

Особенности структуры слитков из сплавов системы Al–Cu–Li в зависимости от химического состава

Н.И. Колобнев, Е.Н. Рябова, Л.Б. Хохлатова,
М.С. Оглодков

ФГУП «ВИАМ», Москва, Российская Федерация
e-mail: olanko@bk.ru; ryabovaen@bk.ru;
xoxlatova_lb@bk.ru; ogmih83@mail.ru

Приведены результаты исследования микроструктуры и фазового состава слитков из модельных сплавов системы Al–Cu–Li–Mg. Показано влияние соотношения основных легирующих элементов на фазовый состав и структуру слитков в литом и гомогенизированном состояниях. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определены температурные интервалы фазовых превращений и выбраны температуры гомогенизации. Построены политермические и изотермические сечения диаграмм состояния исследованных сплавов с использованием программы Thermo-Calc. Исследованные сплавы находятся в фазовой области $\alpha + \delta$ (AlLi) + T_1 (Al₂CuLi) + S(Al₂CuMg).

Ключевые слова: слитки, сплавы системы Al–Cu–Li, термическая обработка, фазовый состав, диаграммы состояния.

Structural Features of Ingots Made of Al–Cu–Li System Alloys Depending on its Chemical Composition

N.I. Kolobnev, E.N. Ryabova, L.B. Khokhlatova, M.S. Oglodkov

All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,
Moscow, Russian Federation
e-mail: olanko@bk.ru; ryabovaen@bk.ru;
xoxlatova_lb@bk.ru; ogmih83@mail.ru

The purpose of the research was to examine the microstructure and phase composition of ingots made of Al–Cu–Li–Mg system model alloys. The study tested the influence of the main doping elements on the phase composition and ingot structure in casted and homogenized states. We defined temperature intervals of phase transformations and chose homogenizing temperature by means of differential scanning calorimetry. As a result, we made polythermal and isothermal sections of thermodynamic diagrams of investigated alloys using Thermo-Calc program. The alloys under consideration are in $\alpha + \delta$ (AlLi) + T_1 (Al₂CuLi) + S(Al₂CuMg) phase area.

Keywords: ingots, Al–Cu–Li system alloys, heat treatment, phase composition, thermodynamic diagram.

Российские и зарубежные алюминий-литиевые сплавы третьего поколения на основе системы Al–Cu–Li, такие как российские В-1461, В-1469 и зарубежные 2099, 2397 2198, 2060, характеризуются пониженным содержанием лития и дополнительным легированием Ag, Zn,

Zr и Sc [1–17]. Они имеют повышенные характеристики пластичности, вязкости разрушения и минимальную анизотропию свойств. Содержание легирующих элементов указанных сплавов находится в интервалах (% масс.): 2,8...4,5 Cu; 0,8...1,7 Li; 0,3...1,0 Mg при разных соотношениях концентраций Cu и Li. Основные легирующие элементы Cu, Li и Mg создают упрочняющие метастабильные фазы в процессе старения. Скандий и цирконий модифицируют структуру и повышают температуру рекристаллизации. Серебро и цинк интенсифицируют выделения упрочняющих фаз.

Для обеспечения более высокой вязкости разрушения в зарубежных сплавах рекомендуется придерживаться следующего соотношения: $(Cu + 5/3 \% Li) < 5,2$ [16, 17]. С учетом этих рекомендаций указанные сплавы можно разделить на две условные группы: сплавы 2198, 2060 с более высокой вязкостью разрушения при концентрации Cu и Li менее 5,2 и сплавы 2099, 2397 с более низкой вязкостью разрушения при концентрации элементов более 5,2 [5–7].

Комплекс свойств сплавов зависит не только от химического состава сплавов и режимов термической обработки, но и от сформированной в полуфабрикатах структуры, которая во многом наследуется от структуры слитков.

Цель настоящего исследования — оценка влияния соотношения основных легирующих элементов на изменение структуры и фазового состава модельных сплавов на основе системы Al–Cu–Li–Mg.

Методика проведения исследований. Работа выполнялась на слитках диаметром 70 мм из модельных сплавов трех составов системы Al–Cu–Li–Mg с различным содержанием меди, лития и магния, как в сплавах 2099, 2397 2198, 2060 (табл. 1) [5–8]. Плавку проводили в электрической печи сопротивления с использованием шамотно-графитового тигля номинальной емкостью 10 кг. Структуру слитков в литом и гомогенизированном состояниях исследовали на световом микроскопе Olympus GX51 после травления в азотной кислоте.

