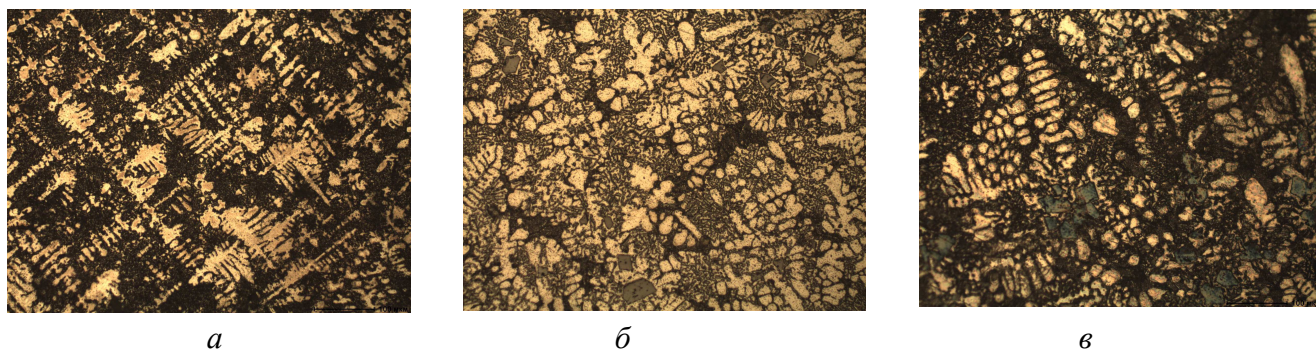


Рисунок 6 – Влияние содержания меди на ТКЛР сплавов Al–Cu

Исследовано влияние пластической деформации на тепловое расширение сплавов Al–10÷20% Cu. Установлено, что горячая и холодная пластическая деформации существенно влияют на их тепловое расширение, причем эффект деформации усиливается при увеличении содержания меди. На примере сплавов алюминия с 10, 15 и 20 % меди, показано, что пластическая деформация и последующий рекристаллизационный отжиг полностью устраняют аномалии линейного расширения изучаемых сплавов.

В четвертой главе приведены результаты исследований изменения ТКЛР тройных алюминиевых сплавов системы Al–Si–Cu за счет легирования кремнием и медью в количествах, значительно превышающих их предел растворимости в алюминии.

Результаты дилатометрических исследований по влиянию меди на тепловое расширение сплавов Al–11% Si–Cu показывают, что для тройных сплавов этой системы с увеличением содержания меди от 4 до 40% наблюдается тенденция к снижению ТКЛР. С помощью металлографического анализа выявлено, что структура легированного сплава с небольшим содержанием меди (4÷6% Cu) характеризуется наличием тонких ветвей дендритов твердого раствора и мелко-дисперсной эвтектики (рисунок 7).



а – 4% Cu, б – 8% Cu, в – 12% Cu

Рисунок 7 – Микроструктура сплавов на основе Al–11% Si с различным содержанием меди ×200

Увеличение содержания меди в сплаве Al–11% Si приводит к образованию тройной эвтектики (α +Si+CuAl₂) более крупного строения, а также способствует появлению первичных кристаллов кремнистой фазы полиэдрической формы, размеры которых меняются от 15 до 42 мкм.

Закономерности изменения величины ТКЛР сплавов Al–20÷30% Si–Cu в зависимости от содержания меди и от температуры испытания получены на графиках уравнений регрессии, представленных в виде трехмерной поверхности, построенных в программе StatSoft Statistica 6.0 (рисунок 8).

