

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции
23– 25 ноября 2022 г.***

Часть 1

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 Металлургия : технологии, инновации, качество : труды
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЫШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Ti/TiB, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ <i>Озеров М.С., Поволяева Е.А., Громишова Д.В., Волокитина Е.И.</i>	298
ТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРЕССОВОК ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников А.Н., Прудников В.А., Рексис В.С.</i>	303
ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Жибинова И.А.</i>	310
ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н., Жибинова И.А.</i>	315
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ К76Ф НА УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ <i>Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О.</i>	323
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА <i>Хамид. Махан М., Коновалов С.В., Куценко А.А., Цветков А.В., Панченко И.А.</i>	327
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Васильев А.А., Колбасников Н.Г.</i>	332
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ РЕЛЬСЫ В НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QFORM <i>Белопищевская Е.С., Соловьев В.Н.</i>	341
УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУКТУРОЙ ТРУБНЫХ МАРК СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Колбасников Н.Г., Жуков Н.В.</i>	348
ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА «МОРЩИНА» ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СОРТОВОЙ СТАЛИ <i>Колбасников Н.Г., Адигамов Р.Р., Шишов И.А., Зайцев А.М.</i>	356
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГООУПРУЖЕННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СПЛАВЫ СЕРИИ AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ КРЕМНИЯ И НЕБОЛЬШИМИ ДОБАВКАМИ СКАНДИЯ И ЦИРКОНИЯ <i>Арышенский Е.В., Лапинов М.А., Солопаев М.В., Коновалов С.В.</i>	367
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВ <i>Сарычев В.Д., Филяков А.Д., Чумаков И.И., Коновалов С.В.</i>	374
ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА СТРУКТУРУ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ AL – 40%Si <i>Афанасьев В. К., Попова М.В., Малюх М.А.</i>	379

фонда (проект № 22-79-10229).

Библиографический список

1. Корнева Л.В., Дементьев В.П., Елисеев С.В., Поздеев В.Н., Хоменко А.П., Черняк С. С. Разработка технологии производства железнодорожных рельсов из стали бейнитного класса повышенной эксплуатационной стойкости для условий Сибири // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1 (37). С.47 – 57.

2. Сарычев В.Д., Молотков С.Г., Кормышев В.Е., Невский С.А., Полевой Е.В. Моделирование дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов сжатым воздухом // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Том 63. №11-12. 907-914 С.

УДК 669.71.017

ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА СТРУКТУРУ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ Al – 40%Si

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

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

Аннотация. Изучены особенности изменения микроструктуры и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) высоколегированных алюминиевых сплавов специального назначения на основе системы Al – 40 % Si – Cu. Установлено, что легирование медью в больших количествах снижает ТКЛР тройных сплавов во всем температурном интервале испытаний. Сравнительный анализ полученных данных показал, что значения ТКЛР полученного сплава Al-40 % Si-40 % Cu значительно ниже коэффициента линейного расширения промышленных сплавов инварного типа во всем интервале испытания. Полученные результаты позволяют утверждать, что легирование медью способствует наибольшему снижению ТКЛР тройных сплавов Al – Si – Cu.

Металлографический анализ высоколегированных сплавов демонстрирует наличие крупных пластинчатых кристаллов первичного кремния. Рентгеноспектральный микроанализ исследуемых образцов, полученный с помощью растрового электронного микроскопа, подтверждает наличие в сплавах Al – 40 % Si – 15÷ 40 % Cu между пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы частицы фазы CuAl_2 .

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

FEATURES OF THE STRUCTURE AND THERMAL EXPANSION OF SPECIAL PURPOSE ALLOYS OF 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 peculiarities of changes in the microstructure and temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of high-alloyed aluminum alloys for special purposes based on the Al– 40 % Si - Cu system are studied. It was found that copper alloying in large quantities reduces the TCLE of triple alloys in the entire temperature range of tests. A comparative analysis of the data obtained showed that the values of the TCLE of the obtained alloy Al-40 % Si-40% Cu are significantly lower than the coefficient of linear expansion of industrial invar alloys in the entire test interval. The results obtained allow us to assert that copper alloying contributes to the greatest decrease in TCLE of triple Al – Si – Cu alloys.*

Metallographic analysis of high-alloy alloys demonstrates the presence of large plate crystals of primary silicon. X-ray spectral microanalysis of the studied samples obtained using a scanning electron microscope confirms the presence of CuAl₂ phase particles in Al – 40 % Si - 15÷40 % Cu alloys between the lamellar crystals of the siliceous phase.