Таблица 1

Химический состав модельных сплавов системы Al–Cu–Li (% масс.)

Номер условной группы	Номер сплава	Cu	Li	Mg	Cu + 5/3 % Li, % масс.
1	1	3,6	0,8	1,0	4,94
	2	3,2	0,95	0,3	4,78
	2198	3,5	1,0	0,3	5,17
	2060	3,8	0,8	0,4	5,14
2	3	3,2	1,45	0,4	5,62
	2099	2,7	1,7	0,4	5,54
	2397	2,8	1,6	0,3	5,47

Температуры плавления неравновесной эвтектики и солидуса определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на установке DSC 404 F1 по РТМ 1.2.032-83 и ММ 1.2.068–2006 на образцах из слитков пяти исследуемых сплавов в литом и гомогенизированном состояниях. Образцы нагревали в среде аргона со скоростью 10 К/мин до расплавления. Политермические и изотермические сечения фазовых диаграмм исследуемых сплавов были построены в программе термодинамических расчетов Thermo-Calc.

Результаты исследований и их обсуждение. Модельные сплавы содержали легирующие элементы в интервале: 3,2...3,6 Cu; 0,8...1,45 Li; 0,8...1,0 Mg при соотношении (Cu + 5/3 % Li) в интервале 4,78...5,62 (см. табл.1).

В сплавах № 1 и № 2, как и в сплавах 2198 и 2060, соотношение концентрации Cu и Li составляет менее 5,2 (первая группа), а в сплаве № 3, 2099, 2397 — более 5,2 (вторая группа).

Методом ДСК определили температуру плавления неравновесных эвтектик и температуру солидуса на образцах слитков сплавов № 1–3 в литом и гомогенизированном состояниях (рис. 1, 2 и табл. 2). На основании анализа ДСК кривых были выбраны режимы двухступенчатого гомогенизационного отжига для исследуемых сплавов: для сплавов первой группы — в интервале температур 500...530 °С и для сплавов второй группы — 515...540 °С. Первая ступень гомогенизационного отжига предназначается преимущественно для растворения легкоплавких эвтектик.

