

ISSN 2313-1020 (Print)
ISSN 2542-1093 (Online)

Том 7, Номер 1–2

2020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

<http://journals.nstu.ru/machine-building>

НОВОСИБИРСК



АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Новосибирск, 25 марта 2020 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Новосибирский государственный технический университет, научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», г. Новосибирск, Россия
- ООО «Сибирская Выставочная Компания», г. Новосибирск, Россия

СООРГАНИЗАТОРЫ

- Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, Федеративная Республика Германия;
- Ганновский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, Федеративная Республика Германия;
- Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина;
- Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь;
- ОАО НПО и ЭИ «Оргстанкинпром», г. Новосибирск, Россия;
- ООО НПФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, Россия;
- Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия;
- Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия;
- Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия;
- Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск, Россия;
- Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия;
- Томский политехнический университет, г. Томск, Россия;
- Братский государственный университет, г. Братск, Россия;
- Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

ПОЧЕТНЫЙ КОМИТЕТ

Члены комитета: *Монико Грайф*, профессор, доктор, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук (г.Рюссельсхайм), *Томас Хассел*, профессор, доктор, Ганновский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Флориан Нюрнбергер*, профессор, доктор, Ганновский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Ковалевский С.В.*, профессор, д.т.н., ДГМА (г.Краматорск), *Пантелеенко Ф.И.*, профессор, д.т.н., член-корреспондент НАН Беларуси, БНТУ (г. Минск), *Афанасьев В.К.*, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. каф. СибГИУ (г. Новокузнецк), *Буров В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Герасенко А.Н.*, директор ООО НПФ «Машсервисприбор» (г.Новосибирск), *Гурьев А. М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), *Кирсанов С.В.*, профессор, д.т.н., ТПУ (г.Томск), *Марков А. М.*, профессор, д.т.н., ректор АлтГТУ (г.Барнаул), *Овчаренко А.Г.*, профессор, д.т.н., зав.каф. БТИ АлтГТУ (г. Бийск), *Рахмьянов Х. М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. НГТУ (г. Новосибирск), *Сараев Ю.Н.*, д.т.н, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, *Ситников А.А.*, д.т.н., профессор, АлтГТУ (г.Барнаул), *Янюшкин А.С.*, профессор, д.т.н., член- корреспондент САН ВШ, академик МАН ВШ, ЧГУ (г. Чебоксары).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- *Батаев А.А.*, главный редактор научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., ректор НГТУ, (г. Новосибирск), **председатель;**
- *Коротков А.Н.*, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ (г. Кемерово), **сопредседатель.**
- *Атапин В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г.Новосибирск), **сопредседатель;**

Члены программного комитета: *Иванцовский В.В.*, , профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Лобанов Д.В.*, д.т.н., профессор, ЧГУ (г. Чебоксары), *Трегубчик П.В.*, гл. инженер ОАО «Новосибирский стрелочный завод», (г. Новосибирск), *Янюльский В.В.*, к.т.н., декан МТФ НГТУ (г. Новосибирск).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- *Скиба В.Ю.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск);
- *Марк Е.С.*, директор проекта «MashExpo Siberia»(г. Новосибирск).

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Инновационные технологии в машиностроении;
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты;
- Материаловедение в машиностроении;
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении.

Попова М.В., Малюх М.А. Структура и тепловое расширение высоколегированных сплавов системы Al-Si-Cu специального назначения	105
Афанасьев В.К., Попова М.В., Долгова С.В., Жибинова И.А., Черныш А.П. О возможности применения белого нелегированного чугуна в качестве инструментального материала	113
Бинцева А.А., Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И. Плазменное напыление покрытий из порошков карбида бора	122
Алхимова Е.С., Волков А.С., Максимов Б.А., Сизов И.Г., Полянский И.П. Исследование борохромированных слоев на стали 20, полученных в условиях изотермического и термоциклического нагрева	128
Рашковец М.В., Никулина А.А., Мендагалиев Р.В., Кислов Н.Г. Механические свойства и структура сплава 55Ni-17Cr-5Fe-3Mo при аддитивном производстве	133
Астрашаб Е.В., Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Кукареко В.А. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства газотермических покрытий из псевдосплавов на основе X20H80	138
Прудников А.Н., Прудников В.А. Упрочнение земляных отливок из бинарных заэвтектических силуминов	145
Рекомендации по написанию научной статьи	151
Подготовка аннотации	153
Правила для авторов	155