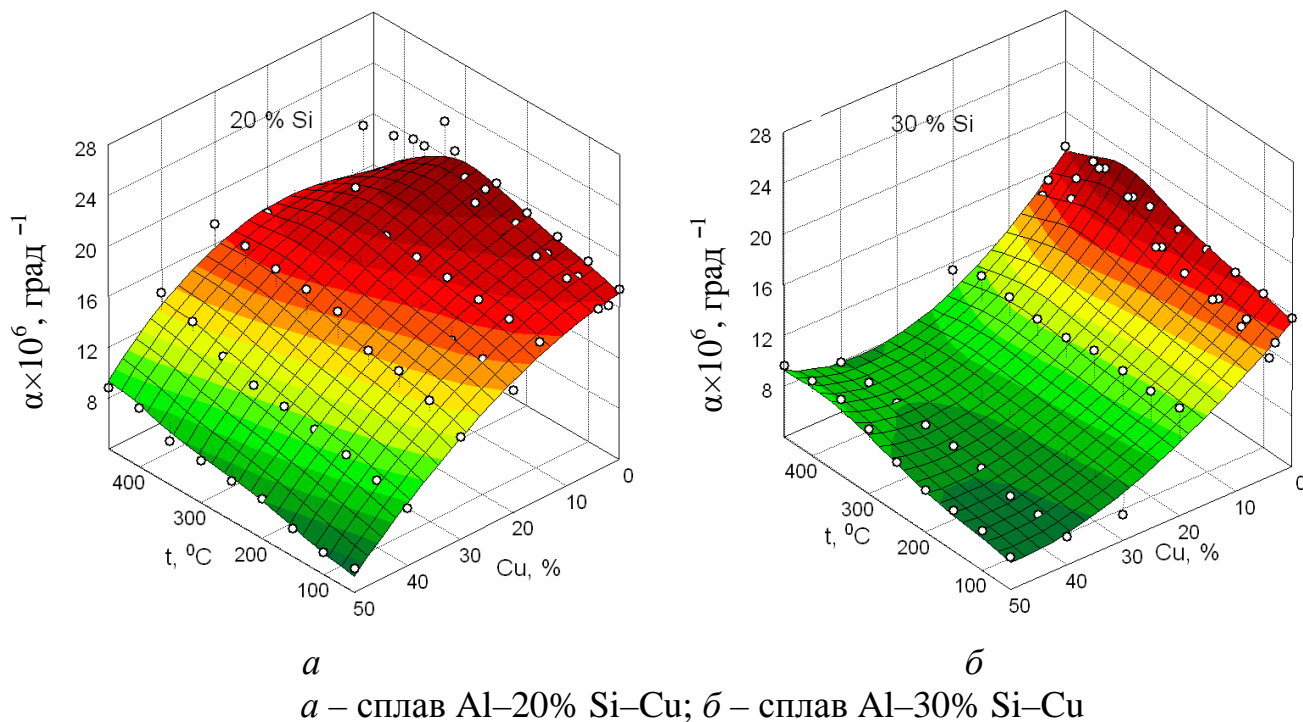
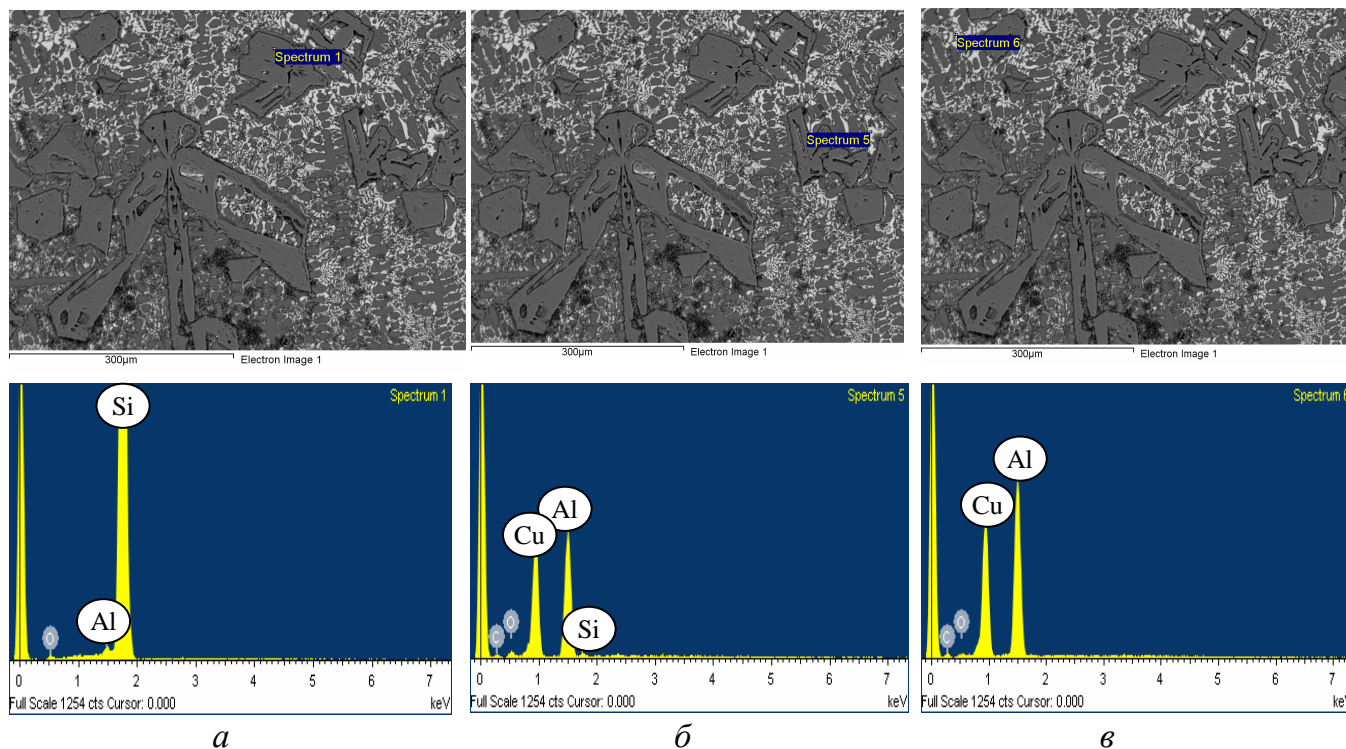


