

УДК 669.721.5

Ю. О. Зеленюк, д-р техн. наук В. А. Шаломєєв, М. М. Зінченко,  
д-р техн. наук Е. І. Цивірко

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

## ВПЛИВ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ЛИТОГО СПЛАВУ МЛ-5 З НЕОДИМОМ

*Досліджували вплив неодиму в литому магнієвому сплаві Мл-5 на його структурні складові та корозійну стійкість в водних розчинах хлористого натрію. Встановлено, що корозійна стійкість сплаву залежить від вмісту неодиму і зростає зі збільшенням кількості інтерметалідів в сплаві, а також зменшується з підвищенням концентрації хлористого натрію в розчині.*

**Ключові слова:** магнієвий сплав, неодим, інтерметалід, швидкість корозії, межа міцності, мікротвердість, жароміцність.

Сплави на основі магнію, маючи низьку питому вагу та добрі механічні властивості, все частіше використовуються в авіаційному і автомобільному двигунобудуванні. Основним недоліком литих магнієвих сплавів є підвищена схильність їх до корозії. Потрібні цілеспрямовані дослідження корозійних властивостей магнієвих сплавів.

Раніш проведені дослідження [1] показали, що покращення корозійної стійкості спостерігається при введенні в магнієвий сплав рідкісноземельних елементів, серед яких заслуговує певної уваги такий елемент як неодим.

Неодим, що має близькі до Mg значення атомного радіусу, електровід'ємності і може утворювати з магнієм тверді розчини, незначно впливаючи на кристалічну ґратку матриці, що може змінити показники корозійної стійкості (табл. 1).

В даній роботі вивчали вплив інтерметалідів на механічні та корозійні властивості литого магнієвого сплаву Мл-5 з різним вмістом неодиму.

Магнієвий сплав Мл-5 (% мас.): (8,62 Al; 0,32 Zn; 0,26 Mn; 0,030 Si; 0,016 Fe; 0,02 Cu; зал. Mg) виплавляли в індукційній тигельній печі ІПМ-500 за серійною технологією. Розплав рафінували флюсом ВІ-2(4048% MgCl<sub>2</sub>; 3040 % KCl; 5 % BaCl<sub>2</sub>; 35 % CaF<sub>2</sub>) у роздавальній печі, з якої порціонно відбирали ковшем розплав і вводили у нього магній – неодимову лігатуру (вміст нео-

диму до 14 %) з розрахунком отримати у сплаві 0; 0,05; 0,1; 1,0 % (по масі) неодиму. Розплав з температури 730 ± 5 °С заливали в піщано-глинисті форми і одержували для механічних випробувань стандартні зразки діаметром 12 мм, які проходили термічну обробку в печах типу Бельв'ю і ПАП-4М по режиму: нагрівання до 415 ± 5 °С, витримка 15 годин, охолодження на повітрі і старіння при 200 ± 5 °С витримка 8 годин, охолодження на повітрі. Механічні властивості зразків із магнієвих сплавів визначалися на розривній машині «INSTRUN» 2801 за ГОСТ 1497-84 і ГОСТ 2856-79.

Методами якісної та кількісної (метод «П» і «Л» ГОСТ 1778 – 70) металографії вивчали структурні складові сплавів на оптичному мікроскопі «Neophot 32» після травлення шліфів реактивом: 1 % азотної кислоти, 20 % оцетової кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколя. Хімічний аналіз структурних складових магнієвих сплавів вивчали на електронному мікроскопі – мікроаналізаторі з енергодисперсійною приставкою РЕММА 202М і РЕМ 161.