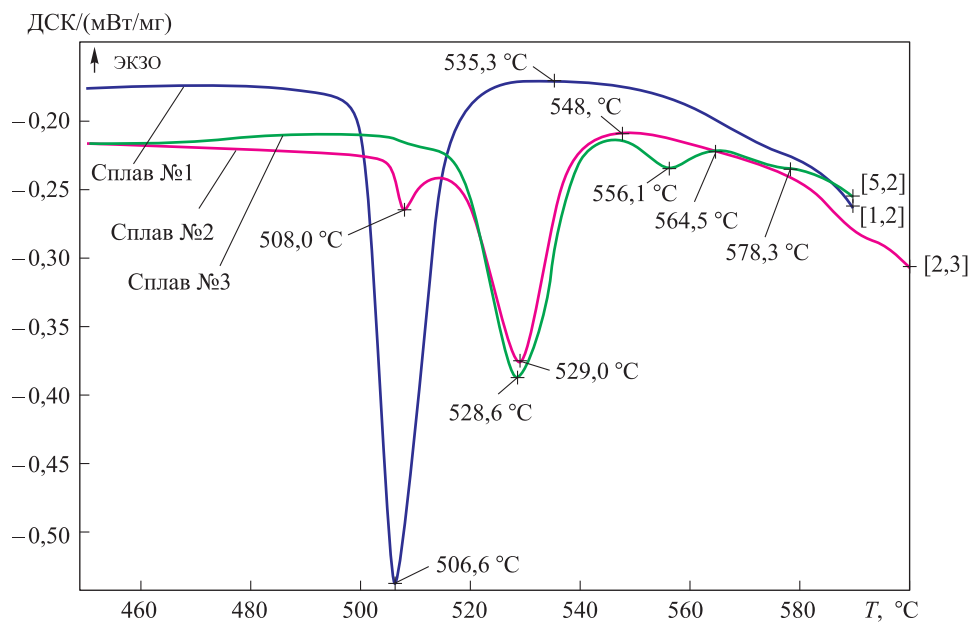


Рис. 1. Термограммы сплавов № 1, 2 и 3 в литом состоянии

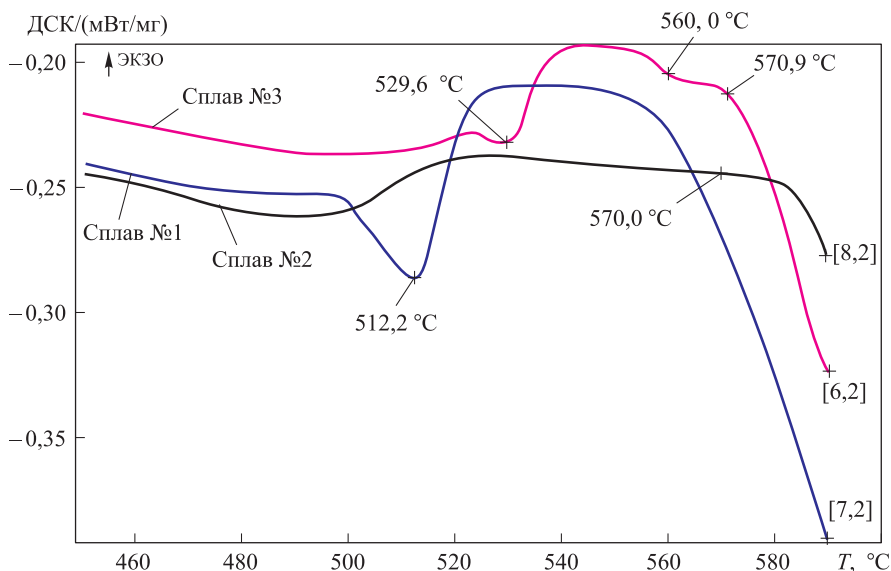


Рис. 2. Термограммы сплавов № 1, 2 и 3 в гомогенизированном состоянии

Таблица 2

Результаты ДСК

Фазовые превращения	Температура фазового превращения, °С					
	Литое состояние			Гомогенизированное состояние		
	Номер сплава					
	1	2	3	1	2	3
Плавление эвтектики 1	507	508	529	512	—	530
Плавление эвтектики 2	—	529	556	—	—	560
Солидус	535	548	565	548	570	571

Дифференциальная сканирующая калориметрия сплавов в гомогенизированном состоянии показала практически полное растворение эвтектических составляющих в сплавах № 1 и 2 и сохранение части высокотемпературной эвтектики (560 °С) в сплаве № 3.

Анализ микроструктуры модельных слитков системы Al–Cu–Li показал, что в литом состоянии структура — дендритная; по границам дендритных ячеек α -твердого раствора наблюдаются прослойки эвтектических фаз литейного происхождения, которые практически полностью растворяются в твердом растворе при гомогенизации сплавов на выбранных режимах в сплавах № 1 и 2 (рис. 3 а, б). В сплаве № 3 с более высоким содержанием лития наблюдается больший объем избыточных фаз как в литом, так и в гомогенизированном состоянии.

