

УДК 620.22:[536.413.2: 669.7.018/669-15]

ТЕПЛОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ Al–Cu ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ТЕРМООБРАБОТКИ

*В.К. АФАНАСЬЕВ, доктор техн. наук, профессор
М.А. МАЛЮХ, младший научный сотрудник УНИ
М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор
В.А. ЛЕЙС, младший научный сотрудник УНИ
С.В. ДОЛГОВА, младший научный сотрудник УНИ
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Поступила 4 апреля 2016
Рецензирование 4 мая 2016
Принята к печати 15 мая 2016

Афанасьев В.К. – 654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: sv_dolgov@mail.ru

Изучены закономерности теплового расширения сплавов системы Al – Cu в литом и деформированном состояниях в зависимости от обработки расплава и термической обработки. Применяемая обработка расплава заключается в продувке водяным паром. Установлено, что выбранная обработка расплава создает аномалии, которые выражаются в уменьшении теплового расширения изучаемых сплавов. Дальнейшая термическая обработка приводит к развитию аномалий. Показано, что горячая пластическая деформация существенно влияет на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР, α) алюминиевомедных сплавов, причем это влияние усиливается с увеличением содержания меди. Рассмотрены возможности применения обнаруженных закономерностей для создания будущих новых инварных сплавов, отличающихся малым удельным весом и меньшей стоимостью.

Ключевые слова: температурный коэффициент линейного расширения, сплавы Al – Cu, инвар, обработка расплава, термическая обработка, аномалия ТКЛР.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-87-94

Введение

Важнейшее место в деятельности человека на Земле отведено метрологии. В ней главное внимание уделяется материалам приборной техники, особое положение среди которых занимают металлы и сплавы с регулируемым ТКЛР [1, 2].

В 1920 году Ш. Гильом получил Нобелевскую премию по физике «за создание железоникелевых сплавов для метрологических целей» [3]. Разработанные им сплавы на основе Fe-Ni получили название «инвары». До сих пор в приборной технике используется его сплав Н36, который при температурах испытания ($t_{исп}$) 50...100 °С после сложной деформации и тер-

мической обработки имеет $\alpha = 1...2 \cdot 10^{-6}$, град⁻¹ [4, 5].

До настоящего времени проводится гигантское количество работ по выяснению инварного эффекта с привлечением легирования железоникелевой основы всеми доступными элементами периодической системы, включая драгоценные (Pt, Pd). Однако секрет инварного эффекта до сих пор не выяснен.

Настоящая работа является разделом общего направления – поиска легких сплавов для космической техники с таким же низким ТКЛР [6], как у тяжелых железоникелевых инваров.

Ранее [7] изучалось влияние меди на линейное расширение алюминия А7. На основании полученных результатов сделан вывод, что «вполне

приемлемым может быть применение меди для получения легких сплавов с контролируемым тепловым расширением». Введение меди в алюминий А7 в количестве 4...20 % создает аномалию линейного расширения с максимумом при $t_{исп} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1). После резкого повышения значений ТКЛР при $t_{исп} = 400...450 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит плавное уменьшение его до значений, близких к исходному. Большие добавки меди (30, 40 и 50 %) аномалию ТКЛР не создают, но снижают ТКЛР во всем температурном интервале испытания, что согласуется с результатами, полученными на алюминиевокремниевых и кремниевых сплавах [8, 9]. Здесь следует отметить очень важное обстоятельство, что высоколегированный алюминий с кремнием и алюминий с медью (30, 40, 50 % легирующей добавки) отличаются высокой хрупкостью [10–12]. Естественно, что это затрудняет применение их для создания деформируемых сплавов для космических аппаратов [13, 14].

В связи с этим цель настоящей работы – исследование возможности уменьшения ТКЛР

сплавов алюминия с 4...20 % Cu в литом и деформированном состоянии за счет обработки расплава и последующей термической обработки.

Обработка расплава заключалась в продувке его водяным паром в течение 30 мин при $730...750 \text{ }^\circ\text{C}$. Водяной пар был выбран как вещество, легко разлагающееся на поверхности жидкого металла и способное существенным образом изменять наводороженность конечного сплава, т. е. изменять соотношение водорода нейтрального и ионизованного (H^\pm , H^+ и H) [15].

Методика экспериментальных исследований

Для исследования осуществляли выплавку сплавов в закрытой лабораторной печи сопротивления в алундовом тигле. После расплавления алюминия А7 вводили медь М1. В ходе экспериментов варьировали количество компонентов. Приготовление сплавов осуществляли по методике [16]. Деформацию проводили на лабораторном прокатном стане [17]. Из полученных слитков изготавливали образцы для дилатометрического исследования. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего дилатометра системы Шевенара в интервале температур испытания $50...450 \text{ }^\circ\text{C}$, погрешность определения составляла $\pm 0,16 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Термическая обработка проводилась при температуре 450 и $510...520 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $1...12$ ч с последующим охлаждением в воде (закалка). В некоторых случаях проводилась закалка с последующим старением.

