

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

*Посвящается 100-летию
со дня рождения ректора СМИ,
доктора технических наук,
профессора Н.В.Толстогузова*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2021»**

***Труды
XXII Международной научно-практической конференции***

10 – 11 ноября 2021 г.

Часть 1

**Новокузнецк
2021**

СОДЕРЖАНИЕ

ПАМЯТИ НИКОЛАЯ ВАСИЛЬЕВИЧА ТОЛСТОГУЗОВА <i>Рожихина И.Д.</i>	4
СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	9
ЛЕГИРОВАНИЕ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ ПРИРОДНЫМИ И ТЕХНОГЕННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ <i>Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е., Голодова М.А., Дмитриенко В.И.</i>	9
ПОЛУЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД КУЗБАССА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ В МЕТАЛЛУРГИИ <i>Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Ходосов И.Е.</i>	18
АНАЛИЗ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ <i>Павлов А.В., Спирин Н.А., Бегинюк В.А., Косаченко И.Е.</i>	26
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОКУСКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ	32
<i>Берсенев И.С., Брагин В.В., Солодухин А.А., Поколенко А.Ю., Бардавелидзе Г.Г., Спирин Н.А.</i>	32
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ НИОБИЙСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ В ЖИДКОЙ СТАЛИ <i>Жучков В.И., Заякин О.В., Кель И.Н.</i>	37
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ НЕЙТРАЛЬНЫЙ ГАЗОМ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ <i>Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Полях О.А.</i>	42
ПОЛУЧЕНИЕ КРЕМНИЯ И ФЕРРОСИЛИЦИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКОЙ И ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ <i>Ёлкин К.С., Рожихина И.Д., Ёлкин Д.К.</i>	46
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ <i>Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Коновалов С.В., Воробьев С.В., Семин А.П., Бессонов Д.А.</i>	50
ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ <i>Гизатулин Р.А., Лепихов В.С., Шароватых Д.Ю.</i>	54
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ В МЕТАЛЛУРГИИ ЦИНКА <i>Козлов П.А.</i>	57
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАРГАНЦЕВЫХ СПЛАВОВ ИЗ БЕДНЫХ КАРБОНАТНЫХ И ОКСИДНЫХ РУД В АГРЕГАТЕ СЭР <i>Рыбенко И.А., Цымбал В.П., Kongoli F.</i>	66
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВСПЕНИВАНИЯ 350-ТОННОЙ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НИЗКОМАРГАНЦОВИСТЫХ ЧУГУНОВ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Полях О.А., Чернышева Н.А., Козьминых Р.А.</i>	73
КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ПРОДУВКЕ НЕЙТРАЛЬНЫМ ГАЗОМ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ <i>Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Полях О.А.</i>	78
ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА НА «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Леонтьев А.С., Рыбенко И.А.</i>	82