УДК 669.3/7.017

**СТРУКТУРА И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ
СИСТЕМЫ Al-Si-Cu СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор
М.А. МАЛЮХ, ст. методист
(СибГИУ, г. Новокузнецк)

Попова М.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: m.popova@rdtc.ru

Изучено влияние меди на микроструктуру и температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) сплавов системы Al-30÷40%Si-Cu. Результаты дилатометрических исследований показали, что введение легирующих элементов в равных количествах приводит к снижению теплового расширения сплава Al-30%Si-30%Cu до значений $6,0\div 6,9\cdot 10^{-6}$ град⁻¹ во всем температурном интервале испытаний. Показано, что высоколегированный сплав Al-40%Si-40%Cu имеет самые низкие значения ТКЛР в рабочем интервале температур ($\alpha_{50-150}=4,5\cdot 10^{-6}$ град⁻¹), нежели тройные сплавы с тем же суммарным содержанием легирующих элементов, но с другим их соотношением.

Металлографический анализ показал, что легирование медью сплавов Al-Si-Cu с содержанием кремния в количестве 30% и более, приводит к увеличению размеров частиц кремнистой фазы. Структура тройных сплавов Al-40%Si-Cu характеризуется крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы. Установлено, что легирование медью в больших количествах приводит к снижению предела растворимости кремния в алюминии.

Ключевые слова: алюминий, кремний, медь, легирование, структура, температурный коэффициент линейного расширения.

Введение

Для развития современных отраслей промышленности, в том числе, авиакосмической, электровакуумной и прецизионного приборостроения необходимы легкие сплавы с заданными теплофизическими свойствами, такими как теплопроводность, теплоемкость, плотность и температурный коэффициент линейного расширения [1, 2]. Сплавы с заданным ТКЛР применяются для получения вакуум-плотных спаев со стеклом, а также для производства изделий с высокой точностью размеров при различных температурах окружающей среды. В настоящее время в промышленности в качестве сплавов с заданным ТКЛР применяются инвары и суперинвары, а также спеченные алюминиевые сплавы (САС). Недостатками инваров являются большая плотность (8130 кг/м^3) и высокое содержание дорогих и дефицитных легирующих элементов, в первую очередь, никеля и кобальта [3]. Сплавы САС имеют малую плотность (2730 кг/м^3), но недостаточно низкий ТКЛР (не ниже $13,5\cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Кроме того, недостатками порошковой технологии являются высокая остаточная пористость и высокая стоимость изготовления заготовок [4]. Поэтому разработка составов сплавов с заданными значениями ТКЛР остается актуальной и важной проблемой для материаловедения.

Многолетние исследования в данной области позволяют утверждать, что разработка новых легких сплавов с регламентированным ТКЛР возможна на основе системы Al-Si-Cu

[5, 6]. Изучение ТКЛР двойных сплавов Al–Si и Al–Cu показало, что он может изменяться в широком диапазоне, величина которого, прежде всего, определяется содержанием легирующих элементов, а также технологическими факторами, такими как способ обработки расплава [7–10]. И кремний, и медь значительно снижают ТКЛР алюминиевых сплавов, если их содержание многократно превышает равновесную растворимость в алюминии [11–13].

Введение меди и магния в сплавы Al–Si способствует их упрочнению при термической обработке за счет образования интерметаллидных фаз, что значительно повышает механические свойства силуминов [14–16]. Значительный объем литературных источников содержит результаты исследований структуры и механических свойств двойных и тройных сплавов на основе алюминия [17 – 19]. Интересные результаты получены при изучении процессов неравновесной кристаллизации, позволяющей улучшить параметры структуры и свойства тройных сплавов Al–Si–Cu [20 – 22]. Однако в научной литературе встречается гораздо меньше сведений о влиянии большого содержания кремния и меди на тепловое расширение алюминиевых сплавов [23, 24]. В основном, исследования посвящены изучению их влияния на теплопроводность и на коэффициент теплопередачи [25 – 27].

