

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**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЕМ
ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ

<i>Князев С.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А.</i>	163
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЧУГУНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОСБОРНОГО КОЛОКОЛА	
<i>Усольцев А.А., Князев С.В., Куценко А.И., Козырев Н.А., Дмитриенко В.И.</i>	167
ОЦЕНКА ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ЧУГУНОВ ВЧ50 И ЧХЗ	
<i>Дмитриенко В.И., Князев С. В., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А.</i>	177
ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ХН65ВМТЮ (ЭИ896) МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чэнь Д., Панченко И.А.</i>	184
ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ И ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЛЬСОВ	
<i>Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А., Кормышев В.Е., Перегудов О.А., Семин А.П.</i>	189
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ И МЕДИ	
<i>Попова М.В., Жибинова И.А., Прудников А.Н.</i>	194
ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ ВЫСОКОЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА 008ЖР	
<i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В.</i>	201
МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДОМЕННОГО ЧУГУНА ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В., Сагалакова М.М., Черныш А.П., Жибинова И.А., Малюх М.А.</i>	208
ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А0 С НИЗКОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРОРАБОТКИ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ	
<i>Яшин В.В., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю., Латушкин И.А.</i>	212
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫКАТЫВАЕМОСТИ ДЕФЕКТОВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА	
<i>Уманский А.А., Юрьев А.Б.</i>	216
МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ И СВОЙСТВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
<i>Арышенский Е.В., Коновалов С.В.</i>	225
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЛИТЬЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ SI ЛЕГИРОВАННОГО МАЛЫМИ ZR, SC ДОБАВКАМИ	
<i>Лапишов М.А., Арышенский Е.В., Коновалов С.В., Арышенский В.Ю.</i>	232
ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МИКРОТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 9СRМОВ-N ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
<i>Осинцев К.А., Шляров В.В., Чэнь С., Коновалов С.В., Загуляев Д.В., Чаплыгин К.К.</i>	240
ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНОЙ РЕЛЬСЫ С УСКОРЕНИЕМ	
<i>Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С.</i>	248
РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ ДИФфуЗИИ ПО ТОЛЩИНЕ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ (ФАЗЫ) ПРИ ВЛИЯНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО НИКЕЛЯ НА ДИФфуЗИОННЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ	
<i>Розенштейн Е.О., Бондарева О.С., Коновалов С.В.</i>	255

верхностном слое, где формируется фрагментированная структура и выделяются наноразмерные частицы цементита.

При наработке 1411 млн. тонн размеры фрагментов феррита в поверхностном слое выкружки изменяются в пределах 30-40 нм, а в поверхностном слое поверхности катания – 150-300 нм. Относительное содержание зерен с фрагментами составляет 25 % в поверхностном слое выкружки и 15 % в поверхностном слое поверхности катания.

При пропущенном тоннаже 11770 млн. тонн в поверхностном слое пластинчатый перлит практически разрушен. Показано, что экстремально длительная эксплуатация рельсов сопровождается существенным перераспределением атомов углерода в поверхностных слоях толщиной до 10 мм. В исходном состоянии основное количество атомов углерода сосредоточено в частицах цементита, а после экстремально длительной эксплуатации рельсов местом расположения углерода, наряду с частицами цементита, являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен). Отмечено, что процессы перераспределения атомов углерода наиболее интенсивно происходят в поверхностных слоях до 2 мм. Увеличение пропущенного тоннажа сопровождается заметным перемещением атомов углерода на дефекты структуры в рабочей выкружке по сравнению с поверхностью катания.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 19-32-60001).

Библиографический список

1. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.B., Morozov K.V. Microstructure of Quenched Rails. – Cambridge, CISP Ltd. 2016. – 153 p.
2. Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation. – Materials Research Forum LLC. 2021. – 193 p.
3. Zuo J.M., Spence J.C.H. Advanced Transmission Electron Microscopy. – New York: Springer. 2017. – 729 p.
4. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. – Basel: Springer International Publishing. 2016. – 196 p.
5. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing. 2016. – 518 p.
6. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука. 1977. – 236 с.
7. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon // Trans. Met. Soc. AIME. 1967. V. 239. No. 11. P. 1818–1820.
8. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия. 1986. – 224 с.