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

Технический прогресс высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, точные приборо- и машиностроение в значительной степени связан с созданием новых материалов специального назначения с регламентированным уровнем теплофизических свойств. Основная научно-практическая задача современного материаловедения – обеспечение высокой стабильности размеров металлических деталей и изделий при изменении температуры окружающей среды.

Обеспечение размерной стабильности деталей возможно, когда ТКЛР практически не изменяется в интервале температур эксплуатации. При создании легких сплавов с требуемым значением ТКЛР особое внимание уделяется легированию кремнием, поскольку он имеет малую плотность и низкий ТКЛР по сравнению с алюминием. Диаграмма состояния системы Al-Si относится к эвтектическому типу. Традиционно считают, что растворимость алюминия в кремнии весьма мала. Однако, при использовании более точных методов исследования было установлено, что Si имеет несколько полиморфных модификаций, на базе которых образуются твердые растворы большей концентрации, чем это принято считать.

В настоящее время в качестве материалов с минимальными значениями ТКЛР используются инвары – сплавы на основе системы Fe-Ni и суперинвары – на основе системы Fe-Ni-Co [1]. Данные сплавы являются высоколегиро-

ванными, 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. Производство сплавов типа САС весьма дорогостоящий процесс, который предусматривает применение сверхвысоких скоростей кристаллизации, брикетирование порошков и горячее прессование заготовок [2].

Медь также является важнейшим легирующим элементом алюминиевых сплавов. 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 . Результаты дилатометрических исследований двойных сплавов Al-Si и Al-Cu, подтверждают, что они могут иметь широкий спектр значений ТКЛР [3, 4]. Легирование кремнием и медью снижает ТКЛР алюминиевых сплавов, когда содержание легирующих элементов значительно превышает их предел растворимости в алюминии [5-6].

В соответствии с равновесной диаграммой состояния, в тройной системе Al – Si – Cu в твердом растворе может находиться до 5 % меди. Промышленные алюминиевые деформируемые сплавы содержат медь в количестве до 6 %, литейные сплавы до 10 %. В литературных источниках мало информации о влиянии большого количества меди на теплофизические свойства сплавов системы Al – Si. Справочные данные содержат сведения о том, что повышение концентрации меди до 10 % способствует увеличению прочности при высоких температурах и снижению скорости ползучести алюминия. Однако у исследователей нет единого мнения о том, когда медь более эффективна – когда она присутствует в фазе CuAl_2 либо когда находится в твердом растворе [7-8].

Если рассматривать фазовый состав сплавов Al – Si – Cu, здесь не образуются тройные соединения. В данной системе в равновесии с алюминиевым твердым раствором находятся кремнистая фаза и фаза CuAl_2 [9]. В соответствии с фазовой диаграммой состояния Al-Si, фаза CuAl_2 имеет ограниченный интервал существования (52,5 – 53,9 % Cu), имеет тетрагональную решетку, ее ТКЛР составляет $\alpha_{27\div 127} = 15,9 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и $\alpha_{27\div 527} = 17,2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ [10]. Что касается тройной системы Al – Si – Cu, здесь в равновесном состоянии происходит тройная эвтектическая реакция $\text{Ж} \rightarrow (\alpha) + \text{Si} + \text{CuAl}_2$ при температуре 525 °С и концентрациях легирующих элементов 27% Cu и 5% Si [11]. При неравновесной кристаллизации возможно обнаружение Si-фазы и фазы CuAl_2 при значительно меньших по сравнению с диаграммой состояния концентрациях меди и кремния.