В связи с этим, целью настоящей работы являлось изучение микроструктуры и ТКЛР сплавов системы Al–Si–Cu, содержащих медь в количествах 15÷50%.

Методика экспериментального исследования

Выплавку сплавов проводили в печи шахтного типа в алундовом тигле. В качестве шихты использовали алюминий марки А7, кремний Кр0 и медь марки М1. После расплавления шихтового алюминия в него вводили кремний в количестве 30 % и 40 % и медь в количестве 15, 20, 40 и 50 %. Расплав заливали в алюминиевый кокиль ($t_{\text{зал.}} = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Из полученных слитков изготавливали образцы для дилатометрического и металлографического исследований. Изучение теплового расширения осуществляли на дифференциальном оптическом фоторегистрирующем дилатометре системы Шевенара в интервале температур испытания 50 – 450 $^{\circ}\text{C}$, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. Изучение микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа *OLYMPUS GX-5* (увеличение 200÷1000 крат). Электронно-микроскопические исследования и рентгеноспектральный микроанализ были проведены с помощью растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss AG - EVO 50 Series*.

Результаты и их обсуждение.

При изучении микроструктуры сплавов Al-30%Si-Cu было установлено, что при содержании меди в количестве 20÷40 %, в их структуре наблюдаются крупные кристаллы кремнистой фазы пластинчатой формы (рис. 1 а, б, в), между которыми располагается сильно травящаяся эвтектика ($\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$). Выявлено, что у сплавов с содержанием 40 % меди, кристаллы кремнистой фазы не имеют четкой огранки.

Структура сплавов Al-40%Si-Cu характеризуется крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы. Причем, с увеличением содержания меди до 50%, уменьшается объемная доля эвтектики (рис. 1 г, д, е).

