

УДК 669.721.5:616-089.843

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240422.67.845

## ПОЛПШЕННЯ ЯКОСТІ БІОРОЗЧИННОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ МАГНІЮ ДЛЯ ІМПЛАНТІВ

ШАЛОМЄЄВ В. А.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,ТАБУНЩИК Г. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, проф.,ШЕЙКО С. П.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,ЛЮТОВА О. В.<sup>4\*</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769-83-80, e-mail: [shalomeev@radiocom.net.ua](mailto:shalomeev@radiocom.net.ua), ORCID ID: 0000-0002-6091-837X

<sup>2</sup> Кафедра програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769-82-67, e-mail: [galina.tabunshchik@gmail.com](mailto:galina.tabunshchik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1429-5180

<sup>3</sup> Кафедра загальної та прикладної фізики, Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, 69600, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (093) 029-22-23, e-mail: [ss6309113@gmail.com](mailto:ss6309113@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5761-4263

<sup>4\*</sup> Кафедра нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769-82-60, e-mail: [lyutova2014@gmail.com](mailto:lyutova2014@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-8818-2608

**Анотація. Постановка проблеми.** Наразі для виготовлення імплантатів широко застосовують біорозчинні матеріали, серед яких найперспективніші магнієві сплави. Магній – природний елемент організму, міститься в кістковій та м'язовій тканинах, бере участь у різних обмінних процесах. Крім того, магній і продукти його біокорозії мають відмінну біосумісність. Головна перевага магнієвих сплавів – це позитивний вплив на організм людини, але якість не задовольняє вимогам для використання їх в людському тілі. Підвищити властивості магнієвих сплавів можливо у результаті вдосконалення процесів рафінування та модифікування рідкого сплаву. **Мета** – дослідити та випробувати різні вуглецевмісні матеріали для рафінування та модифікування магнієвого розплаву. **Методика.** Оптична мікроскопія, застосування стандартних методик для визначення механічних властивостей магнієвого сплаву та спеціальних методик для визначення рафінувальної та модифікувальної здатності різних вуглецевмісних матеріалів. **Результати.** Запропоновано технологію модифікування ливарних магнієвих сплавів системи Mg – Zr – Nd дисперсним графітовим порошком. Показано, що оптимальна присадка вуглецю у кількості 0,05...0,1 % сприяє підвищенню механічних властивостей унаслідок подрібнення зерна та додаткового зміцнення структурних складових. Запропоновано комплексний фільтр, який містить рівні кількості магнезиту, графіту і вапняку, що забезпечує підвищений рівень рафінування розплаву для отримання високоякісного лиття. Показано, що застосування комплексного вуглецевмісного фільтра забезпечує не тільки ефективне рафінування сплаву, а й додаткове його модифікування. При цьому в структурі сплаву спостерігається підвищена кількість інтерметалідної γ-фази, що забезпечує підвищення мікротвердості структурних складових сплаву і сприяє поліпшенню його фізико-механічних характеристик. **Наукова новизна.** Досліджено структуру та властивості литого магнієвого сплаву системи Mg – Zr – Nd при модифікуванні дисперсним графітовим порошком та фільтрації його через вуглецевмісні матеріали. **Практична значимість.** Розроблена комплексна технологія обробки рідкого розплаву магнієвих сплавів системи Mg – Zr – Nd дозволяє поліпшити вихід придатного лиття та покращити його якість.

**Ключові слова:** магнієвий сплав; вуглецевмісні матеріали; фільтрація; модифікування; рафінування; мікрозерно; механічні властивості; рафінувальна та модифікувальна здатність

## IMPROVING THE QUALITY OF MAGNESIUM-SOLUBLE BIOLOGICAL ALLOY FOR IMPLANTS

SHALOMEEV V.A.<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,TABUNSHCHYK G.V.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Prof.,SHEYKO S.P.<sup>3</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,LIUTOVA O.V.<sup>4\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

<sup>1</sup> Department of Descriptive Geometry, Engineer and Computer Graphics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine, tel. + 38 (061) 769-83-80, e-mail: [shalomeev@radiocom.net.ua](mailto:shalomeev@radiocom.net.ua), ORCID ID: 0000-0002-6091-837X

<sup>2</sup> Department of Software Tool, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (061) 769-82-67, e-mail: [galina.tabunshchik@gmail.com](mailto:galina.tabunshchik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1429-5180

<sup>3</sup> Department of General and Applied Physics, Zaporizhzhia National University, 66, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, 69000, Ukraine, tel. +38 (093) 029-22-23, e-mail: [ss6309113@gmail.com](mailto:ss6309113@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5761-4263