УДК 669.71.017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ И МЕДИ

Попова М.В.¹, Жибинова И.А.², Прудников А.Н.¹

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, m.v.popova@mail.ru*

²*Кузбасский гуманитарно-педагогический институт КемГУ,
Новокузнецк, Россия*

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния легирования медью в количестве 2–60 % на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) сплавов

систем Al–11%Si и Al–20%Si. По результатам множественного регрессионного анализа построены математические модели температурной зависимости ТКЛР силуминов с различным содержанием кремния и меди в интервале температур 50–250 °С. Проведена проверка качества моделей. Полученные математические зависимости могут быть использованы для разработки составов легких сплавов с требуемыми значениями ТКЛР.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, легирование, кремний, медь, температурный коэффициент линейного расширения, регрессионный анализ

MODELING OF TEMPERATURE DEPENDENCE THERMAL EXPANSION OF SILUMINS WITH DIFFERENT SILICON AND COPPER CONTENT

Popova M.V.¹, Zhibinova I.A.², Prudnikov A.N.¹

¹*Siberian State Industrial University*

Novokuznetsk, Russian Federation, m.popova@rdtc.ru

²*Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute KemGu, Novokuznetsk, Russia*

Abstract. The results of studies of influence of copper alloying in amount of 2-60 % on temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of alloys of Al-11 % Si and Al-20 % Si systems are presented. Based on the results of multiple regression analysis, mathematical models of the temperature dependence of the thermal expansion of silumins with different silicon and copper contents in the temperature range of 50-250 °C were constructed. The quality of the models was checked. The obtained mathematical relationships can be used to develop light alloy compositions with the required TCLR values.

Keywords: aluminium alloys, alloying, silicon, copper, temperature coefficient of linear expansion, regression analysis

Развитие наукоемких отраслей промышленности основано на использовании новых материалов с улучшенными свойствами, во многом определяющих возможности современной техники. В частности, для таких отраслей машиностроения как авиастроение, двигателестроение, приборостроение необходимы легкие материалы с низкими значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР, α), сочетающие высокую стабильность размеров в интервале температур эксплуатации с хорошей коррозионной стойкостью [1, 2].

Этим требованиям отвечают сплавы алюминия с кремнием, так как алюминий – легкий и пластичный металл, обладающий высокой коррозионной стойкостью. Сплавы Al–Si немагнитны, характеризуются хорошими литейными свойствами и герметичностью [3]. Медь так же, как и кремний, является важнейшим легирующим элементом алюминия, повышающим прочность и жаропрочность. Сплавы системы Al–Si–Cu широко применяются в машиностроении как конструкционные материалы. Для создания сплавов с малым тепловым расширением ТКЛР алюминия достаточно велик ($\alpha_{0-100} = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), однако его можно значительно снизить за счет легирования кремнием и медью, величина ТКЛР которых меньше, чем у алюминия ($\alpha_{\text{Si}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{Cu}} = 16,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [4, 5]. На основании результатов ранее проведенных исследований теплового расширения как двойных, так и тройных сплавов Al–Si, Al–Cu и Al–Si–Cu можно утверждать, что именно тройные сплавы могут иметь низкие и стабильные значения ТКЛР (от 6 до $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), в довольно широком диапазоне температур испытания [6, 7]. Однако подбор легирующего комплекса, обеспечивающего требуемые значения ТКЛР в заданном интервале температур эксплуатации – это довольно сложная задача, которая до настоящего времени решается экспериментальным путем [8].