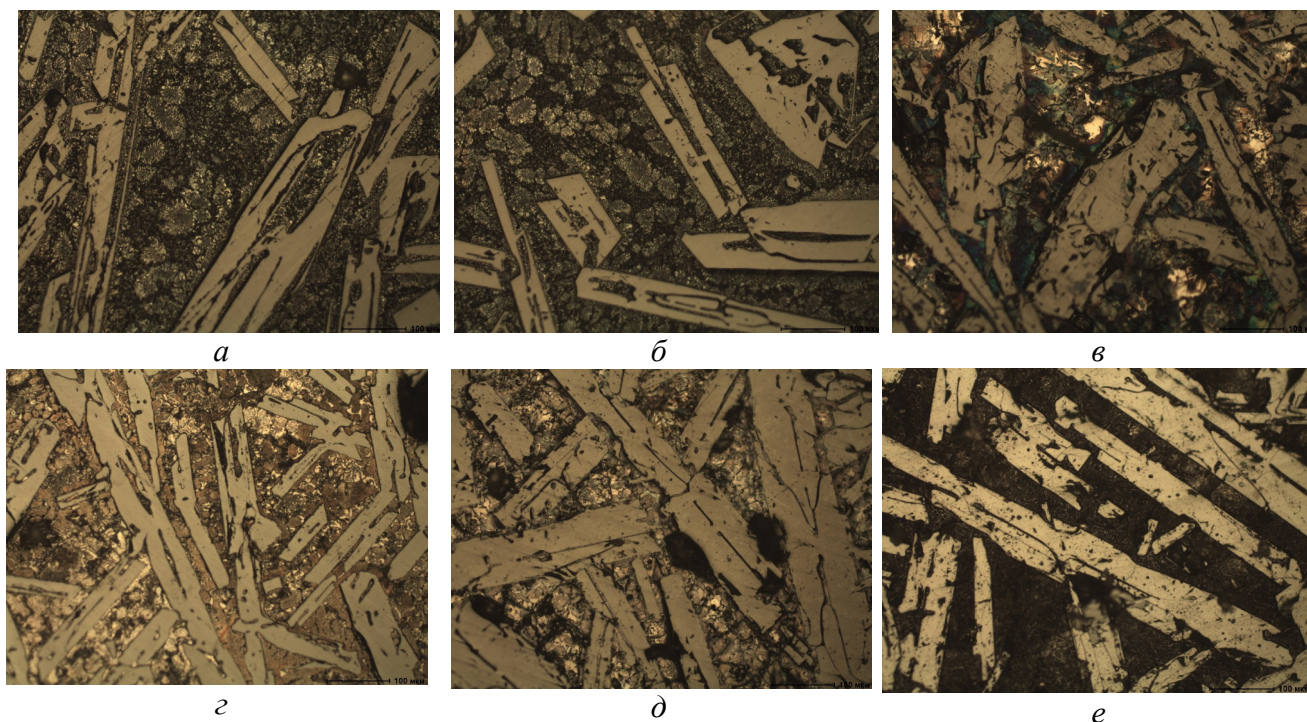


Рис.1. Влияние содержания меди на микроструктуру сплавов
Al-30% Si- Cu (а, б, в) и Al-40 % Si-Cu (г, д, е):
20 % Cu (а), 30 % Cu (б), 40 % Cu (в), 15 % Cu (г), 40 % Cu (д), 50 % Cu (е)

Изучение сплавов Al-40%Si-Cu методом растровой электронной микроскопии позволило установить, что в их структуре наряду с крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы присутствует эвтектика (α +Si+CuAl₂), объемная доля которой уменьшается с увеличением содержания меди (рис. 2). Результаты рентгеноспектрального микроанализа подтверждают наличие фазы CuAl₂ в исследуемых сплавах.

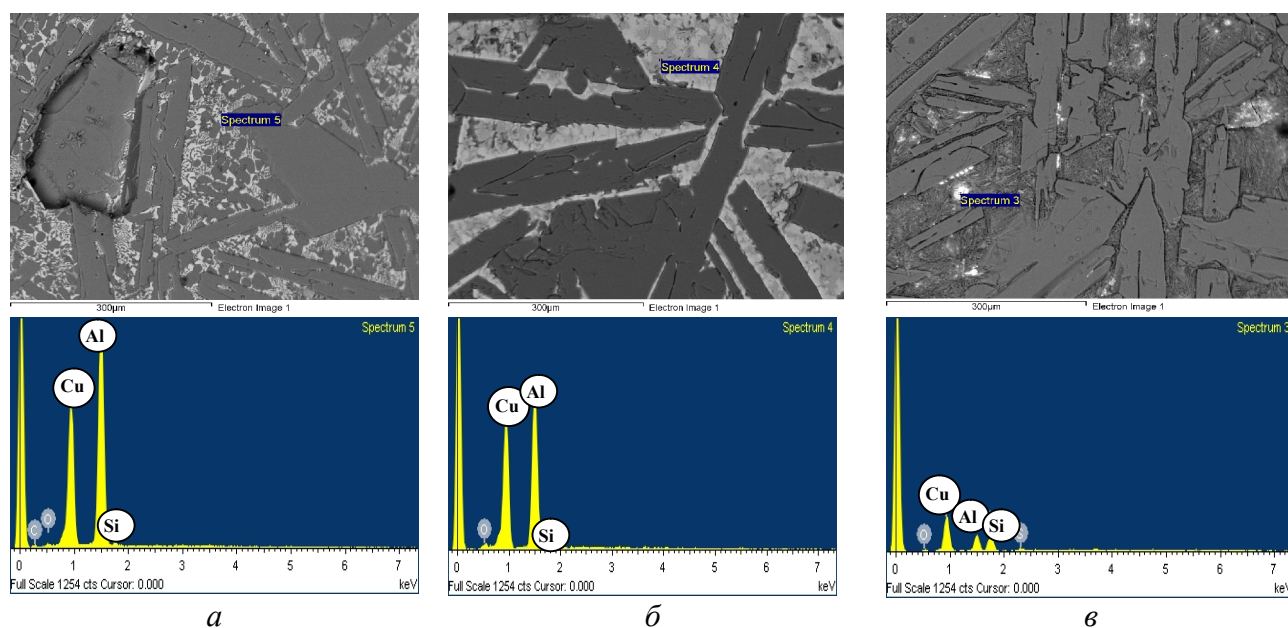


Рис. 2. Микроструктура и элементный состав сплава Al – 40 % Si – Cu с различным содержанием меди: 15 % Cu (а), 40 % Cu (б), 50 % Cu (в)

При определении ТКЛР изучаемых сплавов было установлено, что введение меди в сплавы Al-30%Si и Al-40%Si в количестве 20÷50% способствует снижению их теплового расширения (таблица 1).

