**А. Р. Айтмагамбетов, А. В. Поздняков** НИТУ «МИСиС», г. Москва, Ленинский пр., 4 alisher\_9266@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ AL-ZR-SC

## АННОТАЦИЯ

Исследованы влияние малых добавок переходных металлов Hf, Sm, Y, Er и Gd на структуру и свойства сплава Al-0,2%Zr-0,1%Sc. Косвенно показано, что добавки Y, Er и Gd приводят к повышению термической стабильности дисперсоидов Al<sub>3</sub>(Sc,Zr) после отжига при 250 °C вплоть до 100 часов выдержки. Максимальное упрочнение достигается при наличии 0,1% Er и составляет 50 HV после 54 часов выдержки при 370 °C.

*Ключевые слова*: переходные металлы, дисперсоиды, термическая стабильность.

## ABSTRACT

Investigate the effect of small additions of transition metals Hf, Sm, Y, Er and Gd on the structure and properties of the Al-0,2%Zr-0,1%Sc alloy. Indirectly, it is shown that addition of Y, Er, and Gd result to increase thermal stability of dispersoid Al<sub>3</sub>(Sc,Zr) after annealing at 250 °C for up to 100 hours. Maximum hardening is achieved in the presence of 0.1% Er and it is 50 HV after 54 hours at 370 °C.

Key words: transition metals, dispersoid, thermal stability.

Скандий и цирконий существенно повышают прочностные свойства алюминия и сплавов на его основе за счет образования наноразмерных частиц фазы Al<sub>3</sub>(Sc,Zr) и сохранения нерекристаллизованной структуры [1–9]. Однако скандий является самой дорогостоящей добавкой в алюминиевых сплавах. Поэтому весьма актуальной является задача поиска альтернативной замены. Последнее годы активно проводят исследования рассматривающие влияние малых добавок Er, Gd, Y на свойства и структуру алюминия и его сплавов [10–20]. Чаще добавка скандия вводится в алюминиевые сплавы на основе систем Al–Mg и Al–Zn–Mg–Cu [5–7], а в случае легирования, к примеру, Er гомогенизировать их при столь высоких температурах невозможно. В работах [12–13] установили, что добавки Zr и Er в сплавы на основе системы Al–Mg повышают свойства сварных соединений в основном за счет измельчения зеренной структуры. Добавка 0,08%Y в сплав Al-0,3%Zr уменьшает скорость разупрочнения и повышает

<sup>©</sup> Айтмагамбетов А. Р., Поздняков А. В., 2015

температуру рекристаллизации на 50 °С за счет образования дисперсоидов Al<sub>3</sub>(Zr,Y) [14]. Исследования совместного влияния Y и Gd на структуру и свойства сплава на основе системы Al–Zn–Mg–Cu–Zr показало повышение температуры начала рекристаллизации и эффекта старения, связанное с выделением дисперсоидов фазы Al<sub>3</sub>CuGd [15].

С использованием лигатур Al-1,3%Y, Al-2,2%Sm, Al-1,9%Gd, Al-1,7%Er, Al-1,6%Hf, Al-3,5%Zr, Al-2,5%Sc и алюминия марки A85 выплавляли сплавы в электрической печи сопротивления «Nabertherm». Плавку и разливку проводили при температуре 800 °C. Заливку сплавов осуществляли в медную водоохлаждаемую изложницу (20 × 40 × 100 мм). Скорость охлаждения при кристаллизации составляет примерно 15 К/с. Подготовку шлифов для микроструктурных исследований производили на шлифовально - полировальных установках Struers Labopol-5 и Metkon. Микроструктурные исследования и идентификацию фаз проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN VEGA 3LMH с использованием энерго-дисперсионного детектора X-Max 80. Термическую обработку проводили в сушильных шкафах «Nabertherm» и «SNOL» с температуры ±1 °C. Твердость точностью поддержания измеряли стандартным методом Виккерса, ошибка в определении не превышала 2 HV.