При разработке сплавов специального назначения с требуемыми значениями ТКЛР обычно учитывают влияние не только химического состава сплава, но и технологических параметров, ответственных за формирование его структуры. При этом правильный выбор легирующих элементов и их количественного соотношения является определяющим, поскольку значения ТКЛР в первую очередь зависят от величины сил межатомной связи [9].

Для создания новых перспективных сплавов с низким ТКЛР необходимо провести объемные экспериментальные исследования, на основе которых возможно оценить вклад и степень влияния каждого из изучаемых факторов на структуру и свойства сплава. Однако проведение натурных экспериментов требует больших материальных и временных затрат, поэтому зачастую объем экспериментальных данных о характеристиках разрабатываемого нового материала весьма ограничен. В связи с этим весьма актуальной и значимой является задача моделирования свойств сплавов на этапе их разработки.

В настоящей работе приведены результаты моделирования температурной зависимости теплового расширения сплавов алюминия с кремнием, содержащих в качестве третьего компонента медь. Установлено, что кремний и медь снижают ТКЛР алюминиевых сплавов, когда их содержание значительно превышает предельную растворимость в алюминии [10, 11]. Однако величина ТКЛР при их совместном введении изменяется нелинейно и для получения достоверных значений коэффициента линейного расширения требуется проведение большого числа экспериментов.

В качестве объекта исследования были выбраны тройные сплавы систем Al–11%Si–Cu и Al–20%Si–Cu, в которых содержание меди изменялось от 2 до 60%. 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, а затем медь. Сплавы заливали в алюминиевый кокиль ($t_k=20$ °C) при температуре 1100 – 1200 °C. Из полученных слитков изготавливали образцы для dilatометрического анализа. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фототренирующего dilatометра системы Шевенара, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Статистическую обработку результатов эксперимента проводили по известным методикам [12]. Анализ данных и построение моделей осуществляли с помощью программы StatSoftStatistica Release:6.

Экспериментально полученные данные зависимости величины ТКЛР исследуемых сплавов от температуры и содержания меди визуализированы в виде двумерных графиков (рисунки 1 и 3) и графиков поверхности (квадратичное сглаживание), что позволяет выявить скрытую структуру данных и взаимосвязи между тремя переменными (рисунки 2 и 4).

При изучении влияния меди на тепловое расширение сплава Al-11%Si, который является основой широко применяемого в промышленности литейного сплава АК12, было установлено, что увеличение содержания меди в сплаве от 4 до 60% способствует плавному снижению значений ТКЛР в диапазоне температур испытания 50–250 °C. Причем у сплавов, легированных медью в количестве 30 и более процентов, не наблюдалась аномалия линейного расширения в интервале 250–350 °C, характерная для двойного сплава (рисунки 1 и 2).