Результаты и обсуждение

Обработка расплава. Продувка расплава водяным паром значительно снижает ТКЛР при $t_{исп} = 50...200 \text{ }^\circ\text{C}$, усиливает первую аномалию при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и вторую при $400 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2). Это действие обработки расплава наиболее ярко наблюдается для сплава $\text{Al} - 10 \text{ } \%$ Cu. Сплав $\text{Al} - 4 \text{ } \%$ Cu (основа промышленных дуралюминов) при обычном приготовлении не имеет второй аномалии ($t_{исп} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$). Продувка его расплава водяным паром создает аномалию при этой температуре испытания, что дает основание считать

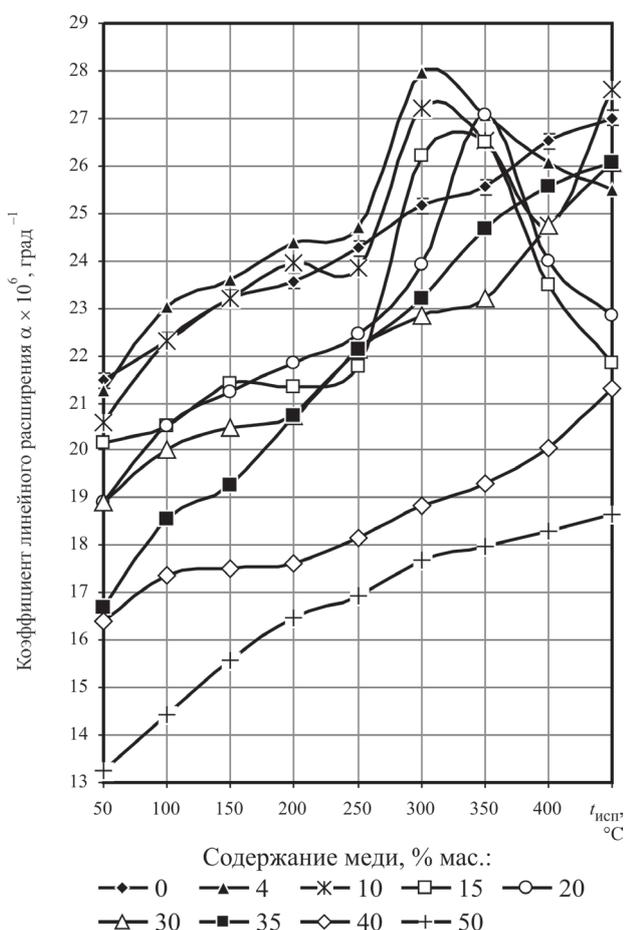


Рис. 1. Линейное расширение сплавов алюминия с медью

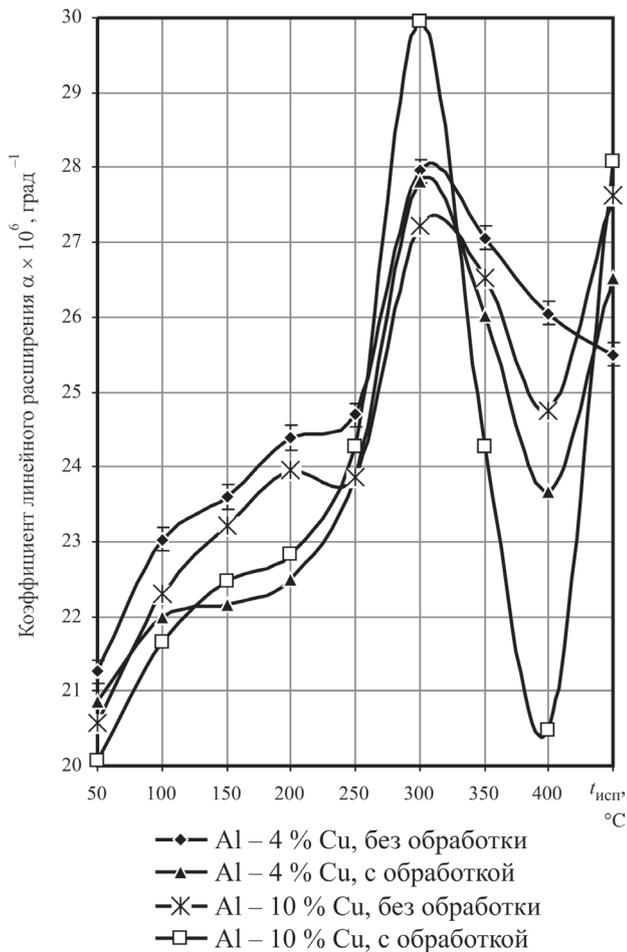


Рис. 2. Влияние обработки расплава водяным паром ($\tau = 30$ мин) на линейное расширение сплавов Al-Cu