Рис. 1. Микроструктуры сплавов в литом: Al-0,2%Zr-0,1%Sc (a); Al-0,2%Zr-0,%1Sc-0,1%Y (б); Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Sm (в); Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Er (г); Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Hf (д); Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Gd (е) (СЭМ)

На рисунке 1 представлены микроструктуры сплавов Al-0,2%Zr-0,1%Sc, Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Y, Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Er и Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Gd в литом состоянии. В структуре сплава Al-0,2%Zr-0,1%Sc

присутствуют дисперсные сфероидные включения железокремниевой фазы содержащей также небольшое количество Sc ((Al, Fe, Si, Sc)), расположенные по границам дендритных ячеек алюминиевого твердого раствора и, вытянутые вдоль границ зерен, включения фазы (Al, Fe, Sc).

Введение раздельно 0,1%Y, 0,1 Ег и 0,1% Gd в сплав Al-0,2%Zr-0,1%Sc (рис.1, а) в литом состоянии приводит к образованию фаз Al<sub>3</sub>Y (рис. 1, б), Al<sub>3</sub>Er (рис. 1, в) и Al<sub>3</sub>Gd (рис. 1, г), соответственно (рис. 1) – яркие включения по границам зерен и дендритных ячеек, что качественно подтверждено результатами микрорентгеноспектрального анализа (рис. 1, б–г). В сплавах также присутствуют фазы образованные примесями железа и кремния, в которых растворяется до 0,5 % Y и Er (рис. 1, б–в).



Рис. 2. Кинетические кривые отжига при *a*) 250 °C; б) 300 °C; в) 370 °C

Полученнык сплавы отжигали при температурах 250 и 370 °С и различных временах выдержки вплоть до 100 часов. На рис. 2 представлены кинетические кривые отжига. Отжиг литого сплава Al-0,2%Zr-0,1%Sc при 250 °С приводит к максимальному приросту твердости через 30 часов с последующим разупрочнением практически до исходного состояния. При введении 0,1 % добавок Y, Sm, Hf и Gd максимум твердости достигается после 54 часов выдержки без дальнейшего разупрочнения до 100 часов. Добавка 0,1 % Ег приводит к постоянному росту твердости в течение 100 часов выдержки до 40 HV. По полученным кинетическим кривым отжига при 250 °С качественно можно сказать о том, что добавки Y, Sm, Hf, Er и Gd приводят к повышению термической стабильности дисперсоидов Al<sub>3</sub>(Sc,Zr). Отжиг при 370 °С показывает достаточно существенный прирост твердости на 10-20 HV при введении в сплав Al-0,2%Zr-0,1%Sc добавок Y, Sm, Er и Gd. Максимальное упрочнение достигается при наличии 0,1 % Er и составляет 50 HV. При отжиге при 370 °C в сплавах с добавками разупрочнение начинается только после 54 часов выдержки, в то время как в сплаве Al-0,2%Zr-0,1%Sc – после 30 часов. Термообработка сплава Al-0,2%Zr-0,1%Sc-0,1%Hf при 370 °C не дала прироста твердости в сравнение со сплавом без добавки Hf.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Fuller C. B. Seidman. Temporal evolution of the nanostructure of Al(Sc,Zr) alloys: Part I – Chemical compositions of  $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$  precipitates / C. B. Fuller, J. L. Murray, D. N. Seidman // Acta Materialia. – V. 53 – 2005. – P. 5401–5413.

2. Fuller C. B. Temporal evolution of the nanostructure of Al(Sc,Zr) alloys: Part II-coarsening of Al<sub>3</sub>(Sc<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>) precipitates / C. B. Fuller, D. N. Seidman // Acta Materialia. -V.53 - 2005. -P.5415 - 5428.

3. Precipitation kinetic of  $Al_3(Sc,Zr)$  dispersoids in aluminium / W. Lefebvrea, F. Danoixa, H. Hallem, B. Forbord, A. Bostel, K. Marthinsen // Journal of Alloys and Compounds. – V. 470 (2009) – P. 107–110.

4. Microstructural investigations on as-cast and annealed Al–Sc and Al–Sc–Zr alloys / A. K. Lohara, B. Mondala, D. Rafajab, V. Klemmb, S. C. Panigrahi // Materials Characterization. – V. 60 (2009) – P. 1387–1394.

5. Ocenasek V. Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al-Mg alloys / V. Ocenasek, M. Slamova // Materials Characterization. – V. 47 (2001). – P. 157–162.