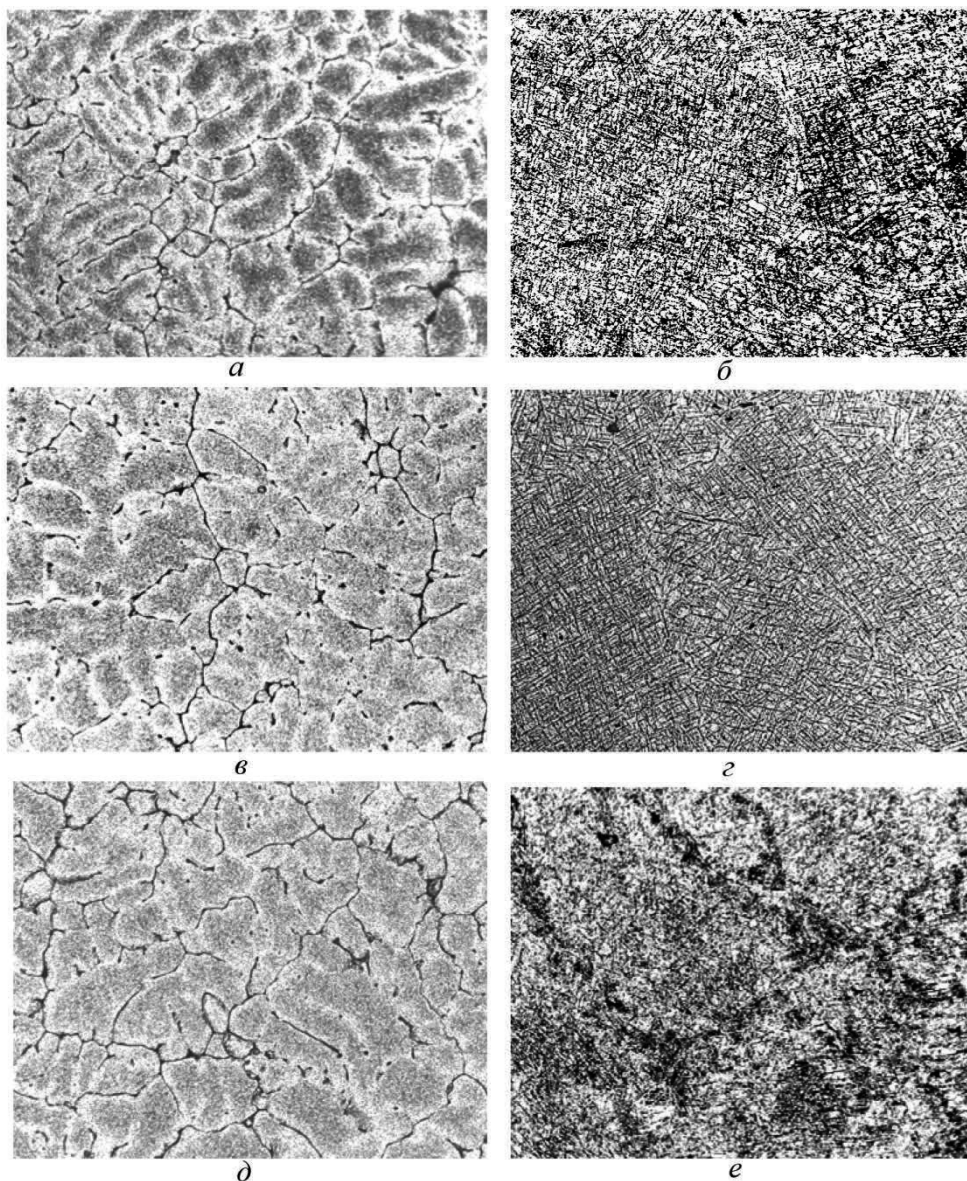
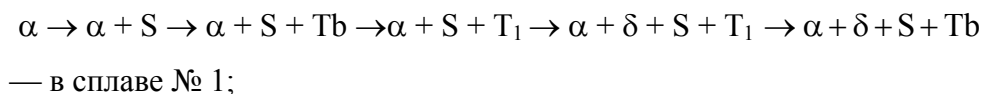
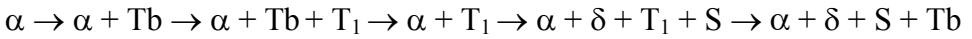


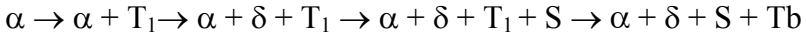
Рис. 3. Типичная микроструктура слитка сплавов № 1 и 2 (*а, б, в, з*) и № 3 (*д, е*) в литом (*а, в, д*) и гомогенизированном (*б, з, е*) состоянии ($\times 100$)

Политермические сечения диаграмм состояния системы Al–Cu–Mg строились с переменным содержанием Li и постоянным содержанием Cu и Mg, как в сплавах № 1–3 (рис. 4). В зависимости от содержания лития при термической обработке в этих сплавах могут протекать многофазные превращения:





— в сплаве № 2;



— в сплаве № 3.

