

## ПРОВОДНИКОВЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬЮ

Белов Н.А.

НИТУ «МИСус», г. Москва, Россия, E-mail: nikolay-belov@yandex.ru

Высокая электропроводность алюминия обусловила его применение для производства широкой номенклатуры кабельной продукции [1,2]. Поскольку при добавлении других элементов в той или иной степени снижается электропроводность, то проволоку в основном изготавливают из технического алюминия (А5Е или А7Е) [3,4] или из низколегированных сплавов системы Al-Si-Mg, в частности, АВЕ [5]. В настоящее время в различных областях техники сильно возрос интерес к термостойким материалам на основе алюминиевых сплавов (в частности, в энергетике для изготовления проводов высоковольтных воздушных ЛЭП). Такие материалы должны сочетать низкое электросопротивление и достаточную прочность, сохраняющуюся после нагревов вплоть до 250-300°C, что исключает использование традиционных сплавов.

В работах ВИЛСа, проводившихся в семидесятых-девяностых годах прошлого века под руководством В.И.Добаткина [6,7], для создания термостойких сплавов было предложено легировать алюминий добавками церия и других РЗМ (в частности, в виде мишметалла – Мм), способных обеспечить значительное повышение характеристик жаропрочности. Результаты проведенных исследований нашли отражение в составе сплава 01417, который содержит около 7 % РЗМ (ТУ 1-809-1038-96) и ориентирован на гранульную технологию – быстрое затвердевание с последующими операциями порошковой металлургии (RS/PM). Жаропрочный алюминиевый сплав 01417 предназначен для изготовления проволоки, длительно работающей при температурах до 250 °С. В настоящее время из него изготавливают бортпровода авиалайнеров взамен медных проводов, при этом достигается существенное снижение массы изделия по сравнению с медной проволокой [8].

В последние годы активно развивается другое направление: создание низколегированных проводниковых алюминиевых сплавов с добавкой циркония [9,10]. Эти сплавы нашли уже достаточно значительное применение для изготовления проволоки, используемой в проводах высоковольтных ЛЭП, в которых возможны нагревы до 300°C. Раньше создание алюминиевых сплавов с повышенным содержанием циркония рассматривалось только применительно к технологии сверхбыстрой кристаллизации (RS/PM) [6]. Однако из-за высокой стоимости полуфабрикатов, полученных данным методом, такие материалы (например сплав 01419) не получили значительного применения. В качестве альтернативы технологии RS/PM в работах авторов [11-12] было предложено использовать традиционные литейные технологии для получения отливок и слитков сплавов, содержащих до 0,6% Zr. В этом случае улучшенные эксплуатационные свойства деформированных полуфабрикатов определяются наночастицами фазы Al<sub>3</sub>Zr (а именно, метастабильной модификации L12) с объемной долей 0,5–1 % (об.) и средним размером 5-10 нм.

При получении сплавов с добавкой циркония необходимы повышенные температуры плавки литья, что обусловлено спецификой диаграммы состояния Al–Zr, характеризующейся резким повышением температуры ликвидуса с ростом концентрации этого элемента [2]. Поскольку в процессе кристаллизации весь цирконий должен войти в состав алюминиевого твердого раствора [далее (Al)], то для Al–Zr-сплавов требуется иная технология приготовления литой заготовки по сравнению с марочными сплавами. Второй важнейшей особенностью технологии является выделение циркония из пересыщенного (Al) в виде наночастиц фазы Al<sub>3</sub>Zr, что достигается деформационно-термической обработкой. В сплавах с РЗМ низкая легированность (Al) обеспечивается строением соответствующих фазовых диаграмм, в частности Al–Ce [2]. А вот минимизация значения  $\lambda$  вызывает серьезные трудности, которые даже для технологии RS/PM представляются непреодолимыми. Ниже дается обоснование сказанному.

