

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

№ 11 (809). ноябрь. 2022

ОСНОВАН В ИЮЛЕ 1955 г.
ВЫХОДИТ 12 РАЗ В ГОД

Главный редактор: В. С. Крапошин
Зам. гл. редактора: С. Ю. Кондратьев
Зав. редакцией: Н. В. Хабарова

Editor-in-Chief: V. S. Kraposhin
Deputy Editor-in-Chief: S. Yu. Kondrat'ev
Staff Editor: N. V. Khabarova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

С. К. Гордеев, В. И. Горынин, В. В. Захаров,
В. Н. Зикеев, Yin Fuxing, L. Kaczmarek,
С. Ю. Кондратьев, В. С. Крапошин, Л. И. Куksenova,
М. Л. Лобанов, К. В. Макаренко, V. Yu. Novikov,
А. А. Попов, М. Ю. Семенов, Ю. Н. Симонов,
Ю. А. Соколов, А. S. Chaus

EDITORIAL BOARD

S. K. Gordeev, V. I. Gorynin, V. V. Zakharov,
V. N. Zikeev, Yin Fuxing, L. Kaczmarek,
S. Yu. Kondrat'ev, V. S. Kraposhin, L. I. Kuksenova,
M. L. Lobanov, K. V. Makarenko, V. Yu. Novikov,
A. A. Popov, M. Yu. Semenov, Yu. N. Simonov,
Yu. A. Sokolov, A. S. Chaus

УЧРЕДИТЕЛИ: Издательский дом «Фолиум», редакция

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82955 от 14.03.2022 г.

Полная переводная версия журнала «Metal Science and Heat Treatment» (издательство Springer) включена в международные системы цитирования: Cambridge Scientific Abstracts, Chemical Abstracts Service (CAS), ChemWeb, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, Inspec, Mathematical Science Citation Index, Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (Sci-Search), SCOPUS. Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.

FOUNDERS: Folium Publishing Company, Editorial Office

SUBSCRIPTION INDEX
27847 («Pressa Rossii»)

ADDRESS

Bd. 6, 157, Dmitrovskoe sh., Moscow, 127411, Russia
Folium Publishing Company, MiTOM
Tel./Fax: +7 499 258 08 28; 8 916 062 37 72
E-mail: mitom@folium.ru <http://www.mitom.folium.ru>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС

27847 («Пресса России»)

АДРЕС РЕДАКЦИИ

Россия, 127411, Москва, Дмитровское ш., 157, стр. 6
Издательский дом «Фолиум», MiTOM
Тел./Факс: +7 499 258 08 28; 8 916 062 37 72
E-mail: mitom@folium.ru <http://www.mitom.folium.ru>

PUBLISHER ADDRESS

Bd. 6, 157, Dmitrovskoe sh., Moscow, 127411, Russia
Folium Publishing Company
Tel./Fax: (499) 258 08 28
E-mail: info@folium.ru
<http://www.folium.ru>

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ

Россия, 127411, Москва, Дмитровское ш., 157, стр. 6
Издательский дом «Фолиум»
Тел./Факс: +7 499 258 08 28
E-mail: info@folium.ru
<http://www.folium.ru>



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИЧЕСКАЯ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Мушников А. Н., Путилова Е. А., Поволоцкая А. М., Горюлева Л. С. Влияние пластической деформации на структуру и магнитные свойства корпусной стали 3
- Лаврентьев А. Ю., Дожделев А. М., Кондратьев С. Ю. Влияние поверхностного пластического деформирования на структуру и механические свойства рабочего слоя биметаллического инструмента 11

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПОКРЫТИЯ

- Полунин А. В., Боргардт Е. Д., Черетаева А. О., Кацман А. В., Кристал М. М. Влияние концентрации наночастиц SiO_2 в электролите на состав и свойства оксидных слоев, формируемых плазменно-электролитическим оксидированием на силумине АК7 18
- Романов Д. А., Соснин К. В., Пронин С. Ю., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е. Структура и свойства электроэрозионного молибденового покрытия, полученного на титановом сплаве VT6 32

ЧУГУНЫ

- Макаренко К. В., Поддубный А. Н., Тарасов А. А. Литые функционально-градиентные материалы на основе хромистых белых чугунов для производства мелющих тел 40

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

- Афанасьев В. К., Попова М. В., Малюх М. А. Особенности структурообразования и свойства высоколегированных сплавов специального назначения системы $\text{Al} - \text{Si} - \text{Cu}$ 48

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПОРОШКОВЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Шлярова Ю. А., Громов В. Е., Коновалов С. В., Иванов Ю. Ф. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру, свойства и характер разрушения высокоэнтропийного $\text{Co} - \text{Cr} - \text{Fe} - \text{Mn} - \text{Ni}$ -сплава 54

