

УДК 621.74:669.721

Айкін М. Д., д-р техн. наук Шаломєєв В. А., Лук'яненко О. С.

Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИСОКИХ ШВИДКОСТЕЙ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ СИСТЕМИ Mg-Zr-Nd

Мета роботи. Вивчення впливу високих швидкостей охолодження на структуроутворення і механічні властивості біорозчинного сплаву системи Mg-Zr-Nd.

Методи дослідження. Металографічний аналіз. Визначення механічних властивостей при розтягуванні (ГОСТ 1497-84). Комп'ютерне моделювання (ProCast).

Отримані результати. Визначено вплив швидкості охолодження на середній розмір зерна та механічні властивості дослідного сплаву. Показано, що підвищення швидкості охолодження позитивно впливає на зазначені параметри.

Визначено, що надвисока швидкість охолодження (близько 55 °C/c), що забезпечується охолодженням мідної форми у рідкому азоті, призводить до утворення наддрібної структури та змінює характер розподілу зміцнювальних фаз, приводячи до їх рівномірному розподілу за об'ємом мікроструктури та значному підвищенню механічних властивостей сплаву.

Наукова новизна. На основі даних комп'ютерного моделювання мікроструктури дослідного сплаву Mg-Zr-Nd побудовано рівняння регресії, що дозволяє прогнозувати середній розмір зерна сплаву. Досліджено структуроутворення та характер розподілу частинок зміцнювальних фаз при надвисоких швидкостях охолодження (близько 55 °C/c), що забезпечуються охолодженням мідної форми у рідкому азоті. Отримані емпіричні залежності, що дозволяють спрогнозувати механічні властивості сплаву в залежності від швидкості охолодження.

Практична цінність. Отримані емпіричні залежності дозволяють прогнозувати та отримувати кінцевий сплав з широким можливим спектром механічних властивостей, сприятливий для виконання різноманітних задач, що стоять перед біорозчинними імплантатами, використовуючи максимально доступні методи литва.

Ключові слова: магнієвий сплав, швидкість охолодження, комп'ютерне моделювання, зміцнювальна фаза, механічні властивості, подрібнення зерна, імплантат, рідкий азот.

Вступ

Метод лікування переломів шляхом скріплення кісткових уламків за допомогою імплантатів, званий остеосинтезом, використовується з середини XIX століття [1]. Основною характеристикою імплантатів для остеосинтезу є їх здатність з мінімальними травмами м'яких і кісткових тканин зберігати нерухомість уламків і осколків, забезпечуючи функціонування і стійкість пошкодженої кінцівки на весь період лікування. Для цього він повинен зберігати необхідний рівень механічних властивостей протягом всього періоду лікування перелому.

Традиційно в медицині найбільш ефективними вважалися корозійностійкі металеві матеріали, такі як нержавіюча сталь або титан. Однак, такі довговічні імплантати є чужорідними тілами, які несуть сильний ризик місцевого запалення. Крім того, вони ускладнюють процеси регенерації організму і подальшого лікування [2]. Здатність імплантатів до розчинення (біодеградації) є великою перевагою, адже виключає необхідність повторної операції з видалення імплантату. Недоліком біорозчинних сплавів є зниження механічних характеристик по мірі їх біодеградації.

© Айкін М. Д., Шаломєєв В. А., Лук'яненко О. С., 2020
DOI 10.15588/1607-6885-2020-1-4

Раніше авторами був розроблений біорозчинний магнієвий сплав системи Mg-Zr-Nd [3], який зберігає високий рівень механічних властивостей протягом тривалого впливу біокорозії (3 місяці). Але варто зазначити, що застосування конструкцій з біорозчинних сплавів ускладнене тим, що дані конструкції мають складну конфігурацію зі змінним, часто малим перерізом, наявністю різьби та отворів. Це призводить до підвищення швидкості біодеградації і більш істотного падіння механічних властивостей в подібних місцях. Виходячи з цього, доцільно отримання максимально високого комплексу механічних властивостей сплаву. Одним з доступних способів підвищення механічних властивостей є підвищення швидкості охолодження виливків, що досягається застосуванням різних матеріалів ливарних форм і охолоджувальних середовищ.

