

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский государственный индустриальный университет

Посвящается 400-летию города Новокузнецка

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2017»

15 – 16 ноября 2017 г.

Труды
XX Международной научно-практической конференции
Часть 2

Новокузнецк
2017

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия
академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор М.В. Темлянцев, д.т.н., профессор А.В. Феоктистов,
д.т.н., профессор Г.В. Галевский, д.ф.-м.н., профессор В.Е. Громов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., профессор Н.А. Козырев,
к.т.н., профессор С.Г. Коротков, к.т.н., доцент С.В. Фейлер

М 540 Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XX Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – 474 с., ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и технологии производства, обработки и сварки металлов, энергоресурсосбережения, рециклинга и экологии в металлургии.

Конференция проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-20433.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Администрация Кемеровской области
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
АО «Русал Новокузнецк»
АО «Кузнецкие ферросплавы»
ОАО «Черметинформация»
Издательство Сибирского отделения РАН
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»
Журнал «Вестник СибГИУ»
Журнал «IOP conference series: materials science and engineering»
ОАО «Кузбасский технопарк»
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук
Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2017

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ТЕРМООБРАБОТКИ.....	174
Попова М.В., Малюх М.А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СТАЛИ СТЗ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ	181
Балановский А.Е., Штайгер М.Г., Кондратьев В.В., Карлина А.И. АКТИВНОСТЬ МАГНИЯ В РАСПЛАВАХ СИСТЕМЫ FE-MG-SI	187
Власов В.Н., Агеев Ю.А. ОСОБЕННОСТИ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В СТАЛИ 20ГЛ.....	191
Каравайцева А.А., Квеглис Л.И., Павлов А.В. РАСЧЕТ СОДЕРЖАНИЯ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ, ВЫДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ РАСПЛАВА.....	196
Рафальский И.В., Луцник П.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ГВС МЕТОДОМ ВОЛОЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА БРБ2	200
Сидельников С.Б., Бер В.И., Вагнер А.В., Дударев В.М., Семиряков М.А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ БОРОАЛИТИРОВАНИЯ НА ТОЛЩИНУ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ НА СТАЛИ 20	206
Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С., Сизов И.Г., Шурыгин Ю.Л., Хараев Ю.П. РАЗРАБОТКА СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ТРАМВАЙНЫХ РЕЛЬСОВ В НЕПРЕРЫВНОЙ РЕВЕРСИВНОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ	211
Сметанин С.В., Перетягко В.Н. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ДРЕССИРОВАННОЙ ЛЕНТЫ	216
Медведева Е.М., Голубчик Э.М., Гулин А.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	221
Васюхно А.Ю., Черномас В.В. ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ	230
Балановский А.Е., Гречнева М.В., Ву Ван Хун, Штайгер М.Г., Кондратьев В.В., Карлина А.И.	

СЕКЦИЯ 3: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ, ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

ОКИСЛЕНИЕ НАНОДИБОРИДА ТИТАНА НА ВОЗДУХЕ	235
Галевский Г.В., Руднева В.В., Ефимова К.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФЛЮС-ДОБАВОК ДЛЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛИ	241
Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Кислов А.И., Свистунов А.Д. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ WO_3 УГЛЕРОДОМ И КРЕМНИЕМ	245
Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Шурупов В.М. АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА БАЗЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С КЕРАМИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ	249
Калашников И.Е., Болотова Л.К., Кобелева Л.И., Колмаков А.Г., Катин И.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА КАРБИДА КРЕМНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ.....	254
Квашина Т.С., Крутский Ю.Л., Чушенков В.И. ВЛИЯНИЕ ИНГИБИРУЮЩИХ ДОБАВОК ТУГОПЛАВКИХ КАРБИДОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ	257
Крутский Ю.Л., Веселов С.В., Тюрин А.Г., Черкасова Н.Ю., Кузьмин Р.И., Чушенков В.И., Воробьев Р.С., Квашина Т.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАСТЕРНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФАЗЫ Ni_3Al ПРИ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВ Ni И Al	262
Джес А.В., Носков Ф.М., Квеглис Л.И., Казначеева А.М.	

5. Васечко, Д.Ю. Конъюнктура мировых рынков меди и алюминия / Д.Ю. Васечко // Кабели и Провода, 2011. №2. – С. 10-12.
6. Мещанов, Г.И. Анализ основных тенденций в развитии мирового производства кабелей и проводов // Кабели и Провода. 2012. – №4. – С. 3-8.
7. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005.
8. Сидельников, С.Б. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации-деформации и модифицировании алюминиевых сплавов / С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, Н.Н. Довженко, Т.Н. Дроздова, С.В. Беляев, В.Н. Баранов, И.Л. Константинов, А.С. Сидельников, В.М. Беспалов. - Красноярск: Сиб. федер.ун-т, 2015.
9. Клейменова, Ю.Ю. Технико-экономический анализ производства катанки из сплава АВЕ с применением различных процессов совмещенной обработки. // Инновационные процессы обработки металлов давлением: материалы 2 международной научно-практической конференции / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016, С. 23-24.
10. Перлин, И.Л. Теория прессования металлов /И.Л. Перлин Л.Х. Райтбарг – М.: Металлургия, 1975.