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

- Казанцева Н. В., Давыдов Д. И., Ежов И. В., Меркушев А. Г., Козмец Ю. Н. Анализ неметаллических включений в изделиях из аустенитной стали, полученных с помощью лазерной 3D печати 60
- Уманский А. А., Симачев А. С., Думова Л. В. Особенности микроструктуры мелющих шаров при их производстве из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей различного химического состава 64

CONTENTS

THERMAL AND THERMOMECHANICAL TREATMENT

- Mushnikov A. N., Putilova E. A., Povolotskaya A. M., Goruleva L. S. Effect of plastic deformation on the structure and magnetic properties of hull steel. 3
- Lavrent'ev A. Y., Dozhdelev A. M., Kondrat'ev S. Yu. The effect of surface plastic deformation on the structure and mechanical properties of the working layer of a bimetallic tool. 11

THERMOCHEMICAL TREATMENT AND COATINGS

- Polunin A. V., Borgardt E. S., Cheretaeva A. O., Katsman A. V., Krishtal M. M. Effect of concentration of SiO_2 nanoparticles in the electrolyte on the composition and properties of oxide layers formed by plasma-electrolytic oxidizing on silumin AK7 18
- Romanov D. A., Sosnin K. V., Pronin S. Yu., Ivanov Yu. F., Gromov V. E. Structure and properties of electroerosion molybdenum coating deposited on titanium alloy VT6 32

CAST IRONS

- Makarenko K. V., Poddubny A. N., Tarasov A. A. Cast functionally graded materials based on chromium white irons for fabricating grinding bodies 40

ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS

- Afanas'ev V. K., Popova M. V., Malyukh M. A. Special features of structure formation and properties of special high-alloy alloys of the $\text{Al} - \text{Si} - \text{Cu}$ system. 48

ADDITIVE TECHNOLOGIES, POWDER AND COMPOSITE MATERIALS

- Shlyarova Yu. A., Gromov V. E., Kononov S. V., Ivanov Yu. F. Effect of electron beam treatment on the structure, properties and nature of destruction of high-entropy $\text{Co} - \text{Cr} - \text{Fe} - \text{Mn} - \text{Ni}$ alloy. 54

CONTROL OF THE QUALITY OF PRODUCTION PROCESSES AND MATERIALS

- Kazantseva N. V., Davydov D. I., Ezhov I. V., Merkushev A. G., Koemets Yu. N. Analysis of nonmetallic inclusions in articles from austenitic steel obtained using laser 3D printing. 60
- Umanskiy A. A., Simachev A. S., Dumova L. V. Special features of microstructure of grinding balls produced from rejected continuously cast rail steel billets of different chemical compositions. 64

Особенности структурообразования и свойства высоколегированных сплавов специального назначения системы Al – Si – Cu

В. К. АФАНАСЬЕВ, д-р техн. наук, **М. В. ПОПОВА**, д-р техн. наук, **М. А. МАЛЮХ**, канд. техн. наук
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия (m.popova@rdtc.ru)

Исследованы особенности образования структуры в сплавах Al – (20 – 50) % Si – (2 – 60) % Cu и характер распределения в них легирующих элементов. Проведены металлографические исследования сплавов с использованием световой и сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурный анализ, определена плотность. Выбраны составы высоколегированных Al – Si – Cu-сплавов, имеющих низкие и стабильные значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) $\alpha = (9,0 - 4,0) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ в интервале температур 50 – 450 °С. Показано, что плотность этих сплавов не превышает 3500 кг/м³. Полученные результаты могут быть использованы для разработки сплавов с низким ТКЛР для отраслей специального приборостроения.

Ключевые слова: высоколегированные сплавы; микроструктура; кремнистая фаза; алюминиды меди; температурный коэффициент линейного расширения; плотность.

ВВЕДЕНИЕ

Для успешного развития многих высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как прецизионное станкостроение, двигателестроение, точное приборостроение и электровакуумная техника необходимы легкие сплавы с малым тепловым расширением. Это свойство обеспечивает постоянство размеров детали в рабочем интервале температур и характеризуется величиной α — температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР).

В настоящее время большую часть номенклатуры сплавов с заданным ТКЛР составляют инвары (сплавы на основе систем Fe – Ni и Fe – Ni – Co) [1, 2]. Минимальные ТКЛР инваров составляют $\alpha < 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Однако такие низкие значения α сохраняются в довольно узком температурном интервале (0 – 100 °С). Кроме того, инвары обладают рядом недостатков, таких как большая плотность ($\approx 8000 \text{ кг/м}^3$) и пониженная коррозионная стойкость [3]. В последние годы требования к свойствам сплавов этого класса повышаются. Так, в институте проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа, Россия) проводятся исследования инварных сплавов с нанокристаллической структурой, сформированной в результате интенсивной пластической деформации [4 – 6]. При работе изделий в нестационарных магнитных полях нужны сплавы, не проявляющие ферромагнетизм, имеющие высокую коррозионную стойкость и малую плотность. В связи с этим были

разработаны немагнитные инварные сплавы на основе титана, обладающие не только удовлетворительными механическими свойствами и низким ТКЛР, но и малой плотностью, не превышающей 5400 кг/м³ [7, 8].