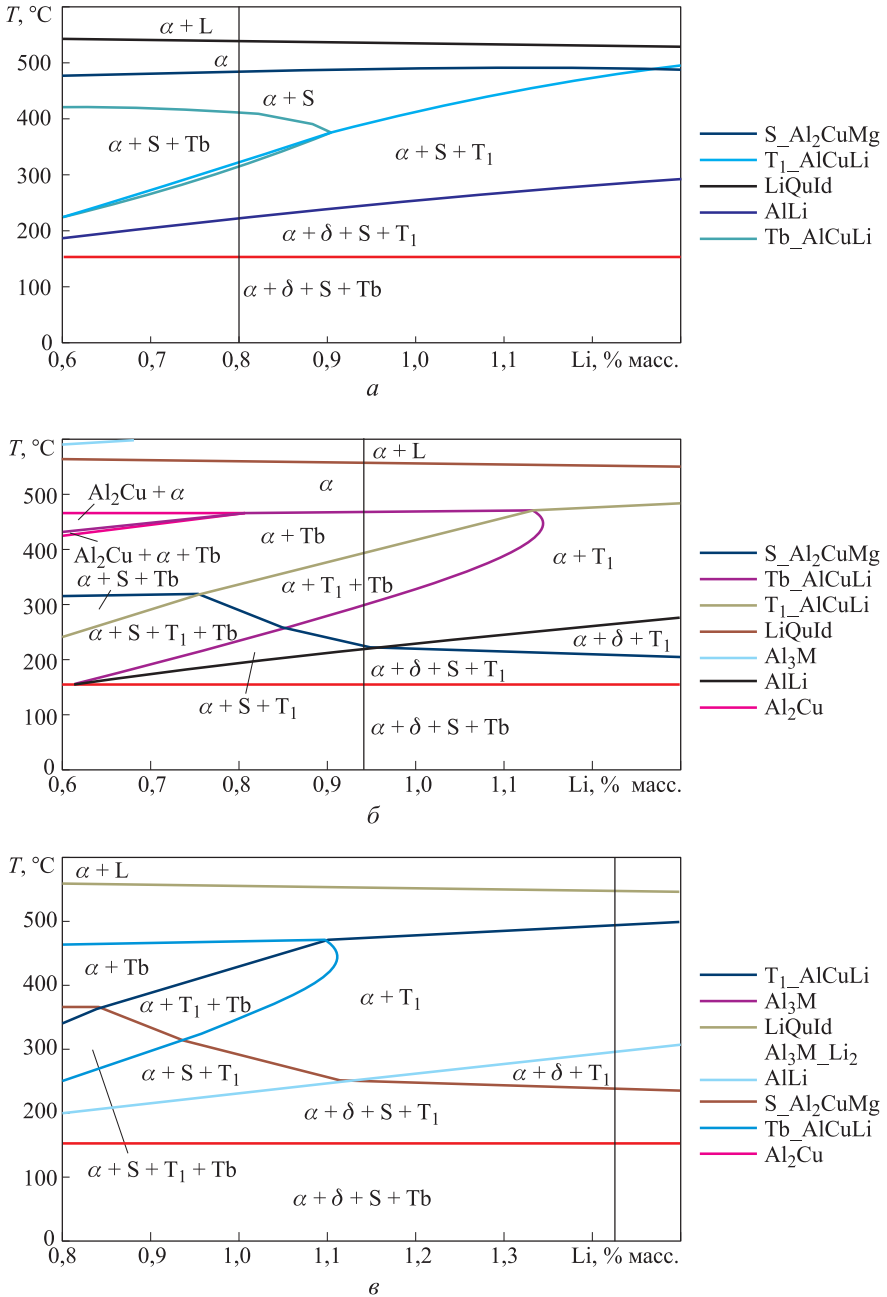


Рис. 4. Политермические сечения диаграмм состояния сплавов № 1 (а), 2 (б), 3 (в)