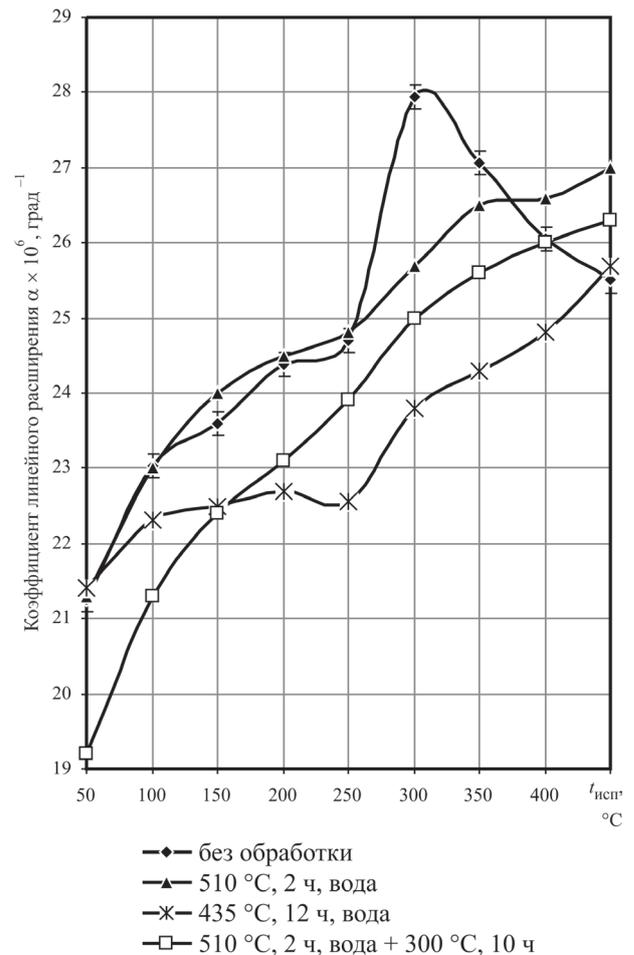


Рис. 3а. Влияние термической обработки на линейное расширение сплава Al – 4 % Cu (обычного приготовления)

ее ответственной за резкое уменьшение расширения при 400 °С (вторая аномалия).

Значительное влияние на развитие аномалии оказывает термическая обработка. Установлено, что нагревы выше температуры начала удаления водорода из металлических сплавов (280...300 °С) уменьшают или полностью устраняют аномалию [18–20]. Например, на рис. 3а показано, что закалка сплава Al – 4 % Cu с температур 450 и 510 °С после нагрева в течение 12 и 2 ч соответственно подавляет образование аномалии. Причем более эффективно действует длительный нагрев в течение 12 ч при 450 °С, а не обычно рекомендуемый для закалки – при 510 °С. Старение при 300 °С в течение 10 ч снижает ТКЛР во всем температурном интервале испытаний, а также устраняет аномалию при 300 °С. Отмечено, что самым эффективным нагревом, подавляющим образование аномалии, является длительный нагрев при температуре этой же аномалии. Сделан очень важный вывод,

что чем выше значения ТКЛР при $t_{исп} = 300$ °С, тем сильнее его снижение после длительного нагрева при 300 °С. В заключение следует отметить, что наиболее эффективными температурами нагрева, устраняющими образование аномалии, являются температуры 435 и 300 °С.

На рис. 3б показано влияние закалки и старения при 100 и 250 °С. Наиболее важно здесь то, что обработка расплава водяным паром и последующая закалка (без старения) повышают ТКЛР при $t_{исп} = 50...250$ °С и усиливают обе аномалии.

Первая аномалия, заключающаяся в резком увеличении расширения при 250...350 °С, и вторая аномалия – резкое уменьшение расширения при $t_{исп} = 400$ °С – свидетельствуют о развитии процессов, управляющих общей величиной ТКЛР.