Для изделий аэрокосмической техники необходимы легкие немагнитные коррозионно-стойкие сплавы с низким ТКЛР и плотностью, не превышающей 3500 кг/м³. Основным принципом создания подобных материалов является введение в алюминиевую основу элементов, ТКЛР которых значительно ниже, чем у алюминия (в интервале температур 20 – 100 °С величина $\alpha_{20-100} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$). К таким элементам, прежде всего, относится кремний, имеющий не только весьма низкий ТКЛР ($\alpha_{20-100} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), но и малую плотность (2330 кг/м³), и медь, а также переходные металлы Ti, Zr, V, Cr и др. [9 – 12].

Лучшим достижением в области создания легких сплавов с низким ТКЛР на сегодняшний день являются спеченные алюминиевые сплавы, которые получают методами порошковой металлургии [13, 14]. По составу они являются заэвтектическими силуминами, содержащими 25 – 30 % Si и 5 – 7 % других легирующих элементов. По величине ТКЛР ($\alpha = (13,5 - 15,5) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) они близки к сталям и имеют плотность 2720 – 2780 кг/м³. Однако для многих изделий современной техники требуются легкие немагнитные сплавы, ТКЛР которых в рабочем диапазоне температур не превышает $(6 - 10) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

По результатам многолетних систематических исследований в области создания легких сплавов с регламентированными значениями ТКЛР нами выбрана система Al – Si – Cu, как одна из перспективных для разработки сплавов специального назначения с регламентированными ТКЛР. Кремний и медь значительно снижают ТКЛР алюминиевых сплавов при введении в количестве, многократно превышающих предел их растворимости в алюминии [15 – 17]. Однако в научно-технической литературе встречается мало сведений о влиянии большого содержания кремния и меди на тепловое расширение алюминиевых сплавов [18, 19]. Исследования в основном посвящены изучению влияния этих элементов на другие теплофизические свойства, например, теплопроводность и коэффициент теплопередачи [20 – 22].

Формирование структуры и свойств высоколегированных сплавов определяется природой компонентов, степенью сходства их физико-химических свойств. Однако они во многом зависят от технологии получения и обработки сплавов, поэтому теоретически рассчитать составы сплавов, имеющих заданные значения ТКЛР в интервале температур эксплуатации изделия, пока не представляется возможным.

Цель настоящей работы — изучение особенностей изменения структуры и температурного коэффициента линейного расширения сплавов системы Al – Si – Cu при изменении содержания кремния от 20 до 50 % и меди от 2 до 60 %.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сплавы выплавляли в лабораторных печах сопротивления шахтного типа СШОЛ с карбидокремниевыми нагревателями в алуновом тиглях. В качестве шихты использовали технически чистые алюминий А7, кремний Кр0 и медь М1.

После расплавления шихтового алюминия вводили кремний небольшими порциями, а после его полного растворения в расплав добавляли медь, постепенно поднимая температуру до 1100 – 1200 °С. После выдержки 10 – 15 мин снимали шлак с зеркала расплава и заливали в холодный алюминиевый кокиль (скорость охлаждения ~ 50 – 80 °С/с). Из полученных слитков изготавливали образцы для металлографического и dilatометрического анализов.

Для металлографического анализа использовали световой микроскоп (СМ) OLYMPUS GX-5, а также сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Carl Zeiss AG-EVO 50 XVP с микроанализатором типа X-АСТ¹. Фазовый состав сплавов определяли мето-

дом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-2 в железном K_{α} -излучении. Плотность оценивали методом гидростатического взвешивания с помощью аналитических весов АДВ-200М. Тепловое расширение сплавов изучали на фоторегистрирующем дифференциальном оптическом dilatометре системы Шевенара в интервале температур 20 – 450 °С. Истинный ТКЛР при заданной температуре рассчитывали методом касательных. Суммарная погрешность его определения составляла $\pm 0,10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовали две группы сплавов: 1 — силумины с 20 и 30 % Si; 2 — высококремнистые силумины с 40 и 50 % Si. Содержание меди в сплавах первой группы изменялось от 2 до 60 %, в сплавах второй группы — от 4 до 50 %.