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ИЗВЕСТНЯКА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ <i>Уманский А.А., Козырев Н.А., Жutow С.В., Николаев В.К., Гизатулин Р.А.</i>	87
ПОВЕДЕНИЕ МАРГАНЦА В ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ <i>Гизатулин Р.А., Дмитриенко В.И., Дмитриенко А.В., Носов Ю.Н., Ноздрин И.В.</i>	92
РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МНОГОСОПЛОВЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ДЛЯ 350-ТОННЫХ КОНВЕРТЕРОВ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Чернышева Н.А., Сафонов С.О.</i>	95
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ДУТЬЕВЫХ УСТРОЙСТВ И КОНСТРУКЦИИ ДВУХЪЯРУСНОЙ КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ ДЛЯ 350-ТОННЫХ КОНВЕРТЕРОВ АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Чернышева Н.А., Сафонов С.О.</i>	101
РАСЧЕТ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ В КОЛОННОМ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОМ РЕАКТОРЕ <i>Сеченов П.А., Рыбенко И.А., Roos К.</i>	107
ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПЛАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ СПЛАВОВ В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОМ РАСПЛАВЕ <i>Заякин О.В., Ренёв Д.С., Жучков В.И.</i>	112
ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА, ВАНАДИЯ И ТИТАНА ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ ОБЖИГЕ ТИТАНОМАГНЕТИТА <i>Агамирова А.С.</i>	116
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ПОЛОСТИ 160-ТОННОГО КОНВЕРТЕРА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Протопопов Е.В., Солоненко В.В., Темлянецев М.В., Якушевич Н.Ф., Полях О.А.</i>	121
МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕРИЯ МЕЖДУ ШЛАКОМ СИСТЕМЫ СаО-SiO ₂ -Ce ₂ O ₃ -15%Al ₂ O ₃ -8%MgO И НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫМ МЕТАЛЛОМ <i>Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Уполовникова А.Г.</i>	126
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СМЕННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Лубяной Д.А., Юрьев А.Б., Кузнецов И.С., Маркидонов А.В., Лубяной Д.Д.</i>	131
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ С ПРЯМЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ МАРГАНЦЕМ <i>Лубяной Д.Д., Юрьев А.Б., Маркидонов А.В., Кузнецов И.С., Лубяной Д.А.</i>	136
РАЗРАБОТКА В PASCALABC.NET ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАКОВ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА <i>Хоанг В.В., Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Плакуций А.В.</i>	141
СЕКЦИЯ 2: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	147
ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА, ОБЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ <i>Абатурова А.А., Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Леонов А.А., Аксенова К.В.</i>	147
О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГКИХ ИНВАРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Si-Cu <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Малюх М.А.</i>	154
ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ <i>Князев С. В., Куценко А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Соколов Б.М., Ознобихина Н.В.</i>	159

8. Лунев, Ф.А. Силумин / Ф.А. Лунев // М.: Ленинград ОНТИ, – 1937. – 50 с.

9. Ласковнев, А.П. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др. // под ред. А.П. Ласковнева. – Минск: Беларус. Наука, – 2013. – 287 с.

УДК 669.71.017

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГКИХ ИНВАРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Si-Cu

Афанасьев В.К., Попова М.В., Малюх М.А.

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

Аннотация: Исследованы закономерности изменения структуры и теплового расширения тройных высоколегированных сплавов Al-Si-Cu с высоким содержанием кремния. Установлена возможность получения низких значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) сплава 50% Si – 20 % Cu – Al во всем интервале испытания. Методом растровой электронной микроскопии исследован характер распределения легирующих элементов в исследуемых высоколегированных сплавах. Результаты рентгенофазового анализа и рентгеноспектрального микроанализа показали, что между пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы располагаются частицы фазы CuAl_2 .

На базе сплава 50 % Si – 40 % Cu – Al получен литой легкий инвар, который имеет неизменные значения $\alpha = 3,0 \div 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ во всем температурном интервале испытаний. Разработаны составы новых высоколегированных легких сплавов системы Si-Cu-Al, обеспечивающие наименьшие значения ТКЛР при температурах 50 – 450 °С.

Ключевые слова: высоколегированные сплавы, легирование, микроструктура, температурный коэффициент линейного расширения.

ABOUT THE POSSIBILITY OF OBTAINING LIGHT INVARS BASED ON THE Al-Si-Cu SYSTEM

Afanasyev V.K., Popova M.V., Malyuh M.A.

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

Abstract. The regularities of changes in the structure and thermal expansion of triple high-alloyed Al-Si-Cu alloys with a high silicon content are investigated. The possibility of obtaining low values of the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of the alloy 50% Si – 20% Cu – Al in the entire test interval is established. The nature of the distribution of alloying elements in the studied high-alloyed alloys is studied by scanning electron microscopy. The results of X-ray phase analysis and X-ray spectral microanalysis showed that CuAl_2 phase particles are located between the plate crystals of the siliceous phase.

On the basis of the alloy 50% Si – 40% Cu – Al, a cast light invar was obtained, which has constant values $\alpha = 3,0 \div 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$ in the entire temperature range of tests. Compositions of new high-alloyed light alloys of the Si-Cu-Al system have been developed, providing the lowest values of TCLE at temperatures of 50-450 °C.

Keywords: high-alloy alloys, alloying, microstructure, temperature coefficient of linear expansion.

