

УДК 669.721.5:621.74

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

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

## НОВІ МАГНІЄВІ СПЛАВИ З ПІДВИЩЕНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

*Досліджували вплив легування литого магнієвого сплаву МЛ-5 на хімічний склад, структурні складові, механічні й жароміцні властивості. Отримано залежності впливу розміру інтерметалідної фази, її морфології і топології на механічні властивості виливків з магнієвих сплавів. Встановлено вплив вмісту термостійкої інтерметалідної фази, що утворюється при введенні в магнієві сплави тугоплавких елементів, на жароміцність лиття.*

**Ключові слова:** магнієвий сплав, хімічний склад, мікролегування, інтерметалід, механічні властивості, жароміцність.

Для сучасного авіадвигунобудування, де поряд зі звичайними вимогами до конструкцій, що працюють у значному температурному діапазоні, стає все більш важливим зменшення їхньої ваги, що робить застосування легких конструкційних матеріалів на основі магнію досить перспективним [1].

Застосування виливків із магнієвих сплавів дозволяє істотно знизити масу агрегатів, що забезпечує підвищення корисного навантаження, дальності пробігу, зниження витрат пального. Вимоги до експлуатаційної надійності та довговічності авіаційної техніки, що зростають, обумовлюють необхідність підвищення властивостей виливків із магнієвих сплавів [2].

Тому розроблення нових і вдосконалення хімічного складу використовуваних магнієвих сплавів з кращими властивостями, поліпшення якості виливків за рахунок керування їх структурними характеристиками є актуальною проблемою, вирішення якої прискорить розвиток та конкурентоспроможність вітчизняного авіадвигунобудування.

Поліпшення властивостей магнієвих сплавів досягали за рахунок їх мікролегування та модифікування.

Для легування і модифікування магнієвих сплавів відібрали хімічні елементи за такими критеріями: близькість атомних діаметрів ( $\leq 15\%$ ) і різниця електронегативності ( $\leq 0,4$ ) [3, 4]. З усього різномайття елементів Періодичної системи Д. І. Менделєєва задовольняли цим критеріям елементи Al, Si, Sc, Ti, Zn, Ge, Y, Zr, Ag, Sn, Nd, Hf, і Pb, серед яких Nd, Ge, Ag, Si, Y, Sc, Zr, Ti і Hf одночасно є перспективними елементами для поліпшення жароміцності магнієвих сплавів, тому що температура плавлення їх перевищує температуру плавлення основи сплаву.

Досліджували вплив вищевказаних елементів на структуроутворення, механічні властивості і

тривалу міцність виливків з магнієвого сплаву МЛ5. Для порівняння проводили дослідження на чистому магнії.

Для одержання магнієвих сплавів у тигельну піч ІПМ-500 завантажували попередньо нагріті шихтові матеріали і по розплавленні при 650...730 °С переливали у виїмні тиглі. Виїмні тиглі встановлювали в роздавальні печі, в яких доводили сплав за хімічним складом і рафінували флюсом ВІ-2 при 740...760 °С. Потім у розплав вводили зростаючу кількість відповідних елементів (0; 0,05; 0,1; 1,0 мас. % – за розрахунком), підігрівали і при 730 °С заливали ливарні форми для одержання литих зразків і виливків.

Хімічний склад виливків з магнієвих сплавів контролювали за допомогою оптичних емісійних спектрометрів «SPECTROMAXx» і «SPECTROMAXxF», фотоелектричних спектрометрів МФС-8 і ТФС-36, ЕДРФ спектрометра «SPECTRO XEPOS».

Макро- і мікроструктуру досліджуваних сплавів вивчали методами світлової мікроскопії («Neophot 32», «OLYMPUS IX 70»), а також з використанням програмно-апаратного комплексу «Відеотест-Структура 5.0» на базі металографічного мікроскопа Axiovert 40MAT. Фрактографічний аналіз зламів зразків проводили на електронному сканувальному мікроскопі «JSM-6360LA».

Хімічний аналіз структурних складових магнієвих сплавів вивчали на електронному мікроскопі – мікроаналізаторі з енергодисперсійною приставкою РЕММА 202М і РЕМ 16І.

Кількісну оцінку структурних складових проводили методом «Л» і «П» за ГОСТ 1778-70.