Сплавы Al – (20 – 30) % Si – nCu. Двойные сплавы алюминия с 20 или 30 % Si характеризуются тем, что в их структуре первичные кристаллы кремнистой фазы (КПК) имеют компактную полиэдрическую форму (рис. 1, см. обл.). Между КПК располагается довольно большое количество эвтектики (α + Si) дисперсного строения, а также присутствуют дендриты α -твердого раствора, образовавшиеся вследствие неравновесной кристаллизации сплава (рис. 1, а, б).

Анализ микроструктуры сплавов Al – 20 % Si, легированных медью, позволил установить, что введение до 10 % Cu обеспечивает измельчение КПК при сохранении размеров других структурных составляющих. Дальнейшее повышение содержания меди до 15 и 20 % (вплоть до 60 %) приводит к тому, что КПК вновь увеличиваются, достигая вначале таких же размеров, как у двойного сплава (рис. 1, в), а затем и больше них. Кроме того, при изучении микроструктуры и элементного состава фаз с помощью СЭМ с микроанализатором установлено, что в сплавах, содержащих ≥ 20 % Cu, образуется тройная эвтектика (α + Si + CuAl_2), а также уменьшается размер ветвей дендритов α -твердого раствора и расстояние между ними (рис. 2, а).

Металлографический анализ сплавов Al – 30 % Si – nCu показал, что добавка в них меди в количестве до 1 – 4 % уменьшает размеры КПК, а выше 4 % — резко увеличивает. При этом форма КПК изменяется от полиэдрической к пластинчатой, а дендриты твердого раствора не образуются (рис. 1, з). При сравнении микроструктур сплавов на основе Al – 20 % Si и Al – 30 % Si установлено, что наиболее резкое увеличение размеров кристаллов кремнистой фазы характерно для сплавов, содержащих ≥ 20 % Cu.

¹ Электронно-микроскопические исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования "Структура, механические и физические свойства материалов" Новосибирского государственного технического университета.

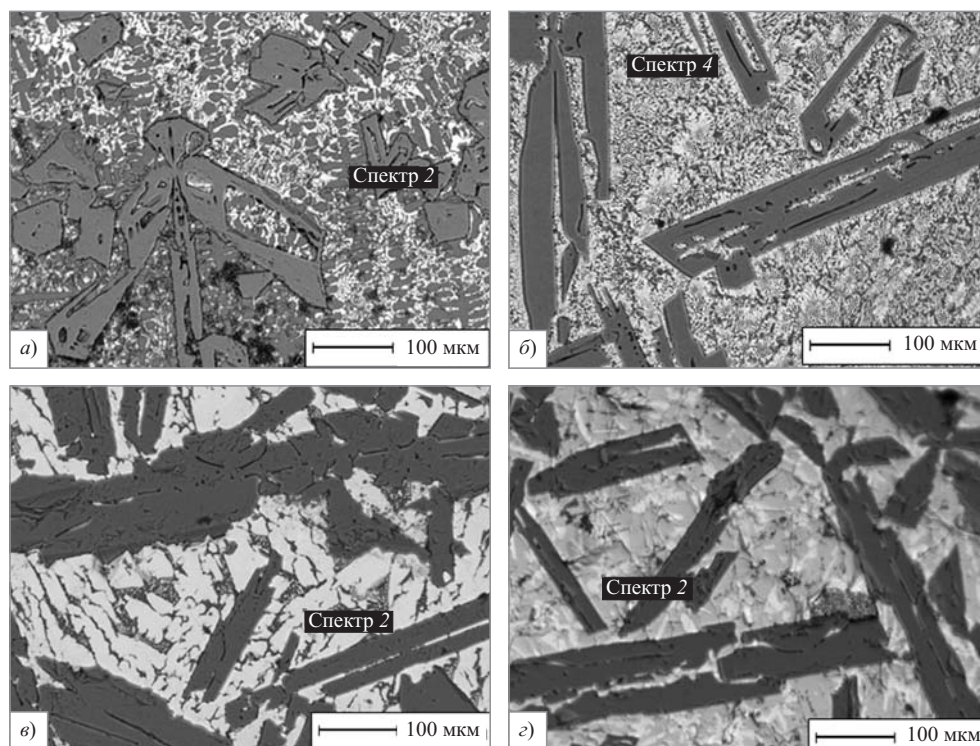


Рис. 2. Микроструктура сплавов Al – 20 % Si – 20 % Cu (а), Al – 30 % Si – 20 % Cu (б), Al – 30 % Si – 30 % Cu (в) и Al – 30 % Si – 40 % Cu (з) (СЭМ)

Характерной особенностью структуры сплава Al – 30 % Si – 20 % Cu является образование чрезвычайно тонкодисперсной тройной эвтектики ($\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$), располагающейся между пластинчатыми КПК (рис. 2, б). При увеличении содержания меди до 30 и 40 % КПК теряют четкую огранку, эвтектика приобретает более грубое строение, ее объемная доля резко уменьшается, что связано с образованием частиц θ -фазы CuAl_2 (рис. 2, в, з). По результатам рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов установлено, что эти частицы представляют собой твердый раствор вычитания на основе интерметаллидной фазы CuAl_2 , так как концентрация меди в ней изменяется от 37 до 41 % (стехиометрическое содержание меди, соответствующее формуле CuAl_2 , равно 54,2 %) [23].