Для корозійних досліджень із зруйнованих після механічних випробувань зразків виготовляли заготовки розмірами Ø10 × 6 мм на токарному верстаті, не допускаючи використання мастила, емульсії та місцевих перегрівів. Заготовки після токарної обробки зачищали наждачним папером з дрібним зерном, одержуючи шорсткість

**Таблиця 1** – Атомні радіуси (Ar), електровід'ємність елементів (E/V), нормальний електродний потенціал (E<sup>0</sup>) Nd, Al та співвідношення їх по відношенню до магнія [2–4]

Елемент	Ar <sub>Ел.</sub> , пм	(Ar <sub>Mg</sub> - Ar <sub>Ел.</sub> ) / Ar <sub>Mg</sub> , %	E/V <sub>Ел.</sub>	E/V <sub>Mg</sub> - E/V <sub>Ел.</sub>	E <sup>0</sup> , В
Mg	160	–	0,56	–	-2,37
Nd	182	-13,8	0,95	-0,39	-2,32
Al	143	10,6	0,61	-0,05	-1,66

поверхні не гірше  $Ra \leq 2,5$  мкм (ГОСТ 9.019-74). Заготовки обмірювали штангенциркулем з точністю до 0,1 мм і зважували їх на аналітичних вагах АДВ-200 з точністю до 0,0001 г.

Корозійні випробування проводили в водних розчинах з вмістом 0,7, 0,9 та 3,0 % NaCl при температурі  $36 \pm 1,0$  °C, стабільність якої забезпечувалась ультратермостатом УТ-15. Зразки перед розміщенням в розчині знежирювали етиловим спиртом. Після випробувань зразки виймалися з розчину, з їх поверхні видаляли продукти корозії хромовим ангідридом, у якому зразки витримували при температурі 18...25 °C на протязі 1...5 хв, промивали у проточній та дистильованій воді, висушували та зважували на вагах АДВ-200.

Втрату маси зразка  $\Delta m$ , г/м<sup>2</sup> розраховували по формулі (1):

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \text{ г/м}^2 \quad (1)$$

де  $m_0$  – вага зразка до випробування, г;

$m_1$  – вага зразка після випробування і видалення продуктів корозії, г;

$S$  – площа поверхні зразка до випробування, м<sup>2</sup>.

Швидкість корозії  $K$ , г/(м<sup>2</sup>·д) розраховували по формулі (2):

$$K = \frac{\Delta m}{\tau}, \text{ г/(м}^2 \cdot \text{д)} \quad (2)$$

де  $\tau$  – тривалість випробування, діб.

Для кожного складу магнієвого сплаву визначали корозійну стійкість впродовж 3, 5, 7, 10, 20, 30 діб й розраховували її середнє значення по даним 6...15 випробувань.

Металографічні дослідження показали, що структура стандартного сплаву Мл-5 складалася з  $\delta$  – твердого розчину, інтерметалідів ( $\gamma$ - фази  $Mg_{17}Al_{12}$ ) та евтектики типу  $\delta + \gamma(Mg_{17}Al_{12})$ , яка розташовувалася по границях зерен (рис. 1, а). При додаванні неодиму у кількості 0,05...0,1 % (мас.) у сплаві Мл-5 зменшувалися кількість евтектики, розмір мікрозерна та відбувалося подрібнення інтерметалідної фази. При подальшому збільшенні вмісту неодиму присутність евтектичної фази в сплаві поступово збільшувалась (рис. 1, б-г). Мікрорентгеноспектральним аналізом магнієвого сплаву з вмістом 1% (ваг.) Nd встановили, що у складі інтерметалідної фази міститься  $N \approx 30,0$  % (мас.) Nd.

Встановлено, що з підвищенням вмісту Nd у сплаві збільшувалася кількість інтерметалідної фази. Так при вмісті 0,05 % (мас.) Nd в сплаві в порівнянні із стандартним складом доля інтерметалідів з розмірами менше 4 мкм збільшувалася в 2,5 рази, розмірами від 4 до 8 мкм – майже у 3 рази, з розмірами від 8 до 15 мкм – в 6 разів, а інтерметаліди з розмірами більше 15 мкм були відсутні (табл. 2). При збільшенні вмісту неодиму з 0,05 до 1,0 % (мас.) середній розмір інтерметалідів змінювався від 4,1 до 6,78 мкм (середній розмір інтерметалідів стандартного сплаву скла-