Механічні властивості зразків із магнієвих сплавів визначалися на розривній машині «INSTRUN» 2801 за ГОСТ 1497-84 і ГОСТ 2856-79. Мікротвердість структурних складових сплавів вивчали мікротвердомером фірми «Buehler» та LM-700AT при навантаженні 0,1 Н згідно з ГОСТ 9450-76.

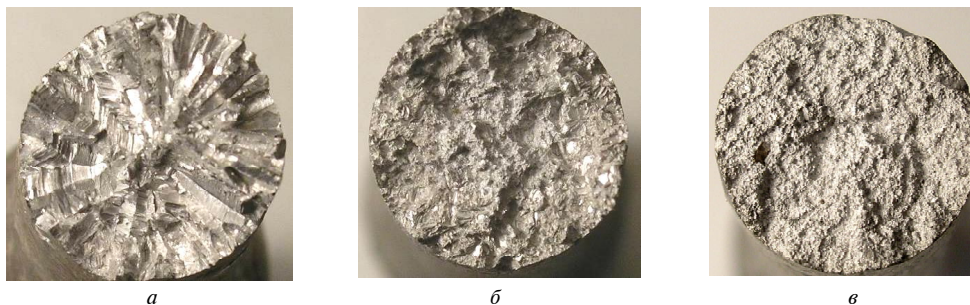


Рис. 1. Макроструктура зламів зразків,  $\times 5$ : а – 99,9% Mg; б – МЛ15; в – МЛ15 + 0,1% Zr

Тривалу міцність при підвищених температурах визначали за ГОСТ 9651-84.

Фрактографічне дослідження зламів литих зразків із чистого магнію показало наявність крихкої грубокристалічної структури (рис. 1, а). Макроструктура стандартного сплаву МЛ15 (8,8 % Al, 0,35 % Mn, 0,32 % Zn) була помітно подрібненою (рис. 1, б), а введення легувальних елементів у сплав забезпечувало в зламі матову дрібнокристалічну структуру (рис. 1, в).

Мікроструктура виливків із чистого магнію мала однорідну зернисту будову (рис. 2, а). Мікроструктура виливків із сплаву МЛ15 являла собою  $\delta$ -твердий розчин з наявністю евтектики типу  $\delta + \gamma$ , розташованої по межах зерен, та окремих інтерметалідів  $\gamma$  (рис. 2, б). Після введення обраних легувальних елементів зменшувалася відстань між осями дендритів другого порядку (з 20 до 16 мкм), розміри структурних складових (табл. 1) і евтектичних угруповань (рис. 2, в).

Зі збільшенням вмісту досліджуваних елементів (від 0,05 до 1,0 мас. %) у сплаві МЛ15 розмір мікрозерна і відстань між осями дендритів 2-го порядку зменшувалися. Легування сплаву МЛ15 Al, Si, Sc, Ti, Zn, Ge, Y, Zr, Ag, Sn, Nd, Hf і Pb здрібнило мікрозерно на 30...40 %, підвищило мікротвердість структурних складових, сприяло подрібненню інтерметалідних фаз. Вплив елементів на подрібнення зерна посилювався зі збільшенням порядкового номера цих елементів у підгрупах Періодичної системи. При цьому

більше подрібнювали зерно елементи IVa підгрупи: Ti, Zr та Hf.

У структурі сплаву МЛ15 спостерігалися сферичні та пластинчасті інтерметалідні фази, збагачені відповідними легувальними елементами (табл. 2).

Введення у сплав МЛ15 0,050, 1 % досліджуваних елементів інтенсивно збільшувало об'ємну частку сферичних інтерметалідів і незначно – пластинчастих. При вмісті легувальних елементів у сплаві  $\sim 1,0$  % незначно зростала об'ємна частка сферичних включень, що знаходилися усередині зерна, та інтенсивно-пластинчастих. Такий перерозподіл інтерметалідів сприяв подрібненню зерна. Із зростанням загальної об'ємної частки інтерметалідів підвищувалася міцність металу. Аналіз розподілу інтерметалідів за розмірними групами показав, що у стандартному сплаві МЛ15 переважали пластинчасті інтерметаліди розмірної групи 4...15 мкм. Сферичні інтерметаліди в основному представлені розмірною групою 2,0...7,9 мкм. У магнієвому сплаві досліджувані легувальні елементи зміщали розміри включень у бік менших груп (до 2,0...11,5 мкм – для сферичних і 2,0...7,9 мкм – для пластинчастих). При підвищенні вмісту легуючих елементів у сплаві збільшувалася об'ємна частка інтерметалідів з розмірами менше 2 мкм і зменшувалася об'ємна частка інтерметалідів розмірами понад 11,6 мкм. Встановлено, що зі збільшенням об'ємної частки інтерметалідів (V) у сплаві МЛ15 (рис. 3) помітно подрібнювалося мікрозерно (рівняння).