6. Effect of Sc/Zr ratio on the microstructure and mechanical properties of new type of Al–Zn–Mg–Sc–Zr alloys / G. Li, N. Zhao, T. Liu, J. Li, C. He, C. Shi, E. Liu, J. Sha // Materials Science & Engineering A. –V. 617 (2014). – P. 219–227.
7. Microstructure and mechanical properties of a 5754 aluminum alloy modified by Sc and Zr additions / C. B. Fuller, A. R. Krause, D. C. Dunand, D. N. Seidman // Materials Science and Engineering A. – V. 338 (2002) – P. 8–16.
8. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminium alloys / V. G. Davydov, T. D. Rostova, V. V. Zakharov, Yu. A. Filatov, V. I. Yelagin // Materials Science and Engineering A. – V. 280 (2000) – P. 30–36.
9. Filatov Yu. A. New Al–Mg–Sc alloys / Yu. A. Filatov, V. I. Yelagin,

9. Filatov Yu. A. New Al-Mg-Sc alloys / Yu. A. Filatov, V. I. Yelagin, V. V. Zakharov // Materials Science and Engineering A. – V. 280(2000) – P. 97–101.

10. Booth-Morrison C. Coarsening resistance at 400 °C of precipitationstrengthened Al–Zr–Sc–Er alloys / C. Booth-Morrison, D. C. Dunand, D. N. Seidman // Acta Materialia. – V. 59(2011) – P. 7029–7042.

11. Synergetic effect of Er and Zr on the precipitation hardening of Al–Er–Zr alloy / S. P. Wen, K. Y. Gao, Y. Li, H. Huang, Z. R. Nie // Scripta Materialia. – V. 65(2011) – P. 592–595.

12. Microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Er sheets jointed by friction stir welding / H. L. Hao, D. R. Ni, Z. Zhang, D. Wang, B. L. Xiao, Z. Y. Ma // Materials and Design. – V. 52 (2013). – P. 706–712.

13. Effect of minor Er and Zr on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Mn alloy (5083) welded joints / Yang dongxi, Lixiaoyan, Hedingyong, Huanghui // Materials Science & Engineering A. – V. 561 (2013). – P. 226–231. 14. Effects of Y additions on the precipitation and recrystallization of Al–Zr alloys / Y. Zhang, H. Gao, Y. Kuai, Y. Han, J. Wang, B. Sun, S. Gu, W. You // Materials Characterization. – V. 86 (2013). – P. 1–8. 15. Effects of Gd and Y additions on microstructure and properties of Al–Zn– Mg–Cu–Zr alloys / XingGuo Zhang, FeiQiang Mei, HuanYue Zhang, ShaoHua Wang, CanFeng Fang, Hai Hao // Materials Science and Engineering A. – V. 552 (2012). – P. 230–235.

16. Booth-Morrison C. Effect of Er additions on ambient and high-temperature strength of precipitation-strengthened Al–Zr–Sc–Si alloys / C. Booth-Morrison, D. N. Seidman, D. C. Dunand // Acta Materialia. – V. 60(2012) – P. 3643–3654.
17. Effects of Er and Zr additions on precipitation and recrystallization of pure aluminum / H. Li, Z. Gao, H. Yin, H. Jiang, X. Sua, J. Bin // Scripta Materialia. – V. 68 (2013). – P. 59–62.

18. Effects of homogenization on microstructures and properties of a new type Al-Mg-Mn-Zr-Ti-Er alloy / L.Z. He, X.H. Li, X.T. Liu, X.J. Wang, H.T. Zhang, J.Z. Cui // Materials Science and Engineering A. – V. 527 (2010). – P. 7510–7518.

19. Vo N.Q. Improving aging and creep resistance in a dilute Al–Sc alloy by microalloying with Si, Zr and Er / N.Q. Vo, D.C. Dunand, D.N. Seidman // Acta Materialia. -V. 63 (2014). -P. 73-85.

20. Van Dalen M. E. Microstructural evolution and creep properties of precipitation-strengthened Al–0.06Sc–0.02Gd and Al–0.06Sc–0.02Yb (at.%) alloys / M. E. Van Dalen, D. C. Dunand, D. N. Seidman // Acta Materialia. – V. 59 (2011). – P. 5224–5237.