Таблица 1

Влияние меди на тепловое расширение сплавов Al – (30÷40 % Si)

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-30% Si	20	12,5	12,3	12,4	12,5	12,0	11,9	12,2	12,4	11,4
	30	6,0	6,3	6,3	6,4	6,5	6,5	6,7	6,7	6,9
	40	6,1	6,2	6,2	6,2	7,2	7,5	7,6	7,8	8,0
	50	6,5	7,1	7,2	7,3	8,0	9,1	9,9	9,9	9,5
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

Исследования теплового расширения сплавов Al-30%Si, содержащих от 20 до 40 %Cu показали стабильные значения ТКЛР в интервале 50÷450 °C. Введение кремния и меди в равных количествах по 30 % снижает температурный коэффициент линейного расширения сплава до значений $6,0 \div 6,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Исследования теплового расширения сплавов Al-40%Si, содержащих от 20 до 40%Cu позволили установить, что сплав с равным содержанием кремния и меди имеет самые низкие значения ТКЛР в рабочем интервале температур, нежели тройные сплавы с тем же суммарным содержанием легирующих элементов, но с другим их соотношением.

Предложены возможные области для практического применения разработанных составов тройных сплавов, близких по ТКЛР к промышленным инварам (таблица 2).

Таблица 2

Возможная область применения новых сплавов

Сплав с регламентированным ТКЛР		Средний $\alpha \cdot 10^6$ град ⁻¹ в интервале температур, °C		Область применения
инвар	новый сплав	инвар	новый сплав	
30НКС	40Si – 40 Cu– Al	$\alpha_{20-100} = 4,6$	$\alpha_{20-100} = 4,5$	соединение с керамикой, низкотемпературными припоями, цементами, клеями
29НКС	Al – 30Si – 30 Cu	$\alpha_{20-100} = 6,3$	$\alpha_{20-100} = 6,1$	
47НХР	Al – 40Si – 20 Cu	$\alpha_{20-200} = 9,1$	$\alpha_{20-200} = 9,1$	вакуум-плотные соединения со стеклами

Особенности теплового расширения тройных сплавов представлены в виде трехмерной поверхности, построенной с помощью программы StatSoft Statistica 6.0 (рис. 3).

Полученные графики позволяют наиболее четко представить температурно-концентрационные области, при которых ТКЛР имеет низкие значения. С их помощью можно выявить взаимосвязь между величиной ТКЛР изучаемых сплавов и двумя переменными параметрами, такими как содержание меди и температура испытания.