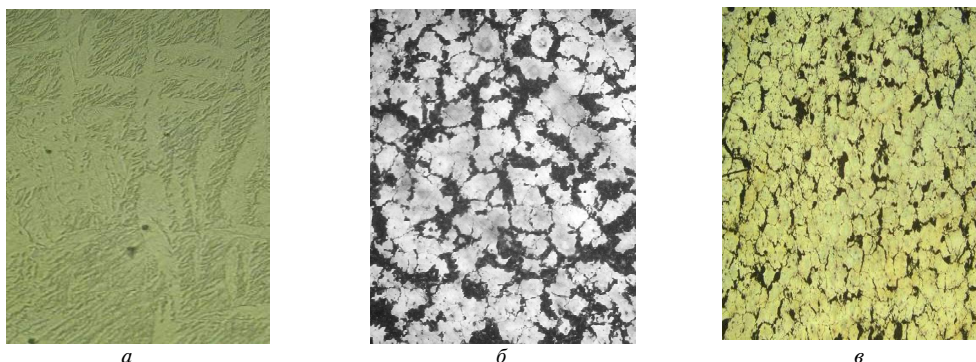


Рис. 2. Мікроструктура термооброблених зразків,  $\times 100$ : а – 99,9% Mg; б – МЛ15; в – МЛ15 + 0,1% Sc

**Таблиця 1** – Характеристики структурних складових сплаву МЛ5 з різними легувальними елементами

Елемент	Вміст, мас. % (разрах.)	Відстань між осями дендритів 2 <sup>го</sup> порядку, мкм	Розмір мікрозерна, мкм	Мікротвердість, НВ, МПа	Елемент	Вміст, мас. % (разрах.)	Відстань між осями дендритів 2 <sup>го</sup> порядку, мкм	Розмір мікрозерна, мкм	Мікротвердість, НВ, МПа
Mg (99,9%)	--	40	300	524	Zr	0,05	17	105	1235
						0,10	16	100	1265
						1,0	16	70	1297
Ag	0,046	18	120	1227	Hf	0,05	17	110	1256
	0,12	18	100	1357		0,10	16	100	1294
	0,98	17	90	1390		1,0	15	70	1321
Zn	0,32 (МЛ5)	23	140	1227	Si	0,047	19	130	1276
	0,97	18	100	1384		0,12	17	120	1313
	0,05	18	120	1465		1,05	16	100	1334
Sc	0,10	17	100	1547	Ge	0,055	19	125	1233
	1,0	16	90	1675		0,095	18	100	1244
	0,05	18	130	1385		1,09	17	90	1287
Y	0,10	17	130	1451	Sn	0,047	16	125	1283
	1,0	17	100	1630		0,14	15	100	1293
	0,05	18	120	1290		1,15	15	90	1323
Nd	0,10	17	100	1390	Pb	0,057	18	135	1287
	1,0	17	90	1407		0,013	16	110	1311
	0,05	18	120	1265		0,980	15	80	1343
Ti	0,10	16	100	1270					
	1,0	16	100	1283					

**Таблиця 2** – Хімічний склад інтерметалідів у сплаві МЛ5, легованому різними хімічними елементами

Вміст елементів, мас. %						
Легувальний елемент	Mg	Al	Si	Mn	Zn	Fe
стандартний	81,99	14,85	1,36	1,8	--	--
78,41 % Ag	17,84	2,12	1,33	0,30	--	--
11,35 % Zn	47,72	40,78	0,15	--	--	--
32,65 % Sc	33,02	26,87	--	6,49	0,97	--
15,74 % Y	2,99	34,33	0,58	46,36	--	--
31,26 % Nd	22,96	44,25	0,16	1,37	--	--
21,80 % Ti	35,49	21,14	21,57	--	--	--
71,40 % Zr	14,77	10,98	1,55	1,30	--	--
1,16 % Hf	1,27	34,94	2,38	34,67	--	25,58
52,36 % Si	46,40	1,22	--	0,02	--	--
19,84 % Ge	60,65	2,68	16,83	--	--	--
12,32 % Pb	66,46	20,65	0,54	0,03	--	--
26,19 % Sn	68,19	2,96	2,66	--	--	--

Інтерметаліди, що розташовуються як у середині зерна, так і на його межах, зміцнювали сплав та підвищували його жароміцність. Пластичність сплаву, в залежності від об'ємної частки інтерметалідів, мала нелінійну залежність, яка помітно зростала при об'ємній частці 0,35...0,45 % і різко знижувалася при подальшому збільшенні її (рис. 4).

