

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 бортопровода 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 Al₃Zr (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 Al₃Zr, 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 λ вызывает серьезные трудности, которые даже для технологии RS/PM представляются непреодолимыми. Ниже дается обоснование сказанному.

Величина λ 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 λ 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 λ до ~400 нм, что можно считать пределом для гранульной технологии.

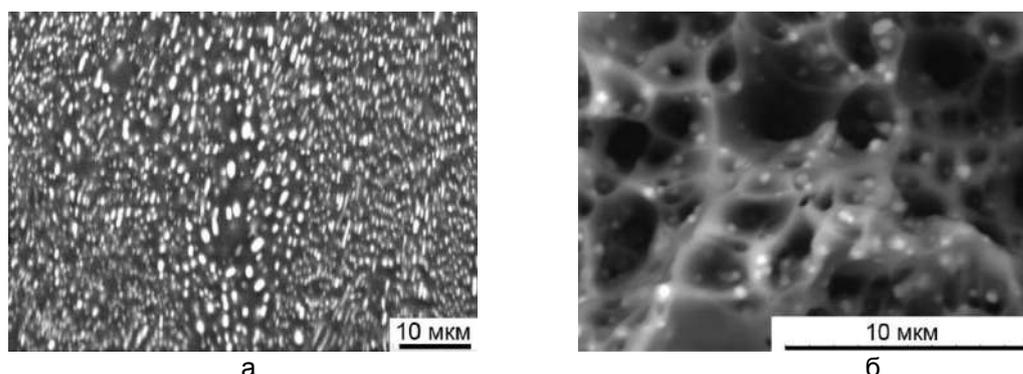


Рисунок 1 – Включения фазы Al_4Ce (PЗМ) в сплавах Al-9,8%Ce (а) и 01470 (Al-7%Mn) (б), СЭМ: а – слиток, отжиг при 600 °С, 3 ч; б - проволока (излом), отжиг при 300 °С, 3 ч

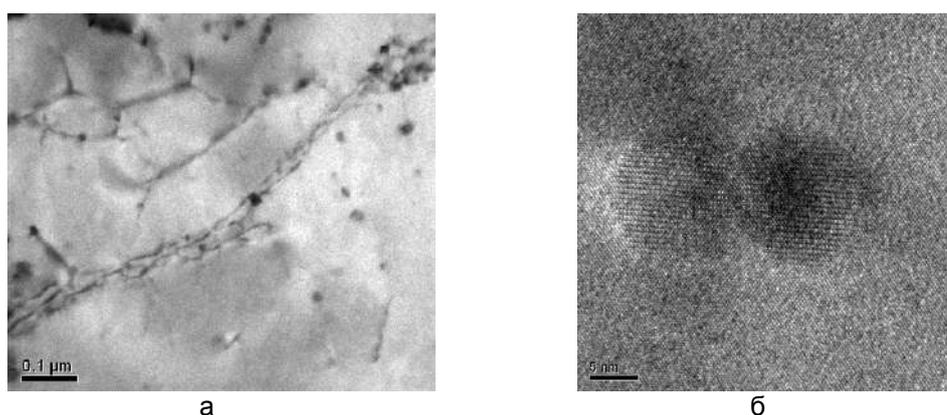


Рисунок 2 – Вторичные выделения фазы Al_3Zr в сплаве Al-0,64%Zr (проволока, отжиг при 300 °С, 500 ч), ПЭМ: а – дислокации, закрепленные вторичными наночастицами фазы Al_3Zr ; б – наночастица фазы Al_3Zr крупным планом

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 λ 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 ρ и σ_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 σ_B и ρ 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/см³) 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	σ_B , МПа	δ , %	ρ , Ом·м·10 ⁻⁹
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.