Исследовали влияние меди на тепловое расширение сплавов Al – 20 % Si и Al – 30 % Si. Для двойных сплавов характерно немонотонное изменение ТКЛР при повышении температуры испытания. В интервале 250 – 300 °C у них наблюдается небольшая аномалия линейного расширения, которая проявляется в значительном увеличении ТКЛР в узком интервале температур испытания (рис. 3, а – в). Медь, как и кремний, имеет ТКЛР ниже, чем у алюминия, поэтому у тройных сплавов он должен уменьшаться. Дилатометрический анализ позволил установить, что с увеличением содержания меди в сплаве Al – 20 % Si от 2 до 15 % происходит постепенное уменьшение

ТКЛР в интервале температур испытания 50 – 250 °C. Однако при более высоких температурах ТКЛР тройных сплавов не подчиняется закону аддитивности: значения этого коэффициента у них становятся больше, чем у двойного силумина. Аномалия линейного расширения, характерная для двойного сплава, становится более выраженной и смещается в область температур испытания 300 – 400 °C (рис. 3, а). Введение в сплав Al – 20 % Si более 20 % Cu снижает ТКЛР во всем интервале температур испытания до весьма низких значений (рис. 3, б). Так, если средний ТКЛР двойного сплава Al – 20 % Si в интервале 50 – 200 °C составляет $\bar{\alpha}_{50-200} = 18,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, то при введении 50 % Cu он снижается до $\bar{\alpha}_{50-200} = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

В большей степени действие меди, стабилизирующее ТКЛР, проявляется у сплава Al – 30 % Si (рис. 3, в). Установлено, что легирование двойного сплава Al – 30 % Si медью в количестве 20 % способствует получению стабильных значений ТКЛР тройного сплава во всем температурном интервале испытаний: $\bar{\alpha}_{50-450} = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. С увеличением содержания меди до 30 % ТКЛР снижается еще более значительно: $\bar{\alpha}_{50-450} = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Следует отметить, что увеличение содержания меди в сплаве до 40 и 50 % не только не приводит к дальнейшему снижению значений ТКЛР, но и наблюдается некоторое его повышение в высокотемпературном интервале испытаний (рис. 3, в).