Встановили, що на властивості магнієвого сплаву впливала морфологія і топологія інтерметалідних фаз. Пластинчасті інтерметаліди розміром менше 8,0 мкм та сферичні – до розміру 11,6 мкм позитивно впливали на властивості сплаву (табл. 3). Отже, сферична форма інтерметалідів була кращою для підвищення властивостей сплаву.

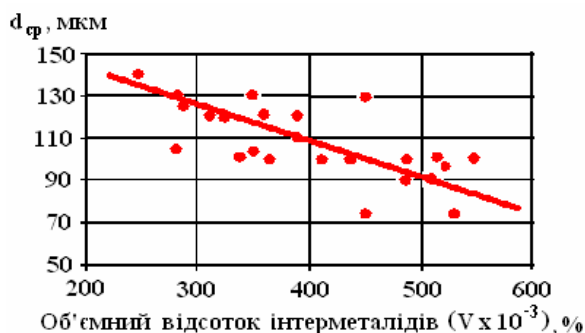


Рис. 3. Вплив об'ємного відсотка інтерметалідів ( $V$ ) на розмір мікрозерна ( $d_{cp}$ ) у сплавi МЛ5

$$d_{cp} = 180,52 - 0,18 \cdot V, \quad r = -0,82.$$

Зростання пластичності сплаву спостерігалося тільки при вмісті досліджуваних елементів у кількості 0,05...0,1 %, коли збільшувалася частка сферичних інтерметалідів і подрібнювалося зерно. При подальшому збільшенні вмісту елементів у сплавi (до 1,0 %) одночасно з подрібненням мікрозерна істотно зростає об'ємний відсоток інтерметалідів, що призводило до окрихчування металу і зниження його пластичності.

Вплив досліджуваних елементів на межу міцності від максимального до мінімального вишикувався у наступний ряд: Zr, Hf, Sc, Nd, Si, Ge, Ti, Ag, Sn, Pb, Y, Zn (рис. 5). При вмісті 0,05...0,1 мас. % елементів, що вводилися, підвищувалася і пластичність сплаву. Помітно поліпшували пластичність сплаву МЛ5 Y, Ti, Sc, Nd, Hf, слабше – Si, Zn, Ge, Ag, Sn.

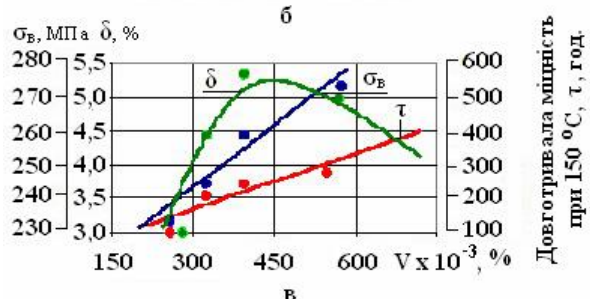
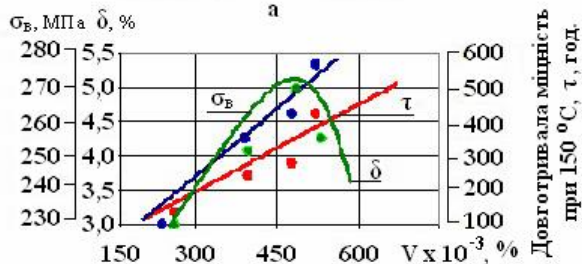
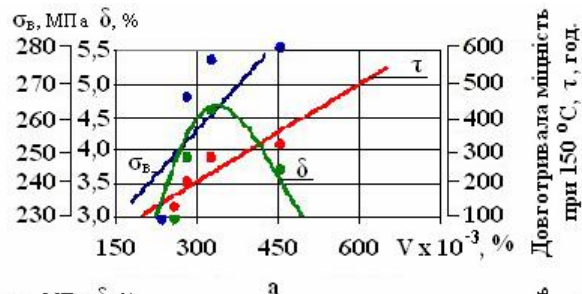