Рисунок 8 – Влияние содержания меди на ТКЛР сплавов Al–Si–Cu

С помощью полученных графиков можно прогнозировать величину ТКЛР сплавов Al–20÷30% Si–Cu с заданным содержанием кремния в зависимости от содержания меди и температуры испытания. Выявлена закономерность изменения ТКЛР сплавов Al–20% Si, содержащих от 4 до 50% меди, в интервале испытаний 50–150 °C. Так увеличение содержания меди способствует плавному снижению ТКЛР исследуемых сплавов со значений 17,5 до $5,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, что характерно для сплавов инварного типа. Показано, что увеличение содержания меди до 30 % позволяет снизить ТКЛР для сплавов Al–30% Si, содержащих 20–40% Cu до значений $\bar{\alpha}_{50-450} = 6,0 \div 7,0 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Установлено, что нецелесообразно введение меди более 30%, т.к. увеличение ее содержания до 40% способствует повышению значений ТКЛР в высокотемпературном интервале испытаний.

Установлено, что введение кремния и меди в сравнимых концентрациях способствует образованию более мелких первичных кристаллов кремнистой фазы, чем в двойном сплаве. С помощью РЭМ выявлено, что эвтектика имеет мелкоигольчатое строение со средним размером частиц эвтектического кремния не более 10 мкм. Кристаллы первичного кремния имеют преимущественно полиэдрическую форму, но приобретают сложную конфигурацию с полостями внутри. Результаты рентгеноспектрального микроанализа показали, что в отдельных участках эвтектики наблюдается высокое процентное соотношение

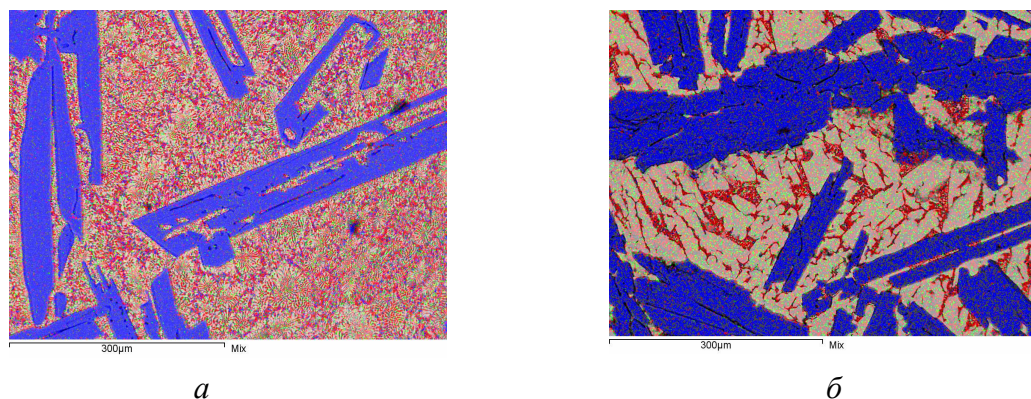
меди и алюминия (37 % и 52 %, а также 41 % и 47% соответственно), характерное для фазы CuAl_2 . Наличие фазы CuAl_2 подтверждено результатами рентгенофазового анализа. Таким образом, кремний присутствует в составе тройной эвтектики ($\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) в виде частиц игольчатой формы, а медь в основном входит в состав эвтектики в виде фазы CuAl_2 (рисунок 9).



a – кремнистая фаза, *б* – фаза CuAl_2 , *в* – фаза CuAl_2

Рисунок 9 – Микроструктура и элементный состав сплава Al–20% Si–20% Cu

Металлографический анализ сплавов на основе Al–30% Si–Cu выявил, что введение в сплав 20÷30% Cu приводит к частичному размодифицированию эвтектики, кристаллы кремнистой фазы преимущественно имеют форму пластин (рисунок 10). При введении 40% Cu кремнистая фаза теряет четкую границу, между ее кристаллами видна размодифицированная эвтектика.