<sup>4\*</sup> Department of Descriptive Geometry, Engineer and Computer Graphics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine, tel. + 38 (061) 769-82-60, e-mail: [lyutova2014@gmail.com](mailto:lyutova2014@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-8818-2608

**Abstract. Formulation of the problem.** Currently, biosoluble materials are widely used for the manufacture of implants, among which the most promising are magnesium alloys. Magnesium is a natural element of the body. It is contained in bone and muscle tissue and involved in various metabolic processes. In addition, magnesium and its biocorrosion products have excellent biocompatibility. The main advantage of magnesium alloys is the positive effect magnesium has on the human body, but their quality is not satisfactory for use in the human body. Improved refining and modification processes of liquid melt can increase the properties of magnesium alloys. **Purpose of research:** to investigate and test various carbonaceous materials for refining and modifying magnesium melt. **Method.** Optical microscopy, application of standard techniques for determining the mechanical properties of magnesium alloy and special techniques for determining the refining and modifying ability of various carbon-containing materials. **Results.** The technology of cast magnesium alloys modification for Mg – Zr – Nd system by dispersed graphite powder is proposed. It is shown that the optimal carbon additive in the quantity of 0,05...0,1 % improves the mechanical properties due to grain grinding and additional strengthening of structural components. A complex filter containing equal quantity of magnesite, graphite and limestone is proposed. It provides an increased level of melt refining to obtain high quality casting. It is shown that the use of a complex carbon-containing filter provides not only efficient melt refining, but also its additional modification. In alloy structure the increased quantity of intermetallic  $\gamma$ -phase is observed, that provides increase the microhardness of alloy structural components and promotes increase of its physical-mechanical characteristics. **Scientific novelty.** The structure and properties of cast magnesium alloy for Mg –Zr – Nd system during modification with dispersed graphite powder and its filtration through carbon-containing materials are investigated. **Practical significance.** The developed complex technology for processing the liquid melt of magnesium alloys for the Mg – Zr – Nd system allows to increase the yield of suitable casting and improve its quality.

**Keywords:** *magnesium alloy; carbonaceous materials; filtration; modification; refining; micrograin; mechanical properties; refining and modifying ability*

## Вступ

Наразі для виготовлення імплантатів широко застосовують біорозчинні матеріали, серед яких найбільш перспективні магнієві сплави. Головна їх перевага – позитивний вплив магнію на організм людини. Магній – природний елемент організму, міститься в кістковій та м'язовій тканинах, бере участь у різних обмінних процесах. Крім того, магній і продукти його біокорозії мають відмінну біосумісність.

Технологія отримання магнієвих сплавів включає виплавлення сплаву в індукційних, газових печах, обробку рідкого розплаву флюсом, заливання форм і термічну обробку. Поліпшення якості імплантатів з магнієвих сплавів та підвищення їх механічних властивостей може досягатися способом удосконалення методів модифікування та рафінування розплаву.

Основні вимоги до модифікаторів магнієвих сплавів медичного призначення – це можливість утворювати нерозчинні центри кристалізації, стабільний ефект модифікування, низька вартість, недефіцитність і нетоксичність. Найбільш підходящий для цих умов вуглець [1], головна перевага у використанні якого полягає в його здатності забруднювати метал оксидними включеннями і продуктами реакції під час контакту з розплавом [2]. Враховуючи, що вуглець нерозчинний у магнії [3] та його частинки або карбіди можуть бути додатковими центрами кристалізації, застосування вуглецевмісних матеріалів, зокрема, графіту, для модифікування магнієвих сплавів бачиться перспективним напрямком для поліпшення їх якості.

Для захисту та рафінування рідкого магнієвого сплаву широко застосовують

різні флюси, однак у цьому випадку виникає загроза забруднення металу флюсом і продуктами його рафінування [4], що викликає появу осередків флюсової корозії і знижує якість імплантатів. Для підвищення їх якості застосовують фільтрацію розплаву перед його заливанням у форму [5] із застосуванням матеріалів, здатних адсорбувати флюс, неметалеві включення [6] і, що забезпечують високу якість металу та підвищені механічні властивості [7].

До фільтраційних матеріалів поставлені такі вимоги [8]: можливість легкого дроблення та розсіювання, достатня механічна міцність, інертність фільтра до хімічного складу сплаву, стабільний ефект рафінування, низька вартість та недефіцитність.

