

**ВЛИЯНИЕ Mg НА МИКРОСТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА  
УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО СПЛАВА Al-Mg-Zr**

**Латынина Т.А.<sup>1</sup>, Мурашкин М.Ю.<sup>2,3</sup>, Валиев Р.З.<sup>2,3</sup>, Орлова Т.С.<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Уфимский государственный авиационный технический университет  
Институт физики перспективных материалов, Уфа, Россия*

<sup>3</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>4</sup>*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
t.latynina13@yandex.ru*

Проводники на основе алюминиевых сплавов находят широкое применение в различных сферах промышленности благодаря их высокой электропроводности, коррозионной стойкости и легкости. Однако для электротехнических сплавов, используемых для линий электропередач, особенно важно сочетание высоких значений электропроводности и прочности при эксплуатации до температур 150–200 °С. В последнее время перспективными материалами для удовлетворения требованиям термостабильности этих функциональных свойств считаются алюминиевые сплавы, легированные 0.1-0.4 мас.% Zr [1]. Однако сплавы системы Al-Zr имеют невысокую прочность [1]. Методы интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяют улучшить механические свойства Al-Zr сплавов [2], однако уровень прочности остается еще недостаточно высоким. Поэтому Mg был выбран в качестве второго легирующего элемента, так как известно, что его присутствие в сплавах Al значительно уменьшает средний размер зерна во время ИПД [3] и, соответственно, заметно повышает прочность материала.

Целью настоящей работы является детальное исследование влияния Mg на микроструктуру и функциональные свойства сплава Al-Mg-Zr, предварительно подвергнутого длительному высокотемпературному старению и последующей обработке интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК).

Исходный сплав Al-Mg-Zr (0.53Mg, 0.27Zr, примесей (Fe+Ti+V+Cr+Mn) ≤0.10 мас.%, ост. Al), полученный методом совмещенного литья и прокатки, был состарен при температуре 375 °С в течение 366 ч (далее образцы Al-Mg-Zr\_TO), структурирован ИПДК под давлением 2 ГПа на 10 оборотов при комнатной температуре (далее образцы Al-Mg-Zr\_TO\_ИПДК).

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. Удельная электропроводность измерялась вихретоковым методом при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены изображения ПЭМ и дифракционные картины, демонстрирующие типичную микроструктуру образцов Al-Mg-Zr\_TO и Al-Mg-Zr\_TO\_ИПДК. Микроструктура сплава после длительного старения характеризуется крупными зернами со средним размером зерна ~2 мкм. В данном состоянии наблюдается большое количество наноразмерных частиц вторичной фазы со средним размером ~23 нм. После обработки ИПДК структура сплава становится ультрамелкозернистой (УМЗ), зерна принимают равноосную форму и их средний размер составляет ~400 нм. Количество частиц вторичной фазы после обработки ИПДК значительно уменьшается, рефлексы от нее на дифракционной картине отсутствуют.

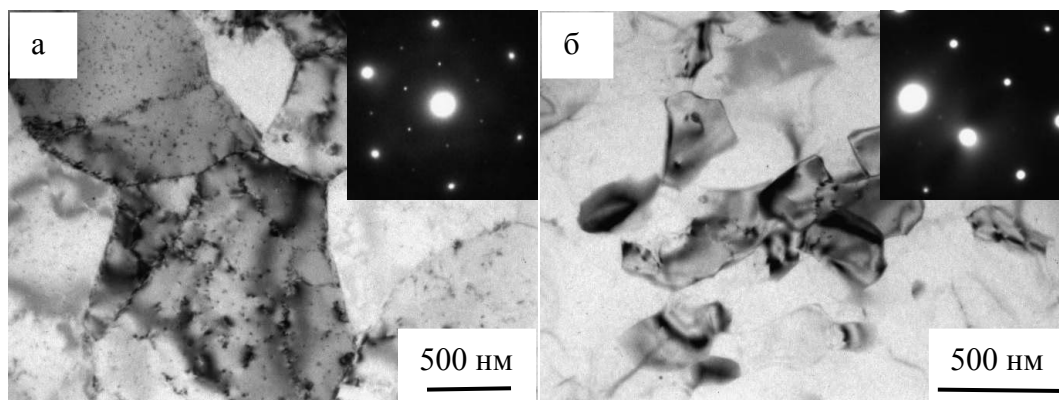


Рисунок 1 - Микроструктура сплава Al-Mg-Zr после ТО (а) и после ТО и ИПДК (б)

В таблице 1 приведены результаты ДОРЭ и РСА для сплава Al-Mg-Zr и для сравнения для сплава Al-0.4Zr (мас.%) [4] в для УМЗ состояниях. Можно отметить, что в сплаве Al-Mg-Zr значительно меньше средний размер зерна и в ~5 раз больше плотность дислокаций  $L_{dis}$ .

Таблица 1 - Микроструктурные данные по результатам ДОРЭ и РСА.  $d_{av}$  – средний размер зерна,  $f_{\geq 15}$  – доля большугловых границ зерен,  $D_{XRD}$  - средний размер областей когерентного рассеяния,  $\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$  – уровень микроискажений кристаллической решетки,  $L_{dis}$  – плотность дислокаций.

