

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО СОСТАРЕННОГО УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО СПЛАВА Al-0.4Zr

Латынина Т.А.¹, Мавлютов А.М.¹, Мурашкин М.Ю.^{2,3},
Валиев Р.З.^{2,3}, Орлова Т.С.^{1,4}

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

²Уфимский государственный авиационный технический университет, Институт физики перспективных материалов, Уфа, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
t.latyнина13@yandex.ru

Алюминиевые сплавы обладают такими свойствами, как высокая электропроводность, коррозионная стойкость и легкость, благодаря чему проводники на их основе находят широкое применение в различных сферах промышленности [1]. Однако для электротехнических сплавов, используемых для линий электропередач, особенно важно сочетание высоких значений электропроводности и прочности, а также термостабильности свойств при повышении температуры эксплуатации. В последнее время перспективными материалами для удовлетворения этим требованиям считаются сплавы на основе Al, легированные 0.1-0.4 мас.% Zr [1]. Такое содержание циркония при старении сплавов в интервале температур 300–450 °С обеспечивает формирование дисперсных наноразмерных частиц Al₃Zr метастабильной фазы L1₂, что приводит к хорошей термостабильности свойств при температурах до 150–230 °С [2,3]. Однако сплавы системы Al-Zr имеют невысокую прочность [2]. Для ряда сплавов на основе Al, например, сплавов системы Al-Mg-Si, методы интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяют существенно повысить механические свойства за счет формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры [4]. Однако комплексных исследований влияния ИПД на физико-механические свойства Al-Zr сплавов до сих пор не проводилось.

В нашей предыдущей работе [5] было описано влияние предварительного старения и последующей обработки интенсивной пластической деформацией кручением (ИПДК) на микроструктуру и физико-механические свойства сплава Al-0.4Zr. В ходе испытаний на термостойкость был обнаружен значительный эффект упрочнения отжигом [5]. Целью настоящей работы является детальное исследование влияния дополнительного кратковременного отжига на микроструктуру и функциональные свойства сплава Al-0.4Zr (мас.%), предварительно подвергнутого длительному высокотемпературному старению и последующей обработке ИПДК.

Исходный сплав Al-0.4Zr, полученный методом непрерывного литья и прокатки, был состарен при температуре 375 °С в течение 60 ч, структурирован ИПДК под давлением 6 ГПа на 10 оборотов при комнатной температуре (далее образцы AG-NPT). Затем образцы AG-NPT дополнительно отжигались при температуре 230 °С в течение t=1-5 ч (далее образцы AG-NPT-AN(t)).

Микроструктура образцов изучалась с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА), дифракции обратнорассеянных электронов (ДОРЭ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Для исследования механических свойств проводились испытания на одноосное растяжение и измерялась микротвердость по методу Виккерса. Электрическое сопротивление измерялось стандартным четырехточечным методом в температурном интервале 77–300 К. Более подробно экспериментальные методики описаны в [6].

На рис.1а показана зависимость микротвердости (H_V) от времени отжига (t) при температуре 230 °С, при которой было получено максимальное повышение прочностных свойств [5]. Максимальное повышение микротвердости достигается при отжиге в течение 3 ч и составляет 15%. На рис.1б приведены диаграммы растяжения. Увеличение условного предела текучести составило 43 и 55%, предела прочности 20 и 38% для состояний AG-HPT-AN(1) и AG-HPT-AN(3), соответственно. Деформация до разрушения в результате отжига в обоих случаях уменьшилась примерно на 30%, но осталась на достаточно высоком уровне $\approx 18\%$. При этом отжиг в течение 1 ч привел к повышению электропроводности (ω) на 4%, а в течение 3 ч к понижению ω на 9%.