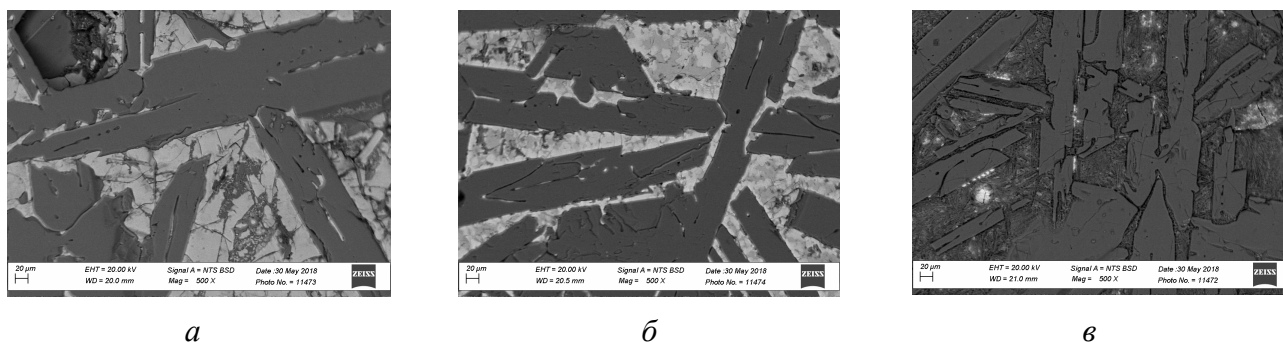
a – Al–30% Si–20% Cu, *б* – Al–30% Si–30% Cu

Рисунок 10 – Микроструктура тройных сплавов

Сравнение ТКЛР сплавов, содержащих 30% Cu и 30% Si отдельно и совместно, а также двойных сплавов, содержание кремния и меди в которых было равно суммарному содержанию легирующих элементов показало, что тройной сплав Al–30%Si–30%Cu имеет самый низкий и стабильный ТКЛР во всем интервале испытаний, по сравнению с двойными сплавами Al–60%Si и Al–60%Cu.

Результаты dilatометрических исследований по влиянию легирования сплавов на основе Al–40÷50% Si, содержащих 15÷50% Cu показывают, что сплав с равным содержанием легирующих элементов Al–40% Si–40% Cu имеет наименьшие значения ТКЛР во всем интервале испытания, нежели тройные сплавы сравнимых концентраций (сумма легирующих элементов 80 %).

Металлографический анализ показал, что высоколегированные сплавы содержат в своей структуре крупные пластинчатые частицы первичного кремния (рисунок 11). Это позволяет сделать заключение о том, что при больших содержаниях меди снижается предел растворимости кремния в алюминии, другими словами меняются условия структурообразования сплавов.



a – 30% Cu, *б* – 40% Cu, *в* – 50% Cu

Рисунок 11 – Микроструктура сплавов на основе Al–40% Si с различным содержанием меди

Методом рентгенофазового анализа установлено, что в сплавах Al–Si–Cu, содержащих более 40% Si и более 30% Cu, кроме фазы CuAl_2 имеются и другие интерметаллиды – CuAl и Cu_9Al_4 . Обобщение результатов определения ТКЛР и рентгенофазового анализа позволяет утверждать, что совместное введение в алюминий кремния и меди способно существенным образом уменьшить тепловое расширение тройных сплавов системы Al–Si–Cu в том случае, когда в их составе присутствует не только большое количество кремнистой фазы, но и образуются интерметаллиды CuAl , CuAl_2 , Cu_9Al_4 .

Результаты рентгеноспектрального микроанализа демонстрируют наличие в сплавах Al–40% Si–15÷50% Cu между пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы частиц фазы CuAl_2 , наряду с которыми присутствуют участки α -твердого раствора с повышенным содержанием кремния (от 59,4 до 69%).

Сравнительный анализ полученных данных по высоколегированным сплавам показал, что значения ТКЛР тройных сплавов с равным содержанием легирующих элементов Al–30% Si–30% Cu и Al–40% Si–40% Cu ниже значений промышленных сплавов инварного типа (рисунок 12, *a*). Полученные сплавы могут быть использованы для качественных спаев со стеклом и керамикой. По значению ТКЛР они могут применяться для согласованных соединений с металлами, сплавами, керамическими материалами и стеклами.

Дилатометрические исследования по влиянию легирования сплавов, содержащих 50 % Si, показали, что возможно получение низких значений ТКЛР сплава 50%Si–20%Cu–Al во всем интервале испытания, так $\alpha_{50-450}=6,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Установлено, что увеличение содержания меди в сплаве до 40% способствует дальнейшему снижению ТКЛР. Таким образом, разработан высоколегированный состав сплава 50%Si–40%Cu–Al, который имеет неизменные значения $\alpha=3,0-4,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ во всем температурном интервале испытаний от 50 до 450 °С (рисунок 12, б), что является большим преимуществом новых легких инваров по сравнению с тяжелыми железоникелевыми сплавами.