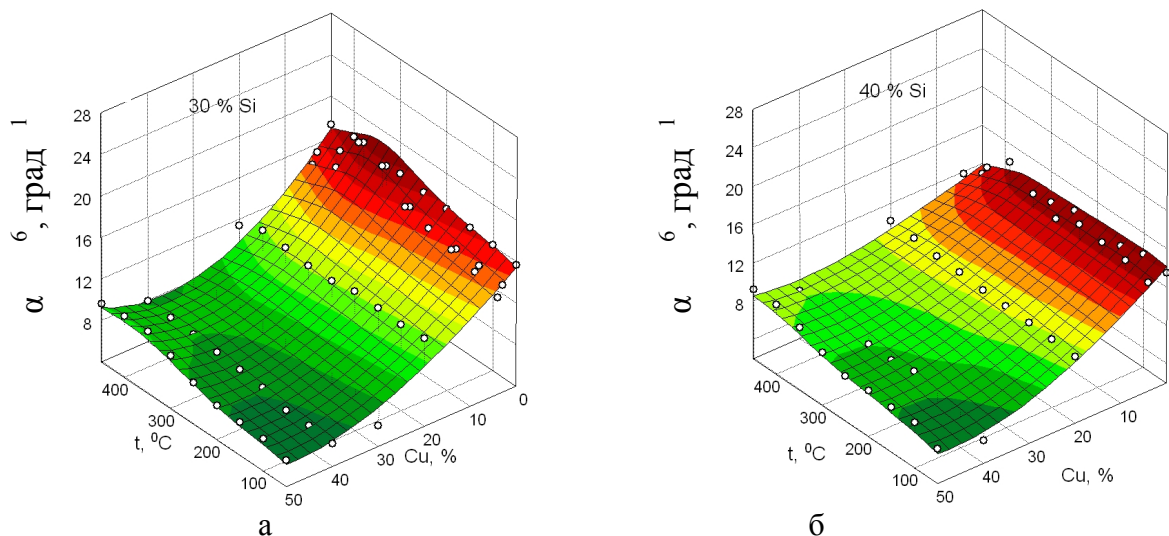


Рис. 3. Особенности теплового расширения тройных сплавов:
а – сплав на основе Al – 30% Si ; б – сплав на основе Al – 40% Si

Результаты дилатометрического анализа показали, что значения ТКЛР тройных сплавов, содержащих равное количество кремния и меди, близки к значениям ТКЛР промышленных инваров в интервале температур 20 – 200°C и имеют явное весовое преимущество перед ними. Таким образом, полученные легкие сплавы могут быть использованы как альтернатива тяжелым инварам.

Выводы

Металлографические исследования показали, что структура высоколегированных сплавов характеризуется крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы, между которыми располагается тройная эвтектика ($\alpha + Si + CuAl_2$). Выявлено, что при увеличении содержания меди уменьшается объемная доля эвтектики. Результаты рентгеноспектрального микроанализа позволяют утверждать, что между кристаллами кремнистой фазы имеются участки эвтектики с повышенным содержанием меди, которые соответствуют местам расположения частиц фазы $CuAl_2$.

Получены новые легкие сплавы с низким ТКЛР, которые могут быть использованы как альтернатива инварам (30НКД, 29НК, 47НХР) в интервале температур эксплуатации 20 – 200°C.

Список литературы

1. Ларионов Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов: справочник. – Киев: Наукова думка, 1985. – 440 с.
2. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с.
3. Инвары: учеб. пособие / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.А. Ладышев [и др.]. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 126 с.

4. Гопиенко В.Г., Смагоринский М.Е., Григорьев А.А. Спеченные материалы из алюминиевых порошков. – М.: Металлургия, 1993. – 320 с.
5. 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.
6. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина (Малюх) // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 23–26.
7. Popova, M.V. Frolov V.F., Lyubushkina A.N. On linear expansion of alloyed aluminum alloys with silicon // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. – 2003. – № 2. – P. 38–40.
8. About anomaly of linear expansion of industrial silumins / V.K. Afanas'ev, A.A. Ruzhilo, A.N. Lyubushkina, M.V. Popova // Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy. – 2003. – № 10. – P. 16–17.
9. 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. – Art. 012010 (7 p.).
10. Effect of melt treatment with water vapor on thermal expansion of alloy Al – 20–40% Si / V.K. Afanasyev, M.V. Popova, S.V. Dolgova, A.V. Gorshenin, M.A. Malyukh // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63, № 1–2. – P. 87–95.
11. Hidnert P., Krider H.S. Thermal Expansion of Aluminum and Some Aluminum Alloys // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1952. – Vol. 48, № 3. – P. 209–220.
12. 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.
13. 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.
14. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of an Al-Si-Cu-Mg-Ni Aluminium Alloy after Thermal Exposure / X. Feng, P.L. Jian, Ch. G. Yong, Y. Zhong // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 765. – P. 486–490. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.765.486>.
15. Effects of Si, Cu and Mg on the High-Temperature Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg Alloy / J. Zhengyi, L. Xianghua, J. Sihai, H. Jingtao // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 652–654. – P. 1030–1034. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1030>.
16. Chen C.L., West G.D., Thomson R.C. Characterisation of Intermetallic Phases in Multicomponent Al-Si Casting Alloys for Engineering Applications // Materials Science Forum. – 2006. – Vol. 519–521. – P. 359–364. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.359>.
17. Morphology of intermetallic phases in Al-Si cast alloys and their fracture behaviour / L. Hurtalová, E. Tillová, M. Chalupová, J. Belan // Production Engineering Archives. – 2015. – Vol. 6/1. – P. 2–5. – DOI: 10.30657/pea.2015.06.01.