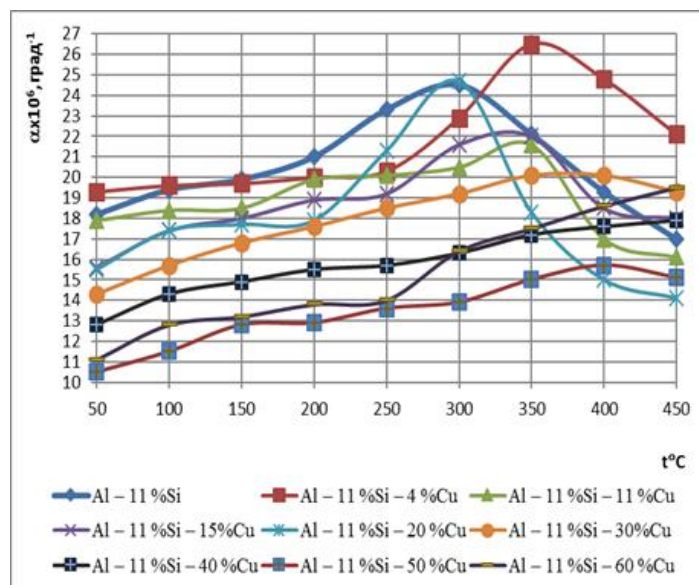


Рисунок 1 – Влияние меди на тепловое расширение сплавов Al–11% Si

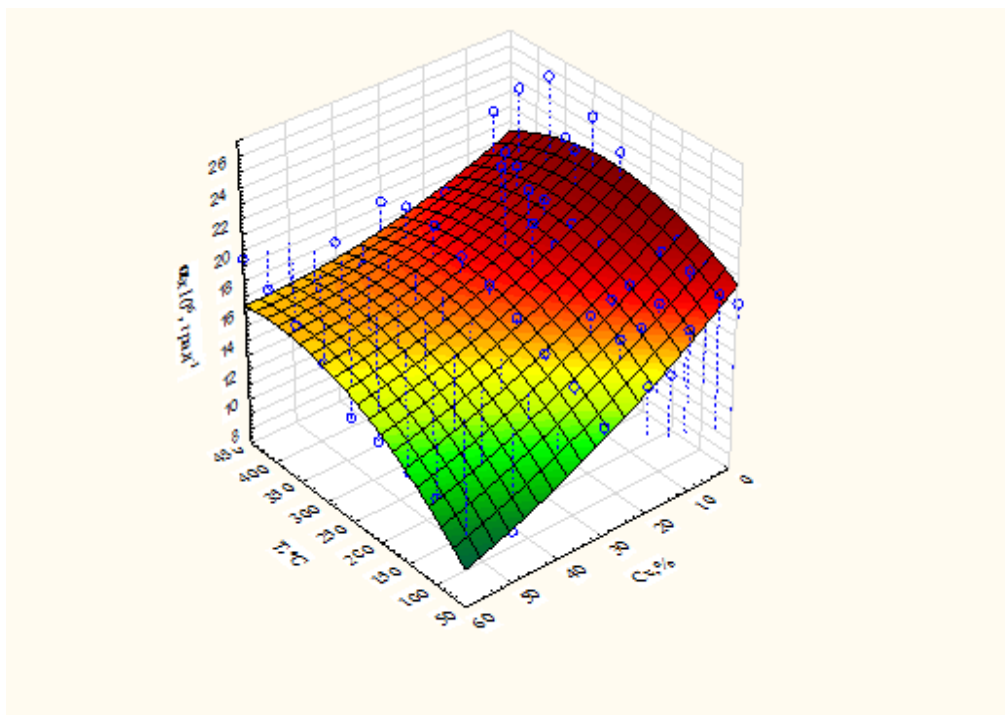


Рисунок 2 – Диаграмма зависимости ТКЛР от температуры и содержания меди для сплавов Al–11%Si–Cu (квадратичное сглаживание)

Установлено, что сплав Al–20 % Si, являющийся основой промышленных сплавов для производства поршней двигателей внутреннего сгорания, с увеличением содержания меди также имеет более низкие значения и стабильные значения ТКЛР в низкотемпературном интервале испытаний. Показано, что легирование медью в небольших количествах способствует незначительному снижению ТКЛР тройного сплава во всем интервале температур испытания. Дилатометрические исследования позволили установить, что легирование медью в количестве 2, 4 и 15 % снижает ТКЛР сплава в интервале 50–250 °С, но при этом наблюдается аномалия линейного расширения при температуре испытания 300 °С (рисунки 3 и 4).