На рис. 4 показано, что высокотемпературный нагрев сплава Al – 10 % Cu, продутого в расплавленном состоянии водяным паром, еще более четко выражает наличие первой и второй

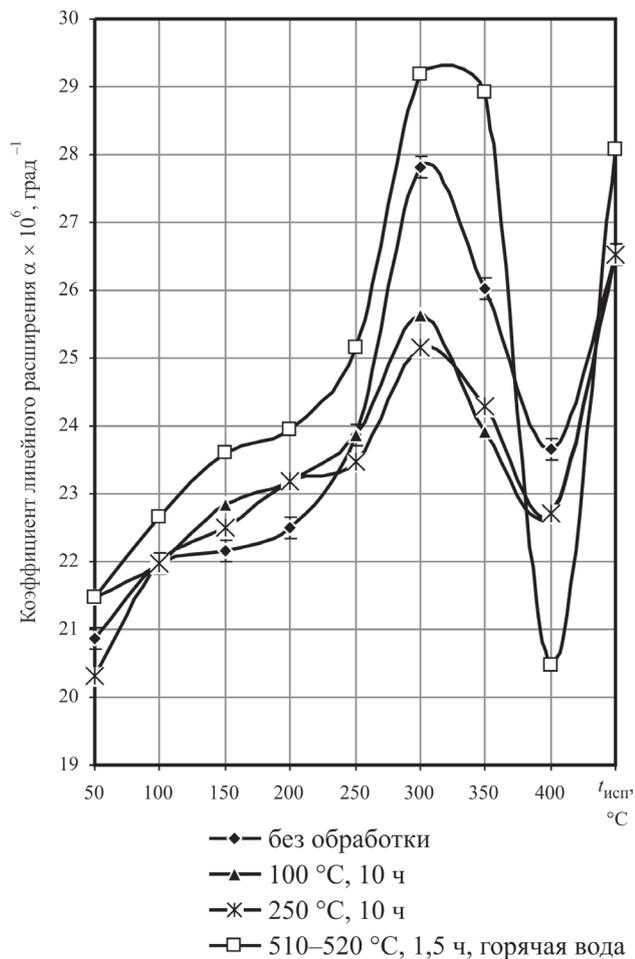


Рис. 3б. Влияние термической обработки на линейное расширение сплава Al – 4 % Cu (продувка расплава водяным паром, 30 мин)

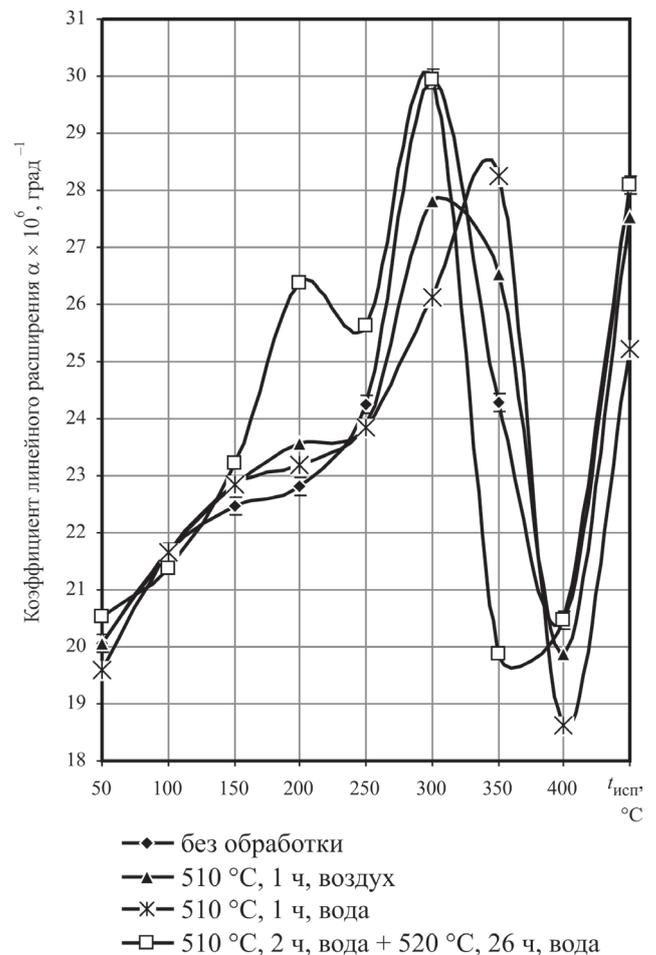


Рис. 4. Влияние термической обработки на линейное расширение сплава Al – 10 % Cu (продувка расплава водяным паром, 30 мин)

аномалий. Сделано заключение о том, что одной закалки недостаточно для снижения ТКЛР. Это происходит потому, что высокий нагрев разлагает промежуточные фазы, являющиеся концентраторами водорода [21, 22]. В результате количество водорода H^+ в твердом растворе повышается, а следовательно, ТКЛР сплава увеличивается. Для его снижения необходимо проведение закалки с последующим старением при 200...300 °C, когда водород H^+ взаимодействует с примесями сплава и образует независимые «продукты распада пересыщенного раствора» [23], снижающие ТКЛР.