УДК 669.716:621.745

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ТЕРМООБРАБОТКИ

Попова М.В., Малюх М.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, starostina_ma1976@mail.ru*

Аннотация: Представлены результаты исследований влияния обработки расплава на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) алюминиевых сплавов специального назначения на основе системы Al-(11÷40)%Si. Показано, что обработка расплава водным раствором CuSO₄ и модифицирование расплава смесью (CaCO₃·MgCO₃) приводит к снижению ТКЛР всех рассматриваемых сплавов в низкотемпературном интервале испытаний. Обработка расплава парами CO(NH₂)₂ приводит к снижению ТКЛР сплавов доэвтектического состава во всем интервале температур испытания: 50-450°C.

Ключевые слова: алюминий, кремний, температурный коэффициент линейного расширения, обработка расплава.

FEATURES THERMAL EXPANSION ALUMINUM ALLOYS OF SPECIAL PURPOSE AFTER MELT PROCESSING AND HEAT TREATMENT

Popova M. V., Malyuh M. A.

*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation, starostina_ma1976@mail.ru*

Abstract: The results of studies of the effect of alloying and melt processing (modification), the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of aluminium alloys special purpose on the basis of system Al-(11÷40)Si. It was shown that treatment of the melt with an aqueous solution of CuSO₄ and modification of the melt mixture (CaCO₃·MgCO₃) leads to a decrease TCLE in all examined alloys in the low temperature range of testing. While the processing of the melt in pairs CO(NH₂)₂ leads to a decrease in TCLE of alloys devehinskogo composition throughout the temperature range tested.

Keywords: aluminum, silicon, temperature coefficient of linear expansion, the melt treatment.

Специальное назначение алюминиевых сплавов определяется требованием к конкретному комплексу механических, физических, физико-химических и технологических свойств, необходимых для

эксплуатации изделий в строго определенных условиях, например, при низких или повышенных температурах для специального назначения в приборах и аппаратах аэрокосмической промышленности.

Для космического приборостроения необходимо сочетание коррозионной стойкости, малого удельного веса, высокой стабильности размеров в широком интервале температур, так как облегчение выводимых на орбиту конструкций и приборов способствует значительной экономии топлива [1]. Последнее требование обеспечивается минимальным температурным коэффициентом линейного расширения (далее – ТКЛР) и сведением к минимуму структурных превращений во времени. Известно, что воздействие на расплав с помощью различных физических, механических и химических способов изменяет соотношение примесных элементов в расплаве, которые при кристаллизации будут управлять формированием свойств твердого металла [2]. Термомеханические характеристики алюминия и его сплавов являются предметом многих научно-исследовательских работ. Так, по мнению авторов [3], сплавы Al-Mg-Si (алюминиевые сплавы серии бxxx) обладают привлекательными свойствами по отношению к их применению в авиационной промышленности. Эти свойства включают среднюю и высокую прочность, хорошую коррозионную стойкость, улучшенную свариваемость, хорошую прочность, а также снижение остаточных напряжений в крупногабаритных пластинах и листовых изделиях. Эти сплавы были исследованы в отношении их механических свойств, усталостной прочности, стойкости к повреждениям и сопротивлению коррозии.

При разработке новых материалов с улучшенными физическими свойствами особое внимание уделяется заэвтектическим сплавам системы Al-Si. Однако при обычных методах литья их структура характеризуется наличием грубой эвтектики и крупных кристаллов кремнистой фазы. С целью измельчения первичных кристаллов кремния и эвтектики и обеспечения необходимого комплекса механических и технологических свойств такие сплавы подвергают модифицированию, рафинированию или прогрессивным методам термообработки. Разработано большое количество способов модифицирования силуминов: использование натрийсодержащих смесей, введение модификаторов в виде солей и лигатур, фосфорсодержащих соединений, кислородсодержащих реагентов, добавок и присадок на основе высокодисперсных компонентов [4, 5]. Следует отметить, что перечисленные технологии, наряду с достоинствами (удобство введения модификаторов), имеют и существенный недостаток – наличие вредных фторидных и хлоридных выделений в атмосферу. На основании систематически проводившихся исследований, авторами разработан способ обработки расплава заэвтектических силуминов смесью карбонатов кальция и магния, который способствует значительному улучшению их технологических свойств [6]. Известно, что комбинированные модифицирующие средства, состоящие из 2-х и более элементов, по эффективности превосходят каждый элемент в отдельности. Кальций и магний являются модификаторами эвтектики в заэвтектических силуминах, а соли меди применяют для измельчения первичных кристаллов кремния. В связи с этим цель данной работы – исследовать возможность получения стабильных значений ТКЛР алюминиевых сплавов $Al-(11\div 40)\%Si$ в рабочем интервале температур за счет обработки расплава соединениями с повышенным содержанием *кислорода и азота*.