Завданням даного дослідження є вивчення впливу швидкості охолодження на структуроутворення і механічні властивості біорозчинного магнієвого сплаву системи Mg-Zr-Nd.

1 Огляд літератури

Швидкість охолодження при литті є важливим термодинамічним параметром, що може впливати на пе-

ребіг процесів кристалізації, розподіл зміцнювальних фаз та механічні властивості [4]. На швидкість охолодження сплавів при литті впливають: матеріал для ливарної форми, охолоджувальне середовище, конфігурація та товщина ливарної форми.

Висока ступінь переохолодження, викликана більшою швидкістю охолодження, призводить до подрібнення зерна сплаву WE43. При зміні часу затвердіння з 304,95 с до 30,75 с середня площа зерна сплаву зменшувалась з 1358 мкм² до 562 мкм² [5].

Швидкість охолодження впливає на дендритну морфологію та відстань між осями дендритів 2-го порядку для сплавів AZ91 (Mg-Al-Zn), AM60B (Mg-Al-Mn) та AE44 (Mg-4Al-P3M). При підвищенні швидкості охолодження цих сплавів (від 1 °C/хв до 20 °C/хв) морфологія дендритів змінювалась з рівновісової до стовпчастої. При цьому, відстань між осями дендритів 2-го порядку знижувалась з 25 до 10 мкм для AZ91, з 30 до 15 мкм для AM60B та з 45 до 10 мкм для AE44. Також, авторами повідомляється про суттєве зменшення середнього розміру частинок вторинної фази. Більш високі швидкості охолодження призводили до утворення скупчень вторинної фази, в той час як при менших швидкостях охолодження частинки були розсіяні по структурі [6]. Схожі результати були отримані для сплаву ZK60 (Mg-Zn-Zr). Швидкість охолодження вище за 20 °C/с сприяла подрібненню зерна та зниженню відстані між осями дендритів 2-го порядку [7].

Дослідження [4, 8] підтверджують позитивний вплив підвищення швидкості охолодження для сплаву GW103K (Mg-P3M-Y-Zr). При зміні швидкості охолодження з 1,4 °C/с до 3,5 °C/с, середній розмір зерна знижувався з 59 до 41 мкм, а кількість вторинної фази, навпаки, підвищувалась з 17,6 % до 22 %. Подрібнення зерна автори пов'язують з високою швидкістю охолодження, що призводить до прискорення початку процесів утворення зерен та збільшення кількості зародків зерен через підвищену ступінь переохолодження.

Дослідження сплаву NZ30K (система Mg-Zr-Nd), виплавленого за технологіями лиття у піщано-гліністу форму, неперервного лиття у кристалізатор та лиття у металевий кокіл показали, що спосіб лиття який забезпечував більш швидку кристалізацію, мав кращі показники механічних властивостей [9].

Отже, підвищення швидкості охолодження є підтвердженим методом модифікування мікроструктури магнієвих сплавів.

2 Матеріали і методи дослідження

Дослідження проводилися на дослідних зразках біорозчинного сплаву Mg-Zr-Nd (Zr – 1,15...1,35 %, Nd – 3,05...3,25 %, Zn – 0,5...0,7 %, решта – Mg).

В тигельну піч ПІМ-500 ємністю 0,5 т, потужністю 140 кВт і продуктивністю 230 кг/година, завантажували заздалегідь нагріті шихтові матеріали і після розплавлення розливали у виймальні тиглі при 650...730 °C. Виймальні тиглі встановлювали в роздавальні печі, в яких доводили сплав за хімічним складом і рафінували флю-

сом ВІ-2 при 740...760 °C. Після цього заливали зразки у ливарні форми. Матеріалами форми були: піщано-глініста суміш, сталевий кокіл зі сталі Ст. 3, мідний кокіл. Як середовища охолодження використовувались повітря, технічна вода та рідкий азот. Товщина стінок ливарних форм – 20 мм. Як середовища охолодження використовувались повітря, технічна вода та рідкий азот. Швидкість охолодження визначали за показами хромель-алюмелевих термопар ТХА (тип К) з діапазоном вимірювання температур від -400 °C до +1200 °C, що закарбовували у ливарну форму.