Вторая аномалия ТКЛР, выражающаяся в резком снижении коэффициента при $t_{исп} = 400$ °C, ранее была установлена на сплавах алюминия с магнием [24]. Там же сделано заключение, что «аномалию линейного расширения в сплавах Al-Mg следует рассматривать как эффект, обусловленный перераспределением водорода

в твердом растворе, молизацией и частичным выходом в атмосферу. Это согласуется с масс-спектрометрическим определением температуры начала выделения водорода из сплава Al – 10 % Cu [21]». Кроме того, сделан вывод, что «повышение содержания магния или водорода усиливает аномалию, длительная гомогенизация сплавов приводит к значительному ее уменьшению».

Развитие второй аномалии линейного расширения характерно для многих других материалов. Резкое снижение ТКЛР при нагреве различных веществ, таких как высокочистое железо 008ЖР, серый чугун и белый нелегированный чугун [25], часто достигающее отрицательных значений, свидетельствует о едином процессе расширения и сжатия при нагреве. Выяснению природы этого процесса должно быть уделено значительное внимание. Сейчас достоверно известно, что определенная, а может быть веду-

щая, роль в обнаруженных процессах расширения и сжатия принадлежит водороду. Столь необычное поведение тяжелых и легких сплавов открывает перспективу получения требуемого и контролируемого значения ТКЛР.

Основное внимание должно быть уделено также пластической деформации как горячей, так и холодной.

На сплавах Al – Cu показано, что «горячий прокат существенно влияет на линейное расширение сплава, причем эффект деформации усиливается при увеличении содержания меди» [7].

На рис. 5а, б, в на примере сплавов алюминия с 10, 15 и 20 % меди, показано, что пластическая деформация и последующий отжиг полностью устраняют как первую, так и вторую аномалии. Проведение горячего проката с холодным подкатом существует давно и является важным, поскольку лежит в основе получения класса Fe-Ni инваров.

Нами впервые приведены результаты, указывающие на возможность сжатия сплава Al – 30 % Cu при $t_{исп} = 400...450$ °С, где ТКЛР достигает значений $\alpha = -1,92...-2,00 \cdot 10^{-6}$, град $^{-1}$. Также процессы сжатия ярко просматриваются после различной термической обработки железа и белого нелегированного чугуна [25].