	$d_{av}$ (нм)	$f_{\geq 15}$ (%)	$D_{XRD}$ (нм)	$\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$ (%)	$L_{dis}$ (м <sup>-2</sup> )	Ист.
Al-Mg-Zr_TO ИПДК	400±12	88	304±15	0.026±0.001	1.0·10 <sup>13</sup>	-
Al-0.4Zr_TO ИПДК	945±17	78	310±10	0.006±0.002	2.3·10 <sup>12</sup>	[4]

На рис. 2 показано изменение физико-механических свойств вследствие обработки ИПДК предварительно состаренного сплава Al-Mg-Zr. Значения прочностных свойств после ИПДК значительно увеличились: микротвердость ( $H_V$ ) на ~130%, условный предел текучести ( $\sigma_{0.2}^{exp}$ ) на ~270%, предел прочности ( $\sigma_{UTS}$ ) на ~200%, при этом пластичность ( $\delta$ ) значительно уменьшилась до ~2.7% и электропроводность ( $\omega$ ) понизилась на ~3.6% IACS.

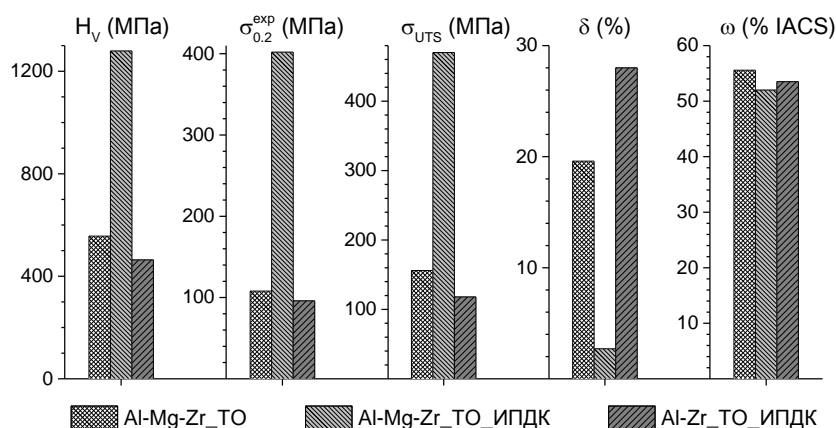


Рисунок 2 - Микротвердость ( $H_V$ ), условный предел текучести ( $\sigma_{0.2}^{exp}$ ), предел прочности ( $\sigma_{UTS}$ ), пластичность ( $\delta$ ) и электропроводность ( $\omega$ ) сплава Al-Mg-Zr до и после обработки ИПДК и сплава Al-0.4Zr после обработки ИПДК [4]

Для сравнения также приведены значения прочностных свойств и электропроводности для предварительно состаренного и обработанного ИПДК сплава Al-0.4Zr [4]. Видно, что легирование Mg даже в таком небольшом количестве как 0.53 мас.% привело к колоссальному увеличению прочности (рис. 2).

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 где  $\sigma_0=10$  МПа – напряжение Пайерлса-Набарро для кристаллической решетки Al,  $\sigma_{SS}$ – твердорастворное упрочнение,  $\sigma_{dis}$  – дислокационное упрочнение,  $\sigma_{GB}$  – зернограничное упрочнение и  $\sigma_{Or}$  – упрочнение частицами вторичной фазы по механизму Орована. Вклады рассчитывались аналогично [4]. В таблице 2 приведены результаты полученных оценок для УМЗ сплавов Al-Mg-Zr и Al-0.4Zr [4] в сравнении с экспериментально измеренными значениями условного предела текучести. Видно, что колоссальное увеличение прочности Al-Mg-Zr\_ТО\_ИПДК сплава невозможно объяснить действием только традиционных механизмов упрочнения, характерных для крупнозернистого состояния. Известно, что Mg легко сегрегирует в ГЗ при обработке алюминий-магниевого сплава методами ИПДК [5]. По-видимому, и в случае Al-Mg-Zr сплава возможна сегрегация/нанопреципитация магния в ГЗ в процессе обработки ИПДК, которая, наиболее вероятно, и приводит к дополнительному колоссальному упрочнению.

Таблица 2 - Теоретические оценки вкладов в упрочнение для УМЗ сплавов Al-Mg-Zr и Al-0.4Zr [4]

	$\sigma_0$ (МПа)	$\sigma_{GB}$ (МПа)	$\sigma_{SS}$ (МПа)	$\sigma_{dis}$ (МПа)	$\sigma_{Or}$ (МПа)	$\sigma_{0.2}^{th}$ (МПа)	$\sigma_{0.2}^{exp}$ (МПа)
Al-Mg-Zr_ТО_ИПДК	10.0	110.7	42.5*	24.2	122.0 *	309.4	401.5
Al-0.4Zr_ТО_ИПДК	10.0	72.0	4.5	11.3	-	97.8	97.7

\* – оценены максимально возможные значения вкладов, то есть твердорастворный вклад рассчитан в приближении, что все легирующие элементы находятся в твердом растворе, а вклад по механизму Орована в приближении, что все атомы Zr находятся в частицах  $Al_3Zr$ , обеспечивающих максимальное дисперсионное упрочнение.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00474.*

#### Литература

1. Belov N.A. et al. Effect of Zr additions and annealing temperature on electrical conductivity and hardness of hot rolled Al sheets //Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2015. – Т. 25, №. 9. – С. 2817-2826.
2. Orlova T. S. et al. Influence of severe plastic deformation on microstructure, strength and electrical conductivity of aged Al-0.4 Zr (wt.%) alloy //Reviews on Advanced Materials Science. – 2018. – Т. 55. – №. 1-2. – С. 92-101.
3. Gubicza J. et al. Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminum //Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Т. 387. – С. 55-59.
4. Orlova T.S. et al. Effect of annealing on microstructure, strength and electrical conductivity of the pre-aged and HPT-processed Al-0.4 Zr alloy //Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Т. 784. – С. 41-48.
5. Sauvage X. et al. Atomic-scale analysis of the segregation and precipitation mechanisms in a severely deformed Al-Mg alloy //Acta Materialia. – 2014. – Т. 72. – С. 125-136.