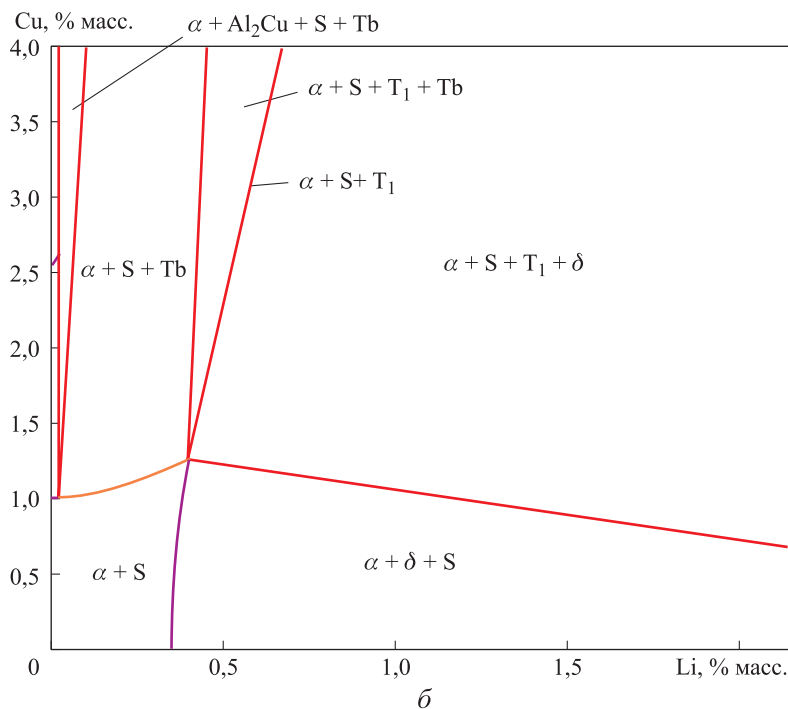
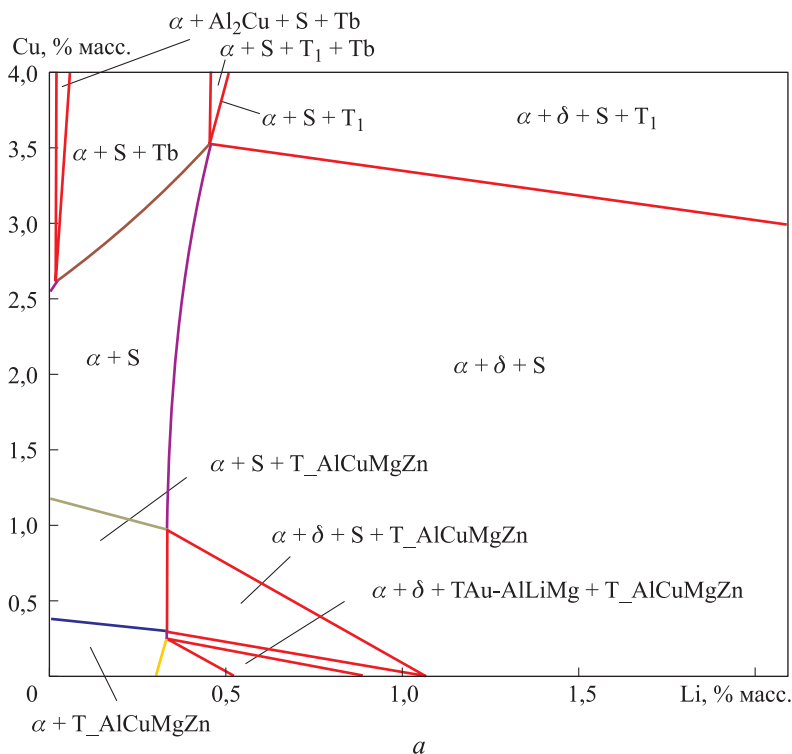


Рис. 5 (начало). Изотермические сечения диаграмм состояния сплавов № 1 (а) и 2 (б) при температуре 155 °С

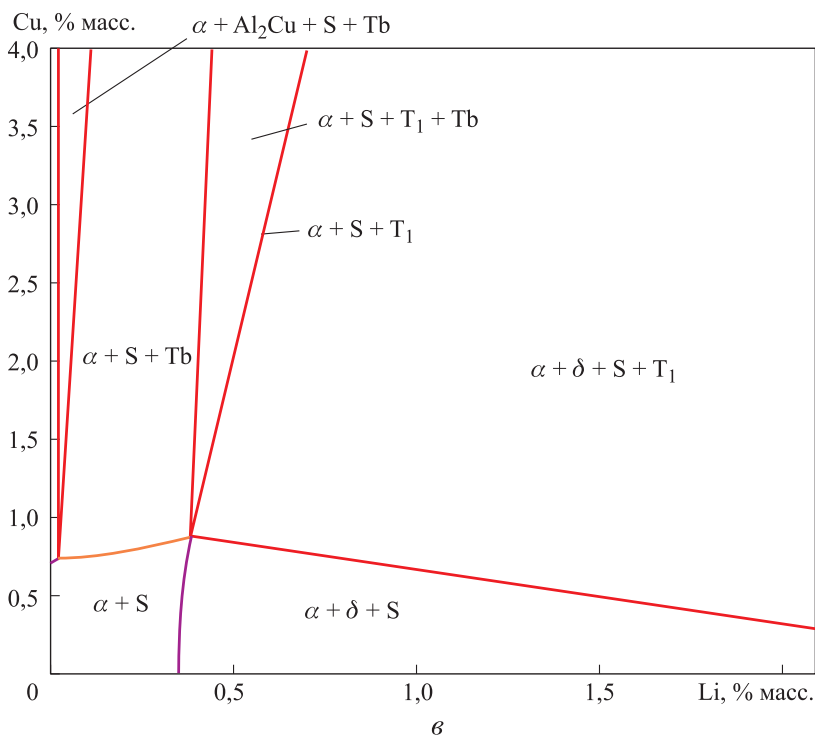


Рис. 5 (окончание). Изотермические сечения диаграммы состояния сплава № 3 (в) при температуре 155 °С

Изотермические сечения диаграмм состояния при температурах, при которых обычно проводят старение (100...200 °С), показали, что все исследованные сплавы находятся в фазовой области $\alpha + \delta$ (AlLi) + T_1 (Al₂CuLi) + S (Al₂CuMg) (рис. 5). Однако разное содержание основных легирующих элементов (Cu, Li, Mg) в сплавах влияет на количественный состав указанных фаз (табл. 3). Следует учитывать также возможное смещение фазовых областей в зависимости от режима старения и создания неравновесных условий. Сплав № 1 условно можно отнести к фазовой области $\alpha + \delta$ (AlLi) + S (Al₂CuMg), а сплавы № 2 и 3 — к области $\alpha + \delta$ (AlLi) + T_1 (Al₂CuLi).

