

**ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В КАМЕРЕ БРИДЖМЕНА НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И УПРОЧНЕНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Al-Ca-Mn-Fe-Zr-Sc**

Рогачев С.О.<sup>1</sup>, Наумова Е.А.<sup>1,2</sup>, Сундеев Р.В.<sup>3</sup>, Табачкова Н.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИТУ «МИСус», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>МГТУ Станкин, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский технологический университет (МИРЭА), г. Москва, Россия

E-mail: csaap@mail.ru; jan73@mail.ru

**Введение.** В последнее время появились работы по исследованию многофазных эвтектических сплавов, обладающих высокими технологическими свойствами как при литье, так и при пластической деформации, на основе системы Al-Ca [1, 2]. Структура этих сплавов состоит из алюминиевого твердого раствора (Al) и эвтектики [(Al) + Al<sub>4</sub>Ca], имеющей очень тонкое строение. Несмотря на целый ряд преимуществ (хорошие литейные свойства, низкая плотность и др.), данные сплавы относятся к сплавам средней прочности. Изыскание возможности повышения их механических свойств представляет несомненный интерес. Использование больших пластических деформаций – перспективный и достаточно освоенный способ повышения прочности и улучшения комплекса свойств различных металлических материалов [3, 4], в т.ч. алюминиевых сплавов [5, 6]. В данной работе изучено влияние деформации методом кручения под высоким давлением в камере Бриджмена (КВД) на упрочнение, структуру и фазовый состав эвтектического сплава системы Al-Ca.

**Исследуемые материалы.** В качестве материала для исследования был выбран литой эвтектический алюминиевый сплав на базе системы Al-Ca следующего химического состава: Al – 94.9 %; Ca – 3.5 %; Mn – 0.9 %; Fe – 0.5 %; Zr – 0.1 %; Sc – 0.1 %.

Деформацию методом КВД осуществляли на образцах сплава диаметром 8 мм и исходной толщиной 0.7 мм при комнатной температуре, давлении  $P = 6$  ГПа и числе оборотов  $N = 1$  и 5. КВД проводили в стесненных условиях, т.е. образец помещали в профилированное отверстие глубиной 0.3 мм, расположенное в нижней вращающейся наковальне. После КВД толщина образцов составила ~0.4 мм.

**Результаты исследования.** Деформация методом КВД (5 оборотов) привела к повышению микротвердости сплава с  $58 \pm 3$  HV до 240–270 HV (на середине радиуса образца), т.е. в 4.1–4.6 раза.

По данным оптической микроскопии структура сплава в исходном состоянии (до КВД) состояла из крупных дендритов твердого раствора (Al) со средним размером  $16 \pm 2$  мкм и эвтектики на основе [(Al) + Al<sub>4</sub>Ca]. СЭМ-анализ выявил в структуре сплава небольшое количество крупных частиц, обогащенных железом и марганцем.

По данным ПЭМ, после одного оборота КВД в сплаве (на середине радиуса образца) сформировалась ультрамелкозернистая структура. Присутствуют как крупные фрагменты (или субзерна) размером 300–450 нм, так и рекристаллизованные мелкие зерна размером 50–300 нм. В структуре сплава видны области, содержащие бывшую эвтектическую фазу, при этом размер частиц Al<sub>4</sub>Ca в этих областях уменьшился с 1–3 мкм до 5–10 нм и менее. Энергодисперсионный микрорентгеноспектральный анализ структуры сплава показал как наличие областей алюминиевой матрицы, обогащенных кальцием (2 – 10 %), так и наличие областей, в которых кальций отсутствовал.

Увеличение числа оборотов до 5-ти привело к формированию в сплаве нанокристаллической структуры (на середине радиуса образца) с преимущественным размером зерен 11–34 нм. Энергодисперсионный микрорентгеноспектральный анализ микроструктуры сплава показал, что алюминиевая матрица обогащена кальцием (от 0.8 до 3 %). Однако по данным СЭМ в структуре сплава сохраняются области, в которых концентрация кальция достигает 8 %.