Новые материалы специального назначения с регламентированным уровнем теплофизических свойств необходимы современным наукоемким отраслям промышленности. Специальное назначение алюминиевых сплавов определяется требованиями 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 [1].

В качестве материалов с минимальными значениями ТКЛР в настоящее время используются сплавы на основе системы Fe-Ni – инвары и на основе системы Fe-Ni-Co – суперинвары. Данные сплавы являются высоколегированными, обладают высокой плотностью, что утяжеляет конструкции и приборы. В области легких сплавов лучшим достижением на сегодняшний день являются спеченные алюминиевые сплавы (САС) на основе системы Al-Si, получаемые методами порошковой металлургии. Технологический процесс изготовления спеченных алюминиевых сплавов с низким ТКЛР достаточно сложен и включает следующие основные операции: получение порошка сплава, горячее брикетирование порошка, прессование полуфабрикатов. При удовлетворительных механических свойствах ТКЛР сплавов типа САС не меньше $13,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ [2].

Создание легких сплавов специального назначения предполагает легирование кремнием, поскольку он имеет малую плотность и низкий ТКЛР по сравнению с алюминием [3]. Проведенные ранее исследования показали, что ТКЛР алюминия снижается при растворении в нем меди, никеля, железа, хрома и бериллия, то есть элементов с меньшим ТКЛР, чем у металла-основы [4, 5]. Следует отметить, что количество легирующих добавок, вводимых для уменьшения теплового расширения, значительно превышает предельную растворимость этих элементов в алюминии, что отрицательно сказывается на структуре и общем комплексе свойств алюминиевых сплавов. Традиционно считается, что растворимость алюминия в кремнии весьма мала. Однако использование более точных методов исследования позволило установить [6], что кремний имеет несколько полиморфных модификаций, на базе которых образуются твердые растворы большей концентрации, чем это принято считать.

Наряду с кремнием, важнейшим легирующим элементом сплавов на основе алюминия является медь. Система Al-Cu с содержанием меди до 60 % относится к эвтектическому типу. В отличие от системы Al-Si, в ней образуется целый ряд интерметаллидов, самым значимым из которых является фаза CuAl_2 . Промышленные алюминиево-медные сплавы содержат от 4,5 до 10 % Cu, поэтому представляет интерес исследование тройных сплавов с содержанием меди, многократно превышающим предел ее растворимости в алюминии. Результаты ранее проведенных исследований позволили установить, что совместное легирование кремнием и медью в суммарном количестве до 30–40 % позволяет снизить ТКЛР сплавов на основе алюминия до значений $12,5 \div 12,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ [7–10].

В данной работе в качестве объекта исследования были выбраны тройные сплавы системы Al – 40÷50% Si – Cu при различном соотношении Si и Cu. Сплавы выплавляли в лабораторных условиях в печах с силитовыми нагревателями, с соблюдением всех правил подготовки шихты и ведения плавки. Шихтовый алюминий расплавляли, вводили в него кремний в количестве 40, 50 % и медь в количестве 15, 20, 40, 50 %. Сплавы заливали в алюминиевый кокиль ($t_k=20^\circ\text{C}$). Температура заливки составляла 1100 – 1200 °C. Из полученных слитков изготавливали образцы для dilatометрического и металлографического исследований. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего dilatометра системы Шевенара, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе *OLYMPUS GX-5*, при увеличениях 200 – 1000. Рентгеноспектральный микроанализ был проведен с помощью растрового электронного микроскопа *Zeiss EVO 50 XVP*¹.

Металлографический анализ тройных сплавов Al – 40% Si – Cu показал, что высоколе-

¹ Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ССМ НГТУ

гированные сплавы содержат в своей структуре крупные пластинчатые кристаллы первичного кремния (рисунок 1, *а, б, в*).