Рис. 4. Вплив об'ємного відсотка інтерметалідів на властивості легованого сплаву МЛ5: а – Zr; б – Hf; в – Sc

Таблиця 3 – Вплив морфології і об'ємного відсотка інтерметалідів ( $V$ ) на властивості сплаву МЛ5 з Ge

Розмірна група інтерметалідів, мкм	Залежності впливу об'ємного проценту інтерметалідів ( $V$ ) на міцність ( $\sigma_B$ ), пластичність ( $\delta$ ) і жароміцність ( $\tau$ )			
	Пластинчасті		Сферичні	
	Рівняння регресії	$r$	Рівняння регресії	$r$
< 2,0	$\sigma_B = 231,67 + 0,96 V$ $\delta = 2,64 + 0,21 V - 0,005 V^2$ $\tau = 159,65 + 1,58 V$	0,90 0,76 0,82	$\sigma_B = 236,76 + 0,99 V$ $\delta = 3,50 + 0,24 V - 0,009 V^2$ $\tau = 164,30 + 1,62 V$	0,88 0,74 0,79
2,0...3,9	$\sigma_B = 230,03 + 2,16 V$ $\delta = 1,13 + 0,38 V - 0,010 V^2$ $\tau = 157,25 + 3,82 V$	0,95 0,78 0,93	$\sigma_B = 219,40 + 1,74 V$ $\delta = -13,0 + 1,14 V - 0,03 V^2$ $\tau = 145,75 + 3,23 V$	0,94 0,71 0,96
4,0...7,9	$\sigma_B = 225,46 + 1,43 V$ $\delta = 0,57 + 0,33 V - 0,007 V^2$ $\tau = 153,16 + 2,49 V$	0,94 0,78 0,90	$\sigma_B = 234,44 + 10,47 V$ $\delta = 3,24 + 0,005 V^2$ $\tau = 162,49 + 16,50 V$	0,81 0,71 0,70
8,0...11,5	$\sigma_B = 250,56 - 10,47 V$ $\delta = 4,41 - 0,007 V^2$ $\tau = 176,51 - 16,50 V$	-0,81 -0,71 -0,70	$\sigma_B = 239,06 + 2,64 V$ $\delta = -0,08 + 1,01 V - 0,06 V^2$ $\tau = 165,70 + 5,17 V$	0,75 0,85 0,75
11,6...15,0	$\sigma_B = 246,30 - 2,59 V$ $\delta = 3,33 + 0,43 V - 0,050 V^2$ $\tau = 173,31 - 4,77 V$	-0,76 -0,88 -0,77	$\sigma_B = 243,67 - 4,97 V$ $\delta = 4,10 - 0,070 V^2$ $\tau = 170,66 - 9,58 V$	-0,77 -0,97 -0,81
15,1...19,0	$\sigma_B = 246,75 - 7,65 V$ $\delta = 2,55 + 1,05 V - 0,160 V^2$ $\tau = 173,56 - 13,38 V$	-0,96 -0,72 -0,93	Відсутні інтерметаліди	-- -- --

Встановлено, що жароміцність сплаву МЛ5 змінювалася в залежності від температури плавлення легувальних елементів (рис. 6). Олово і свинець, що мають температуру плавлення нижчу від основи сплаву (650 °С), знижували жароміцність за рахунок граничних виділень легкоплавких фаз.

На підставі проведених досліджень було розроблено нові магнієві сплави з підвищеним рівнем властивостей, які рекомендуються для використання при виробництві сучасних авіаційних двигунів [5–8].