Таким вимогам задовольняють вапняк, магнезит і графіт, які широко застосовуються в металургії. У разі взаємодії цих матеріалів із магнієвим сплавом, одночасно з рафінуванням розплаву, можливий процес його модифікування вуглецем, що входить до складу матеріалів фільтра. Вочевидь, різні вуглецевмісні матеріали матимуть різну рафінувальну та модифікувальну здатність, зумовлену їх хімічним складом і фізико-хімічними властивостями [9]. Тому правильний вибір матеріалу фільтра, що забезпечує підвищену рафінувальну здатність, максимальне подрібнення зерна металу і, як наслідок, підвищений комплекс властивостей металу, постає актуальним завданням.

### Матеріали і методи досліджень

Магнієвий сплав системи Mg – Zr – Nd (% мас.: 0,1...0,7 Zn; 0,4...1,0 Zr; 2,2...2,8 Nd; Mg залишок ) виплавляли в індукційній печі

тигельного типу ПІМ-500. Рафінування сплаву проводили в роздавальній печі з порційним відбором розплаву і вводили зростаючі присадки дисперсного графітового порошку (мас. частка, %: 99,1 С; 0,9 золи) фракції 0,071 мм, ретельно перемішували і заливали стандартні зразки для механічних випробувань. Зразки проходили термічну обробку в печах типу Бельв'ю та ПАП-4М за режимом Т6: нагрівання до  $540 \pm 5$  °С, витримка 15 годин, охолодження на повітрі та старіння за  $200 \pm 5$  °С, витримка 8 годин, охолодження на повітрі.

Ефективність очищення розплаву фільтраційними матеріалами порівнювали способом визначення характеристик поверхневої взаємодії у різних системах. Для цього застосовували метод «лежачої краплі» [10]. Зразки зі сплаву системи Mg – Zr – Nd ( $\varnothing 7,5$  мм  $\times$  7,5 мм) поміщали у графітовий нагрівач, який розташовувався в печі із кварцового скла усередині індуктора на підкладці з магнезиту, вапняку та графіту. Визначали поверхневий натяг ( $\sigma_{р.г.}$ ), роботу когезії ( $A_k$ ), адгезії ( $A_a$ ) та крайовий кут змочування ( $K_p$ ), а також ефективність видалення включень із розплаву під час його фільтрації ( $W_{фл.}$ ) [11].

Після розплавлення краплі металу та подальшої кристалізації (рис. 1) затверділі зразки металу розрізали навпіл і виготовляли шліфи. Мікроструктуру металу на поверхні контакту «метал-підкладка» вивчали методом оптичної мікроскопії після травлення у 7 % спиртовому розчині азотної кислоти. Мікротвердість металу визначали на мікротвердомірі фірми «Buehler» за навантаження індентора, що дорівнювало 10 г.



Рис.1. Крапля зі сплаву на основі магнію після кристалізації на графітовій підкладці

Ефективність фільтрації через різні матеріали досліджували на магнієвому сплаві, після рафінування флюсом ВІ-2 (мас. частка, %: 38...46 MgCl; 32...43 KCl; 8...10 CaCl<sub>2</sub>; 5...9 BaCl<sub>2</sub>; 3...5 CaF<sub>2</sub>). Попередньо нагріті до температури 500 °С матеріали фільтра гранулярністю 10...50 мм по чергово засипали на сітку знімної литникової чаші висотою 100 мм, встановленої над стояком ливарної форми, і заливали литі зразки з робочим діаметром 12 мм для визначення механічних властивостей та металографічного контролю.

Тимчасовий опір розриву ( $\sigma_B$ ) і відносне подовження ( $\delta$ ) зразків із робочим діаметром

12 мм визначали на розривній машині Р5 за кімнатної температури. Мікроструктуру виливків вивчали методом світлової мікроскопії («Neophot 32») на термічно оброблених зразках після травлення реактивом, що складався з 1 % азотної кислоти, 20 % оцтової кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколю.

Хімічний склад виливків із магнієвих сплавів контролювали за допомогою оптичних емісійних спектрометрів «SPECTROMAXx» та «SPECTROMAXxF», фотоелектричних спектрометрів МФС-8 та ТФС-36.