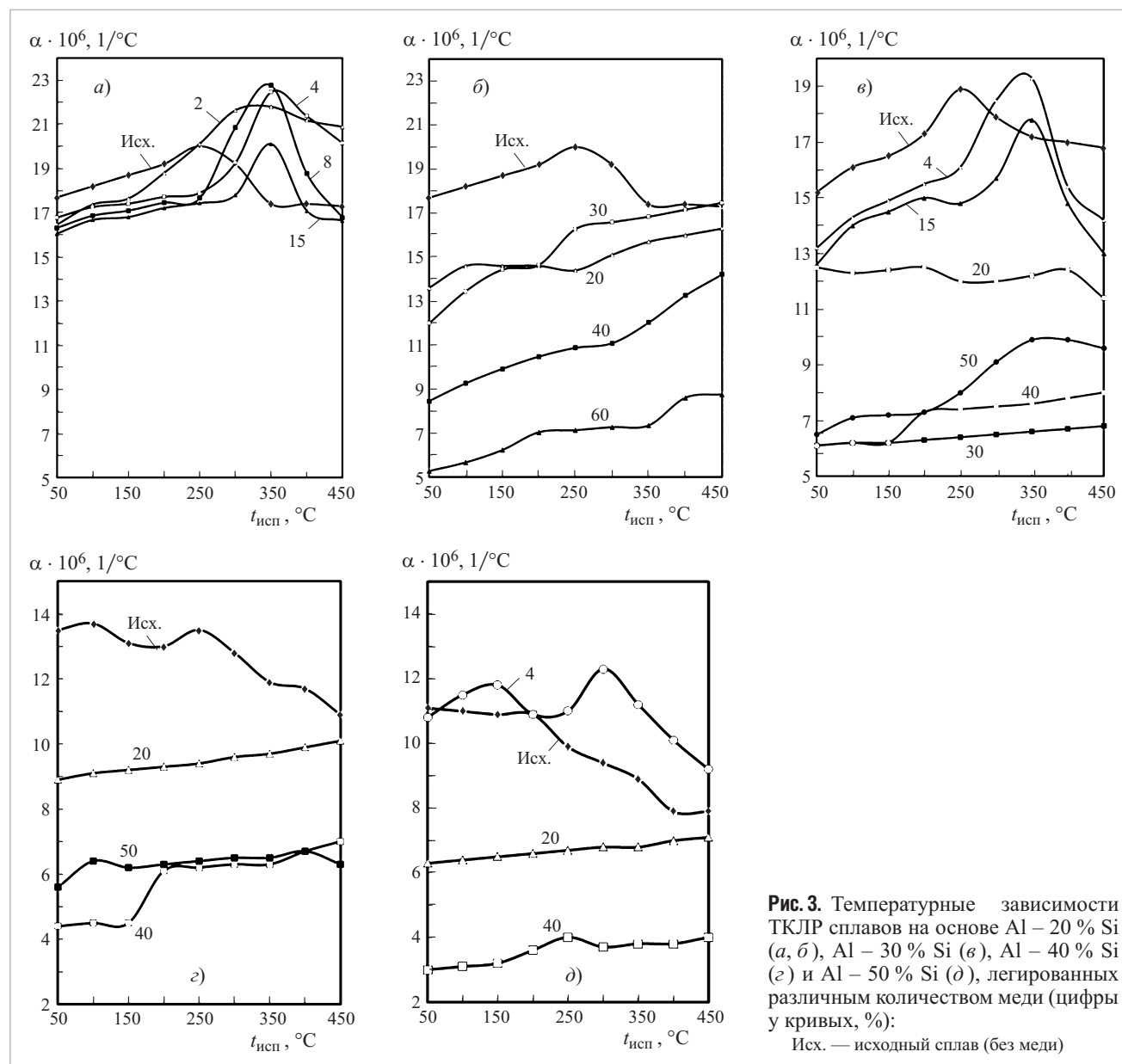


Рис. 3. Температурные зависимости ТКЛР сплавов на основе Al – 20 % Si (а, б), Al – 30 % Si (в), Al – 40 % Si (г) и Al – 50 % Si (д), легированных различным количеством меди (цифры у кривых, %):
Исх. — исходный сплав (без меди)

Обобщение результатов металлографического, микрорентгеноспектрального и дилатометрического анализов позволяет утверждать, что ТКЛР тройных сплавов Al – (20 – 30) % Si – *n*Cu значительно уменьшается, если в их структуре присутствует не только большое количество первичных кристаллов кремнистой фазы, но и частицы интерметаллида CuAl_2 . Эти фазы создают жесткий каркас, уменьшающий тепловое расширение сплавов во всем интервале температур испытания (рис. 2, в, г).

Сплавы Al – (40 – 50) % Si – *n*Cu. Высококремнистые сплавы алюминия с 40 и 50 % Si интересны тем, что они по сравнению с другими силуминами изначально имеют малый ТКЛР в низкотемпературном интервале испытаний (рис. 3, г, д).

Структура двойных сплавов характеризуется крупными пластинчатыми кристаллами кремнистой фазы размерами от 100 до 1000 мкм, между которыми располагается эвтектика ($\alpha + \text{Si}$) игольчатого строения (рис. 4, см. обл.). Первичные кристаллы кремнистой фазы окаймлены светлыми дендритами α -твердого раствора, образовавшимися вследствие обеднения расплава кремнием при формировании КПК в процессе кристаллизации сплава (рис. 4, а, б).

Легирование сплавов медью в количестве ≥ 20 % способствует образованию более крупных КПК и увеличению их объемной доли. Тройная эвтектика ($\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) в структуре этих сплавов присутствует в очень малых количествах. Между КПК находятся частицы интерметаллидов (рис. 4, в, г). Мето-

Таблица. Состав, свойства и рекомендуемые области применения известных и новых сплавов с регламентированным ТКЛР