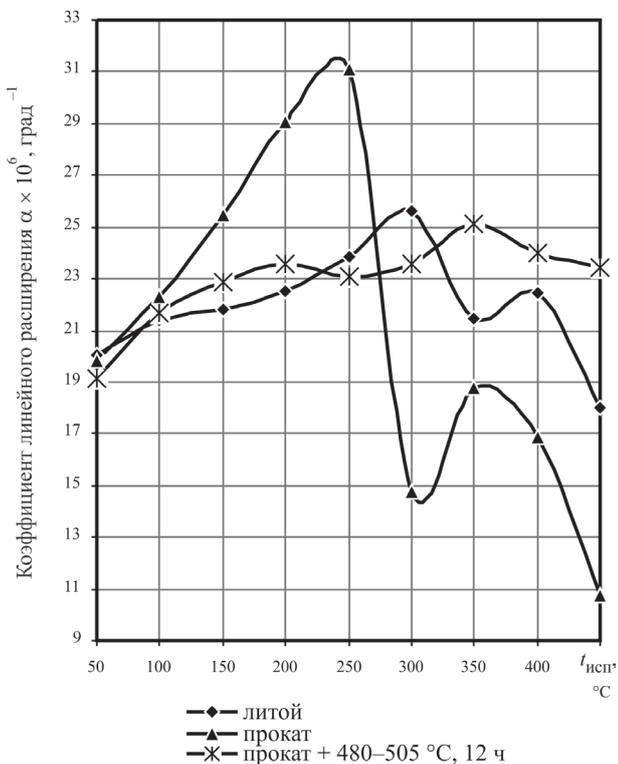


Рис. 5а. Линейное расширение деформируемого сплава Al – 10 % Cu

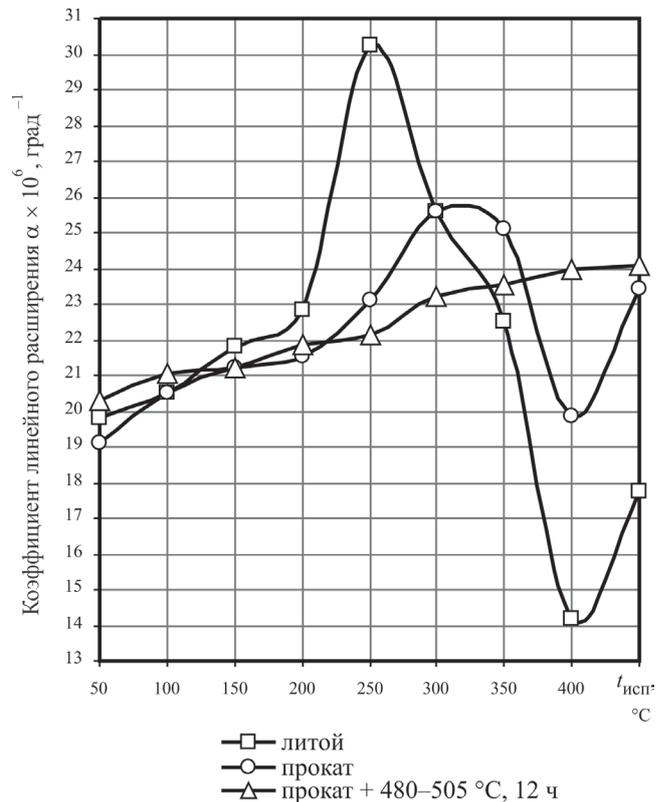


Рис. 5б. Линейное расширение деформируемого сплава Al – 15 % Cu

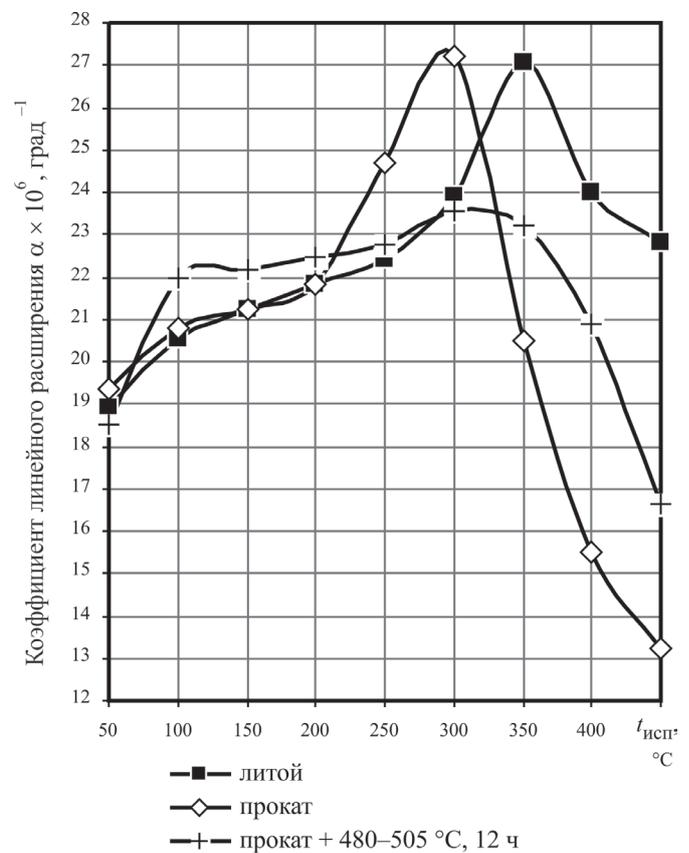


Рис. 5в. Линейное расширение деформируемого сплава Al – 20 % Cu

Выводы

1. Изучена обработка расплава водяным паром и последующая термическая обработка сплавов Al – Cu различного приготовления. Показано, что водяной пар, введенный в расплав, приводит к развитию аномалии линейного расширения при температурах испытания 350...400 °С.

2. Установлено, что пластическая деформация сплавов Al – 10...20 % Cu снижает ТКЛР при высоких температурах испытания, а последующий отжиг (480...505 °С) после 12 ч нагрева существенно уменьшает действие пластической деформации.

3. Полученные экспериментальные результаты являются следующим шагом при разработке будущих легких инваров.

Список литературы

1. *Материаловедение и технология материалов: учебное пособие / под ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина.* – М.: Инфра-М, 2012. – 288 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-16-004821-5.

2. *Новикова С.И.* Тепловое расширение твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 424 с.

3. *Гринвуд Н., Эрншо А.* Химия элементов. В 2 т. Т. 2: пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 670 с. – (Лучший зарубежный учебник). – ISBN 978-5-94774-372-2. – ISBN 978-5-94774-374-6.

4. *Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина.* – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.

5. *Прецизионные сплавы: справочник / под ред. Б.В. Молотилова.* – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 439 с.

6. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии.* – 2012. – № 5. – С. 7–17.

7. *Влияние меди на линейное расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.А. Старостина, Е.В. Первакова, И.В. Дегтярева // Металлургия машиностроения.* – 2010. – № 3. – С. 30–34.

8. *О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина // Металлургия машиностроения.* – 2010. – № 6. – С. 23–26.

9. *Афанасьев В.К., Попова М.В.* Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расши-

рением для космической техники // *Металлургия машиностроения.* – 2012. – № 6. – С. 8–13.

10. *Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б.* Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия, 1977. – 271 с.

11. *Альтман М.Б.* Структура и свойства легких сплавов. – М.: Наука, 1971. – 218 с.