При разработке сплавов специального назначения, наряду с прочими требованиями они должны обладать стабильными эксплуатационными свойствами для исключения решающего влияния внешней среды (изменения температуры, давления и др.) [7]. Применение отливок нежелательно, так как высокая естественная газонасыщенность приводит к «распуханию» в условиях среднего и высокого вакуума. Поэтому дополнительно изучалось влияние термической обработки на ТКЛР исследуемых сплавов. Следует отметить, что существенное влияние на формирование структуры и физико-механических свойств алюминиевых сплавов при термической обработке оказывает состав внешней среды [8-9]. В статье [9] мы показали, что термическая обработка в средах с повышенным содержанием водорода и азота ускоряет протекание фазовых превращений в алюминиевых сплавах, поскольку активизирует диффузию водорода в них. Имеется большое количество научных публикаций, подтверждающих активное участие водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов [1, 2, 10].

В качестве объекта исследования были выбраны двойные сплавы $Al-(11\div 40)\%Si$. Шихтовый алюминий расплавляли, вводили в него кремний в количестве 11, 20, 30, 40%, после его полного растворения расплав обрабатывали смесью карбоната кальция и карбоната магния, взятых в равном соотношении в количестве 1-7% от массы расплава. Обработку проводили в течение 3-15 минут при температуре, на 50-250 °С превышающей температуру плавления алюминия (710-910 °С). Для наглядности эффективности модифицирования параллельно расплав продували парами водного раствора *сульфата меди* $CuSO_4$ в количестве 0,1-0,2% от массы расплава в течение 5 – 15 минут при 800 – 1100°С [11]. Для сравнения проводили продувку расплава *парами карбамида* $CO(NH_2)_2$ при температурах 700...900 °С в течение 3...6 мин [12]. Кристаллизация сплавов проводилась в алюминиевом кокиле с температур заливки 730...750 °С. Из полученных образцов изготавливали образцы для дилатометрического исследо-

вания. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего dilatометра системы Шевенара, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$.

Для стабилизации свойств исследуемых сплавов Al-(11÷40) % Si проводилась термическая обработка, заключающаяся в нагреве в течение 10 ч при температурах 100, 150 и 200 °С с последующим охлаждением на воздухе. Выбор температур обработки обусловлен интервалами наиболее активного диффузионного перераспределения водорода в металле, а также взаимодействия его с азотом, как собственным, так и внесенным в процессе обработки расплава [2].

В *низкотемпературном интервале* испытаний выявлено снижение ТКЛР сплавов Al-20÷40 % Si, предварительно обработанных водным раствором сульфата меди в процессе выплавки, что видно на рисунке 1. Так, средний ТКЛР сплава обычного приготовления Al-20%Si в интервале 50-150 °С имеет значение $\bar{\alpha}_{50-150} = 18 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, тогда как сплав, полученный после обработки сульфатом меди имеет значения $\bar{\alpha}_{50-150} = 16,6 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Для сплава Al-30%Si происходит незначительное снижение ТКЛР в низкотемпературном интервале испытаний. Наибольшее снижение значений ТКЛР наблюдается у сплава Al-40%Si. В этом случае после обработки расплава средний ТКЛР равен $\bar{\alpha}_{50-150} = 11,3 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, тогда как значения $\bar{\alpha}_{50-150}$ сплава обычного приготовления составляют $13,2 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$.

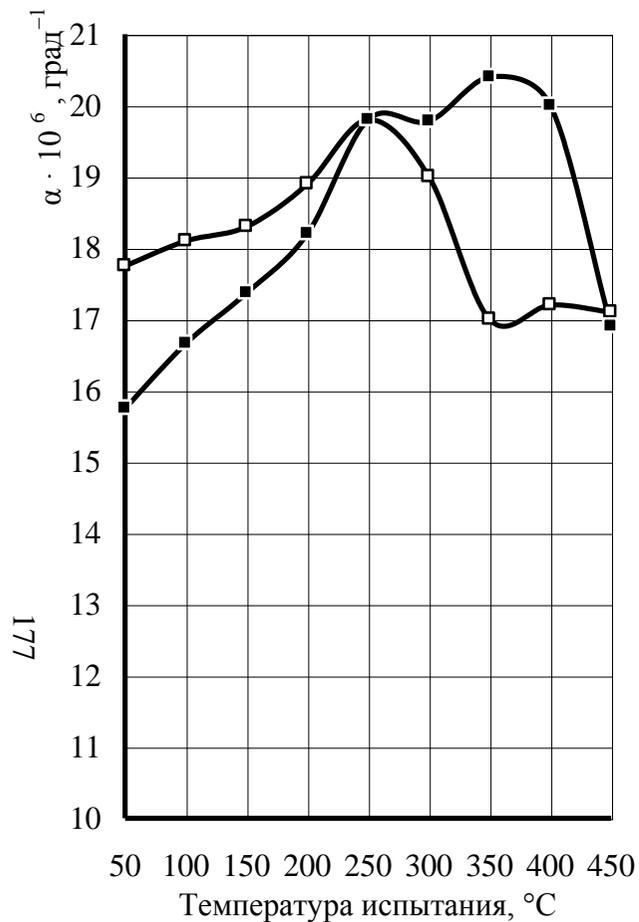
Это снижение может быть обусловлено увеличением содержания меди в составе сплавов и протеканием процессов старения в интервале 200 – 300°С при охлаждении с температур кристаллизации.