Таблица 3

Ориентировочное соотношение по числу фаз в исследуемых сплавах

Номер сплава	Число фаз (% об.)			
	α	δ (AlLi)	T_1 (Al ₂ CuLi)	S (Al ₂ CuMg)
1	91,1	2,8	0,33	5,7
2	91,9	2,7	4,5	0,8
3	87,7	6,9	4,0	1,2

Повышенное суммарное число фаз δ (AlLi) и T_1 (Al₂CuLi) в сплаве № 3 связано с большим содержанием лития. Легирование до 1 % магнием в сплаве № 1 увеличивает содержание фазы S (Al₂CuMg).

Заключение. Показано влияние соотношения основных легирующих элементов в сплавах системы Al–Cu–Li–Mg на фазовый состав и структуру слитков в литом и гомогенизированном состояниях. Методом ДСК определены температурные интервалы фазовых превращений и выбраны температуры гомогенизации. В литом состоянии микроструктура дендритная, по границам дендритных ячеек наблюдаются прослойки эвтектических фаз литейного происхождения, которые практически полностью растворяются при гомогенизации сплавов по выбранным режимам. В сплаве № 3 с более высоким содержанием лития и при $(\text{Cu} + 5/3 \% \text{Li}) > 5,2$ наблюдается больший объем избыточных фаз как в литом, так и в гомогенизированном состоянии.

Построены политепические и изотермические сечения диаграмм состояния исследованных сплавов с использованием программы ThermoCalc. Исследованные сплавы находятся в фазовой области $\alpha + \delta + (\text{AlLi}) + T_1(\text{Al}_2\text{CuLi}) + S(\text{Al}_2\text{CuMg})$. Однако с учетом неравновесного состояния и разных объемных долей указанных фаз можно ожидать, что в температурном интервале старения сплав № 1 сместится в фазовую область $\alpha + \delta + S$, а сплавы № 2 и 3 — в область $\alpha + \delta + T_1$.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Лоцинину, И.А. Майоровой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминий-литиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 183–195.
2. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминий-литиевые сплавы для самолетных конструкций // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 35–38.
3. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминий-литиевые сплавы для самолетостроения // Металлург. 2012. № 5. С. 31–35.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33.
5. Magnusen P.E., Mooy D.C., Yocum L.A., Rioja R.J. Development of high toughness sheet and extruded products for airplane fuselage structures // The Minerals, Metals and Materials Society. 2012. С. 535–540.
6. Karabin L.M., Bray G.H., Rioja R.L., Venema G. Al–Li–Cu–Mg–(Ag) products for lower wing skin applications // The Minerals, Metals and Materials Society. 2012. P. 529–534.
7. Dorin T., Dtschamps A., Gtuser F.D., Weyland M. Quantitative description of the T_1 morphology and strengthening mechanisms in an age-hardenable Al–Li–Cu alloy // The Minerals, Metals and Materials Society. 2012. P. 1155–1160.
8. Пат. US 5198045 США. Высокопрочный Al–Li сплав с пониженной плотностью, повышенной вязкостью для использования в изделиях авиакосмической техники и способ его изготовления. Оpubл. 30.03.1993.
9. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. Киев: Наук. думка. 1992. 192 с.
10. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых аломостеклопластиков на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с

пониженной плотностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. 2. С. 174–183.

11. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминий-литиевые сплавы. В кн.: Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2007. Юбилейный науч.-техн. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вериков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы — материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ. 2013. № 2.
13. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
14. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 4. С. 7–11.
15. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1. С. 8–12.
16. Пат. FR 2006 / 001250. Алюминиево-медно-литиевый лист с высокой вязкостью разрушения для фюзеляжа самолета. Опубл. 02.06.2006.
17. Пат. US 687444P США. Высокопрочный Al–Cu–Li сплав из листового материала для фюзеляжа самолета. Опубл. 14.12.2006.