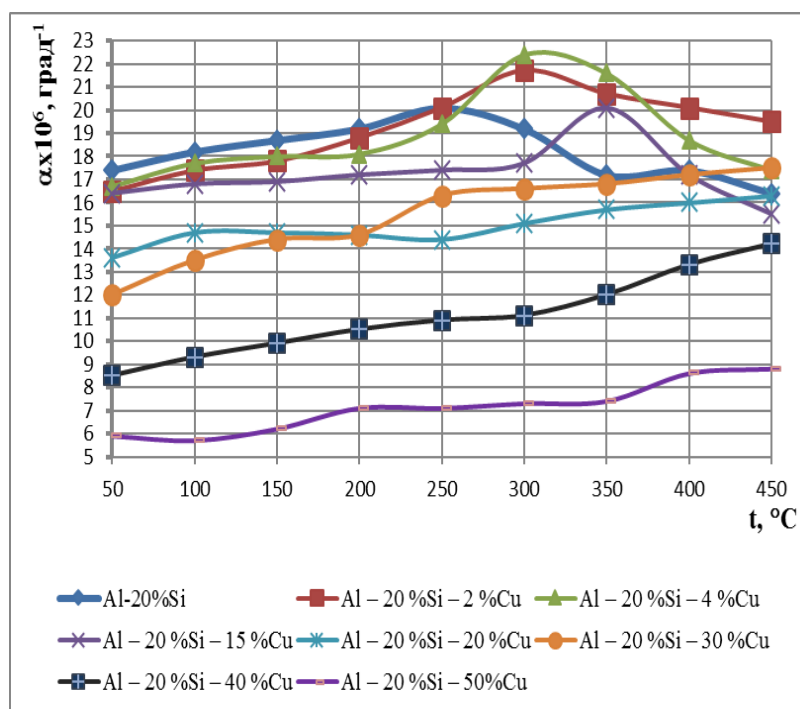


Рисунок 3 – Влияние меди на тепловое расширение сплавов Al–20% Si

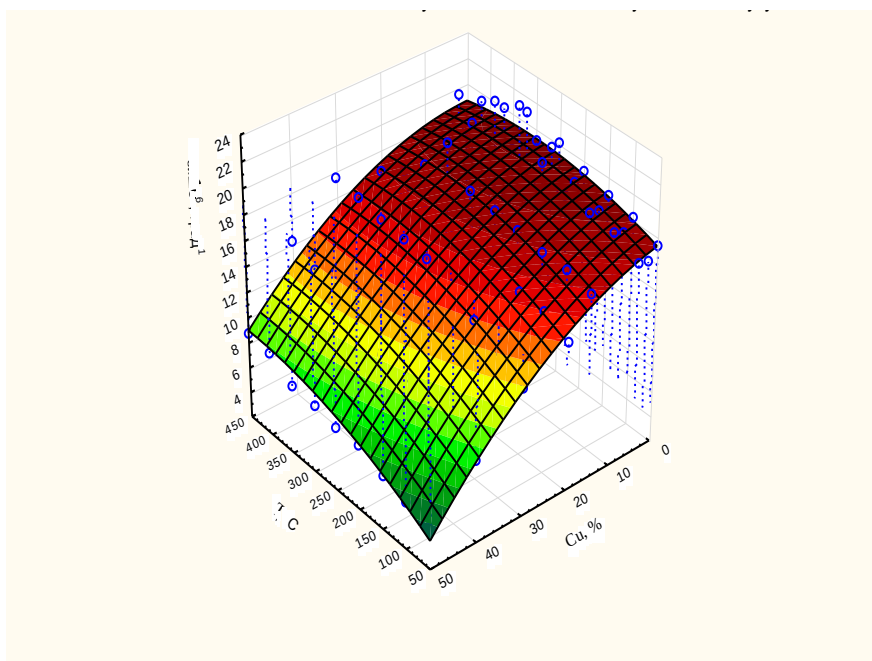


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости ТКЛР от температуры и содержания меди для сплавов Al–20%Si–Cu (квадратичное сглаживание)

Увеличение содержания меди в сплаве Al-20 % Si от 20 до 50% устраняет аномалию линейного расширения и приводит к значительному снижению ТКЛР во всем температурном интервале испытаний. Так, средний ТКЛР сплава Al-20 % Si-20 % Cu в интервале 50-200 °C равен $\bar{\alpha}_{50-200} = 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, однако с увеличением содержания меди в сплаве до 30, 40 и 50% ТКЛР уменьшается соответственно до $\bar{\alpha}_{50-200} = 13,1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, $\bar{\alpha}_{50-200} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и $\bar{\alpha}_{50-200} = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет утверждать, что величина ТКЛР при совместном введении кремния и меди изменяется нелинейно в интервале температур испытания 300–450 °C, но характер изменения значений ТКЛР в интервале 50–250 °C хорошо аппроксимируется линейной регрессией. Этот температурный интервал представляет значительный интерес с практической точки зрения, поскольку большинство конструкционных алюминиевых сплавов, а также сплавов специального назначения применяется для изделий, которые эксплуатируются при температурах, не превышающих 250 °C.