Величина  $\lambda$  зависит от объемной доли ( $Q_V$ ) второй фазы и ее размера ( $d$ ). В сплавах системы Al-PЗМ (т.е. типа 01417) для слитковой технологии максимальное значение  $Q_V$  составляет около 12,5 % (об.), что соответствует эвтектической точке (~10 % (масс.) PЗМ). В этом случае при  $d=0,5$  мкм расчетная величина  $\lambda$  составляет порядка 1,6 мкм, что согласуется с экспериментальными данными (рис.1а). И это по сути предел для слитков. При переходе к технологии RS/PM значение  $Q_V$  может быть увеличено до ~19,5 % (об.) (~15 % (масс.)PЗМ), а значение  $d$  снижено до ~200 нм (рис.1б). Это позволяет добиться уменьшения межчастичного расстояния  $\lambda$  до ~400 нм, что можно считать пределом для гранульной технологии.

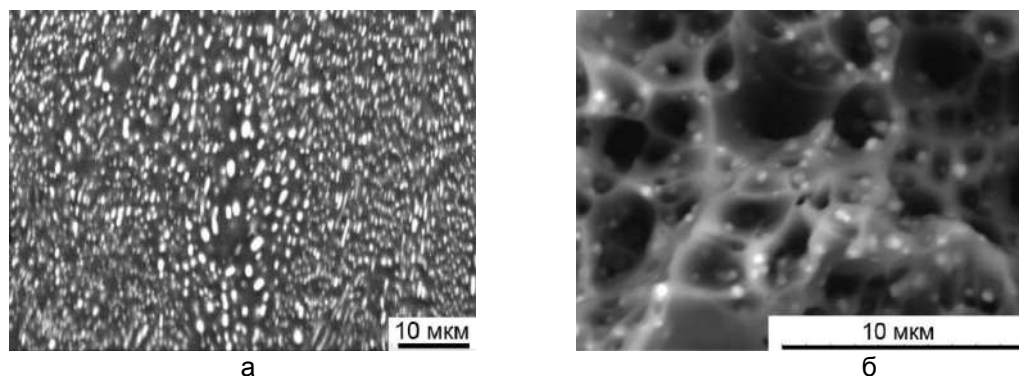


Рисунок 1 – Включения фазы  $Al_4Ce$  (PЗМ) в сплавах Al-9,8%Ce (а) и 01470 (Al-7%Mn) (б), СЭМ: а – слиток, отжиг при 600 °С, 3 ч; б - проволока (излом), отжиг при 300 °С, 3 ч

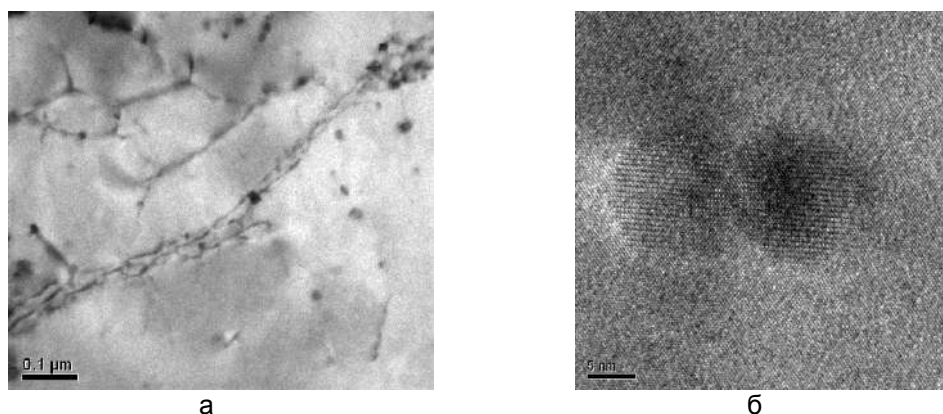


Рисунок 2 – Вторичные выделения фазы  $Al_3Zr$  в сплаве Al-0,64%Zr (проволока, отжиг при 300 °С, 500 ч), ПЭМ: а – дислокации, закрепленные вторичными наночастицами фазы  $Al_3Zr$ ; б – наночастица фазы  $Al_3Zr$  крупным планом

Для Al-Zr-сплавов, полученных по слитковой технологии, максимальное значение  $Q_V$  не превышает 1 % (об.) (т.е. намного меньше, чем в сплавах с PЗМ), однако реально достижимый размер частиц  $Al_3Zr$  составляет около 10 нм (рис. 2), поэтому даже при  $Q_V=0,5$  % (об.) расчетное значение  $\lambda$  составляет ~100 нм. Это свидетельствует о существенно большей эффективности добавки циркония по сравнению с PЗМ.