18. *Biswas P., Prasadu K. D., Mondal M. K.* Effect of Bi addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-17.6Si alloy // *Materials Research Express*. – Vol. 6. – 12 p. – DOI: 10.1088/2053-1591/ab4d34.
19. *Panušková M., Tillová E., Chalupová M.* Relation between mechanical properties and microstructure of cast aluminum alloy AlSi9Cu3 // *Strength of Materials*. – 2008. – Vol. 40. – P. 98–101. – DOI: 10.1007/s11223-008-0026-8.
20. Microstructural Development in a Ternary Al-Cu-Si Alloy during Transient Solidification / I.L. Ferreira, D.J. Moutinho, L.G. Gomes, O.L. Rocha, P.R. Goulart, A. Garcia // *Materials Science Forum*. – 2010. – Vol. 636–637. – P. 643–650. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.643>.
21. *Wei Y.Yu., Wen J. L., Nai R. L.* Microstructures and Properties of Al-Cu-Si Brazing Foils by Melt-Spun Processing // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 583. – P. 268–271. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.583.268>.
22. Intermetallic compounds in the Al-Si-Cu system / C.T. Rios, R. Caram, C. Bolfarini, W.J. Botta // *Acta Microscopia*. – 2003. – Vol. 12. – P. 77–82.
23. *Xue W. Z., Wang R.C., Peng J.* Expansion Behavior and Microstructures of Hypereutectic Al-Si Alloys Subjected to Thermal Cycling // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 937. – P. 145–149. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.937.145>.
24. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al–20% Si alloy / Q. Li, T. Xia, Y. Lan, P. Li, L. Fana // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 588. – P. 97–102.
25. Knipling K.E. Dunand D.C., Seidman D.N. Criteria for developing castable, creep-resistant aluminum-based alloys-A review // *International Journal of Materials Research*. – 2006. – Vol. 97 (3). – P. 246–265.
26. *Huang Y.Y., Hu Z.L., Wang J.J.* Research Progress on the Aluminum Alloy with High Thermal Conductivity // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 574. – P. 396–400. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.574.396>.
27. *Kang S.B., Kim D.B., Cho J.H.* Effect of Copper Variation and Thermomechanical Treatment on Microstructure and Properties in Aluminum Alloy Fin Stock for Heat Exchanger // *Materials Science Forum*. – 2012. – Vol. 706–709. – P. 311–316. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.311>.

**STRUCTURE AND THERMAL EXPANSION OF HIGH-ALLOY ALLOYS
OF THE Al-Si-Cu SYSTEM FOR SPECIAL PURPOSES**

Popova M.V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru
Malyuh M.A., Senior methodologist, e-mail: starostina_ma1976@mail.ru

Siberian state industrial university, 42 Kirov str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

The influence of copper on the microstructure and temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of Al-30÷40% Si-Cu alloys was studied. The results of dilatometric studies have shown that the introduction of alloying elements in equal quantities leads to a decrease in the thermal expansion of the Al-30%Si-30%Cu alloy to values of $6,0\div7,0\cdot10^{-6} \text{ deg}^{-1}$. Increasing the copper content to 40% not only does not lead to a further decrease in the TCLE values, but its increase is observed in the high-temperature test range. It was found that an alloy with an equal content of alloying elements Al-40%Si-40%Cu has the lowest TCLE values in the entire test interval ($\alpha_{50-150} = 4,5\cdot10^{-6} \text{ deg}^{-1}$) than triple alloys with the same total content of alloying elements, but with a different ratio.

Metallographic analysis has shown that the introduction of copper into alloys with a non-eutectic composition of Al-30%Si-Cu, in which microstructure, in addition to eutectic, initially contains particles of the siliceous phase, contributes to an increase in the size of these particles. The structure of Al-40%Si-Cu alloys is characterized by large plate crystals of the siliceous phase. Moreover, with an increase in the copper content to 50%, the volume fraction of eutectic decreases. It is shown that the limit of solubility of silicon in aluminum decreases with high copper content.

Keywords

aluminum, silicon, copper, alloying, structure, temperature coefficient of linear expansion.