В высокотемпературном интервале испытания наблюдается повышение значений ТКЛР за счет обработки расплава, что не является определяющим, поскольку при таких температурах приборы не эксплуатируют. Выбранный режим продувки расплава является оптимальным, так как при меньшем времени продувки ТКЛР снижается незначительно, а при большем – резко увеличивается количество шлака, что уменьшает выход годного металла.

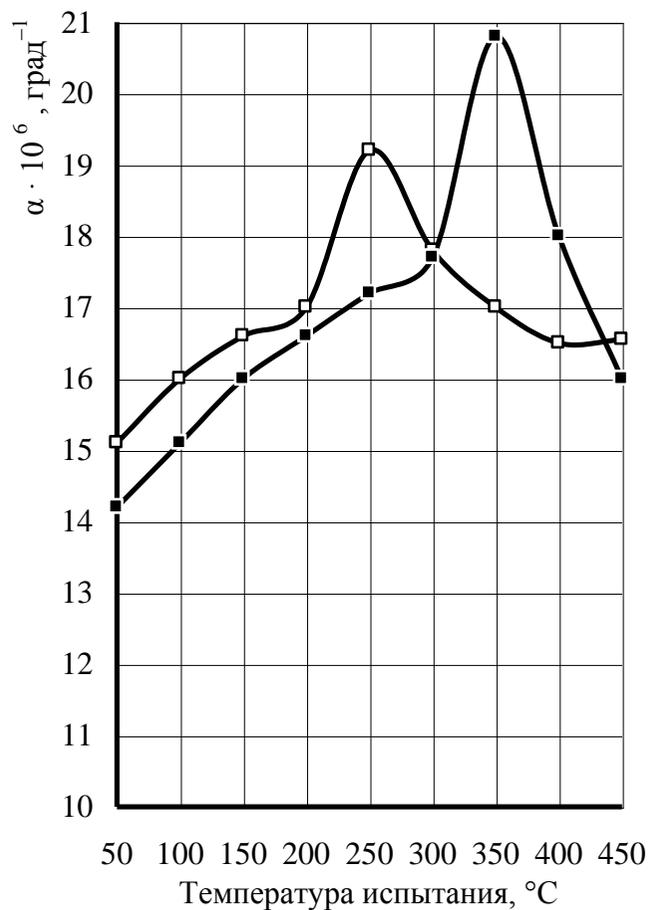
Установлено также, что продувка незначительно увеличивает микротвердость основы, количество кремнистой фазы и газонасыщенность [11].

Данные по результатам воздействия обработки расплава карбамидом на линейное расширение сплавов Al-11÷40%Si представлены на рисунке 2. Видно, что выбранный способ приготовления существенно снижает ТКЛР сплавов Al – 11 % Si во всем интервале температур испытаний. Наибольшее снижение наблюдается в низкотемпературном интервале 50÷150 °С со значений $19,0 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ до $15,7 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Обработка расплава высококремнистых силуминов (20, 30, 40 % Si) приводит к появлению аномалии линейного расширения, заключающейся в резком повышении ТКЛР при $t_{исп} = 300$ °С, что является характерным для настоящей группы сплавов и гипотетически связывается с разложением кремнистой фазы и выходом элементов внедрения в металл-основу. Однако, если рассматривать интересующий нас низкотемпературный интервал испытания, т.е. температуры эксплуатации приборной техники, то здесь наблюдается равномерное снижение ТКЛР всех обработанных сплавов. Известно, что кремний, в наибольшей мере снижающий ТКЛР алюминия, при введении до 12 % не дает требуемых значений теплового расширения, а увеличение его содержания за пределы эвтектического состава приводит к охрупчиванию сплава и, следовательно, потере технологической и эксплуатационной пригодности. Одним из резервов снижения хрупкости является термическая обработка.