В качестве объекта исследования были выбраны тройные сплавы системы Al – 40 % Si – 15÷40 % 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 и медь в количестве 15, 30, 40 %. Сплавы заливали в алюминиевый кокиль ($t_{\text{к}}=20 \text{ °C}$). Температура заливки составляла 1100 – 1200 °С. Из

полученных слитков изготавливали образцы для дилатометрического и металлографического исследований. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего дилатометра системы Шевенара, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Рентгеноспектральный микроанализ был проведен с помощью растрового электронного микроскопа *Zeiss EVO 50 XVP*², оснащенного приставкой для микрорентгеноспектрального анализа *Oxford Instruments X-Act*. Рентгенофазовый анализ осуществляли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН 2,0.

Результаты металлографического анализа изучаемых сплавов при оптических увеличениях представлены на рисунке 1. На фотографиях микроструктур видно, что высоколегированные сплавы содержат в своей структуре крупные пластинчатые кристаллы первичного кремния.



Рисунок 1 – Микроструктура сплавов на основе Al – 40 % Si – Cu x200:
a – без Cu (*a*), 40 % Cu (*б*)

Результаты металлографического анализа изучаемых высоколегированных сплавов, полученные с высоким пространственным разрешением с помощью растрового электронного микроскопа, позволяют предположить, что высокие концентрации Cu способствуют снижению предела растворимости Si в Al. Таким образом, наблюдается изменение условий структурообразования сплавов (рисунок 2).

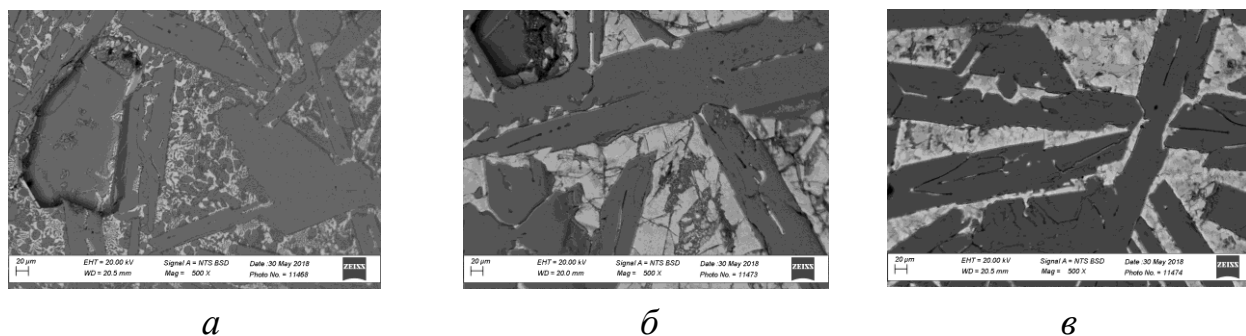


Рисунок 2 – Микроструктура сплава Al – 40 % Si – Cu
a – 15 % Cu, *б* – 30 % Cu, *в* – 40 % Cu

Результаты рентгеноспектрального микроанализа сплавов Al–40 % Si – Cu показали наличие в сплавах Al – 40 % Si – 15÷40% Cu между пластинча-

² Исследования выполнены на оборудовании ЦКП ССМ НГТУ

тыми кристаллами кремнистой фазы частицы фазы CuAl_2 (рисунок 3).