Шихтою для сплавів були наступні матеріали: магній первинний чушковий Мг 90, Мг 95, Мг 96 (ГОСТ 804-93) [10], цинк чушковий Ц2 (ГОСТ 3640-94) [11], лігатура Mg-Nd, лігатура Mg-Zr Л2.

Дослідження металу проводили після термічної обробки в термічній шахтній печі типу Белв'ю, потужністю 112 кВт і продуктивністю 95 кг/година, а також у термічній печі типу ПАП-4М, продуктивністю 50 кг/година, за режимом: нагрів 540^{±5} °C, витримка 8 годин, охолодження на повітрі і старіння при 200^{±5} °C, витримка 16 годин, охолодження на повітрі.

Якість зразків в промислових умовах визначали за допомогою рентгенівського методу апаратами РАП-150/300, РУП 150/300, РУП 400-5 і МИРА-2Д і реєстрували отримані дані на рентгенівські плівки РМ-1, РТ-1, РТ-2.

Механічні властивості зразків з магнієвих сплавів та кісткового матеріалу визначалися за допомогою розривної машини «INSTRUN 2801» за ГОСТ 1497 – 84 [12] та ГОСТ 2856 – 79 [13]. Механічні властивості визначали на циліндричних зразках (тип VI, номер 1; тип III, номер 7).

Мікроструктуру зразків після механічних випробувань вивчали за допомогою оптичних мікроскопів «Neophot 32» та «OLYMPUS IX 70» при збільшеннях 100, 200, 350 та 500 разів. Шліфи для аналізу мікроструктури вивчали після термічної обробки. Склад реактиву для шавлення: 1 % азотної кислоти, 20 % оцтової кислоти, 19 % дистильованої води, 60 % етиленгліколя. Статистичні дані щодо середнього розміру зерна мікроструктури отримувались у відповідності до ГОСТ 21073.4-75 [14] при збільшенні ×100.

Для дослідження впливу швидкості охолодження на мікроструктуру та властивості розробленого магнієвого сплаву використовували програмний комплекс ProCast. Для цього побудовано макет зразка та ливарної форми у форматі .iges за допомогою програми SolidWorks та імпортовано у програмне середовище ProCast (рис. 2). Розрахунки виконувались для режиму гравітаційного лиття. Для зразка та ливарної форми задавали відповідні матеріали та вводили параметри лиття. Вихідні параметри включали до себе: напрямок лиття; температури вихідного сплаву, форми та навколишнього середовища; коефіцієнти теплопровідності охолоджуючого середовища та поверхні, де відбувається теплообмін.

Моделювання мікроструктури дослідного сплаву виконувалось за допомогою модулю САФІ, що входить

до складу програмного комплексу ProCast (рис. 2). Для побудови мікроструктури програмою допускається нор-

мальний розподіл зародків зерен для об'ємної рідини та границі розділу між рідиною та ливарною формою.