12. *Алюминий: свойства и физическое материаловедение: пер. с англ. / под ред. Дж.Е. Хэтча.* – М.: Металлургия, 1989. – 422 с.

13. *Лившиц Б.Г.* Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Машгиз, 1959. – 368 с.

14. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

15. *Афанасьев В.К.* Водородная платформа периодической системы элементов // *Металлургия машиностроения.* – 2011. – № 2. – С. 21–27.

16. *О линейном расширении алюминия при нагреве / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.Ф. Фролов, А.Н. Любушкина // Металлы.* – 2002. – № 2. – С. 47–53.

17. *О новом способе дегазации металлов и сплавов / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, А.А. Копытько, М.А. Старостина, Н.Б. Лаврова, Д.М. Чибряков // Металлургия машиностроения.* – 2009. – № 4. – С. 5–9.

18. *Галактионова Н.А.* Водород в металлах. – М.: Металлургия, 1967. – 303 с.

19. *Колачев Б.А.* Водородная хрупкость цветных металлов. – М.: Металлургия, 1966. – 255 с.

20. *Водород в металлах. В 2 т. Т. 2. Прикладные аспекты / под ред. Г. Алефельда, И. Фелькля.* – М.: Мир, 1981. – 430 с.

21. *Ливанов В.А., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А.* О распределении водорода между фазами в металлах // *Сплавы цветных металлов: сборник статей.* – М., 1972. – С. 145–151.

22. *О распределении водорода в металле при кристаллизации / Р.М. Габидуллин, В.А. Засыпкин, В.Д. Юшин, В.Н. Титов // Алюминиевые сплавы: сборник.* – М., 1968. – Вып. 5. – С. 14–21.

23. *Афанасьев В.К.* Об особенностях влияния водорода на распад алюминиевых твердых растворов // *Физика и химия обработки материалов.* – 1977. – № 4. – С. 67–75.

24. *Афанасьев В.К., Ухов В.Л., Солопеко А.Н.* Об аномалии линейного расширения сплавов Al-Mg // *Известия Академии наук СССР. Металлы.* – 1975. – № 5. – С. 189–191.

25. *Разработки кафедры материаловедения и технологии новых материалов СибГИУ / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, Н.Н. Кушнарченко, А.Н. Прудников // Металлургия машиностроения.* – 2014. – № 2. – С. 30–38.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 87–94

Thermal expansion of Al–Cu alloys after conditioning and heat treatment**Afanas'ev V.K.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sv_dolgov@mail.ru**Malyuh M.A.**, Junior researcher, e-mail: malyuh_ma@umu.sibsiu.ru**Popova M.V.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru**Leis V. A.**, Junior researcher**Dolgova S.V.**, Junior researcher, e-mail: sv_dolgov@mail.ru

Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

There is a huge amount of works on the study of the *invar effect* including alloying of iron-nickel bases by all the available elements of the periodic table, including precious metals (*Pt*, *Pd*). However, the secret of the *invar effect* is still not clear. The effect of copper on the linear expansion of commercial purity aluminum A7 was studied previously. The results obtained led to the conclusion that it can be reasonable to use copper to produce light alloys with controlled thermal expansion. The mechanism of the thermal expansion of as-cast and deformed Al-Cu alloys depends on the melt conditioning and heat treatment. The melt conditioning is presented by the water steam purging. It is found that the melt conditioning leads to anomalies, which are reflected in the reduction of thermal expansion of the alloys of interest. Further heat treatment leads to the development of anomalies. It is shown that the hot plastic deformation significantly affect the temperature coefficient of linear expansion (TCLE, α) aluminum-copper alloys and the effect increases with copper content increasing. The possibility of application of the discovered mechanism to create a new invar alloys, differing by a low specific weight and lower cost is investigated.

Keywords

temperature coefficient of linear expansion, Al-Cu alloys, Invar, melt conditioning, heat treatment, anomaly of TCLE

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-87-94

References

1. Batyshev A.I., Smol'kin A.A., eds. *Materialovedenie i tekhnologiya materialov* [Materials science and technology of materials]. Moscow, Infra-M Publ., 2012. 288 p. ISBN 978-5-16-004821-5
2. Novikova S.I. *Teplovoe rasshirenie tverdykh tel* [Thermal expansion of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 424 p.
3. Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the Elements*. 2nd ed. Oxford, Boston, Butterworth-Heinemann Publ., 1997. 1600 p. ISBN-10: 0-7506-3365-4. ISBN-13: 978-0-7506-3365-9 (Russ. ed.: Grinvud N., Ernsho A. *Khimiya elementov*. V 2 t. T. 2. Translated from English. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2008. 670 p. ISBN 978-5-94774-372-2. ISBN 978-5-94774-374-6).
4. Kikoin I.K., ed. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1006 p.
5. Molotilov B.V., ed. *Pretsiionnye splavy* [Precision alloys]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 439 p.
6. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation materials and technologies*, 2012, no. S (Special iss.), pp. 7–17.
7. Afanasev V.K., Gorshenin A.V., Starostina M.A., Pervakova E.V., Degtyaryova I.V. Vliyanie medi na lineinoe rasshirenie alyuminiya A7 [Features of influence of copper on linear expansion of aluminium A7]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2010, no. 3, pp. 30–34.
8. Afanasiev V.K., Gorshenin A.V., Popova M.V., Prudnikov A.N., Starostina M.A. O vliyanii kremniya na teplovoe rasshirenie alyuminiya [About influence of silicon on thermal expansion of aluminium]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2010, no. 6, pp. 23–26.