Сравнение характеристик термостойких сплавов двух типов: с добавками циркония (АЦр1Е) и PЗМ (01417) свидетельствует в пользу первого. В качестве эффективного критерия для проводниковых сплавов может служить соотношение между значениями  $\rho$  и  $\sigma_B$ . Сравнение результатов, полученных на проволоке, полученной из слитков Al-Zr- сплавов, содержащих от 0,1 до 0,6 % Zr, с результатами, полученными авторами [6] на проволоке, изготовленной по технологии RS/PM из Al-Ce-сплавов, содержащих от 3 до 15 % Ce, свидетельствует в пользу первых. В табл. 1 приведены значения  $\sigma_B$  и  $\rho$  для сплавов систем Al-Ce и Al-Zr. Они достаточно наглядно показывают, что при одинаковой прочности (после отжига при 300 °С) сплавы с цирконием обладают меньшим электросопротивлением. Если принять во внимание

повышенную плотность сплавов с РЗМ (2,9 против 2,7 г/см<sup>3</sup>) и дороговизну технологии RS/PM, то преимущество сплавов с цирконием выглядит достаточно убедительным. Более детально это отражают данные, приведенные в таблице.

Таблица 1– Механические и электрические свойства проволоки из сплавов 01417 и АЦр1Е

Сплав	Термическая обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\rho$ , Ом·м·10 <sup>-9</sup>
01417*	Без термообработки	281	2,3	32,8
	Отжиг при 300 °С	181	7,2	32,0
АЦр1Е**	Без термообработки	215	2,5	29,6
	Отжиг при 300 °С	180	>5	29,2

\* по данным [6]

\*\* экспериментальные данные авторов

**Список литературы:**

1. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: Справочник / Под ред. Дж. Хэтча. М.: Металлургия, 1989.
2. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов- М.: Издательский Дом МИСиС, 2010, 511 с.
3. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
4. ГОСТ 13843-78. Катанка алюминиевая. М.: Изд-во стандартов, 1985.
5. ГОСТ20967-75.Катанкаизалюминиевогосплава.М.:Изд-востандартов, 1975.
6. Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы. М.: ВИЛС, 1995, 341 с.
7. Добаткин В.И., Федоров В.М., Бондарев Б.И. и др. Гранулируемые алюминиевые сплавы с высоким содержанием переходных металлов // Технология легких сплавов 2004. №3. С. 22–29.
8. Матвеев Ю.В., Гаврилова В.П., Баранов В.В. Легкие проводниковые материалы для авиапроводов // Кабели и провода. 2006. № 5 (300). С.22-23.
9. Алюминиевый композитный усиленный провод – новое изобретение для высоковольтных воздушных ЛЭП // Энергоэксперт. 2007. №3. С. 60–62.
10. P.Uliaz, T.Knych, A.Mamala, B.Smyrak: Aluminium Alloys, Ed. by J. Hirsch, B. Skrotzki and G. Gottstein, (WILEY-VCH, Weinheim, 2008) pp. 248–255.
11. Белов Н.А., Алабин А.Н., Прохоров А.Ю. Влияние добавки циркония на прочность и электросопротивление холоднокатаных алюминиевых листов // Изв.вузов. Цветная металлургия. 2009. № 4. С.42-47.
12. N.A.Belov, A.N. Alabin, D.G.Eskin, I.A.Matveeva «Effect of zirconium additions and annealing temperature on electrical conductivity and hardness of hot rolled aluminum sheets». Transactions of Nonferrous Metals Society of China», 2015, Vol. 25, P. 2817–2826

*Статья подготовлена в рамках гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ, НШ-9899.2016.8.*