Для предварительной количественной оценки тесноты и направления связи между исследуемыми переменными в модуле анализа Basics Statistics/Tables/ Correlation Matrices программы Statistica построены и проанализированы матрицы парных линейных коэффициентов корреляции (таблица 1). Тесноту связи оценивали по шкале Чеддока, значимость (существенность) коэффициентов линейной корреляции определяется в программе Statistica на основе t-критерия Стьюдента [12].

Таблица 1 – Матрица парных коэффициентов корреляции для сплавов Al–Si–Cu

Сплавы Al–11%Si–Cu				Сплавы Al–20%Si–Cu			
Переменные	T	Cu	α	Переменные	T	Cu	α
T	1			T	1		
Cu	0	1		C	0	1	
α	0,44	–0,88	1	α	0,39	–0,95	1

Значения рассчитанных, статистически значимых коэффициентов корреляции при уровне значимости 0,05 ($P_{\text{дов}} = 0,95$), показанные в таблице 1, указывают на существование умеренной прямой линейной связи между переменными «ТКЛР–температура» и обратной связи высокой степени между переменными «ТКЛР–содержание меди».

Далее на основе полученной информации в модуле *Multiple LinearRegression* был проведен множественный регрессионный анализ. Результаты регрессионного анализа и показатели качества моделей сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Итоги регрессии и итоговые статистики

Коэффициенты регрессии		Статистические оценки коэффициентов регрессии		Регрессионная статистика	Значимость F
		Стандартная ошибка	P -Значение	Коэффициент множественной детерминации R^2	
Al – 11%Si – Cu					
Свободный член уравнения	17,9	0,32	9,26983E-41	0,93	2,32871E-25
T	0,02	0,002	7,0804E-12		
Cu	-0,14	0,006	7,20483E-25		
Al – 20%Si – Cu					
Свободный член уравнения	17,5	0,45	1,54E-31	0,94	5,01E-23
T	0,01	0,002	6,48E-05		
Cu	-0,23	0,010	1,28E-23		

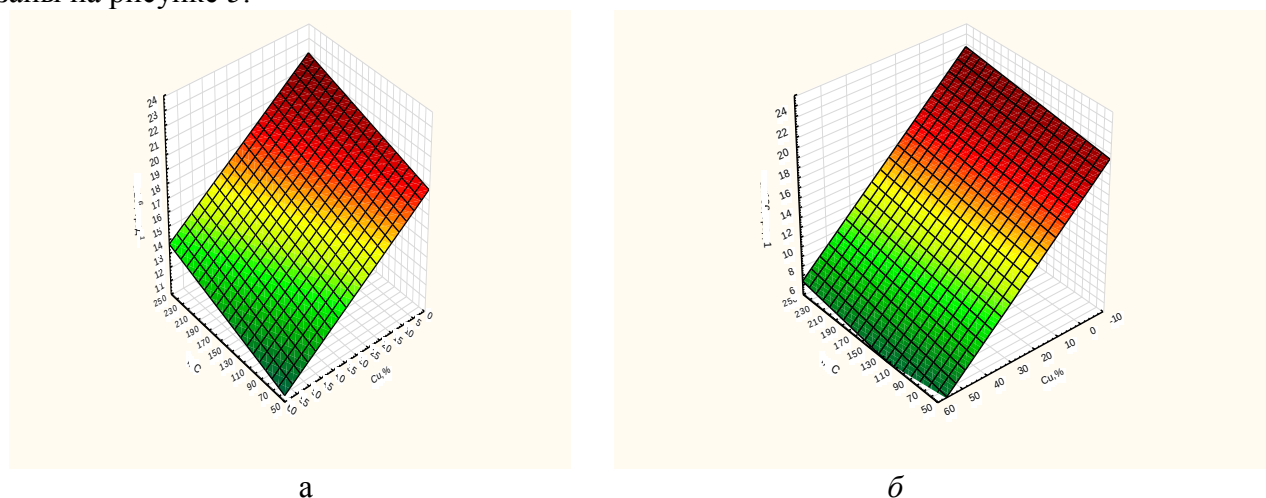
Из данных таблицы 2 следует, что в обоих случаях коэффициенты регрессии являются значимыми, о чем можно судить по величинам их стандартных ошибок и значениям рассчитанных уровней значимости (см. показатель P -Значение в таблице 2), которые значительно меньше заданного уровня ($P < 0,05$).