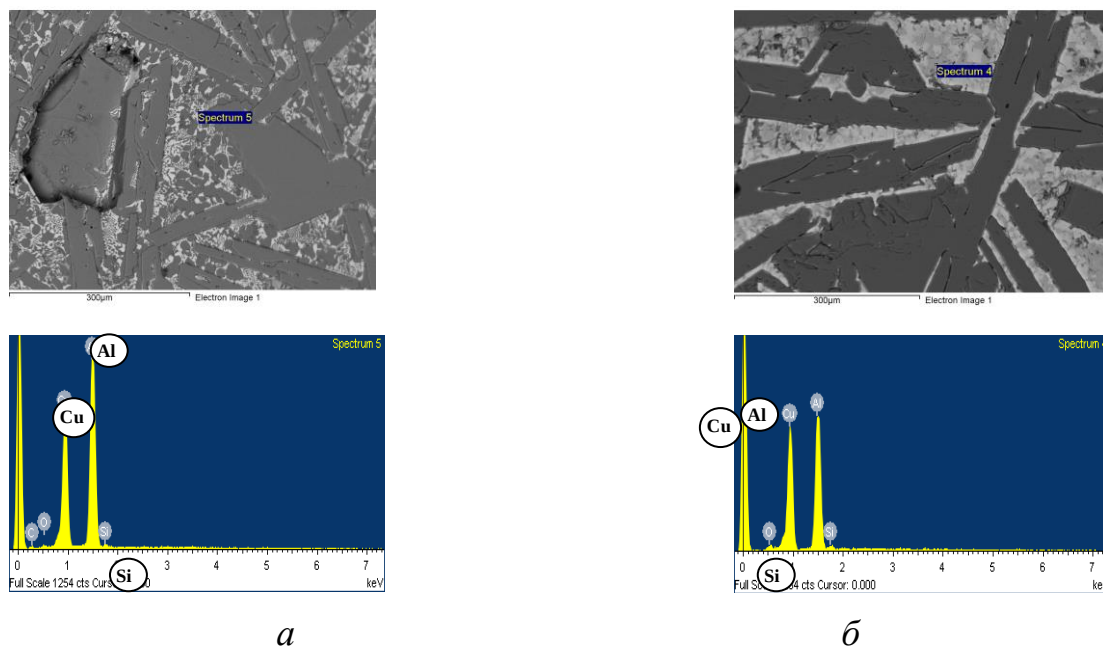


Рисунок 3 – Микроструктура и элементный состав сплава в характерных участках образцов: Al-40 % Si – 15 % Cu (а); Al – 40 % Si – 40 % Cu (б)

Изучалось влияние меди на тепловое расширение сплавов Al-40%Si-Cu. Установлено, что сплав Al-40 % Si-20 % Cu имеет мало изменяющиеся значения ТКЛР во всем температурном интервале испытаний $\bar{\alpha}_{50-450} = 9,1 \div 10,1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Увеличение содержания меди от 20 до 40% способствует плавному снижению значений ТКЛР тройных сплавов во всем интервале испытаний, что видно на рисунке 4. Наибольшее снижение значений ТКЛР наблюдается у сплава Al-40 %Si-40 %Cu. Так, средний ТКЛР в интервале рабочем интервале испытаний составляет $\bar{\alpha}_{50-200} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

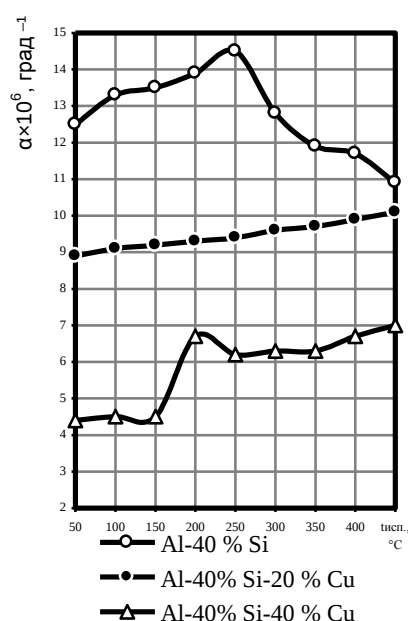


Рисунок 4 – Тепловое расширение сплавов Al – 40 % Si – 20÷40 % Cu

Сравнительный анализ полученных данных по высоколегированным сплавам показал (рисунок 5), что значения ТКЛР тройного сплава с равным содержанием кремния и меди значительно ниже коэффициента линейного расширения промышленных сплавов инварного типа во всем интервале испытания.

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать состав сплава на основе системы Al-Si-Cu, который имеет низкий и малоизменяющийся ТКЛР в рабочем температурном интервале, что является большим преимуществом новых легких инваров по сравнению с тяжелыми железоникелевыми.