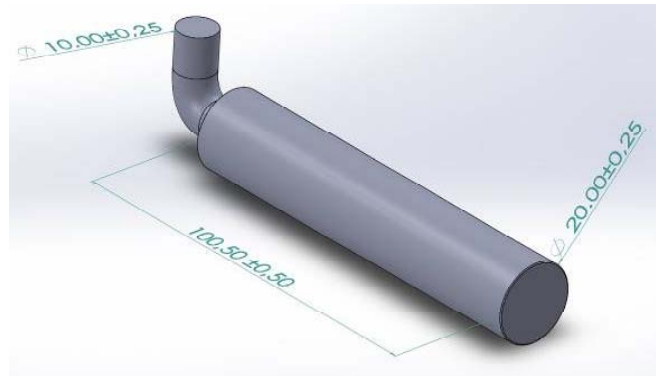


Рис. 1. Тривимірна модель формозразку

Composition						
Thermal Fluid Stress Microstructure CCT/TTT +/-						
Property	Value	Value Unit				
Solid Diffusion Model	Lever					
	Compute Properties					
Phase Fraction						
<input checked="" type="checkbox"/> CAFE Computations						
Gibbs-Thompson Coefficient	2e-07					
Dt max	10					
Dt max(fit)	10					
	Compute CAFE					
a2	1.100075e-08	m/sec-K ²				
a3	9.588695e-10	m/sec-K ³				
Element	%Composition	Recommended R...	m	k	D1	
<input checked="" type="checkbox"/> Base	Mg					
Ag		0 ~ 2				
Al		0 ~ 10				
C		0 ~ 0.5				
Ca		0 ~ 10				
Ce		0 ~ 10				
Cu		0 ~ 10				
Dy		0 ~ 2				
Fe		0 ~ 2				
Gd		0 ~ 10				
La		0 ~ 10				
Li		0 ~ 10				
Mn		0 ~ 10				
Nd	3.12	0 ~ 10	-16.9873	0.0153048	3e-09	
Ni		0 ~ 2				
Pr		0 ~ 2				
Sc		0 ~ 2				
Se		0 ~ 0.5				
Si		0 ~ 10				
Sn		0 ~ 10				
Sr		0 ~ 10				
Y		0 ~ 10				
Zn	0.1	0 ~ 10	-44.2881	0.0493679	3e-09	
Zr	1.25	0 ~ 2	-215.52	5.02131	3e-09	

Рис. 2. Вікно для вводу та розрахунку параметрів дослідного сплаву

3 Результати дослідження та їх обговорення

3.1 Моделювання та дослідження впливу зміни швидкості охолодження на параметри мікроструктури сплаву Mg-Zr-Nd

Зміна швидкості охолодження забезпечувалась різними умовами лиття:

1. Лиття в піщано-гліністу форму (ПГФ) (варіант 1);
2. Лиття в сталевий кокіль, охолодження повітрям (варіант 2);
3. Лиття в мідний кокіль, охолодження повітрям (варіант 3);
4. Лиття в мідний кокіль, охолодження водою (варіант 4);
5. Лиття в мідний кокіль, охолодження рідким азотом (варіант 5).

Моделювання мікроструктури виливків, що проводили за допомогою модулю САФІ показали, що середній розмір зерна змодельованої структури (рис. 3) близький до розміру зерна дослідних зразків (рис. 4).

Кількісний аналіз розміру зерна змодельованих мікроструктур дозволив отримати рівняння регресії, що має вигляд експоненційної залежності, та описує вплив швидкості охолодження на середній розмір зерна дослідного сплаву (1).

$$D = 130,1 * e^{-0,04 * V_{ox}} \pm 9,3, \text{ мкм} \quad (1)$$

$$R = 0,985; R^2 = 0,971; p = 0,95.$$

Розраховані значення середнього розміру зерна за допомогою отриманого рівняння близькі до значень середнього розміру зерна дослідних зразків (табл. 2).