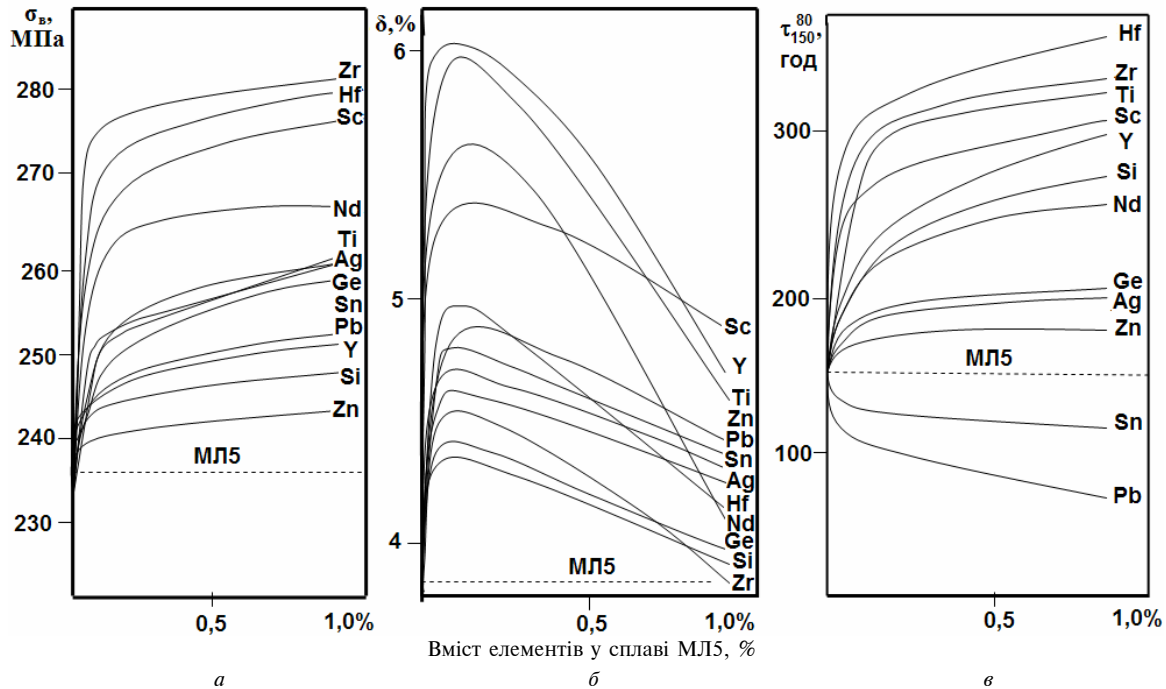


Рис. 5. Вплив легування на міцність (а), пластичність (б) та жароміцність (в) сплаву МЛ5 (..... – нормативні вимоги до виливків зі сплаву МЛ5)

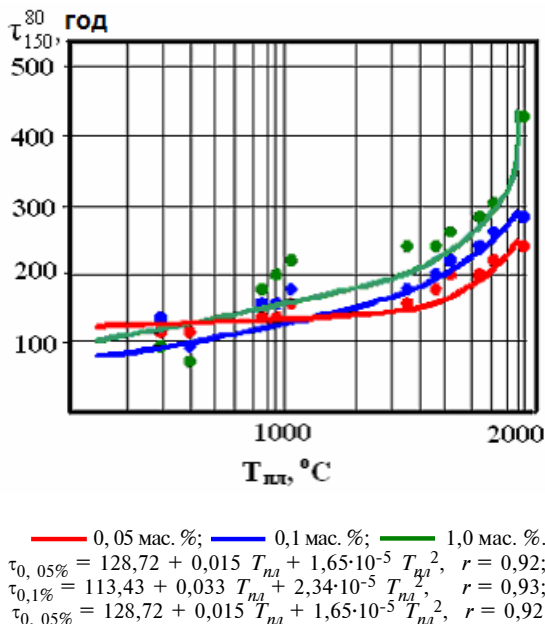


Рис. 6. Вплив температури плавлення ( $T_{пл}$ ) легувальних елементів сплаву МЛ5 на його жароміцність ( $\tau$ )

**Висновки**

1. Отримано нові дані про вплив легування (Al, Si, Sc, Ti, Zn, Ge, Y, Zr, Ag, Sn, Nd, Hf, і Pb) магнієвих сплавів на комплексні інтерметалідні фази, що утворюються і які відрізняються морфологією і топологією. Зазначені легувальні елементи на 30...40 % подрібнювали макро- і мікрозерно металу та підвищували мікротвердість структурних складових. Зі збільшенням вмісту кожного з елементів у сплаві пропорційно підвищувалася його міцність, але пластичність поліпшувалася лише при їх вмісті 0,05...0,1 мас. %. Систематизовані експериментальні дані щодо впливу легувальних елементів на механічні властивості сплаву МЛ5 показали, що помітно зміцнювали сплав Zr, Hf, Sc, Nd, а пластичність підвищували Y, Ti, Nd, Sc.