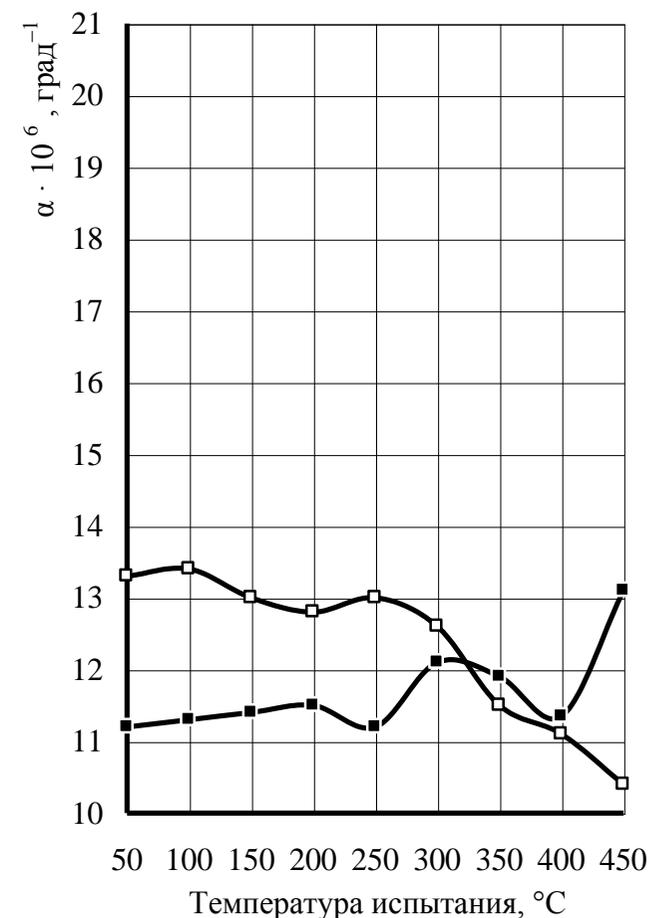
Влияние термообработки, которая заключалась в нагреве от 100 до 200 °С в течение 10 ч и охлаждении на воздухе, проявляется в снижении ТКЛР исследуемых сплавов (таблица 1). Так, для сплавов Al – 11 % Si снижение ТКЛР наблюдается в интервале $t_{исп}$ 300...450 °С после нагрева при любой из выбранных температур, но наиболее эффективна термообработка при 150 °С. Однако следует отметить, что проведение повторного нагрева при тех же параметрах не ведет к дальнейшему снижению ТКЛР. Нагрев высококремнистых силуминов уменьшает аномалию линейного расширения, проявляющуюся при $t_{исп}$ 300 °С, тем эффективнее, чем выше температура нагрева. После нагрева при 200 °С данная аномалия полностью устраняется, что, по всей вероятности, связано с образованием элементов внедрения собственных соединений с малым ТКЛР. Увеличение времени нагрева при 200 °С до 20 ч не дает дополнительного снижения ТКЛР, что свидетельствует о достаточности выбранного времени обработки для полного прохождения диффузионных процессов.