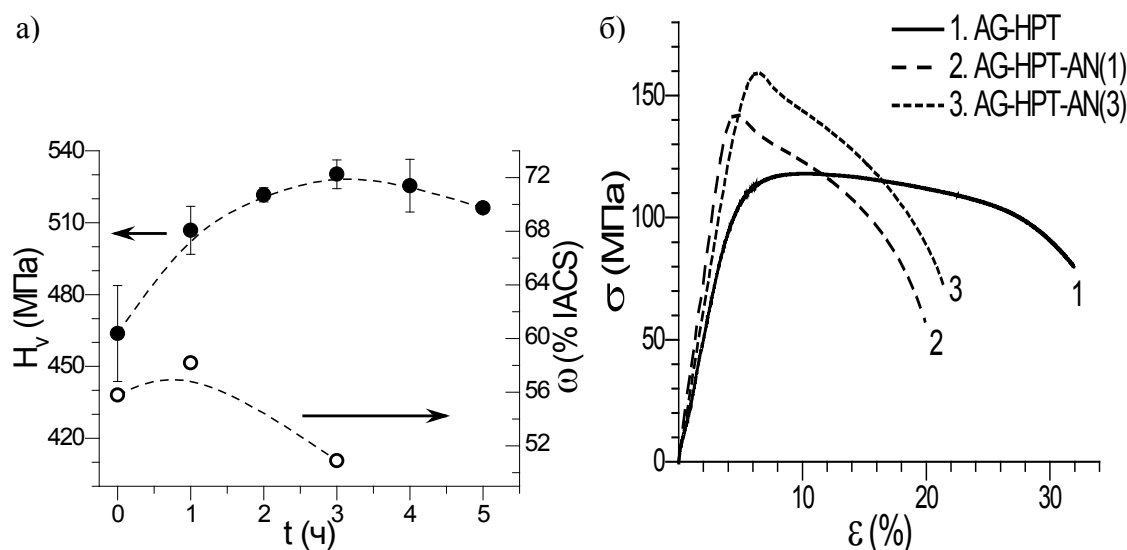


Рисунок 1 - (а) – Зависимости микротвердости (H_V) и электропроводности (ω) от времени отжига (t) для УМЗ сплава Al-0.4Zr, предварительно состаренного и обработанного ИПДК; (б) – диаграммы напряжение-деформация для состояний AG-HPT, AG-HPT-AN(1) и AG-HPT-AN(3).

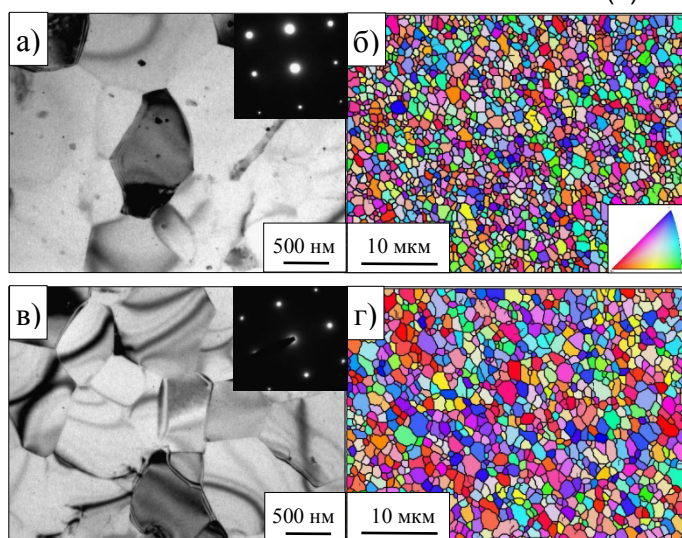


Рисунок 2 - Типичная микроструктура, дифракционные картины и карты ДОРЭ для УМЗ сплава Al-0.4Zr, предварительно состаренного и обработанного ИПДК, после отжига в течение 1 ч (а, б) и в течение 3 ч (в, г).

На рис. 2 представлены изображения ПЭМ и карты ДОРЭ, демонстрирующие типичную микроструктуру предварительно состаренного и структурированного методом ИПДК сплава Al-0.4Zr после дополнительных отжигов в течение 1 и 3 ч. В обоих случаях микроструктура представлена равноосными зернами со средним размером около 1150 нм, что несколько превышает размер зерна в состоянии после обработки ИПДК (950 нм). В результате отжига также повышается доля большеугловых границ зерен (БУГЗ) с 78 до 85%. Такое небольшое увеличение размера зерна и доли БУГЗ предположительно является

результатом отжига малоугловых ($\leq 2^\circ$) границ зерен (ГЗ) дислокационного характера. По данным ПЭМ отжиги не привели к заметному изменению размеров

и распределения частиц вторичной фазы, как и в состоянии до отжига их количество невелико и распределение неравномерно.