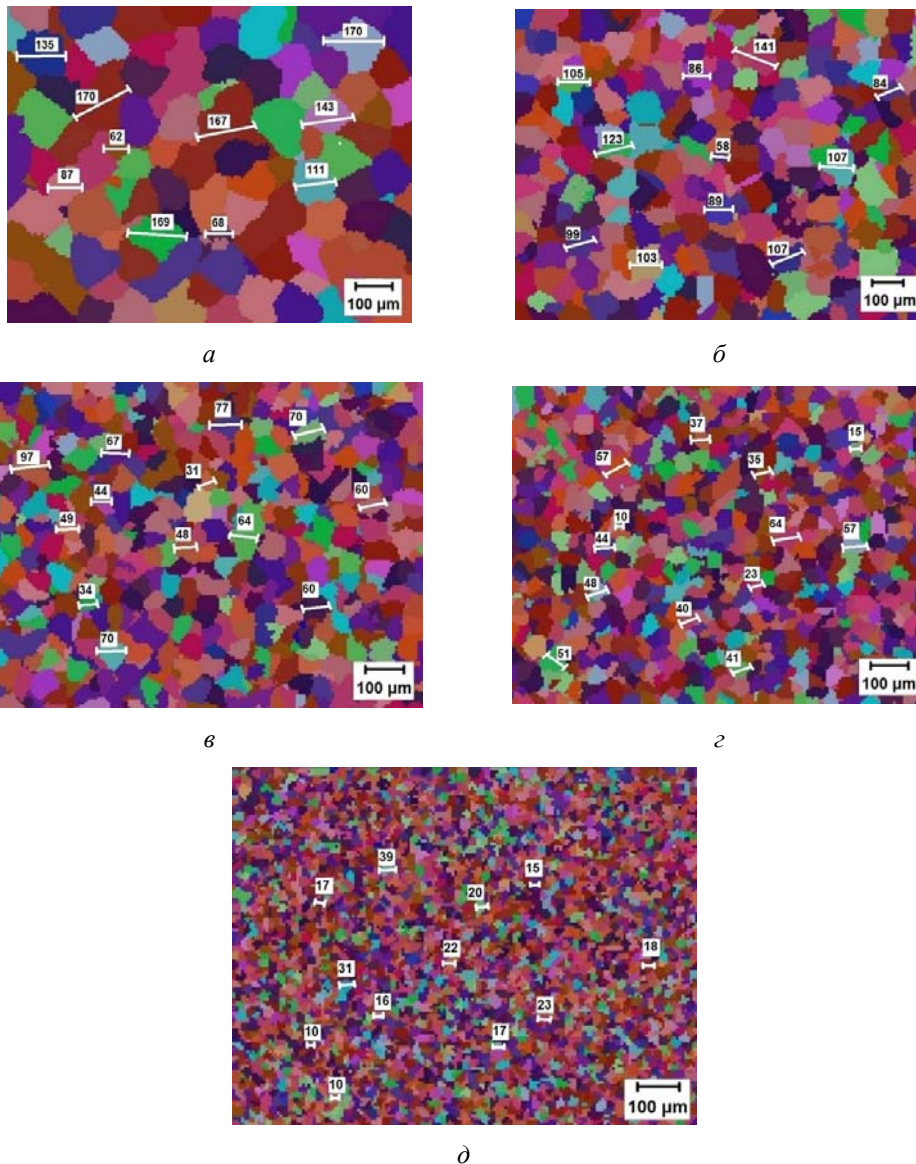


Рис. 3. Модель впливу швидкості кристалізації на мікроструктуру сплаву: а – варіант 1; б – варіант 2; в – варіант 3; г – варіант 4; д – варіант 5