а – Al – 20%Si

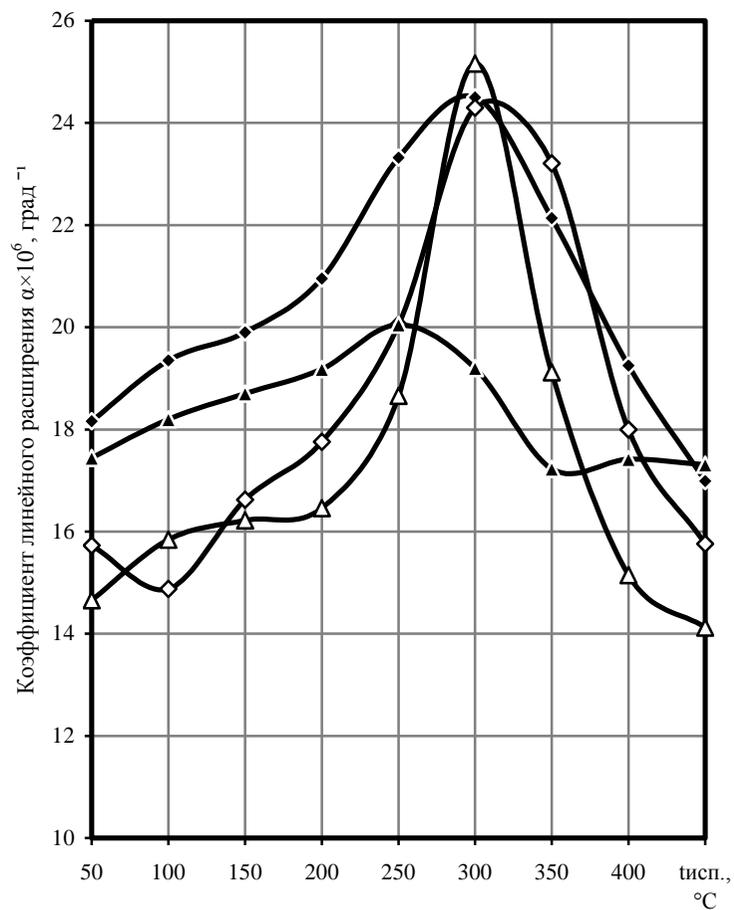


б – Al – 30%Si

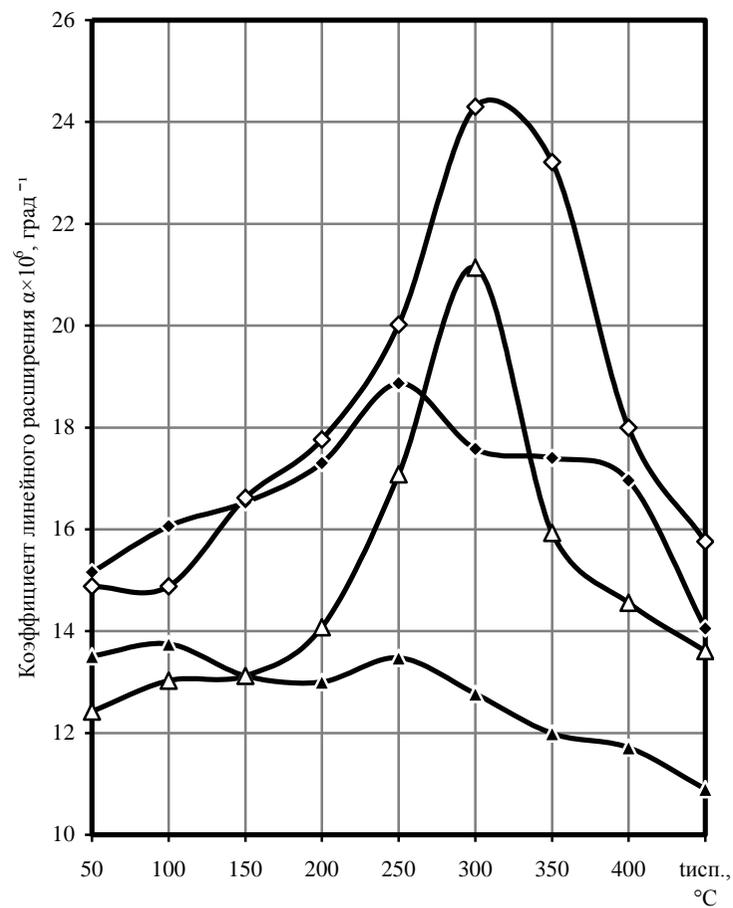


в – Al – 40%Si

Рисунок 1 – Влияние обработки расплава парами водного раствора CuSO_4 на линейное расширение сплавов Al-Si



- ◆— Al – 11 % Si, обычного приготовления
- ◇— Al – 11 % Si, приготовлен с обработкой расплава
- ▲— Al – 20 % Si, обычного приготовления
- △— Al – 20 % Si, приготовлен с обработкой расплава



- ◆— Al – 30 % Si, обычного приготовления
- ◇— Al – 30 % Si, приготовлен с обработкой расплава
- ▲— Al – 40 % Si, обычного приготовления
- △— Al – 40 % Si, приготовлен с обработкой расплава

Рисунок 2 – Влияние обработки расплава парами $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ на линейное расширение сплавов Al-Si

Таблица 1 – Влияние нагрева (10 ч, воздух) на линейное расширение высококремнистых сплавов Al – Si (обработка расплава парами $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)

Режим нагрева	$\alpha \times 10^6 \text{ град}^{-1}$, при температурах испытания, °С								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Al-11%Si									
без нагрева	15,7	14,9	16,6	17,8	20,1	24,3	23,2	18,0	15,8
100 °С	15,2	17,7	18,7	19,4	21,5	25,6	18,1	15,4	13,4
150 °С	16,1	16,9	17,2	18,3	20,5	20,4	14,7	12,4	11,7
200 °С	15,7	17,1	17,3	17,8	19,0	20,0	19,5	16,7	13,1
Al-20%Si									
без нагрева	14,6	15,8	16,2	16,5	18,7	25,2	19,1	15,2	
100 °С	15,4	16,2	16,8	17,5	20,8	26,1	15,7	13,1	12,1
150 °С	17,1	17,4	17,3	17,9	20,8	23,9	14,7	14,1	13,4
200 °С	14,7	16,2	16,8	17,2	17,8	18,0	15,9	15,0	12,5
Al-30%Si									
без нагрева	14,9	14,9	16,6	17,8	20,0	24,3	23,2	18	15,8
100 °С	15,1	15,3	15,3	16,2	19,4	21,7	14,9	14,3	12,4
150 °С	15,2	15,7	16,0	16,8	21,0	20,0	15,2	14,0	13,2
200 °С	15,0	15,5	15,7	16,2	16,0	15,6	13,1	13,0	11,2
Al-40%Si									
без нагрева	12,4	13,0	13,1	14,1	17,1	21,1	15,9	14,6	
100 °С	12,4	13,7	13,9	14,9	21,3	17,4	14,3	13,6	12,6
150 °С	13,0	12,9	13,0	14,1	18,2	17,0	14,2	14,0	13,0
200 °С	12,1	12,8	13,1	13,6	14,5	14,9	15,0	15,0	14,1

Обработка расплава смесью ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) является дополнительным фактором снижения ТКЛР в рабочем интервале температур. После обработки предложенным способом значения α на 12 – 17 % ниже, чем у сплавов обычного приготовления (рисунок 3).