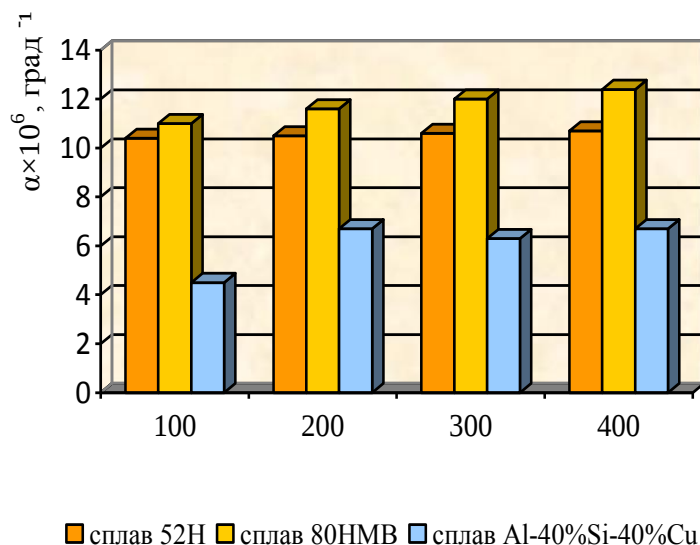


Рисунок 5 – Сравнительный анализ по тепловому расширению сплавов

Выводы

Результаты металлографического анализа изучаемых высоколегированных сплавов позволяют предположить, что высокие концентрации Cu способствуют снижению предела растворимости Si в Al.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждают, что совместное введение в алюминий кремния и меди способствует значительному снижению значений коэффициента линейного расширения тройных сплавов Al-Si-Cu в том случае, когда в их структуре наряду с большим количеством кремнистой фазы образуются интерметаллиды CuAl, CuAl₂, Cu₉Al₄.

Легирование сплавов Al – 40 % Si медью приводит к значительному снижению ТКЛР тройных сплавов во всем температурном интервале испытаний. Установлено, что разработанный сплав Al – 40 % Si – 40%Cu имеет постоянные значения ТКЛР в рабочем интервале испытаний $\bar{\alpha}_{50-200} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, что характерно для сплавов инварного типа [12]. Значения ТКЛР нового сплава значительно ниже коэффициента линейного расширения промышленных сплавов инварного типа во всем интервале испытания.

Железоникелевые сплавы со средним ТКЛР $10,0 \div 12,0 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ могут

быть заменены на легкие сплавы для соединения со стеклом и керамикой. По значению ТКЛР они могут применяться для согласованных соединений с металлами, сплавами, керамическими материалами и стеклами.

Библиографический список

1. Захаров А. И. Физика прецизионных сплавов с особыми тепловыми свойствами / А. И. Захаров. – Москва : Металлургия, 1986. – 237 с.
2. Гопиенко В.Г. Спеченные материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев. – М.: Металлургия, 1993. – 320 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. 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.
5. Afanas'ev V.K. About anomaly of linear expansion of industrial silumins / V.K. Afanas'ev, A.A. Ruzhilo, A.N. Lyubushkina, M.V. Popova. – Izvestiya Ferrous Metallurgy – 2003. – №10.– P. 16–17.
6. Попова М.В. Некоторые пути получения алюминиевых инваров / М.В. Попова // Обработка металлов. – 2004. – № 3 (24). – С. 16–19.
7. Золотаревский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 376 с.
8. Строганов Г.Б. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы / Г.Б. Строганов. – Металлургия, 1985. – 216 с.
9. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ. под ред. Ф.И. Квасова / Л.Ф. Мондольфо. – М.: Металлургия, 1979. – 639 с.
10. Таблицы физических величин: справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
11. Хэтч Дж. Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение: Справочник: Пер. с англ. / Дж. Е. Хэтч. – М.: Металлургия, 1989. – 422 с.
12. Афанасьев В.К. Инвары: Учебное пособие / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.А. Гладышев [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 126 с.