Таким образом, зависимости ТКЛР от температуры и содержания меди могут быть записаны в виде уравнения (1) для сплавов Al – 11%Si – Cu, и в виде уравнения (2) для сплавов Al – 20 % Si – Cu:

$$\hat{\alpha} = 17,9 + 0,016 \cdot T - 0,14 \cdot Cu \quad (1)$$

$$\hat{\alpha} = 17,5 + 0,011 \cdot T - 0,23 \cdot Cu \quad (2)$$

Графики в виде трехмерной поверхности, построенные по уравнениям (1) и (2), показаны на рисунке 5.



а – сплавы Al – 11%Si – Cu; б - сплавы Al – 20%Si – Cu

Рисунок 5 - Диаграммы зависимости ТКЛР от температуры и содержания меди в интервале температур 50 – 250 °C

Значения множественного коэффициента детерминации R^2 , близкие к единице, говорят о хорошем приближении линии регрессии к наблюдаемым данным и о возможности построения качественного прогноза. Рассчитанный уровень значимости (см. показатель *Значимость F* в таблице 2), значение которого значительно меньше заданного уровня ($P < 0,05$), подтверждает значимость R^2 и позволяет сделать вывод об адекватности полученных моделей.

Проверка остатков (разности между наблюдаемыми значениями ТКЛР и теми его значениями, которые предсказываются регрессионной моделью) по критерию Дарбина-Уотсона показала отсутствие их автокорреляции, что еще раз подтверждает адекватность рассчитанных регрессионных моделей.

Таким образом, получены математические зависимости, с использованием которых возможно создание сплавов систем Al – 11%Si – Cu, Al – 20%Si – Cu с требуемым (прогнозируемым) значением ТКЛР в интервале температур эксплуатации 50 – 250 °С.

Библиографический список

1. Фридляндер И.Н. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе / И.Н. Фридляндер, А.В. Добромислов, Е.А. Ткаченко, О.Г. Сенаторова. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – №7. – 2005 – С. 17 – 23.
2. 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.
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. Afanas'ev V.K. Effect of alloying on the thermal expansion of aluminum / V.K. Afanas'ev, M.V. Popova, A.A. Ruzhilo, V.F. Frolov. – *Russian metallurgy (Metally)*. – 2002. – № 6. – P. 539-544.
5. 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.
6. 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.
7. 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).
8. Попова М.В. Некоторые пути получения алюминиевых инваров / М.В. Попова // *Обработка металлов*. – 2004. – № 3 (24). – С. 16–19.
9. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел / С.И. Новикова. – Москва: Наука. – 1974. – 292 с.
10. Афанасьев В.К. Особенности структурообразования и тепловое расширение высоколегированных сплавов системы Al-Si-Cu / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх // *Металлургия: технологии, инновации, качество: сборник трудов XXI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях / под ред. Е.В. Протопопова*. – 2019. – С. 228-235.
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. Теория статистики : учебник / под ред. проф. Г.Л. Громыко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2019. – 465 с.