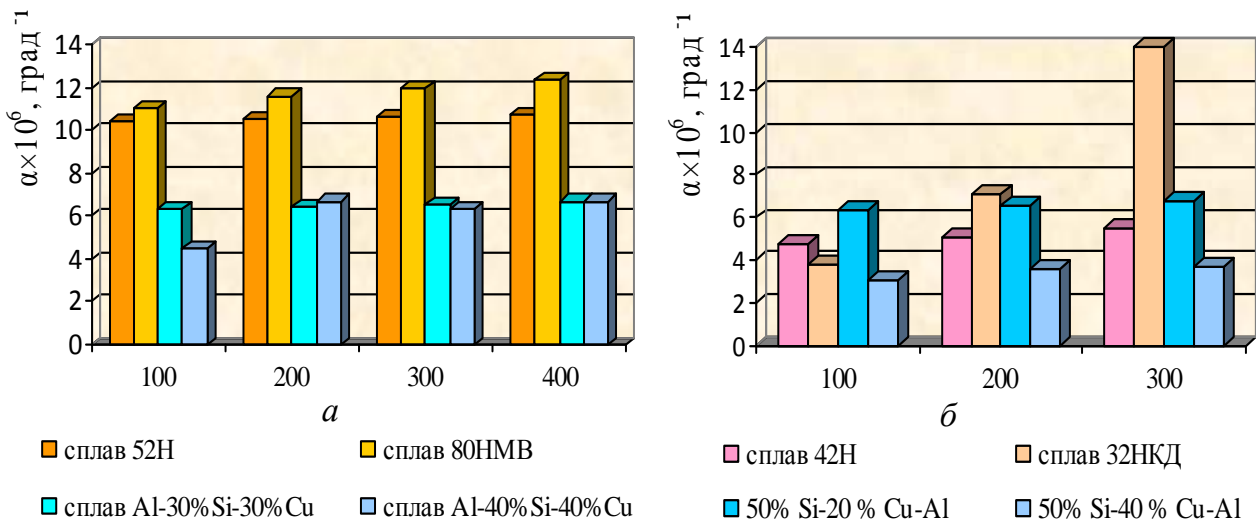


Рисунок 12 – Тепловое расширение сплавов с низким ТКЛР

С применением метода регрессионного анализа определен характер изменения ТКЛР тройного сплава 50% Si–40% Cu–Al в зависимости от температуры эксплуатации. Получено уравнение регрессии $\alpha = 2,6476 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0059 \cdot t$, которое может быть использовано для прогнозирования изменения ТКЛР полученного сплава.

Разработаны рекомендации по практическому применению предложенных составов легких сплавов системы Al–Si–Cu с заданными ТКЛР для изготовления деталей специального приборостроения. Проведен сравнительный анализ стоимости (по элементному составу) в относительных единицах разработанных легких сплавов со сплавами инварного типа. Показано, что стоимость новых сплавов в 2÷3 раза ниже стоимости существующих промышленных сплавов. Для подтверждения весового преимущества разработанных новых составов сплавов, рассчитана их плотность в относительных единицах по сравнению с плотностью тяжелых железоникелевых инваров. Показано, что плотность сплавов систем Al – Si и Al – Si – Cu не превышает 0,6 от плотности сплавов систем Fe – Ni и Fe – Ni – Co, что является их явным преимуществом.

Обширный экспериментальный материал по тепловому расширению двойных сплавов Al–Si, Al–Cu и тройных сплавов Al–Si–Cu был систематизирован в виде базы данных, на которую получено свидетельство о государственной регистрации.

В приложениях приведены: Справка о промышленном внедрении результатов научно-исследовательской работы в условиях АО «РУСАЛ Новокузнецк» и Акт о внедрении в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что ТКЛР алюминия технической чистоты существенно зависит от условий выплавки и кристаллизации, режимов термической обработки, формирующих его структуру. Методом дилатометрического анализа выявлено, что за счет обработки расплава смесью карбонатов щёлочноземельных металлов без введения легирующих элементов, возможно снизить ТКЛР алюминия марки А7, до значений, которые имеет сплав, легированный 20% кремния, в рабочем интервале температур 50–100 °С. Средний ТКЛР алюминия в рабочем интервале температур составляет $22 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, обработка расплава смесью карбонатов способствует его снижению до значений $17 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

2. Определены особенности влияния технологических факторов на величину ТКЛР сплавов Al–11÷50% Si. Показано, что различные виды модифицирующей обработки существенно влияют на величину ТКЛР исследуемых сплавов, но не так значительно, как увеличение содержания кремния. Для сплавов Al–20÷40% Si установлено, что на каждый процент вводимого кремния приходится снижение ТКЛР на $1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Модифицирующие обработки расплава приводят к снижению ТКЛР исследуемых сплавов в низкотемпературном интервале, всего на 3–16%. Установлено, что легирование кремнием и модифицирующая обработка расплава водяным паром двойных сплавов Al–20÷40% Si приводят к диспергированию первичных и эвтектических кристаллов кремнистой фазы, что обеспечивает возможность пластической деформации сплавов.