Сплав	Тепловые свойства		Применение
	ρ , кг/м ³	$\bar{\alpha} \cdot 10^6$, 1/°C	
29НК (28,5 – 29,5 % Ni; 17 – 18 % Co)*	8000	$\alpha_{20-100} = 4,5$	Материал для изготовления элементов радиоэлектронной аппаратуры (вводов, баллонов приборов). Обеспечивает вакуумно-плотные спаи со стеклами марок С39, С47, С48, С52, С59
Al – 30 % Si – 30 % Cu**	3230	$\alpha_{20-100} = 4,6$	
Al – 50 % Si – 40 % Cu**	3410	$\alpha_{20-100} = 3,1$	
30НКД (29,5 – 30,5 % Ni; 13,0 – 14,2 % Co, 0,3 – 0,5 % Cu)*	8200	$\alpha_{20-100} = 6,1$	Материал для металлических элементов вакуумных и газоразрядных приборов, соединяющихся с керамическими конструкциями и интегральными схемами. Соединение с керамикой осуществляют низкотемпературным припоем, цементом и клеями
Al – 40 % Si – 40 % Cu**	3420	$\alpha_{20-100} = 6,3$	
47НХР (46 – 48 % Ni; 4,5 – 6,0 % Cr)*	8200	$\alpha_{20-200} = 9,1$	Сплав для изготовления вводов и баллонов полупроводниковых приборов. Обеспечивает вакуумно-плотные спаи с мягкими стеклами марок С80-1, С72-1, С90-1, С93-2
Al – 40 % Si – 20 % Cu**	3120	$\alpha_{20-200} = 9,1$	

* Стандартные сплавы (остальное — Fe).

** Опытные сплавы (настоящая работа).

Обозначения: ρ — плотность сплава; α_{20-100} и α_{20-200} — температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) в интервале 20 – 100 и 20 – 200 °C соответственно.

дом рентгеноструктурного анализа установлено, что в тройных сплавах Al – (40 – 50) % Si – nCu присутствуют частицы не только стабильной фазы CuAl₂, но и метастабильных интерметаллидов Cu₉Al₄ и CuAl.

Обобщение результатов дилатометрического, металлографического и рентгеноструктурного анализов позволяет утверждать, что совместное введение в алюминий кремния и меди в суммарном количестве ≥ 60 % изменяет фазовый состав сплавов таким образом, что в их структуре образуется сплошная сетка из кремнистой фазы и алюминидов меди CuAl, CuAl₂, Cu₉Al₄. Все алюминиды меди имеют ТКЛР существенно ниже, чем у алюминия, а плотность — меньше, чем у меди. Например, ТКЛР фазы CuAl₂ равен $\alpha_{27+127} = 15,9 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, плотность $\rho = 4340$ кг/м³ [24]. В связи с этим плотность сплавов системы Al – Si – Cu не превышает 3500 кг/м³ даже при содержании в них 50 % Cu. Такие сплавы могут быть использованы в качестве основы для разработки легких сплавов специального назначения с регламентированными значениями ТКЛР.

На основании полученных данных определены возможные направления практического использования высоколегированных сплавов системы Al – Si – Cu с ТКЛР, близким к ТКЛР сплавов инварного класса (см. таблицу).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы структура и характер распределения легирующих элементов в сплавах Al – (20 – 50) % Si – (2 – 60) % Cu. Металлографический

анализ показал, что структура высоколегированных сплавов, суммарное содержание кремния и меди в которых превышает 60 %, характеризуется крупными пластинчатыми первичными кристаллами кремнистой фазы, между которыми располагаются частицы стабильных и метастабильных алюминидов меди, а также небольшое количество тройной эвтектики (α + Si + CuAl₂).

Обобщение результатов дилатометрического и рентгеноструктурного анализов позволяет утверждать, что совместное введение кремния и меди в алюминий способно существенным образом уменьшить температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) тройных сплавов системы Al – Si – Cu в том случае, когда в их структуре присутствует не только большое количество первичных кристаллов кремнистой фазы, но и образуются интерметаллиды CuAl, CuAl₂, Cu₉Al₄, создающие своеобразный жесткий каркас, обеспечивающий размерную стабильность сплава. Установлено, что плотность этих сплавов не превышает 3500 кг/м³.

На основании результатов дилатометрического анализа определены составы высоколегированных Al – Si – Cu-сплавов, характеризующихся низкими и стабильными значениями ТКЛР ($\alpha = (9,0 - 4,0) \times 10^{-6}$ 1/°C) в интервале температур 50 – 450 °C. Так, сплавы 40 % Al – 30 % Si – 30 % Cu; 30 % Al – 50 % Si – 20 % Cu и 10 % Al – 50 % Si – 40 % Cu в интервале температур 50 – 450 °C имеют практически постоянные значения ТКЛР: $\alpha = 6,4 \cdot 10^{-6}$ 1/°C; $6,7 \cdot 10^{-6}$ 1/°C; $3,5 \cdot 10^{-6}$ 1/°C соответственно. Исследованные составы сплавов могут быть использо-