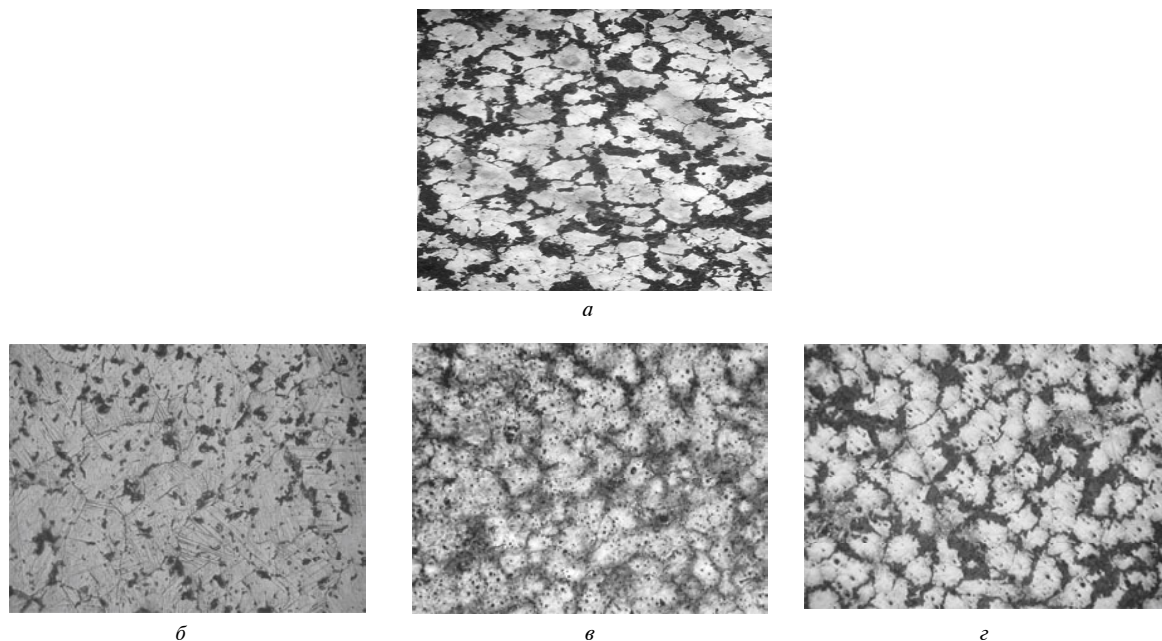


Рис. 1. Мікроструктура зразків зі сплаву Мл-5 (а, б, в, г) з Nd ( $\times 100$ ):

а – стандартний сплав, б – 0,05 % Nd, в – 0,1 % Nd, г – 1,0 % Nd

дав 3,2 мкм). В той же час з підвищенням концентрації неодима у сплаві спостерігалось значне збільшення кількості інтерметалідів в розмірній групі від 8 до 15 мкм.

Порівняльний аналіз швидкості корозії зразків вивчаємих варіантів магнієвого сплаву показав, що з підвищенням вмісту неодиму в сплаві Мл-5 з 0 до 0,05 % (мас.) швидкість корозії в усіх розчинах зменшувалась у 2,5 рази, але при збільшенні в розчині хлористого натрію з 0,7 до 3,0 % помітно збільшується швидкість корозії сплаву (табл. 3). Збільшення вмісту Nd до 0,1 % (мас.) помітно не змінювало швидкість корозії. Подальше зростання вмісту Nd до 1,0 % (мас.) значно зменшувало швидкість корозії в усіх розчинах майже у 10 разів. Спостерігається певна залежність між кількістю, хімічним скла-

дом інтерметалідної фази та швидкістю корозії. Так, зниження швидкості корозії можна пов'язати з суттєвою зміною хімічного складу інтерметалідів, які у гальванічній парі δ-твердий розчин – інтерметалідна фаза відіграють роль катода. Збільшення кількості інтерметалідної фази з неодимом зменшує негативний вплив алюмінію в сплаві на швидкість корозії.