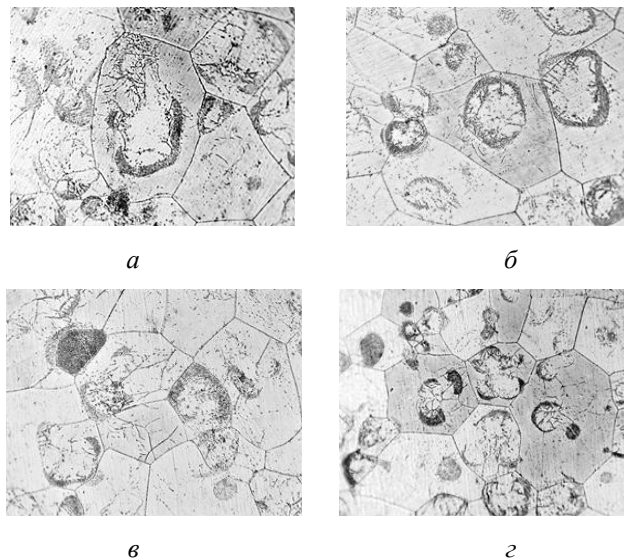


Рис. 2. Мікроструктура магнієвого сплаву після термообробки ( $\times 350$ ):  
а – вихідний метал; б – присадка 0,05 % С; в – присадка 0,1 % С. г – присадка 0,3 % С

### Результати досліджень

Досліджували вплив зростаючих присадок дрібнодисперсного графітового порошку (мас. частка 0,05, 0,1, 0,3 %) на структуроутворення та механічні властивості магнієвого сплаву.

Мікроструктура сплаву системи Mg – Zr – Nd, відлитого за стандартною технологією, являла собою  $\delta$ -твердий розчин з наявністю евтектоїду ( $\delta + \gamma$  фаза) сферичної форми та окремих інтерметалідів  $\gamma$ -фази (рис. 2, а).

Уведення та підвищення концентрації графітового модифікатора у сплаві сприяло зменшенню розмірів та кількості евтектоїдних виділень (рис. 2, б–г). При цьому величина мікрозерна зменшувалися в

1,5 раза, а розміри структурних складових – удвічі (табл. 1).

Установлено, що мікротвердість евтектоїдних виділень литого сплаву була значно вищою за показниками матричного  $\delta$ -твердого розчину. У термообробленому сплаві спостерігалось збільшення мікротвердості матриці та зниження твердості евтектоїду, що свідчить про підвищення однорідності термообробленого сплаву. Присадка вуглецю від 0,05 до 0,3 % сприяла підвищенню мікротвердості структурних складових (табл. 1) і, як наслідок, підвищенню міцності сплаву (табл. 2).

Модифікування магнієвого сплаву дрібнодисперсним графітовим порошком

(0,05...0,1 %) сприяло підвищенню його пластичності за рахунок утворення додаткових центрів кристалізації та подрібнення зерна металу. Подальше

підвищення кількості модифікатора, що вводиться, спричинювало деяке зниження фізико-механічних властивостей матеріалу (табл. 2).

Таблиця 1

## Розміри структурних складових та їх мікротвердість у зразках із магнієвого сплаву

Присадка модифікатора (С), мас. частка, %	Розміри структурних складових, мкм		Мікротвердість, НV, МПа	
	евтектоїд	мікрозерно	матриця	евтектоїд
без модиф.	60...330	160...280	771,9...899,2	1 011,7...1 119,5
0,05	60...240	100...210	984,5...1 045,0	1 292,8...1 387,4
0,1	60...200	80...200	1 014,5...1 054,3	1 296,4...1 621,7
0,3	50...180	60...180	1 065,3...1 268,9	1 357,5...1 787,7

Таблиця 2

## Механічні властивості зразків із магнієвого сплаву з присадкою графітового порошку

Присадка модифікатора (С), мас. частка, %	Механічні властивості			
	без термообробки		після термообробки	
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
без модифікатора	153	1,9	223	2,9
0,05	163	2,5	231	4,9
0,1	178	3,1	240	4,8
0,3	173	3,0	236	3,5

На підставі вищевикладеного можна зазначити, що модифікування магнієвого сплаву вуглецем до 0,1 % сприяло підвищенню його механічних властивостей внаслідок додаткового зміцнення структурних складових сплаву та подрібнення зерна. Термічна обробка сприяла підвищенню однорідності сплаву внаслідок перерозподілу елементів між осями та міжосьовими просторами дендритів, що зумовлювало вирівнювання властивостей вздовж перерізу металу. Присадка у розплав більше 0,1 % вуглецю спричинювала забруднення металу плівками, збільшення пористості матеріалу і, як наслідок, зменшення його механічних характеристик.