На основе микроструктурных данных были проведены оценки вкладов возможных механизмов в общее упрочнение, которое является их суперпозицией:

$$\sigma_{0.2}^{th} = \sigma_0 + \sigma_{SS} + \sigma_{dis} + \sigma_{GB} + \sigma_{Or}, \quad (1)$$

где $\sigma_0=10$ МПа – напряжение Пайерлса-Набарро для кристаллической решетки Al, σ_{SS} – твердорастворное упрочнение, σ_{dis} – дислокационное упрочнение, σ_{GB} – зернограничное упрочнение и σ_{Or} – упрочнение частицами вторичной фазы по механизму Орована. Как было показано в [5], упрочнение по механизму Орована подавляется в образцах AG-HPT, и, следовательно, не учитывалось и для состояний после отжигов. Остальные вклады рассчитывались аналогично [5]. Диаграммы с результатами полученных оценок приведены на рис. 3 в сравнении с экспериментально измеренными значениями условного предела текучести. Полученное различие экспериментальных и теоретических данных может быть обусловлено релаксацией неравновесных ГЗ подобно тому, как это наблюдалось для технически чистого Al [7]. Однако для сплава Al-0.4Zr не исключено и влияние образования возможных сегрегаций на границах зерен. Для выяснения конкретной причины упрочнения отжигом в исследуемых образцах Al-0.4Zr необходимо провести исследование тонкой структуры ГЗ.

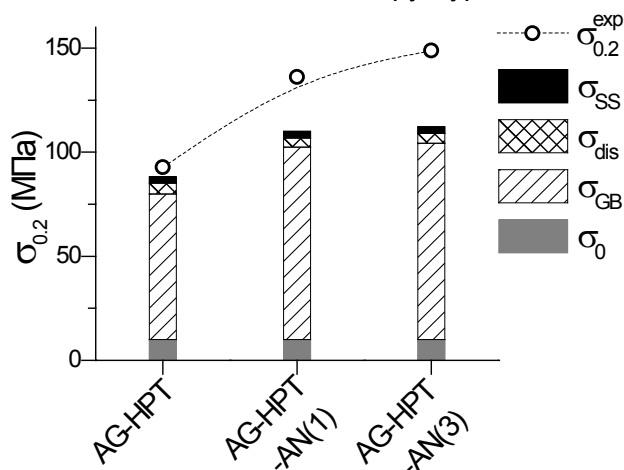


Рисунок 3 - Диаграмма вкладов возможных механизмов в упрочнение ($\sigma_{0.2}^{th}$): твердорастворного (σ_{SS}), дислокационного (σ_{dis}), зернограничного (σ_{GB}), напряжения Пайерлса-Набарро (σ_0) и экспериментальные значения ($\sigma_{0.2}^{exp}$) для состояний AG-HPT, AG-HPT-AN(1) и AG-HPT-AN(3)

Список литературы

1. Д.И. Белый. Кабели и провода, 1(332), с. 8–15 (2012).
2. N.A. Belov, A.N. Alabin, I.A. Matveeva, D.G. Eskin. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 25(9), p. 2817–2826 (2015).
3. K.E. Knipling, D.C. Dunand, D.N. Seidman. Acta Mater., 56(1), p 114–127 (2008).
4. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov. Prog. Mat. Sci., 45, p. 103–189 (2000).
5. T.S. Orlova., A.M. Mavlyutov, T.A. Latynina, E.V. Ubyivovk, M.Yu. Murashkin, R. Schneider, D. Gerthsen, R.Z. Valiev. RAMS, 55(1) (2018).
6. A.M. Mavlyutov, A.S. Bondarenko, M.Yu. Murashkin, E.V. Boltynjuk, R.Z. Valiev, T.S. Orlova. JALCOM, 698, p. 539–546 (2017).
7. А.М. Мавлютов, Т.А. Латынина, М.Ю. Мурашкин, Р.З. Валиев, Т.С. Орлова. ФТТ, 59(10), с. 1949–1955 (2017).