Повышение физико-механических свойств сплавов Al-Si, подвергнутых обработке смесью ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) в процессе выплавки связано, видимо, с лучшим усвоением водорода и кислорода, вводимых в расплав. Кроме того, частицы тугоплавких оксидов Mg и Ca, содержащихся в смеси, служат дополнительными многочисленными центрами кристаллизации. Об эффективности данного способа обработки расплава для алюминия и сплавов системы Al-Si свидетельствует увеличение предельной степени пластической деформации до разрушения в среднем на 7-25% и снижение ТКЛР на 7-14% [6].

Выводы

1. Сравнивая полученные данные по влиянию рассмотренных способов предварительной обработки расплава можно сделать вывод, что продувка парами *водного раствора сульфата меди* в течение 5 – 15 минут при температуре 800 – 1100 °С приводит к уменьшению ТКЛР сплавов Al-20÷40%Si в низкотемпературном интервале испытаний. Так, для сплава Al-20%Si ТКЛР снижается со значений $\alpha_{50-150} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ до $16,6 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и для сплава Al-40%Si – со значений $\alpha_{50-150} = 13,2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ до $11,3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

2. Обработка расплава *парами карбамида* приводит к снижению ТКЛР алюминиевых сплавов Al-Si доэвтектического состава во всем интервале температур испытания. Наибольшее снижение наблюдается в интервале 50÷150 °С со значений $19,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ до $15,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Термическая обработка при 100÷200 °С способствует дальнейшему снижению ТКЛР: для малокремнистых сплавов наиболее эффективной признана обработка при 150 °С, для высококремнистых – при 200 °С.

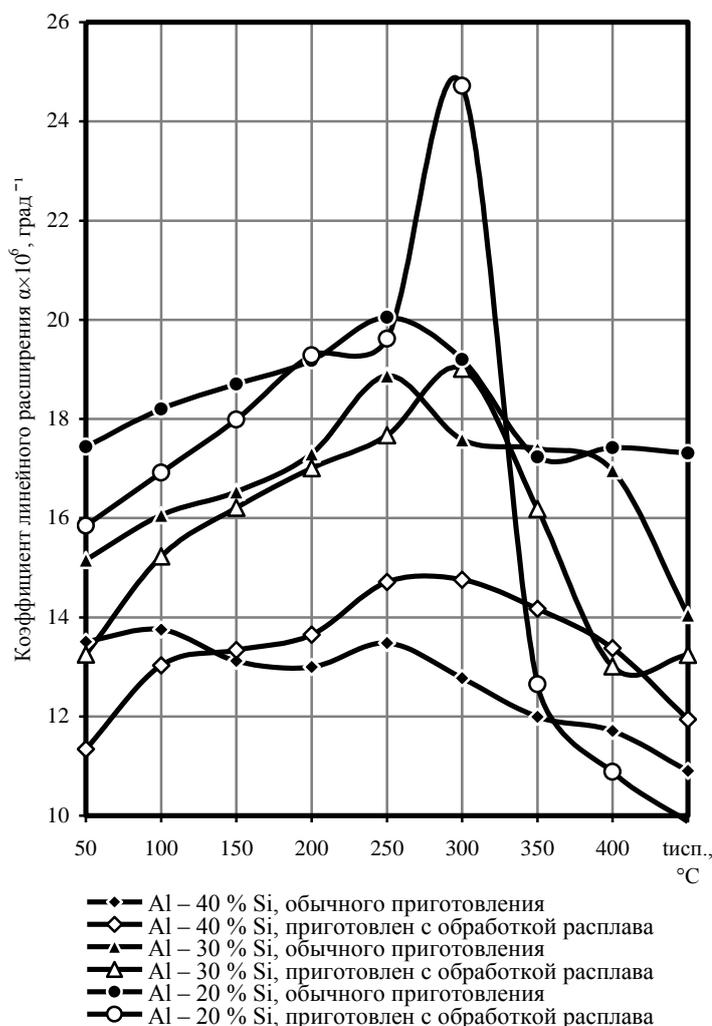


Рисунок 3 – Влияние обработки расплава смесью (CaCO₃·MgCO₃) на линейное расширение сплавов Al-Si

3. Обработка расплава *смесью карбонатов кальция и магния* является не только экологически чистым технологическим вариантом модифицирования сплавов Al-20÷40%Si, но и является дополнительным фактором снижения ТКЛР в рабочем интервале температур. После обработки предложенным способом значения α на 12 – 17 % ниже, чем у сплавов обычного приготовления. Так, в интервале 50÷150 °C, средний ТКЛР сплава Al-20%Si снижается со значений $18 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $16,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, для сплава Al-30%Si с $16 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $14,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, для сплава Al-40%Si с $13,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $12,6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Дополнительное преимущество использования смеси карбонатов заключается не только в комплексном модифицировании, но и в снижении температуры перегрева расплава с 1100 – 1200 °C до 900 °C и в сокращении времени выплавки с 5 – 6 до 1 – 1,5 ч.