Ефективність очищення розплаву вапняком, магnezитом і графітом порівнювали способом визначення характеристик поверхневої взаємодії у

системах: сплав – фільтр, флюс – фільтр, сплав – включення, флюс – включення.

Аналіз результатів досліджень (табл. 3) показав, що поверхневий натяг ( $\sigma_{p,r}$ ) на границі сплав – газ у системах сплав – карбонатова підкладка та сплав – оксид перебував на рівні 71...80 МДж/м<sup>2</sup>.

Флюс розтікався на карбонатних матеріалах і практично не змочував оксидні, що спричиняло різні значення поверхневого натягу ( $\sigma_{p,r}$ ) на підкладках з оксидів та карбонатів. Адгезія ( $A_a$ ) на границі розділу флюс – підкладка з CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> та графіту становила 131, 127 та 124 МДж/м<sup>2</sup> відповідно, що у 2...3 рази більше, ніж адгезія на границі флюс – підкладка з оксидів. У системах сплав – підкладка з карбонатів та сплав – оксид менший кут змочування і відповідно велика робота адгезії отримані для матеріалу з CaCO<sub>3</sub>.

Таблиця 3

## Характеристики поверхневої взаємодії між сплавом, флюсом та матеріалом підкладок (середні показники)

Матеріал підкладки	$\sigma_{p,r}$ , МДж/м <sup>2</sup>	$\theta$ , °	$A_{a,r}$ , МДж/м <sup>2</sup>	$A_{a,k}$ , МДж/м <sup>2</sup>	$KK_p$ , МДж/м <sup>2</sup>
	сплав/ флюс	сплав/ флюс	сплав/ флюс	сплав/ флюс	сплав/ флюс
1	2	3	4	5	6
CaCO <sub>3</sub>	80/79	128/49	32/131	158/155	-126/-25

Закінчення таблиці 3					
1	2	3	4	5	6
MgCO <sub>3</sub>	71/78	141/53	17/127	141/156	-125/-31
графіт	73/76	155/50	9/124	143/152	-138/-26
SiO <sub>2</sub>	72/103	131/132	24/35	139/204	-116/-170
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75/100	138/144	21/20	149/200	-129/-183
MgO	71/102	149/138	12/29	141/203	-130/-174

Рафінувальна властивість флюсу ( $W_{фл.}$ ) характеризується роботою адгезії до металу. Міжфазний натяг (адгезія) на границі сплав – флюс становить:  $\sigma_{р.г.} = 79$  МДж/м;  $\theta = 49$ . Адгезія включень до металу серед флюсу складала для SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і MgO відповідно 140, 143 та 132 МДж/м<sup>2</sup>. Враховуючи, що рафінувальна властивість флюсу ( $W_{фл.}$ ) зростає зі зменшенням роботи адгезії, можна зробити висновок, що флюс адсорбує ці

включення, але більш ефективно – оксиди магнію (рис. 3, а).

Ефективність рафінування характеризується сумарною енергією зв'язку сорбент – включення ( $W_{еф.}$ ) у системі: твердий фільтр (сорбент) – металевий розплав – включення (флюс). Повнота видалення включень у розплаві знижувалася під час фільтрації від вапняку до магнезиту та графіту – 279, 259 та 250 МДж/м<sup>2</sup> відповідно (рис. 3, б).