3. Выявлены закономерности теплового расширения двойных сплавов Al–Si и Al–Cu, содержащих легирующие элементы в количествах, многократно превышающих предел их растворимости в алюминии (до 50% Si и 30% Cu). Установлено, что кремний снижает ТКЛР алюминия больше, чем медь: введение 30% Si снижает ТКЛР сплава до значений $16 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, а введение 30% Cu до значений $19,8 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Наиболее значительно и во всем температурном интервале наблюдается снижение ТКЛР алюминия при введении 50–60% Si. Методом дилатометрического анализа установлено, что двойной сплав 60%Si–40%Al имеет практически постоянные значения $\alpha = 8,5 \div 9,0 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ в температурном интервале 50–450 °С.

4. Выявлены закономерности влияния совместного легирования алюминия кремнием и медью в количествах, многократно превышающих предел их растворимости в алюминии, на тепловое расширение тройных сплавов системы Al–Si–Cu. Сравнительный анализ полученных данных по высоколегированным сплавам показал, что значения ТКЛР тройных сплавов Al–30%Si–30%Cu и Al–40%Si–40%Cu ниже ТКЛР промышленных сплавов инварного типа. Установлено, что средние значения ТКЛР сплава Al–30%Si–30%Cu составляют $6,4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, тогда как средний ТКЛР промышленного сплава 52Н составляет $10,4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ в интервале температур 50–450 °С. Показано, что введение меди в тройных сплавах влияет на условия их структурообразования, в особенности на характер образования первичных кристаллов Si-фазы. Металлографические исследования сплавов системы Al–Si–Cu показали, что введение меди в больших количествах в доэвтектические сплавы способствует появлению кристаллов кремнистой фазы, а в заэвтектические – укрупняет их.

5. Методом растровой электронной микроскопии исследованы структура сплавов Al–(11÷50)%Si–(5÷30)%Cu и характер распределения легирующих элементов в них. Согласно результатам рентгенофазового анализа и рентгеноспектрального микроанализа установлено, что между пластинчатыми кристал-

лами кремнистой фазы располагаются частицы фазы CuAl_2 , наряду с которыми имеются участки твердого раствора с переменной растворимостью легирующих элементов. Увеличение содержания меди снижает предел растворимости кремния в алюминиевом твердом растворе.

6. Установлено, что при определенном соотношении легирующих элементов можно получить значения ТКЛР более низкие и стабильные, чем у двойных сплавов. Разработаны составы новых высоколегированных легких сплавов системы Si-Cu-Al , обеспечивающие наименьшие значения ТКЛР при температурах 50 – 450 °С. Так, сплавы 50% Si-20\% Cu-Al и 50% Si-40\% Cu-Al в интервале испытаний 50 – 450 °С имеют практически постоянные значения ТКЛР, которые составляют $6,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и $3,0 \div 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ соответственно.

7. Для различных полученных составов легких сплавов с заданными ТКЛР разработаны рекомендации по практическому применению для изготовления деталей и изделий специального приборостроения. Новые сплавы по величине ТКЛР конкурируют с железоникелевыми инварами и САС. Результаты исследования рекомендованы к промышленному внедрению в условиях АО «РУСАЛ Новокузнецк» и внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке магистрантов, обучающихся по направлению подготовки «Материаловедение и технологии материалов».

ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. О новом способе дегазации металлов и сплавов / В. К. Афанасьев, С. В. Долгова, А. А. Копытько, М. А. Старостина (М. А. Малюх), Н. Б. Лаврова, Д. М. Чибряков // *Металлургия машиностроения*. – 2009. – № 4 – С. 5–9.

2. Афанасьев, В. К. Особенности влияния малых добавок кремния на линейное расширение алюминия / В. К. Афанасьев, А. В. Горшенин, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2010. – № 6. – С. 88–89.

3. Особенности влияния меди на линейное расширение алюминия А7 / В. К. Афанасьев, А. В. Горшенин, М. А. Старостина (М. А. Малюх), И. В. Дегтярева, Е. В. Первакова // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – № 3. – С. 30–34.

4. Афанасьев, В. К. Об аномалиях линейного расширения алюминия А7 / В. К. Афанасьев, А. В. Горшенин, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2010. – № 8. – С. 53–54.

5. Афанасьев, В. К. Наследственное влияние температуры заливки на поведение алюминия А7 при термической обработке / В. К. Афанасьев, А. В. Горшенин, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2010. – № 10. – С. 56.

6. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 / В. К. Афанасьев, А. В. Горшенин, М. В. Попова, А. Н. Прудников, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – № 6. – С. 23–26.