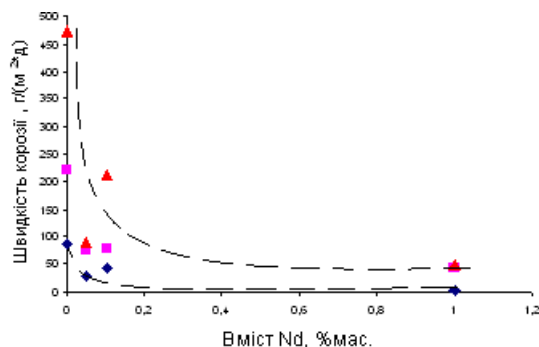
Вивчали залежності механічних властивостей легованого сплаву Мл-5 від розміру і кількості інтерметалідів (рис. 4). Встановили, що із збільшенням кількості інтерметалідів межа міцності, жароміцність та мікротвердість матриці підвищувались. Більший вплив згідно табл. 3 мають дрібні інтерметаліди, вміст яких значно змінюється при легуванні.

**Таблиця 2** – Кількісна оцінка інтерметалідів в зразках сплаву Мл-5 з неодимом (метод «Л» та «П» ГОСТ 1778-70)

Вміст Nd розрахунковий, % ваг	Об'ємний відсоток інтерметалідів, $\nu \cdot 10^{-3}$	Індекс інтерметалідів, $I \cdot 10^{-3}$	Кількість інтерметалідів на довжині 50 мм				Середній розмір інтерметалідів, мкм	
			Загальна	в т.ч. в розмірних групах, мкм				
				до 4	4,1–7,9	8–15		15,1–19
0	246	3,8	60	36	22	2	0	3,20
0,05	396	13,3	162	90	60	12	0	4,10
0,1	432	13,4	136	52	66	18	0	4,93
1,0	513	29,5	218	55	82	76	5	6,78

**Таблиця 3** – Швидкість корозії магнієвих сплавів в розчинах з різним вмістом хлористого натрію

Вміст Nd (розрахунковий), % мас.	Середня швидкість корозії в розчинах з NaCl, K, $г/(м^2 \cdot д)$		
	Вміст NaCl у розчині, %		
	0,7	0,9	3,0
0	85,40	219,4	472,9
0,05	26,09	73,95	88,91
0,1	41,1	78,37	211,3
1,0	2,83	42,77	46,99



**Рис. 2.** Вплив вмісту неодиму на швидкість корозії зразків із сплаву Мл-5

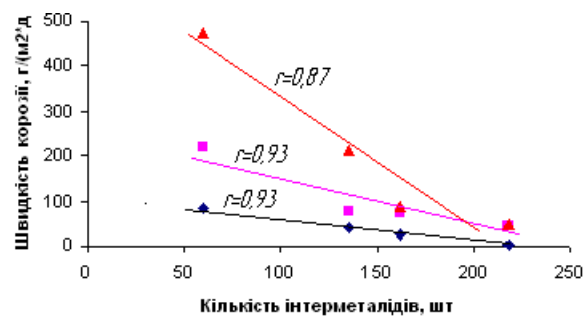
(◆ – 0,7 % NaCl, ■ – 0,9 % NaCl, ▲ – 3,0 % NaCl)

При випробуванні зразків сплаву Мл-5 в розчині з різним вмістом NaCl встановлені достовірні прямопропорційні лінійні залежності, між загальною кількістю інтерметалідів (N) та швидкістю корозії (K) (рис. 3).

$$K = 110,55 - 0,49N, (r = 0,93), г/(м^2 \cdot д); \quad (3)$$

$$K = 264,6 - 1,11N, (r = 0,93), г/(м^2 \cdot д); \quad (4)$$

$$K = 574,5 - 2,56N, (r = 0,87), г/(м^2 \cdot д). \quad (5)$$



**Рис. 3.** Вплив кількості інтерметалідів (N) на швидкість корозії (K) сплаву Мл-5 з Nd

(◆ – 0,7 % NaCl, ■ – 0,9 % NaCl, ▲ – 3,0 % NaCl)

