

# Влияние легирующих примесей и постоянного магнитного поля на процесс фазообразования и микротвердость алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg при старении

С.Р. Макеев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева Самара, Россия

**Обоснование.** Экспериментальные исследования [1, 2] показывают, что постоянное магнитное поле (ПМП) является эффективным фактором контроля и модификации физико-механических свойств материалов, а также может изменять скорость процесса фазообразования. Что, в свою очередь, приводит к изменению микро- и макроструктуры и физико-механических свойств материалов. Кроме этого, немаловажную роль в формировании конструкционных свойств металлических сплавов играют легирующие примеси [3]. Так, в работе [4] обнаружено, что малые добавки легирующей примеси повышают микротвердость состаренного металлического сплава в 1,5 раза.

**Цель** — экспериментальное исследование влияния постоянного магнитного поля и легирующих примесей на микротвердость и фазообразование в техническом алюминиевом сплаве В95пч и модельном алюминиевом сплаве Al-Zn-Mg при старении.

**Методы.** Образцы сплавов подвергали закалке и последующему старению в вакуумной печи при температуре 140 °С в течение четырех часов, при этом исследовали влияние ПМП с напряженностью 557,0 кА/м. Химический состав сплавов анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA3 SBH, оборудованного системой энергодисперсионного микроанализа. Микротвердость измеряли методом Виккерса с использованием микротвердомера HAUSER, прикладывая нагрузку 100 г в течение семи секунд. Каждое значение микротвердости рассчитывали как среднее из 30 измерений, при этом относительная ошибка среднего значения составляла 2–3 %. Рентгенофазовый анализ проводили с использованием CoK $\alpha$  и FeK $\alpha$  излучений на рентгеновской установке ДРОН-2.

**Результаты.** Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов

В95пч		Al-Zn-Mg	
Химический элемент	Содержание в сплаве вес. %	Химический элемент	Содержание в сплаве вес. %
Al	87,45–91,45	Al	91,05–92,5
Zn	5,00–6,50	Zn	5,00–6,0
Mg	1,80–2,80	Mg	2,00–2,50
Cu	1,40–2,00	Примеси не более	
Примеси не более		Fe	0,2–0,3
Fe	0,05–0,25	Ni	<0,01
Mn	0,2–0,6	Si	<0,15
Cr	0,1–0,25	Mn	<0,01
Si	до 0,1	Cr	<0,001
Ni	до 0,1	Cu	<0,1
Ti	до 0,05	Всего примесей: <0,55	
Всего примесей: <1,35			

Результаты измерений микротвердости представлены в таблице 2.

Старение при наложении постоянного магнитного поля (ПМП) на сплав В95пч приводит к повышению микротвердости на 21 %, что указывает на наличие отрицательного магнитопластического эффекта [5]. В противоположность этому, модельный сплав Al-Zn-Mg при старении в ПМП демонстрирует лишь

незначительное изменение микротвердости, которое находится в пределах погрешности измерений. Различия в микротвердости между этими сплавами достигают до  $70 \text{ кг/мм}^2$ , что подчеркивает значительную роль легирующих элементов в определении механических свойств металлических сплавов.

**Таблица 2.** Результаты измерения микротвердости алюминиевых сплавов после термической и термомагнитной обработок

Время старения $t$ , ч	Напряженность $H$ , кА/м	В95пч		Al-Zn-Mg	
		$H_{\mu} \pm \Delta H_{\mu}$ , кг/мм <sup>2</sup>	МПЭ	$H_{\mu} \pm \Delta H_{\mu}$ , кг/мм <sup>2</sup>	МПЭ
Закалка при 470°C (1 ч) в воду (20°C)	–	139±2	–		–
Закалка при 550°C (2 ч) в воду (20°C)				70±2	
4	0	152±3	–21	112±3	–2
	557,0	184±2		114±2	

Рентгенофазовый анализ также выявил, что при всех режимах старения дифрактограммы обоих сплавов показывают линии, соответствующие  $\alpha$ -твердому раствору на основе алюминия. При этом применение ПМП при старении вызывает уширение этих линий на  $0,05^\circ$ , что объясняется искажением кристаллической решетки из-за увеличения количества дефектов, включая сегрегацию примесей, двойники и упрочняющие фазы. Кроме того, наблюдается смещение линий  $\alpha$ -твердого раствора в сторону больших углов на  $0,2^\circ$ , что связано с уменьшением параметра кристаллической решетки, вызванным процессами старения. Сравнение полуширины рентгеновских линий технического и модельного сплавов показало, что в техническом сплаве В95пч она больше на  $0,2^\circ$ , чем в модельном сплаве Al-Zn-Mg, что свидетельствует о ключевой роли легирующей примеси меди в создании более искаженной и деформированной структуры.

**Выводы.** Установлено наличие отрицательного магнитоэластического эффекта, достигающего 21 %, в техническом сплаве, в то время как в модельном алюминиевом сплаве этот эффект практически не проявляется. Дополнительный анализ экспериментальных данных выявил, что легирующая примесь меди, присутствующая в составе алюминиевого сплава В95пч, играет важную роль в создании более искаженной и деформированной структуры, по сравнению с модельным алюминиевым сплавом Al-Zn-Mg.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы; старение; постоянное магнитное поле; магнитоэластический эффект; рентгенофазовый анализ.

## Список литературы

- Luo J., Luo H., Liu C., et al. Effect of magnetic field on precipitation kinetics of an ultrafine grained Al-Zn-Mg-Cu alloy // Mater Sci Eng. 2020. Vol. 798. ID 139990. doi: 10.1016/j.msea.2020.139990
- Luo J., Luo H., Zhao T., Wang R. Effect of magnetic field on dislocation morphology and precipitation behaviour in ultrafine-grained 7075 aluminium alloy // J Mater Sci Technol. 2021. Vol. 93. P. 128–146. doi: 10.1016/j.jmst.2021.03.016
- Замятин В.М., Грачев С.В., Гриненко М.А., и др. Рациональное легирование и модифицирование алюминиевых сплавов на основе систем Al-Cu-Mg-Mn и Al-Zn-Mg-Cu // Известия вузов. Нефть и газ. 2011. № 3. С. 104–110. EDN: NWBLON
- Осинская Ю.В., Покоев А.В., Петров С.С. Влияние малых добавок никеля на магнитоэластический эффект в состаренных медно-бериллиевых сплавах // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77, № 9. С. 1256–1259. EDN: RBUTOX doi: 10.7868/S0367676513090330
- Молоцкий М.И. Отрицательный магнитоэластический эффект в немагнитных кристаллах // Физика твердого тела. 1993. Т. 35, № 1. С. 11–14.

*Сведения об авторе:*

**Сергей Романович Макеев** — студент, группа 4201-030402D, физический факультет; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: seregazd30@yandex.ru

*Сведения о научном руководителе:*

**Юлия Владимировна Осинская** — кандидат физико-математических наук, доцент; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: osinskaya.yuv@ssau.ru