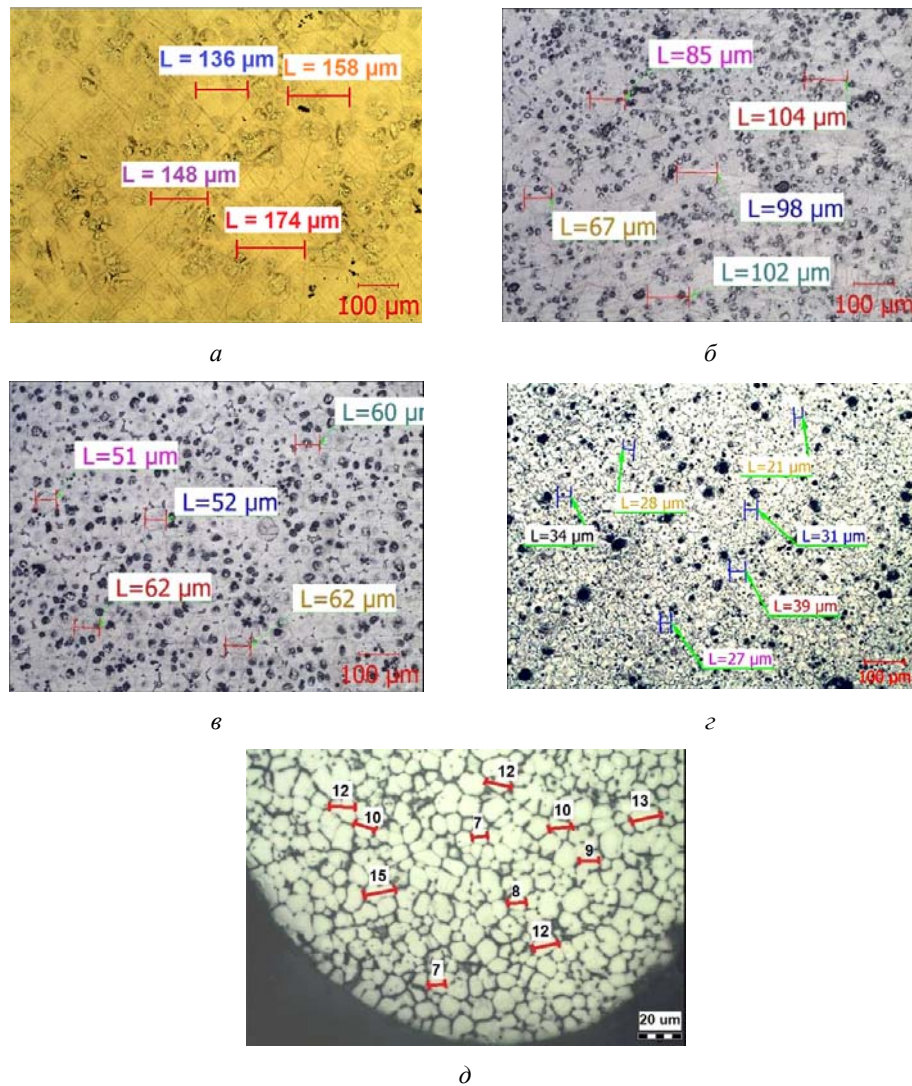


Рис. 4. Мікроструктури дослідних зразків з розробленого сплаву Mg-Zr-Nd при різних швидкостях кристалізації:

$a-e - \times 100$, $d - \times 500$: a – варіант 1; b – варіант 2; c – варіант 3; d – варіант 4; e – варіант 5

Таблиця 2 – Параметри мікроструктури зразків дослідного сплаву, відлитих за різними варіантами лиття

Варіант лиття	Розрахунки ProCast		Аналіз зразків		Середній розмір зерна за рівнянням (1), мкм
	Середня швидкість охолодження, °C/c	Середній розмір зерна, мкм	Середня швидкість охолодження, °C/c	Середній розмір зерна, мкм	
Варіант 1	1,7	131,2	1,0	148,2	138,0
Варіант 2	8,0	96,2	9,0	90,6	90,1
Варіант 3	14,8	65,3	17,0	58,8	55,7
Варіант 4	21,0	49,5	26,5	36	44,7
Варіант 5	53,3	15,2	55,0	11	14,3

Таким чином, отримана залежність бути використана для передбачення середнього розміру зерна мікроструктури дослідного сплаву в залежності від швидкості охолодження.

3.2 Дослідження мікроструктури і механічних властивостей зразків з розробленого магнієвого сплаву Mg-Zr-Nd з різною швидкістю охолодження

Мікроструктура зразків після термообробки при $V_{ox} = 1 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ (рис. 5a), відповідала стандартній для магнієвих сплавів системи Mg-Zr-Nd. Мікроструктура зразків при $V_{ox} = 9 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ (рис. 5б) відрізнялась більшою щільністю скупчень, що говорить про підвищену дисперсність цирконідів цинку Zr_2Zn_3 , менший розмір частинок нерозчиненої евтектики, а також більшу кількість дис-

перших частинок зміцнювальної β'' - фази. Подібний характер змін в мікроструктурі спостерігався при подальшому підвищенні швидкості охолодження до $V_{ox} = 17^\circ\text{C}/\text{c}$ (рис. 5б) та $V_{ox} = 26,5^\circ\text{C}/\text{c}$ (рис. 7з). Кількість цирконідів та частинок зміцнювальної фази підвищувалась, а розмір скупчень – зменшувався. Забезпечення швидкості кристалізації $V_{ox} = 55^\circ\text{C}/\text{c}$ призводило до утворення наддрібної мікроструктури (рис. 5д). Круглих скупчень частинок інтерметалідів та зміцнювальної фази не утворювалось.