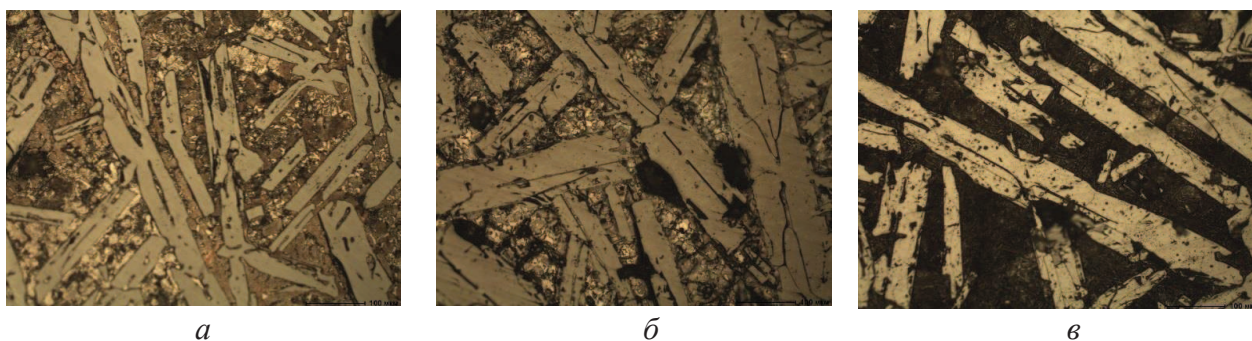


Рисунок 1 – Микроструктура сплавов на основе Al – 40 % Si – Cu:
а – 15 % Cu, *б* – 40 % Cu, *в* – 50% Cu

Установлено, что с увеличением содержания меди до 50 %, уменьшается объемная доля эвтектики. Это позволяет сделать заключение о том, что при больших содержаниях меди снижается предел растворимости кремния в алюминии. Другими словами, меняются условия структурообразования сплавов [11].

Кроме того, по результатам микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализа установлено, что в составе эвтектики присутствует не только интерметаллид CuAl_2 , но и Cu_9Al_4 (рисунок 2).

