

Научная статья

УДК 669.71

## Влияние режимов гомогенизации на структуру и свойства сплава Al–Cu–Er–Zr

**Сайед Мохамед Амер<sup>1</sup>, Руслан Юрьевич Барков<sup>2</sup>,  
Мария Владимировна Главатских<sup>3</sup>, Андрей Владимирович Поздняков<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>4</sup> pozdniakov@misis.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние режимов гомогенизации на структуру и свойства сплава Al–Cu–Er–Zr. Формирование диспресоеидов меньшего размера после двуступенчатой гомогенизации обеспечивает более высокий уровень характеристик прочности после прокатки и отжига с сохранением хорошей пластичности.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, редкоземельные металлы рекристаллизация, механические свойства, микроструктура

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10242).

Original article

## Effect of Homogenization Regimes on Structure and Properties of the Al–Cu–Er–Zr Alloy

**Sayed M. Amer<sup>1</sup>, Ruslan Yu. Barkov<sup>2</sup>, Maria V. Glavatskikh<sup>3</sup>,  
Andrey V. Pozdniakov<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russia

<sup>4</sup> pozdniakov@misis.ru

**Abstract.** The effect of homogenization regimes on structure and properties of the Al–Cu–Er–Zr alloy was investigated. Formation of the fine dispersoids after two-stage homogenization treatment provides a higher yield and tensile strength after rolling and annealing.

**Keywords:** aluminum alloys, rare earth metals, recrystallization, mechanical properties, microstructure

**Funding.** The work was carried out with the financial support of the Russian science foundation (project No. 19–79–10242).

Легирование редкоземельными и переходными металлами позволяет повысить прочностные свойства алюминиевых сплавов. Легирование малыми добавками эрбия совместно с цирконием и/или скандием позволяет повысить эффект упрочнения при термической обработке слитков за счет повышения плотности распределения наноразмерных  $L_{12}$  дисперсоидов [1–3]. Квазибинарные сплавы системы Al–Cu–Er отличаются хорошей технологичностью при литье, высокой термической стабильностью и хорошей прочностью [4–6]. Данная работа посвящена исследованию влияния режимов гомогенизации перед прокаткой на структуру и свойства сплава Al–Cu–Er–Zr. Детально микроструктура слитков сплавов Al–Cu–Er, их фазовый состав, эволюция структуры в процессе гомогенизации исследована в работах Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of a New Al–Cu–Er Wrought Alloy, Comparative Analysis of Structure and Properties of Quasibinary Al–6.5Cu–2.3Y and Al–6Cu–4.05Er Alloys Effect of Zr on Microstructure and Mechanical Properties of the Al–Cu–Er Alloy [4–6].

Гомогенизацию сплавов проводили по трем режимам: первый — 590 °C, 3 ч; второй — 605 °C, 1 ч; третий — 360 °C, 24 ч + 605 °C, 1 ч. Исследования микроструктуры проводили с использованием сканирующего и просвечивающего электронных микроскопов (СЭМ и ПЭМ). После гомогенизации и прокатки избыточные фазы  $Al_8Cu_4Er$  и  $Al_3Er$  кристаллизационного происхождения вытягиваются в направлении прокатки (рис. 1). Средний размер интерметаллидных фаз находится в интервале 0,6–0,7 мкм вне зависимости от режима гомогенизации. Более высокая температура гомогенизации способствует более полному прохождению сфероидизации и фактор формы увеличивается с 0,87 до 0,9. При этом гомогенизация при 605 °C способствует более

полному растворению неравновесного избытка фаз кристаллизационного происхождения, в результате чего увеличивается концентрация меди в твердом растворе с 1,7 до 2,1 %.

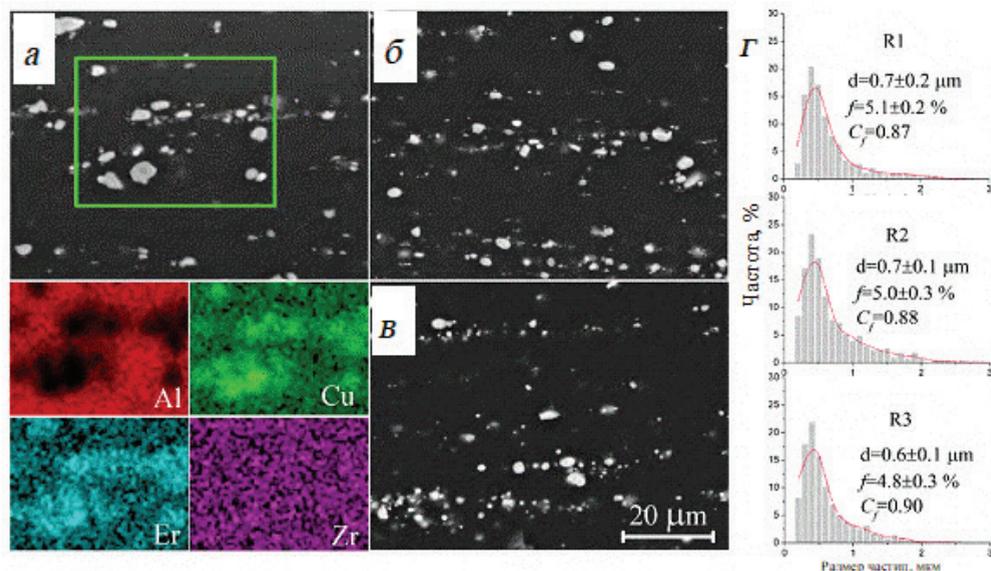


Рис. 1. Микроструктура прокатанного сплава после гомогенизации:

*a* — при 590 °С, 3 ч; *б* — при 605 °С, 1 ч;

*в* — при 360 °С, 24 ч + 605 °С, 1 ч;

*г* — гистограммы распределения по размерам избыточных фаз (СЭМ)

В процессе гомогенизации параллельно процессам фрагментации сфероидизации происходит процесс выделения дисперсоидов из пересыщенного цирконием и эрбием при кристаллизации твердого раствора на основе алюминия.  $L1_2$  дисперсоиды однородно распределены в матрице (рис. 2). Средний размер выделений составляет  $55\pm 5$  мкм,  $40\pm 7$  мкм и  $35\pm 4$  мкм после гомогенизации по режимам 595 °С, 3 ч, 605 °С, 1 ч и двухступенчатому 360 °С, 24 ч + 605 °С, 1 ч соответственно. Контраст Эшби — Брауна на выделениях свидетельствует о формировании полукогерентной границы матрица/частица.

Результаты анализа механических свойств представлены в табл. ниже.

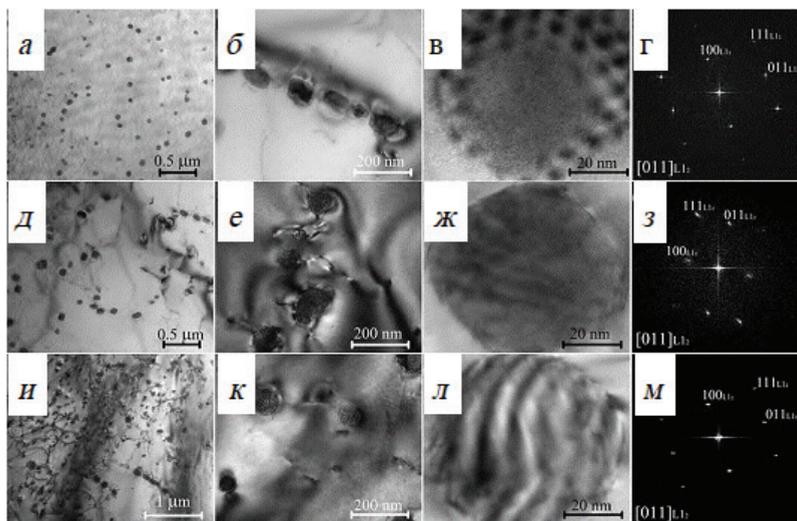


Рис. 2. Микроструктура и электронограммы с дисперсидов после гомогенизации:

*а, б, в, г* — при 590 °С, 3 ч; *д, е, ж, з* — при 605 °С, 1 ч;  
*и, к, л, м* — 360 °С, 24 ч + 605 °С, 1 ч (ПЭМ)

Результаты испытаний на растяжение после прокатки и отжига

Состояние	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Гомогенизация 590 °С			
Деформированное	278±1	300±15	2,4±0,6
Отжиг 100 °С, 3 ч	270±2	303±3	3,1±0,2
Отжиг 150 °С, 3 ч	253±4	283±4	2,4±0,3
Гомогенизация 605 °С			
Деформированное	284±4	315±4	4,6±0,4
Отжиг 100 °С, 3 ч	272±1	306±1	6,2±0,2
Отжиг 150 °С, 3 ч	258±1	289±1	6,2±0,5
Гомогенизация 360 + 605 °С			
Деформированное	298±5	327±2	3,5±0,8
Отжиг 100 °С, 3 ч	291±2	322±1	5,1±0,4
Отжиг 150 °С, 3 ч	274±4	306±4	6,6±0,4

Следовательно, формирование дисп्रेसоидов меньшего размера после двухступенчатой гомогенизации обеспечивает более высокий уровень характеристик прочности после прокатки и отжига с сохранением хорошей пластичности в сравнение с одноступенчатым отжигом.

### Список источников / References

1. Effects of Substituting Rare-Earth Elements for Scandium in a Precipitation-Strengthened Al–0.08at. % Sc Alloy / R. A. Karnesky [et al.] // Scripta Materialia. 2006. Vol. 55 (5). P. 437–440.
2. Karnesky R. A., Dunand D. C., Seidman D. N. Evolution of Nanoscale Precipitates in Al Microalloyed with Sc and Er // Acta Materialia. 2009. Vol. 57 (14). P. 4022–4031.
3. Synergetic Effect of Er and Zr on the Precipitation Hardening of Al–Er–Zr Alloy / S. P. Wen [et al.] // Scripta Materialia. 2011. Vol. 65 (7). P. 592–595.
4. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of a New Al–Cu–Er Wrought Alloy / A. V. Pozdnyakov [et al.] // Physics of Metals and Metallography. 2019. Vol. 120 (6). P. 614–619.
5. Comparative Analysis of Structure and Properties of Quasibinary Al–6.5Cu–2.3Y and Al–6Cu–4.05Er Alloys / S. M. Amer [et al.] // Physics of Metals and Metallography. 2020. Vol. 121 (5). P. 476–482.
6. Effect of Zr on Microstructure and Mechanical Properties of the Al–Cu–Er Alloy / S. M. Amer [et al.] // Materials Science and Technology. 2020. Vol. 36 (4). P. 453–459.