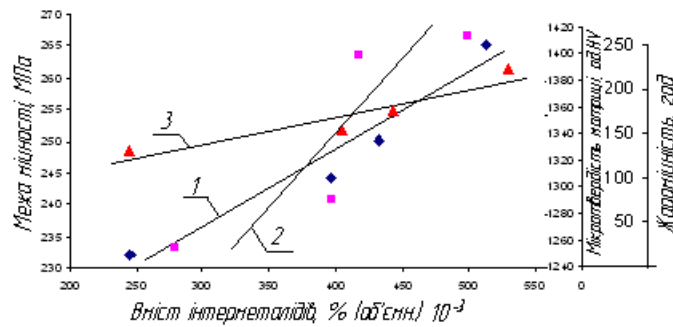


Рис. 4. Вплив об'ємного відсотка інтерметалідів на межу міцності, мікротвердість матриці та жароміцність сплаву Мл-5 з Nd (◆ –  $\sigma_B$ , ■ –  $HV$ , ▲ –  $\tau$ )

$$\sigma_B = 200,76 + 0,12V, (r = 0,97), \text{ МПа}; \quad (6)$$

$$HV = 1100,7 + 0,59V, (r = 0,89), \text{ од.}; \quad (7)$$

$$\tau = 51,3 + 0,33V, (r = 0,93), \text{ год.} \quad (8)$$

**Висновки**

1. На швидкість корозії литих зразків із магнієвого сплаву Мл-5 в водних розчинах хлористого натрію суттєво впливають його структурні складові, які обумовлені хімічним складом металу.
2. Введення неодиму в сплав Мл-5 помітно збільшувало його корозійну стійкість в водних розчинах хлористого натрію, за рахунок зміни складу, розмірів та кількості інтерметалідів.

3. Зростання кількості і вмісту інтерметалідів в сплаві Мл-5 підвищили механічні властивості.

**Список літератури**

1. Структура, механические и физические свойства металлических материалов / Межвузовский сборник научных трудов – М. : ВЗМИ, 1987. – 147 с.
2. Юм-Розери. Структура металлов и сплавов / Юм-Розери, В. Рейнор. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 391 с.
3. Гшнейднер К. А. Сплавы редкоземельных металлов / К. А. Гшнейднер. – М. : «Мир», 1965. – 185 с.
4. Уоббер Дж. Металлургия и металловедение плутония и его сплавов / Дж. Уоббер. – Госатомиздат, 1962. – 102 с.

Поступила в редакцию 21.02.2013

**Зеленюк Ю.А., Шаломеев В.А., Зинченко М.Н., Цивирко Э.И. Влияние интерметаллидов на свойства литого сплава Мл-5 с неодимом**

*Исследовали влияние неодима в литом магниевом сплаве Мл-5 на его структурные составляющие и коррозионную стойкость в водных растворах хлористого натрия. Установили, что коррозионная стойкость сплавов зависит от содержания неодима и повышается с увеличением количества интерметаллидов в сплаве, а также уменьшается с повышением концентрации хлористого натрия в растворе.*

**Ключевые слова:** магниевый сплав, неодим, интерметаллид, скорость коррозии, предел прочности, микротвердость, жаропрочность.

**Zelenyuk Yu., Shalomayev V., Zinchenko M., Tsivirko E. Effect of intermetallic compounds on properties of cast Мл-5 alloy with neodymium**

*Effect of neodymium on structural constituents and corrosion stability of cast magnesium alloy Мл-5 in sodium chloride aqueous solutions is described. It was found that corrosion stability of alloys depends on content of neodymium and increases with increase of amount of intermetallic compounds in alloy, as well as decreases with increase of sodium chloride concentration in solution.*

**Keywords:** magnesium alloy, neodymium, intermetallic compounds, corrosion velocity, strength limit, microhardness, heat stability.