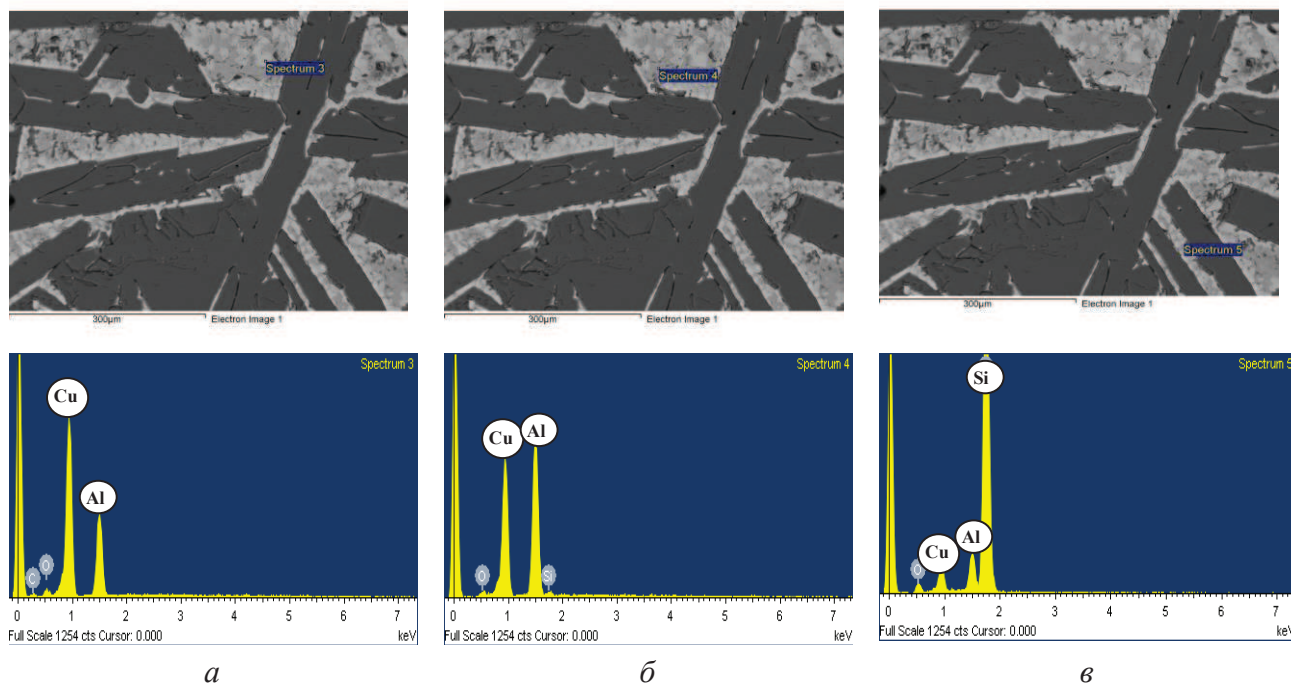


Рисунок 2 – Микроструктура и элементный состав сплава Al – 40 % Si – 40 % Cu в характерных участках образцов: *а, б* – фаза CuAl_2 ; *в* – твердый раствор переменной растворимости легирующих элементов

Изучено влияние меди на тепловое расширение сплавов Al-40% Si-Cu и Al-50% Si-Cu. Установлено, что легирование высококремнистых сплавов медью в количестве 20% позволяет получить тройные сплавы со слабо изменяющимся ТКЛР во всем температурном интервале испытаний (таблица 1).

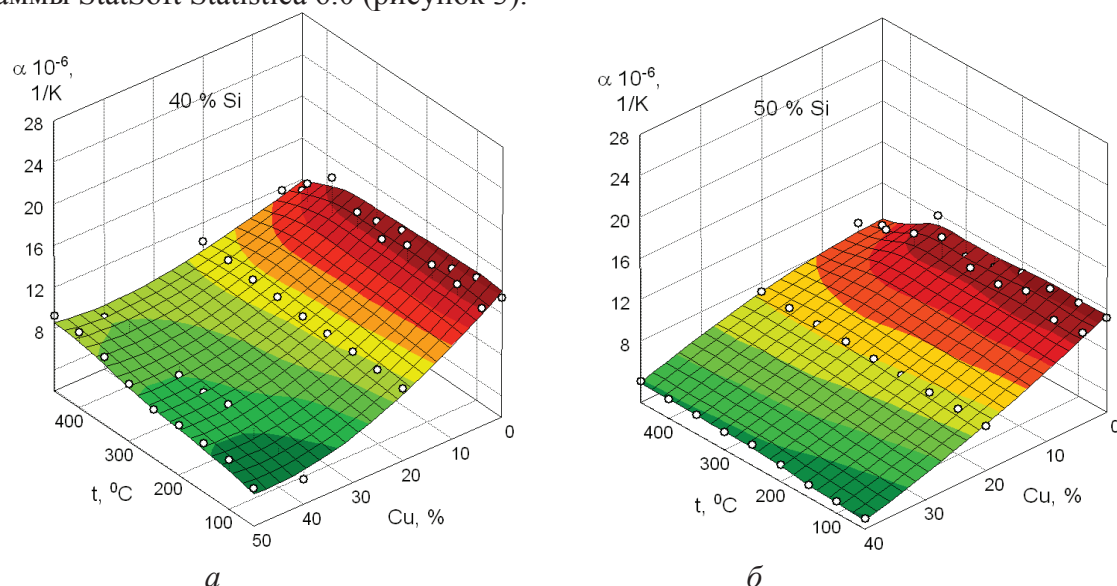
У высококремнистых сплавов (40÷50 %) Si легирование медью в больших количествах снижает ТКЛР сплавов во всем температурном интервале испытаний. Видно, что сплав Al – 50% Si – 40 % Cu, который, по сути, уже является сплавом на основе кремния, имеет значения $\alpha = 3,0\div 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Таблица 1 – Тепловое расширение высоколегированных сплавов Al – Si – Cu

Основа сплава	Содержание меди, %	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ град ⁻¹ при температуре нагрева, °C								
		50	100	150	200	250	300	350	400	450
Al-40 % Si	-	12,5	13,3	13,5	13,9	14,5	12,8	11,9	11,7	10,9
	20	8,9	9,1	9,2	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,1
	40	4,4	4,5	4,5	6,7	6,2	6,3	6,3	6,7	7,0
Al-50 % Si	-	11,1	11,0	10,9	10,9	9,9	9,4	11,9	7,9	7,9
	20	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,8	7,0	7,1
	40	3,0	3,1	3,2	3,6	4,0	3,7	3,8	3,8	4,0

Обобщение результатов dilatометрического и рентгенофазового анализов позволяет утверждать, что ТКЛР тройных сплавов системы Al–Si–Cu значительно уменьшается, если в их составе присутствует не только большое количество кремнистой фазы, но и интерметаллиды, такие как CuAl₂, Cu₉Al₄, CuAl.