7. Влияние обработки расплава водородосодержащими веществами на тепловое расширение алюминия / В. К. Афанасьев, М. В. Попова, М. А. Старостина (М. А. Малюх), Н. В. Кривичева // *Металлургия машиностроения*. – 2011. – № 3. – С. 30–33.

8. Алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния и магния. Часть I. $\text{Al} - 11 \dots 30 \% \text{Si} + 5 \dots 30 \% \text{Mg}$ / В. К. Афанасьев, С. В. Долгова, М. В. Попова, М. А. Малюх, В. В. Герцен, А. В. Горшенин // *Металлургия машиностроения*. – 2016. – № 2. – С. 10–15.

9. Водород и термическая обработка алюминиевых сплавов / В. К. Афанасьев, М. А. Малюх, М. В. Попова, С. В. Долгова, Н. Б. Лаврова // *Металлургия машиностроения*. – 2017. – № 1. – С. 33–40.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus:

10. Влияние обработки расплава водяным паром на тепловое расширение сплавов Al-20...40% Si / В. К. Афанасьев, М. В. Попова, А. В. Горшенин, М. А. Малюх // *Металлург*. – 2019. – № 1. – С. 71–76.

11. Тепловое расширение сплавов Al-Cu после обработки расплава и термообработки / В. К. Афанасьев, М. А. Малюх, М. В. Попова, В. А. Лейс, С. В. Долгова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 2. – С. 87–94.

12. Об участии водорода в формировании свойств заэвтектических сплавов Al-Si / В. К. Афанасьев, М. В. Попова, М. А. Малюх, С. В. Долгова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 63–74. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-63-74.

13. Features of thermal expansion of special-purpose aluminum alloys after treatment of melt and heat treatment / V. K. Afanasyev, M. V. Popova, M. A. Malyukh, A. N. Prudnikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411 [012010, 7 p.]. – doi:10.1088/1757-899X/411/1/012010.

Статьи в других изданиях, труды научно-практических конференций:

14. Горшенин, А. В. О влиянии обработки расплава и старения на линейное расширение технического алюминия / А. В. Горшенин, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // *Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество : труды Всероссийской научно-практической конференции, 7-10 октября 2008 г.* – Новокузнецк : СибГИУ, 2008. – С. 160–162.

15. Горшенин, А. В. Особенности влияния температуры заливки на линейное расширение технического алюминия / А. В. Горшенин, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // *Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество : труды Всероссийской научно-практической конференции, 7-10 октября 2008 г.* – Новокузнецк : СибГИУ, 2008. – С. 157–159.

16. Влияние обработки расплава водяным паром и термической обработки на линейное расширение алюминия с добавками 3-9% кремния / В. К. Афанасьев, Е. Л. Морозова, А. А. Копытько, А. В. Горшенин, М. В. Попова, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // *Вестник Российской Академии Естественных наук. ЗападноСибирское отделение*. – 2009. – Вып. 11. – С. 105–110.

17. Коношенкина, Н. В. Наследственное влияние предварительной обработки жидкого алюминия на его расширение в твердом состоянии / Н. В. Коношенкина, М. А. Старостина (М. А. Малюх), А. А. Копытько ; науч. рук. М. В. Попова // *Молодежь и наука: реальность и будущее : материалы II Международной научно-практической конференции, 3 марта 2009 г.* – Невинномысск : НИЭУП, 2009. – Т. VIII. Естественные и прикладные науки. – С. 56–59.

18. Старостина, М. А. Новый способ обработки расплава и его влияние на технологические и физические свойства алюминия и его сплавов / М. А. Старостина (М. А. Малюх) ; науч. рук. В. К. Афанасьев // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 5-8 мая 2009 г.* – Новокузнецк : СибГИУ, 2009. – Вып. 13. Ч. 3. Технические науки. – С. 149–152.

19. Агиенко, Н. Ю. Влияние химико-термической обработки на линейное расширение чушкового алюминия А7 / Н. Ю. Агиенко, М. А. Старостина (М. А. Малюх), Е. Н. Махонина ; науч. рук. В. К. Афанасьев // *Наука и молодежь:*

проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 5-8 мая 2009 г. – Новокузнецк : СибГИУ, 2009. – Вып. 13. Ч. 3. Технические науки. – С. 143–148.

20. О перспективе уменьшения теплового расширения технического алюминия / А. А. Копытько, М. А. Старостина (М. А. Малюх), Е. Н. Махонина, Н. А. Ластовецкая, Д. А. Гордеев // Будущее машиностроения России : труды 2-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов, 21-25 сентября 2009 г. – Москва : МГТУ, 2009. – С. 158.