Зміна характеру розподілу вторинних фаз в дослідному сплаві при підвищенні швидкості охолодження пов'язано із її впливом на кількість евтектики у литій структурі металу. Із підвищенням швидкості охолодження, кількість та розміри нерівноважної евтектики, що виділилась при литті, знижується [15], що призводить до більш повного її розчинення при гартуванні, знижуючи необхідний час витримки. Внаслідок цього, ефективність подальшого старіння також підвищується, що призводить до виділення більшої кількості частинок

α -цирконію та цирконідів цинку, а також частинок зміцнювальної β'' - фази [16]. Відсутність скупчень фаз при $V_{ox} = 55^\circ\text{C}/\text{c}$ також пов'язано з дуже низькою кількістю евтектики у литій структурі та відсутністю нерозчинених частинок евтектики після гартування, навколо яких, зазвичай, концентруються інтерметаліди та зміцнювальна фаза, призводячи до їх рівномірного розподілу за об'ємом мікроструктури.

Аналіз результатів механічних випробувань (табл. 3) показав, що найменший комплекс властивостей мали зразки, відлиті при швидкості кристалізації $V_{ox} = 1^\circ\text{C}/\text{c}$ ($\sigma_B = 261$ МПа, $\delta = 4,4\%$). Зразки, відлиті при більших швидкостях кристалізації $V_{ox} = 9^\circ\text{C}/\text{c}$, $V_{ox} = 17^\circ\text{C}/\text{c}$ та $V_{ox} = 26,5^\circ\text{C}/\text{c}$ мали вищу границю міцності (на 10,6 МПа; 16,3 МПа; 22,5 МПа) та відносне видовження (на 2%; 2,5%; 3,4%) за рахунок виділення більшої кількості вторинних фаз та подрібнення зерна. Найвищий комплекс механічних властивостей отримано при $V_{ox} = 55^\circ\text{C}/\text{c}$. Відносно $V_{ox} = 1^\circ\text{C}/\text{c}$ границя міцності