REFERENCES

- [1] Antipov V.V., Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B. Development of Aluminium-Lithium Alloys and Multistage Heat Treatment Conditions. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 5, pp. 183–195 (in Russ.).
- [2] Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B., Antipov V.V. Promising Aluminum-Lithium Alloys for Aircraft Structures. *Tekhnologiya legkikh splavov* [The Technology of Light Alloys], 2007, no. 2, pp. 35–38 (in Russ.).
- [3] Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Mikhaylov E.D. Aluminum-Lithium alloys for aircraft building. *Metallurgist*, 2012, vol. 56, iss. 5, pp 336–341.
- [4] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE VIAM SSC of RF on realization of “Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030”. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1 (34), pp. 3–33 (in Russ.).
- [5] Magnusen P.E., Mooy D.C., Yocum L.A., Rioja R.J. Development of high toughness sheet and extruded products for airplane fuselage structures. *The Minerals, Metals and Materials Society*, 2012, pp. 535–540.
- [6] Karabin L.M., Bray G.H., Rioja R.L., Venema G. Al-Li-Cu-Mg-(Ag) products for lower wing skin applications. *The Minerals, Metals and Materials Society*, 2012, pp. 529–534.
- [7] Dorin T., Dtschamps A., Gtuser F.D., Weyland M. Quantitative description of the T₁ morphology and strengthening mechanisms in an age-hardenable Al-Li-Cu alloy. *The Minerals, Metals and Materials Society*, 2012, pp. 1155–1160.
- [8] Low Density High Strength Al-Li Alloy. Patent US, no. 5198045, 30.03.1993.
- [9] Fridlyander I.N., Chuistov K.V., Berezina A.L., Kolobnev N.I. Алюминий-Литиевые сплавы. Структура и свойства [Aluminum-Lithium Alloys. Structure and Properties]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 192 p.
- [10] Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F. New Class of Laminated Aluminum Fiberglass Plastics Based on Aluminum-Lithium Alloy 1441 with Low Density. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashino-*

nostr., *Spetsvyp* no. 2 [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng. Spec. Iss. no. 2], 2011, pp. 174–183 (in Russ.).

- [11] Fridlyander I.N., Grushko O.E., Antipov V.V., Kolobnev N.I., Khokhlatova L.B. Alyuminiy-litievye splavy. V kn. *Aviatsionnye materialy. Izbr. tr. VIAM 1932–2007. Yubileynyy nauch.-tekh. sb.* [Aluminum-Lithium Alloys. In Aviation Materials. Selected Works VIAM 1932–2007. Scientific and Engineering Festschrift]. Moscow, VIAM Publ., 2007, pp. 163–171.
- [12] Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare-earth elements – materials for modern and future high technologies. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2013, no. 2.
Available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=9
- [13] Kablov E.N. Aerospace material science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopedic Reference Book], 2008, no. 3, pp. 2–14 (in Russ.).
- [14] Oglochkov M.S., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Alekseev A.A., Lukina E.A. Effect of the thermomechanical treatment on Al (Al-Cu-Mg-Li-Zn) alloy properties and structure. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2010, no. 4, pp. 7–11 (in Russ.).
- [15] Klochkova Yu.Yu., Grushko O.E., Lantsova L.P., Burlyayeva I.P., Ovsyannikov B.V. Mastering of semifinished products, produced of B-1469 Al-Li advanced alloy in the commercial production. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2011, no.1, pp. 8–12 (in Russ.).
- [16] Aluminum-Copper-Lithium Sheet with High Fracture Toughness for Aircraft Fuselage. Patent FR no. 001250, 02.06.2006.
- [17] High-Strength Al-Cu-Li Alloy Sheet Material for an Aircraft Fuselage. Patent US no. 687444P, 14.12.2006.

Статья поступила в редакцию 14.08.2015

Колобнев Николай Иванович — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Kolobnev N.I. — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Research Scientist of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Рябова Елена Николаевна — инженер Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Ryabova E.N. — Engineer of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Хохлатова Лариса Багратовна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Khokhlatova L.B. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Оглодков Михаил Сергеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Oglodkov M.S. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колобнев Н.И., Рябова Е.Н., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С. Особенности структуры слитков из сплавов системы Al–Cu–Li в зависимости от химического состава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 3. С. 69–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-69-80

Please cite this article in English as:

Kolobnev N.I., Ryabova E.N., Khokhlatova L.B., Oglodkov M.S. Structural Features of Ingots Made of Al–Cu–Li System Alloys Depending on its Chemical Composition. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 3, pp. 69–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-69-80