21. Свойства объемных наноматериалов системы Al-Zr-H / М. В. Попова, М. А. Старостина (М. А. Малюх), Н. В. Кривичева, Е. Н. Махонина // Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов : материалы Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи, 16-20 ноября 2009 г. – Белгород : БелГУ, 2009. – С. 49–50.

22. Поршневой объемный наноматериал системы Al-Si-H / В. К. Афанасьев, А. В. Горшенин, И. В. Дегтярева, Е. В. Первакова, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции, 24 марта 2010 г. – Новосибирск : НГТУ, 2010. – С. 150–151.

23. Новые способы получения поршневых силуминов / В. К. Афанасьев, А. В. Горшенин, С. В. Долгова, А. Н. Калитин, М. А. Старостина (М. А. Малюх) // Вестник Российской Академии Естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2011. – Вып. 13. – С. 91–95.

24. Малюх, М. А. Особенности теплового расширения алюминия А7 после обработки расплава доломитом и старения / М. А. Малюх ; науч. рук. М. В. Попова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 13-15 мая 2015 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – Вып. 19. Ч. 2. Технические науки. – С. 191–194.

25. Попова, М. В. Применение обработки карбонатами кальция и магния для повышения свойств технического алюминия / М. В. Попова, А. Н. Прудников, М. А. Малюх // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы второй Международной научно-практической конференции. – 2015. – № 2. – С. 445–450.

26. Попова, М. В. Обработка расплава карбонатами щелочноземельных металлов как фактор влияния на тепловое расширение алюминия / М. В. Попова, А. Н. Прудников, М. А. Малюх // Инновации в машиностроении : сборник трудов VII Международной научно-практической конференции, 23–25 сентября 2015 г. – Кемерово, 2015. – С. 368–372.

27. Попова, М. В. Влияние модифицирования на тепловое расширение алюминия и его сплавов / М. В. Попова, М. А. Малюх // Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XIX Международной научно-практической конференции, 15–16 декабря 2015 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – Ч. 2. – С. 58–61.

28. Афанасьев, В. К. Влияние комплексного легирования на тепловое расширение сплава Al-11% Si / В. К. Афанасьев, М. В. Попова, М. А. Малюх // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы третьей международной научно-практической конференции, 30 марта 2016 г. – Новосибирск : НГТУ, 2016. – № 3. – С. 364–369.

29. Малюх, М. А. Влияние магния на линейное расширение сплава Al-20%Si / М. А. Малюх ; науч. рук. В. К. Афанасьев // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 1–3 июня 2016 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – Вып. 20. Ч. 3. Естественные и технические науки. – С. 247–250.

30. Попова, М. В. Совместное влияние легирования и условий кристаллизации на технологичность и тепловое расширение литых алюминиевых сплавов /

М. В. Попова, М. А. Малюх, Н. Б. Лаврова // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы четвертой Международной научно-практической конференции. – 2017. – Том 4, № 1. – С. 112–118.

31. Малюх, М. А. Влияние меди на линейное расширение алюминиевых сплавов Al-Si / М. А. Малюх ; науч. рук. М. В. Попова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 16-18 мая 2017 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2017. – Вып. 21. Ч. 2. Естественные и технические науки. – С. 304–307.

32. Попова, М. В. Особенности теплового расширения алюминиевых сплавов специального назначения после обработки расплава и термообработки / М. В. Попова, М. А. Малюх // Metallurgy: technologies, innovations, quality. Metallurgy – 2017 : труды XX Международной научно-практической конференции, 15-16 ноября 2017 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2017. – Ч. 2. – С. 174–181.

33. Перспективные алюминиевые сплавы для авиационной и космической техники / М. В. Попова, А. Н. Прудников, С. В. Долгова, М. А. Малюх // Вестник Сибирского государственного университета. – 2017. – № 3 (21). – С. 18–23.

34. Попова, М. В. Воздействие модифицирования на микроструктуру и физические свойства сплавов Al-(20÷40)% Si / М. В. Попова, М. А. Малюх // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы четвертой Международной научно-практической конференции. – 2018. – Том 5, № 1-2. – С. 132 – 138.

Свидетельства о государственной регистрации базы данных

35. Тепловое расширение алюминиевых сплавов, легированных кремнием и медью : заявка № 2017620649 Российская Федерация. Федеральная служба по интеллектуальной собственности государственная регистрация базы данных, охраняемой авторскими правами / В. К. Афанасьев, М. В. Попова, М. А. Малюх ; правообладатели: В. К. Афанасьев, М. В. Попова, М. А. Малюх. – Номер регистрации (свидетельства) № 2017620959. – Дата регистрации 24.08.2017. – Номер и дата поступления заявки: 2017620649 26.06.2017. – Дата публикации 24.08.2017.

Подписано в печать 21.10.2019 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,22 Тираж 100 экз. заказ 218

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Издательский центр СибГИУ