9. Afanasyev V.K., Popova M.V. Perspektivy razvitiya legkikh splavov s malym teplovym rasshireniem dlya kosmicheskoi tekhniki [Development prospects for light alloys with low thermal expansion for space technology]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2012, no. 6, pp. 8–13.
10. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. *Splavy alyuminiya s kremniem* [Aluminum alloys with silicon]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 271 p.
11. Al'tman M.B. *Struktura i svoistva legkikh splavov* [Structure and properties of easy alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 218 p.
12. Hatch J.E., ed. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Metals Park, Ohio, ASM International Publ., 1984. 424 p. ISBN-10: 0-8717-0176-6. ISBN-13: 978-0871701763 (Russ. ed.: *Alyuminii: svoistva i fizicheskoe metallovedenie*. Translated from English. Ed. by Dzh. Khetch. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 422 p.).
13. Livshits B.G. *Fizicheskie svoistva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow, Mashgiz Publ., 1959. 368 p.
14. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoistva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1974. 472 p.
15. Afanasyev V.K. Vodorodnaya platforma periodicheskoi sistemy elementov [The hydrogen platform of the periodic table of elements]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2011, no. 2, pp. 21–27.
16. Afanas'ev V.K., Popova M.V., Frolov V.F., Lyubushkina A.N. O lineinom rasshirenii alyuminiya pri nagreve [On the linear expansion of aluminum upon heating]. *Metally – Russian metallurgy (Metally)*, 2002, no. 2, pp. 47–53. (In Russian)
17. Afanasev V.K., Dolgova S.V., Kopytko A.A., Starostin M.A., Lavrova N.B., Chibryakov D.M. O novom sposobe degazatsii metallov i splavov [A new way of decontamination of metals and alloys]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2009, no. 4, pp. 5–9.
18. Galaktionova N.A. *Vodorod v metallakh* [Hydrogen in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 303 p.
19. Kolachev B.A. *Vodorodnaya khrupkost' tsvetnykh metallov* [Hydrogen fragility of non-ferrous metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1966. 255 p.
20. Alefeld G., Völkl J., eds. *Hydrogen in metals*. In 2 vol. Vol. 2. *Application-oriented properties*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1978. 387 p. (Russ. ed.: *Vodorod v metallakh*. V 2 t. T. 2. *Prikladnye aspekty*. Ed by G. Alefel'd, I. Fel'kl'. Moscow, Mir Publ., 1981. 430 p.).
21. Livanov V.A., Gabidullin R.M., Kolachev B.A. [About distribution of hydrogen between phases in metals]. *Splavy tsvetnykh metallov: sbornik statei* [Non-ferrous alloys: collection of articles]. Moscow, 1972, pp. 145–151. (In Russian)
22. Gabidullin P.M., Zasyplin V.A., Yushin V.D., Titov V.N. [About distribution of hydrogen between phases in metals]. *Alyuminievye splavy: sbornik* [Aluminium alloys: collection of articles]. Moscow, 1968, no. 5, pp. 14–21. (In Russian)
23. Afanas'ev V.K. Ob osobennostyakh vliyaniya vodoroda na raspad alyuminievykh tverdykh rastvorov [About features of influence of hydrogen on disintegration of aluminum solid solutions]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Physics and chemistry of materials treatment*, 1977, no. 4, pp. 67–75.
24. Afanas'ev V.K., Ukhov V.L., Solopeko A.N. Ob anomalii lineinogo rasshireniya splavov Al-Mg [About anomaly of linear expansion of alloys of Al-Mg]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Metally – News of Academy of Sciences of the USSR. Metals*, 1975, no. 5, pp. 189–191. (In Russian)
25. Afanasiev V.K., Popova M.V., Kushnarenko N.N., Prudnikov A.N. Razrabotki kafedry materialovedeniya i tekhnologii novykh materialov SibGIU [Developments by the SibGIU's Material Science and New Materials Technology Department]. *Metallurgiya mashinostroeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2014, no. 2, pp. 30–38.

Article history:

Received 4 April 2016

Revised 4 May 2016

Accepted 15 May 2016