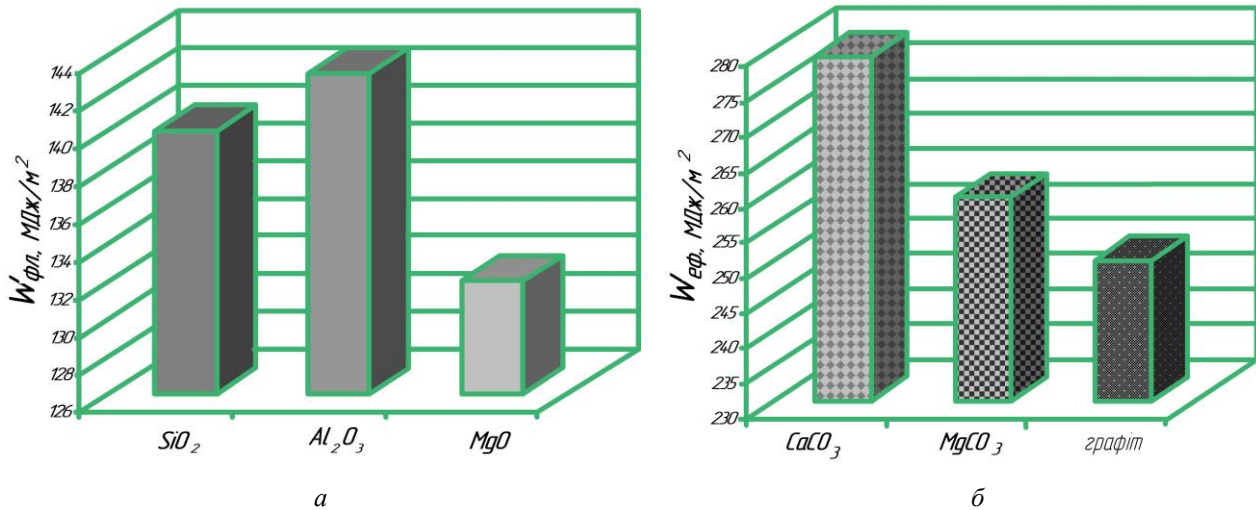


Рис. 3. Рафінувальна здатність флюсу до включень (а) та ефективність рафінування розплаву матеріалами фільтра (б)

Глибину взаємодії між сплавом та матеріалом фільтра оцінювали металографічним аналізом. Установили, що магнієвий розплав проникав у

матеріал фільтра з CaCO<sub>3</sub> на глибину 180 мкм, що значно перевищувало дію графіту (10 мм) і магнезиту (12 мм) (рис. 4).

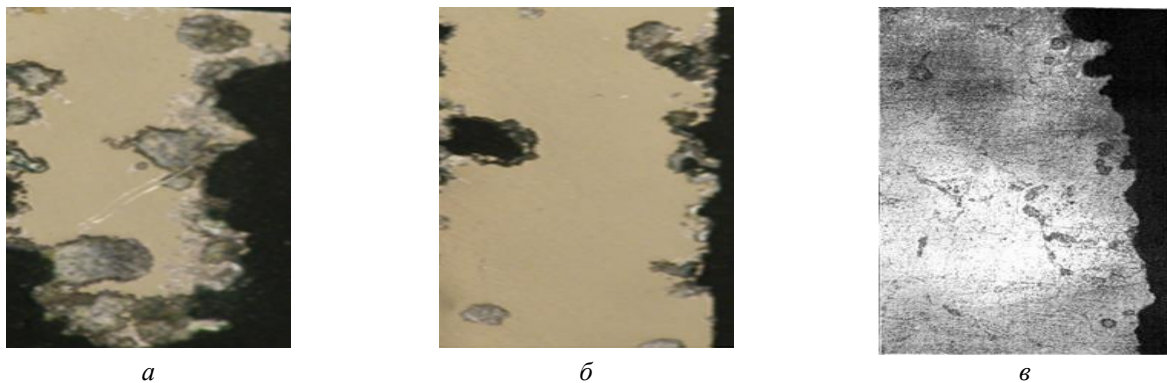


Рис. 4. Мікроструктура границі взаємодії металу з фільтром ( $\times 500$ ): а – з вапняку; б – із графіту; в – з магнезиту

У поверхневій зоні контакту досліджуваних крапель з матеріалом підкладок спостерігали підвищену (порівняно з рештою об'єму краплі) кількість інтерметалідів. Установлено, що більше інтерметалідів виявлено в поверхневій зоні краплі при контакті з магнезитовою підкладкою. Розміри інтерметалідів досягали 25 мкм, що у 3...4 рази більше, ніж у краплях при контакті з вапняком та графітом. Величина мікрозерна у матеріалі всіх досліджуваних крапель перебувала на одному рівні (табл. 4).

Мікротвердість  $\delta$ -твердого розчину в поверхневих зонах крапель всіх варіантів була дещо вищою, ніж у центрі (табл. 5). Підвищена мікротвердість матриці, евтектики та інтерметалідів спостерігалася у металі краплі, отриманої на підкладці з магнезиту, що швидше за все пов'язано з процесами дифузії елементів підкладки у металевий розплав.

Кількісний аналіз структурних складових у зразках із досліджуваного сплаву показав, що за взаємодії металу з матеріалами підкладки утворювалися як поодинокі інтерметаліди, так і їх скупчення. Їх індекс та середній розмір зростали від магнезиту до графіту та вапняку (табл. 6). Після контакту металу з матеріалами підкладок змінювалася топографія та морфологія включень.