Библиографический список

1. Афанасьев В.К. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники / В.К. Афанасьев, М.В. Попова // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 6. – С. 8 – 13.
2. Афанасьев В.К. Водород и свойства сплавов алюминия с кремнием / В.К. Афанасьев, И.Н. Афанасьева, В.В. Герцен, М.В. Попова, М.К. Сарлин. – Абакан: Хакасское кн. изд-во, 1998. – 192 с.
3. Ehrstrom J, Warner T. “Metallurgical design of alloys for aerospace structures” // *ICAA 7*, 2000. – v.1. – P. 5–16.
4. Попова М.В. Влияние обработки расплава на параметры микроструктуры и тепловое расширение силуминов с различным содержанием кремния / М.В. Попова, Н.В. Кибко // *Обработка металлов*. – 2014. – № 2 (63). – С. 107 – 116.
5. А.с. СССР № 1312989, МПК C22C 1/06, C22B 9/10. Способ модифицирования силуминов /

В.К. Афанасьев, З.А. Скобелина, О.В. Рябцев [и др.]. – Сибирский металлургический институт им. Серго Орджоникидзе. – Заявл. 04.06.85. – № заявки 3906333/22-02.

6. Пат. 2136773 РФ. Способ модифицирования алюминия и его сплавов / М.В. Попова, В.В. Герцен, А.В. Доронченко, В.К. Афанасьев. – № 98104521; заявл. 05.03.98; опубл. 10.09.99.

7. Афанасьев В.К. О создании новых легких деформируемых сплавов для космической техники / В.К. Афанасьев, В.А. Самонь, М.В. Попова и др. // Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении». – Кемерово: 2015. – С. 37-44.

8. MJ. Starink, I. Sinclair, P.J. Gregson, Predicting the structural performance of heat-treatable Al-alloys, Aluminum Alloys: their physical and mechanical properties. 2000, vol. 331-337, p. 97-110.

9. Афанасьев В.К. Воздействие внешней среды на формирование свойств алюминиевых сплавов при термической обработке / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.В. Герцен, С.В. Долгова, В.А. Лейс // Обработка металлов. – 2013. – № 4 (61). – С. 28–34.

10. P.D. Hess and G.K. Tumbull, Effects of Hydrogen on Properties of Aluminum Alloys // Paper from Hydrogen in Metals, American Society for Metals, 1974. – p. 277-287.

11. Ушакова В.В. Влияние обработки расплава парами водного раствора сульфата меди на линейное расширение сплавов Al-(20÷40)%Si / В.В. Ушакова, К.А. Воротынцева, М.В. Попова // Сборник материалов 5-ой научн.-метод. конференции с международным участием «Наследственность в литых сплавах», г. Самара. – 1995. – С. 188-189.

12. Афанасьев В.К. О воздействии обработки расплава и термической обработки на линейное расширение алюминиево-кремниевых сплавов / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова и др. // Сб. материалов 1-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении». – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2014. – С. 381 – 387.

УДК 621.789

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СТАЛИ СТ3 ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ

Балановский А.Е.¹, Штайгер М.Г.², Кондратьев В.В.¹, Карлина А.И.¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия, kvv@istu.edu

²УК Мечел Сталь,
г. Москва, Россия, stayger75@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования изменения микроструктуры стали Ст3 при различных способах термической обработки. Приведено сравнение твердости при объемной закалке и закалке высококонцентрированным источником тепла (плазменная дуга). Представлено описание получаемых микроструктур.

Ключевые слова: микроструктуры, объемная закалка и нормализация, ультразвуковая обработка, плазменная дуга, микротвердость, высококонцентрированный источник.

THE COMPARATIVE METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF THE STRUCTURE STEEL ST3 AFTER VARIOUS METHODS OF HARDENING

Balanovsky A.E.¹, Shtayger M.G.², Kondrat'ev V.V.¹, Karlina A.I.¹

¹National Research Irkutsk Technical University,
Irkutsk, Russia, kvv@istu.edu

²MC Mechel Steel,
Moscow, Russia, stayger75@yandex.ru

Abstract: Presents results of a study changing micro-structure of steel St3 at various ways of thermal treatment. The comparison of hardness at volume hardening and hardening of a highly concentrated heat source (plasma arc). The description of the resulting microstructures.

Key words: microstructure, volumetric hardening and normalizing, ultrasonic machining, plasma arc, micro-hardness, highly concentrated source.