ваны как основа для разработки материалов с низким ТКЛР для отраслей специального приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевицкая Г. З., Веселкова В. Н., Зусман А. И. и др. Прецизионные сплавы. Справочник под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983. 438 с.
2. Афанасьев В. К., Попова М. В., Гладышев С. А. и др. Инвары. Учебное пособие. Новокузнецк: СибГИУ, 2006. 126 с.
3. Захаров А. И. Физика прецизионных сплавов с особыми тепловыми свойствами. М.: Металлургия, 1986. 237 с.
4. Биткулов И. Х., Бурханов А. М., Казанцев В. А. Влияние интенсивной пластической деформации на свойства инварного сплава Fe – 36 % Ni // Физика металлов и металловедение. 2006. Т. 102, № 1. С. 99 – 104.
5. Мулюков Р. Р., Биткулов И. Х., Букреева К. А. Влияние наноструктурирования на фазовый состав и намагнитенность насыщения инварного сплава Fe – 36 % Ni // Письма о материалах. 2011. Т. 1. С. 70 – 72.
6. Мулюков Р. Р., Биткулов И. Х., Шарипов И. З. Влияние деформационного наноструктурирования и последующих отжигов на эволюцию фазового состава инвара Fe – 36 % Ni // Письма о материалах. 2014. Т. 4, Вып. 1. С. 11 – 14.
7. Хромова Л. П., Родионов Ю. Л., Юдин Г. В. Исследование влияния технологических процессов обработки на ТКЛР инварного сплава Ti – 36 % Nb // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2005. № 1. С. 12 – 15.
8. Патент РФ 2625376, МПК C22F 1/18. Способ термомеханической обработки прутков из двухфазных титановых сплавов для получения низких значений термического коэффициента линейного расширения в направлении оси прутка / С. Л. Демаков, С. И. Степанов, Д. В. Гадеев; заявл. 21.03.2016, опубл. 13.07.2017 // Бюл. 2017. № 20.
9. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука. 1974. 292 с.
10. Хэтч Дж. Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение. Справочник: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1989. 422 с.
11. Попова М. В. Некоторые пути получения алюминиевых инваров // Обработка металлов. 2004. № 3(24). С. 16 – 19.
12. Афанасьев В. К., Попова М. В. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники // Металлургия машиностроения. 2012. № 6. С. 8 – 13.
13. Гопиенко В. Г., Смагоринский М. Е., Григорьев А. А., Беллавин А. Д. Спеченные материалы из алюминиевых порошков. Под ред. М. Е. Смагоринского. М.: Металлургия, 1993. 320 с.
14. Добаткин В. И., Елагин В. И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1981. 176 с.
15. Афанасьев В. К., Горшенин А. В., Попова М. В. и др. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 // Металлургия машиностроения. 2010. № 6. С. 23 – 26.
16. Афанасьев В. К., Долгова С. В., Лаврова Н. Б. и др. Влияние меди на линейное расширение алюминиевых и кремниевых сплавов // Металлургия машиностроения. 2013. № 4. С. 16 – 19.
17. Афанасьев В. К., Малюх М. А., Попова М. В. и др. Тепловое расширение сплавов Al – Cu после обработки расплава и термообработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 2(71). С. 87 – 94.
18. Xue Wei Zhu, Ri Chu Wang, Jian Peng. Expansion behavior and microstructures of hypereutectic Al – Si alloys subjected to thermal cycling // Advanced Materials Research. 2014. V. 937. P. 145 – 149. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.937.145>.
19. Qinglin Li, Tiandong Xia, Yefeng Lan et al. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al – 20 % Si alloy // Materials Science & Engineering. 2013. V. A588. P. 97 – 102.
20. 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. V. 97(3). P. 246 – 265.
21. Ya Ying Huang, Zhi Liu Hu, Jun Jun Wang. Research progress on the aluminum alloy with high thermal conductivity // Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 574. P. 396 – 400. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.574.396>.
22. Suk Bong Kang, Dong Bae Kim, Jae Hyung Cho. Effect of copper variation and thermomechanical treatment on microstructure and properties in aluminum alloy fin stock for heat exchanger // Materials Science Forum. 2012. V. 706 – 709. P. 311 – 316. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.311>.
23. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ. под ред. Ф. И. Квасова. М.: Металлургия, 1979. 639 с.
24. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Special features of structure formation and properties of special high-alloy alloys of the Al – Si – Cu system

V. K. Afanas'ev, M. V. Popova, and M. A. Malyukh

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

The special features of formation of structure in alloys Al – (20 – 50)% Si – (2 – 60)% Cu and the distribution of alloying elements in them are studied. Metallographic analysis is made using optical and scanning electron microscopy and x-ray diffractometry. The density of the alloys is determined. The Al – Si – Cu compositions with low and steady values of the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) $\alpha = (9.0 - 4.0) \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ in the range of 50 – 450°C are chosen. It is shown that the density of these alloys does not exceed 3500 kg/m³. The results of the study may be used for developing low-TCLE alloys for special fields of instrument engineering.

Key words: high-alloy alloys, microstructure, silicon phase, copper aluminides, temperature coefficient of linear expansion, density.