Фільтрація сплаву через магнезит, вапняк та графіт сприяла помітному подрібненню мікрозерна металу, особливо у разі використання комплексного фільтра, що містить рівні частини магнезиту, графіту та вапняку. Механічні випробування показали, що фільтрація розплаву підвищувала міцнісні ( $\sigma_b$ ) і пластичні ( $\delta$ ) характеристики металу. Вищі значення механічних властивостей та щільності отримані на зразках, виготовлених із застосуванням комплексного фільтра (33 % магнезиту + 33 % графіту + 33 % вапняку) (табл. 7).

Таблиця 4

Структурні складові крапель розплаву при контакті з різними підкладками

Матеріал підкладки	Глибина взаємодії, мкм	Розмір мікрозерна, мкм	Розмір $\gamma$ -фази, мкм
вапняк	до 180	80...155	2,0...5,0
графіт	до 12	80...185	3,0...7,0
магнезит	до 10	75...150	3,0...20,0

Таблиця 5

Мікротвердість крапель розплаву при контакті з різними підкладками

Матеріал підкладки	Мікротвердість, НВ, МПа			
	матриця		$(\delta + \gamma)$ -фаза	$\gamma$ -фаза
	край	центр		
вапняк	860,0...978,5	735,4...934,5	1 190,4...1 372,9	2 827,8
графіт	796,0...899,1	764,8...795,0	1 228,8...1 894,6	2 830,8
магнезит	897,1...1 174,8	827,0...1 032,3	1 229,8...2 295,9	2 825,8...5 145,0

Таблиця 6

Кількісна оцінка включень у дослідних зразках магнієвого сплаву

Матеріал фільтра	Одиничні включення		Скупчення включень	
	індекс, I	середній розмір d, мкм	індекс, I	середній розмір d, мкм
магнезит	0,00708	3,899	0,00143	9,988
графіт	0,00910	4,495	0,00125	8,912
вапняк	0,01180	5,673	0,00274	17,15

**Фізико-механічні властивості термооброблених зразків із магнієвого сплаву після різних варіантів фільтрації (середні значення)**

Варіант фільтрації	Фізико-механічні властивості		
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	фізична густина, г/см <sup>3</sup>
без фільтрації	249,0	3,4	1,6951
магнезит	256,0	4,7	1,6984
графіт	255,0	4,9	1,6855
вапняк	282,0	5,7	1,6978
комплексний	291,0	6,6	1,7298

Таким чином, кращі властивості магнієвого сплаву досягаються при фільтрації через комплексний фільтр, що містить вапняк, магнезит і графіт. Застосування комплексного фільтра [7] при виробництві виливків з магнієвих сплавів дозволяє підвищити їхню якість, фізико-механічні властивості та підвищити вихід придатного лиття.

### Висновки

1. Присадки до магнієвого сплаву дисперсного графітового порошку до 0,1 % сприяють підвищенню механічних властивостей металу внаслідок додаткового зміцнення як твердого розчину, так і евтектоїду. При цьому змінюються параметри евтектичного перетворення і відбувається зменшення евтектоїду  $\delta + \gamma$ . Термічна обробка сприяє підвищенню однорідності металу між осями і міжосьовими просторами дендритів.

2. Установлено, що в процесі фільтрації магнієвого розплаву через вуглецевмісні

матеріали (магнезит, вапняк та графіт) забезпечувалося ефективно його рафінування. Застосування фільтра, що містить рівні кількості магнезиту, графіту і вапняку під час розливання магнієвого сплаву, забезпечувало зменшення розмірів структурних складових металу у 1,5 раза, підвищувало його міцність на 20 % і пластичність майже вдвічі.

3. З'ясовано, що за взаємодії матеріалів фільтра з магнієвим розплавом відбувається ефективно його модифікування. При цьому в структурі сплаву спостерігається підвищена кількість інтерметалідної  $\gamma$ -фази, що забезпечує підвищення мікротвердості структурних складових сплаву і сприяє підвищенню його фізико-механічних характеристик.