На ПЭМ-изображениях структуры сплава, подвергнутого КВД, наблюдались частицы размером 0.5–2 мкм (после 1 оборота) и 40–500 нм (после 5 оборотов), обогащенные железом и марганцем.

По данным рентгеновского фазового анализа структура сплава в исходном состоянии (до КВД) состояла из твердого раствора (Al) и эвтектики [(Al) + Al<sub>4</sub>Ca] с объемной долей фазы Al<sub>4</sub>Ca ~12 %. Уже после одного оборота КВД интенсивность рентгеновских линий от фазы Al<sub>4</sub>Ca существенно ослабевает. КВД с числом оборотов 5 привело к практически полному исчезновению линий от фазы Al<sub>4</sub>Ca. Одновременно наблюдалось появление линий, принадлежащих фазе типа Al<sub>6</sub>(Mn, Fe).

Таким образом, исчезновение эвтектики при КВД происходит в основном не за счет образования твердого раствора, а за счет существенного измельчения частиц Al<sub>4</sub>Ca и образования нанокластеров и сегрегаций. Тем не менее, не исключено их частичное растворение в алюминиевой матрице. Также КВД приводит к измельчению исходных крупных частиц Al<sub>6</sub>(Mn, Fe) и, возможно, к выделению новых частиц Al<sub>6</sub>(Mn, Fe).

**Заключение.** Деформация методом КВД (5 оборотов) эвтектического сплава Al – 94.9 %; Ca – 3.5 %; Mn – 0.9 %; Fe – 0.5 %; Zr – 0.1 %; Sc – 0.1 % обеспечивает формирование нанокристаллической структуры с преимущественным размером зерна 11–34 нм. КВД способствует измельчению эвтектики [(Al) + Al<sub>4</sub>Ca] и образованию нанокластеров и сегрегаций. КВД также приводит к повышению микротвердости сплава в 4.1–4.6 раза.

**Acknowledgement:** *The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of Increase Competitiveness Program of NUST «MISiS (№ K2-2019-008), implemented by a governmental decree dated 16th of March 2013, N 211. The authors greatly thank V.M. Khatkevich and M.Yu. Magurina for the help with obtaining the results and their discussion.*

Список литературы.

[1] Belov N.A., Batyshev K.A., Doroshenko V.V., Microstructure and phase composition of the eutectic Al – Ca alloy, additionally alloyed with small additives of zirconium, scandium and manganese, *Non-ferrous Metals*. 2 (2017) 49–54.

[2] Belov N.A., Naumova E.A., Alabin A.N., Matveeva I.A., Effect of scandium on structure and hardening of Al–Ca eutectic alloys, *Journal of Alloys and Compounds*. 646 (2015) 741–747.

[3] Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J., Zhu Y.T., *Fundamentals of Superior Properties in Bulk NanoSPD Materials*, *Mater. Res. Lett.* 4 (2016) 1–21.

[4] Estrin Y., Zehetbauer M.J., Niche applications of bulk nanostructured materials processed by severe plastic deformation, in *Bulk Nanostructured Materials*, eds Michael J. Zehetbauer and Yuntian Theodore Zhu, 2009, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp. 635–648.

[5] J. Estrin, M. Murashkin, R. Valiev, Ultrafine-grained aluminium alloys: processes, structural features and properties, in *Fundamentals of aluminium metallurgy*, eds Roger N Lumley, 2011, Woodhead Publishing, UK, pp. 468-497.

[6] S.A. Nikulin, S.V. Dobatkin, V.G. Khanzhin, S.O. Rogachev, S.A. Chakushin. Effect of submicrocrystalline structure and inclusions on the deformation and failure of aluminum alloys and titanium // *Metal Science and Heat Treatment*.–2009.–V. 51.–N 5-6.–P. 208-217.