2. Отримано нові залежності впливу розміру інтерметалідної фази, її морфології і топології на механічні властивості виливків з магнієвих сплавів. Експериментально показано, що при вмісті 0,05...0,1 мас. % Al, Si, Sc, Ti, Zn, Ge, Y, Zr, Ag, Sn, Nd,

Hf і Pb кожного у магнієвих сплавах утворюються переважно дрібні сферичні інтерметаліди, що подрібнюють зерно і підвищують одночасно міцність і пластичність металу. Зі збільшенням вмісту зазначених елементів у сплавах зростає вміст інтерметалідів на межах зерен, що призводить до зниження пластичності металу.

3. Встановлено вплив вмісту термостійкої інтерметалідної фази, що утворюється при введенні в магнієві сплави тугоплавких елементів, на жароміцність лиття. Показано, що легування сплаву МЛ5 гафнієм підвищувало його жароміцність майже у 3 рази, а свинцем, як більш легкоплавким, знижувало у 2 рази.

#### Список літератури

1. Rourke D. J. Magnesium- current status and future prospects / Rourke D. J. // Proc. Intern. Magnesium Conf. in conjunction with METEER 2000 : Magnesium New Business Opportunities. — Brescia. — 2000. — С. 14–23.
2. Настоящее и будущее магниевых сплавов в нашей цивилизации / [Х. Диринга, П. Майер, Д. Фехнер и др.] // Литейное производство. — 2006. — №1. — С. 4–7.
3. Юм-Розери. Структура металлов и сплавов / Юм-Розери, В. Рейнор, М. : Металлургиздат, 1959. — 391 с.
4. Даркен Л.С. Физическая химия металлов / Л.С. Даркен, Р.В. Гурри. — М. : Metallurgizdat, 1960. — 245 с.
5. Пат. 39357 Украина, МПК С22С 23/00. Ливарний сплав на основі магнію з підвищеною рідинотекучістю / Шаломеев В.А., Цивірко Е.І., Лукінов В.В., Лисенко Н.О.; заявитель и патентообладатель Запорожск. нац. техн. ун-т.; заявл. 28.08.08; опубл. 25.02.09, Бюл. № 4.
6. Пат. 39358 Украина, МПК С22С 23/00. Ливарний сплав на основі магнію / Шаломеев В.А., Цивірко Е.І., Лукінов В.В., Лисенко Н.О., Пархоменко А. В.; заявитель и патентообладатель Запорожск. нац. техн. ун-т.; заявл. 28.08.08; опубл. 25.02.09, Бюл. № 4.
7. Пат. 25055 Украина, МПК С22С 23/00. Сплав на основі магнію / Шаломеев В.А., Цивірко Е.І., Лукінов В.В., Лисенко Н.О., Жеманюк П.Д., Клочихін В. В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Мотор Сич»; заявл. 25.06.07; опубл. 20.12.07, Бюл. № 6.
8. Пат. 25056 Украина, МПК С22С 23/00. Ливарний сплав на основі магнію / Шаломеев В.А., Цивірко Е.І., Лукінов В.В., Лисенко Н.О., Жеманюк П.Д., Клочихін В.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Мотор Сич»; заявл. 25.06.07; опубл. 20.12.07, Бюл. № 6.

Поступила в редакцию 23.05.2011

#### Шаломеев В.А., Цивирко Э.И., Зеленюк Ю.А. Новые магниевые сплавы с повышенными свойствами для авиадвигателей

*Исследовали влияние легирования литого магниевых сплава МЛ-5 на химический состав, структурные составляющие, механические и жаропрочные свойства. Получена зависимость влияния размера интерметаллидной фазы, ее морфологии и топологии на механические свойства отливок из магниевых сплавов. Установлено влияние содержания термостойкой интерметаллидной фазы, которая образуется при введении в магниевый сплав тугоплавких элементов, на жаропрочность литья.*

**Ключевые слова:** магниевый сплав, химический состав, микролегирование, интерметаллид, механические свойства, жаропрочность.

#### Shalomeyev V., Tsivirko E., Zelenyuk Yu. New magnesium alloys with povyschennymi by properties for aero-engines

*The influence of doping cast magnesium alloy Ml-5 on the chemical composition, composes the structural, mechanical and heat-resistant properties. The dependence of the effect size intermetallic phase, its morphology and topology on the mechanical properties of castings of magnesium alloys. The influence of the content of heat-resistant intermetallic phase, co-Thoraya formed by the introduction of magnesium alloy melting of elements, resistance to high temperature casting.*

**Key words:** magnesium alloy, chemical composition, microalloying, intermetallic, mechanical properties, hot-resistance.