4. Застосування вуглецевмісних матеріалів для модифікування та рафінування сплавів на основі магнію досить ефективно для підвищення якості лиття медичного призначення та поліпшення його фізико-механічних властивостей.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Маковский С. Г., Лукинов В. В., Цивирко Э. И. Нанотехнология в повышении свойств литейных магниевых сплавов. *Вестник двигателестроения*. 2016. № 1. С. 92–94.
2. Pekguleryuz Mihriban O., Kainer U. Karl, Kaya A. Arslan *Fundamentals of Magnesium alloy metallurgy*. Woodhead Publishing, 2013. 376 p.
3. Hai-Lin Chen, Li Nan, Andre Klostermeier, Rainer Schmid-Fetzer. Measurement of carbon solubility in magnesium alloys using GD-OES. *J. Anal. At. Spectrom.* 2011. № 26. Pp. 2189–2196.
4. StJohn David H., Ma Qian, Easton A. Mark, Peng Cao. Hildebrand Grain refinement of magnesium alloys. *Metallurgical and materials transactions*. 2005. Vol. 36A. Pp. 1669–1679.
5. Shalomeev V., Tsvirco E., Vnukov Yev., Osadchaya Yu., Makovskyi S. Development of new casting magnesiumbased alloys with increased mechanical properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4 (1–82). Pp. 4–10.
6. Brungs Dieter, Mertz Andreas Innovations in casting alloys – aluminium and magnesium castings. *Cast. Plant and Technol. Int.* 2000. Vol. 16, № 4. Pp. 8–12.
7. Shalomeev Vadim, Aikin Nikita, Chorniy Vadim, Naumik Valeriy. Design and examination of the new biosoluble casting alloy of the system Mg – Zr – Nd for osteosynthesis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 12 (97). Pp. 40–48.



8. Шаломеев В. А., Цивирко Э. И., Лысенко Н. А., Ключихин В. В. Ресурсосберегающая технология рафинирования печных донных остатков магниевого сплава МЛ5. *Вестник двигателестроения*. 2007. № 2. С. 77–82.
9. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. Москва : САЙЕНС ПРЕСС, 2007. 192 с.
10. Якобашвили С. Б. Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков. Київ : Техніка, 1970. 207 с.
11. Калмыков В. А., Кондратьев А. С., Фролов Ю. А. и др. Фильтрационное рафинирование литейных сталей и сплавов. Ленинград : ЛДНТП, 1987. 24 с.

## REFERENCES

1. Makovskij S.G., Lukinov V.V. and Civirko E.I. *Nanotekhnologiya v povyshenii svojstv litejnyh magnievyh splavov* [Nanotechnology in Improving the Properties of Cast Magnesium Alloys]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of Engine Engineering]. 2016, no. 1, pp. 92–94. (in Russian).
2. Mihriban O. Pekguleryuz, Karl U. Kainer and A. Arslan Kaya. *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. Woodhead Publishing, 2013, 376 p.
3. Hai-Lin Chen, Nan Li, Andre Klostermeier and Rainer Schmid-Fetzer. Measurement of carbon solubility in magnesium alloys using GD-OES. *J. Anal. At. Spectrom.* 2011, no. 26, pp. 2189–2196.
4. David H. StJohn, Ma Qian, Mark A. Easton and Peng Cao. Hildebrand Grain refinement of magnesium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2005, vol. 36A, pp. 1669–1679.
5. Shalomeev V., Tsivirco E., Vnukov Yev., Osadchaya Yu. and Makovskiy S. Development of new casting magnesiumbased alloys with increased mechanical properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016, no. 4 (1–82), pp. 4–10.
6. Brungs D. and Mertz A. Innovations in casting alloys – aluminium and magnesium castings. *Cast. Plant and Technol. Int.* 2000, vol. 16, no. 4, pp. 8–12.
7. Shalomeev Vadim, Aikin Nikita, Chorniy Vadim and Naumik Valeriy. Design and examination of the new biosoluble casting alloy of the system Mg – Zr – Nd for osteosynthesis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, no. 12 (97), pp. 40–48.
8. Shalomeev V.A., Civirko E.I., Lysenko N.A. and Klochihin V.V. *Resursosberegayushchaya tekhnologiya rafinirovaniya pechnyh donnyh ostatkov magnievogo splava ML5* [Resource-saving technology for refining furnace bottom residues of magnesium alloy ML5]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of Engine Engineering]. 2007, no. 2, pp. 77–82. (in Russian).
9. Meleshko A.I. and Polovnikov S.P. *Uglerod, uglerodnye volokna, uglerodnye kompozity* [Carbon, Carbon Fibers, Carbon Composites]. Moscow : SAJENS PRESS, 2007, 192 p. (in Russian).
10. Yakobashvili S.B. *Poverhnostnye svojstva svarochnyh flyusov i shlakov* [Surface properties of welding fluxes and slags]. Kyiv : Tekhnika Publ., 1970, 207 p. (in Russian).
11. Kalmykov V.A., Kondrat'ev A.S., Frolov Yu.A. and oth. *Fil'tracionnoe rafinirovanie litejnyh stalej i splavov* [Filtration refining of cast steels and alloys]. Leningrad : LDNTP, 1987, 24 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 09.01.2022.