Закономерности изменения величины ТКЛР сплавов Al – 40÷50% Si – Cu в зависимости от содержания меди и от температуры испытания получены на графиках уравнений регрессии, представленных в виде трехмерной поверхности. Графики построены с помощью программы StatSoft Statistica 6.0 (рисунок 3).



a – сплав Al – 40% Si – Cu; *б* – сплав Al – 50% Si – Cu

Рисунок 3 – Влияние содержания меди на ТКЛР сплавов Al – Si – Cu

С помощью полученных графиков можно прогнозировать величину ТКЛР сплавов Al – 40÷50% Si – Cu в зависимости от содержания меди и температуры испытания.

Полученные экспериментальные данные, демонстрируют постоянство значений ТКЛР исследуемых высоколегированных сплавов во всем температурном интервале испытаний от 50 до 450 °C. Таким образом, полученные легкие сплавы могут стать альтернативой тяжелым железоникелевым сплавам с регламентированным ТКЛР, таким как Н47Х, Н47ХЗ, Н47БХ, Н47Д5, НЗЗК17, Х18ТФМ [12]. Разработанные сплавы системы Al – Si – Cu могут работать в паре с керамикой и различными стеклами.

Выводы.

Результаты dilatометрических исследований высоколегированных сплавов демонстрируют возможность применения меди для получения легких сплавов системы Al–Si с низкими и стабильными значениями ТКЛР ($\alpha = 9,0 \div 4,0 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹) во всем интервале температур эксплуатации.

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, CuAl₂, Cu₉Al₄.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е.Н. Каблов // Юбилейный науч.-технич. сб. «Авиационные материалы и технологии». – Москва: ВИАМ. – 2012. – С. 7-17.
2. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Г.А. Меркулова. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2008. – 312 с.
3. Афанасьев В.К. 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.
4. Afanasyev V.K. Effect of alloying on the thermal expansion of aluminum / V.K. Afanasyev, M.V. Popova, A.A. Ruzhilo, V.F. Frolov. – Russian metallurgy (Metally). – 2002. – № 6. – P. 539-544.
5. Popova, M.V. On linear expansion of alloyed aluminum alloys with silicon / M.V. Popova, V.F. Frolov, A.N. Lyubushkina. – Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2003. – № 2. – P. 38–40.
6. Таран, Ю. В. Фазовые переходы в кремнии и сплавах Al–Si / Ю.В. Таран, В.З. Куцова // Современные проблемы металлургии : научные труды. Вып. 1. – Днепропетровск, 1999. – С. 223–246.
7. Афанасьев В.К. Влияние меди на линейное расширение алюминиевых и кремниевых сплавов / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, Н.Б. Лаврова, Г.Г. Мажитова, М.В. Попова, В.А. Самонь // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 16-19.
8. Афанасьев В.К. 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 (71). – С. 87-94.
9. Afanasyev V. K. Features of structure formation and thermal expansion of high alloys of the Al–Si–Cu system / V. K. Afanasyev, M. V. Popova, M. A. Malyukh and A. N. Prudnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 866 (2020) 012035. – doi:10.1088/1757-899X/866/1/012035. – P. 1–7 (012035).
10. Afanasyev V.K. 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. – P. 1-7 (012010).
11. Попова М.В. Структура и тепловое расширение высоколегированных сплавов системы Al–Si–Cu специального назначения / М.В. Попова, М.А. Малюх // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2020. – Т. 7. – № 1-2. – С. 105-112.
12. Афанасьев В.К. Инвары: Учебное пособие / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.А. Гладышев, В.В. Герцен, Г.В. Обухов, А.В. Горшенин. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 126 с.