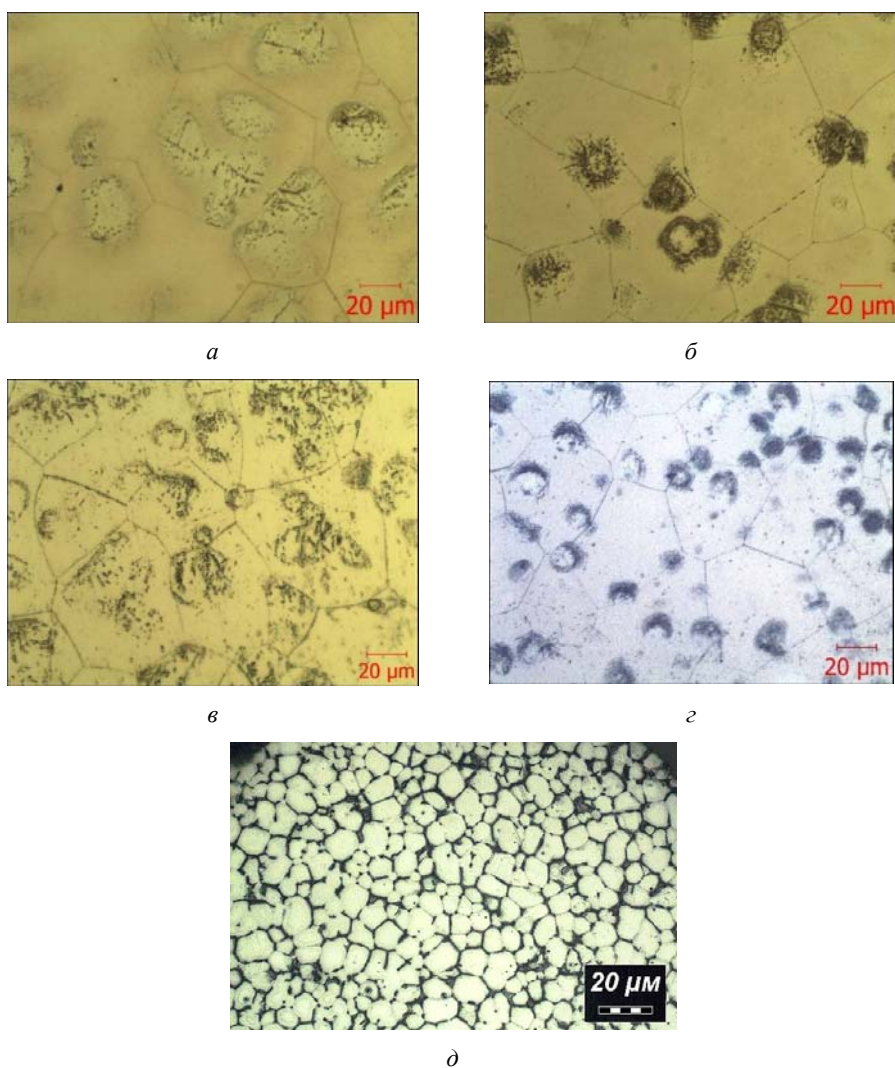


Рис. 5. Мікроструктури зразків після термообробки при використанні різних технологій лиття, $\times 500$: а – $1^\circ\text{C}/\text{c}$; б – $9^\circ\text{C}/\text{c}$; в – $17^\circ\text{C}/\text{c}$; з – $26,5^\circ\text{C}/\text{c}$; д – $55^\circ\text{C}/\text{c}$

σ_B зросла на 55,4 МПа, а відносне видовження δ на 12,6%. Суттєве (майже в 2 рази відносно $V_{ox} = 26,5$ °C/c) підвищення відносного видовження, окрім зменшення розміру зерна, пов'язано із меншою концентрацією напружень, що викликано відсутністю скупчень вторинних фаз та рівномірним розподілом частинок зміцнювальної фази та інтерметалідів. Охолодження сплаву у рідкому азоті наближає його властивості до деформівних сплавів систем Mg-Zr-Nd та Mg-Zn-Zr [17, 18].

За результатами механічних випробувань побудовано емпіричні (2, 3) залежності, що описують вплив швидкості охолодження на механічні властивості дослідного сплаву. Залежність (2) має вигляд рівняння лінійної регресії, а (3) – рівняння експоненціальної регресії.

$$\sigma_B = 0,99 * V_{ox} + 260,4 \pm 2,4, \text{ МПа} \quad (2)$$

$$R_{x,y} = 0,995; R^2 = 0,99; p = 0,95;$$

$$\delta = 4,6 * e^{0,02 * V_{ox}} \pm 0,7, \% \quad (3)$$

$$R = 0,993; R^2 = 0,987; p = 0,95.$$

Розраховані залежності дозволяють спрогнозувати отриману мікроструктуру та механічні властивості дослідного сплаву у будь-якій ділянці виробу. Це особливо важливо для біорозчинних імплантатів, адже, форма та розміри імплантату, складність його конструкції, корозійний вплив та навантаження, що він сприймає в процесі експлуатації, залежать від місця імплантації та властивостей та форми кістки, що скріплюється. Відповідно, до виробів висувається широкий діапазон вимог щодо механічних властивостей. Отримані залежності дозволяють варіювати механічні властивості у відповідності до поставленої задачі.

Таблиця 3 – Результати механічних випробувань дослідних зразків

Швидкість охолодження виливка, °C/c	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %
1	261,1	4,4
9	271,7	6,4
17	277,4	6,9
26,5	283,6	7,8
55	316,5	17,0

Примітка: середні значення по 3 зразкам.

Висновки

1. За допомогою моделювання у програмі ProCast та практичних досліджень впливу швидкості охолодження на мікроструктуру біорозчинного магнієвого сплаву системи Mg-Zr-Nd визначено, що із збільшенням швидкості охолодження розмір зерна сплаву знижується за експоненційною залежністю.

2. Отримано рівняння регресії, що описує вплив швидкості охолодження на розмір зерна дослідного сплаву. Розрахункові значення, отримані за допомогою отриманого рівняння близькі до результатів кількісного аналізу дослідних зразків.

3. Підвищення швидкості охолодження призводило до зменшення кількості виділень евтектики у литій структурі та її більш повному розчиненні при гартуванні, що призводило до підвищеної ефективності старіння. Структура сплаву, охолодженого рідким азотом, відрізнялась відсутністю місць концентрації (скупчень) вторинних фаз, призводячи до рівномірного їх розподілу за об'ємом металу.

4. Проведені механічні випробування дозволили встановити залежності границі міцності та відносного видовження від швидкості охолодження. Відповідні залежності мали вигляд рівнянь лінійної регресії (для границі міцності) та експоненціальної регресії (для відносного видовження).

5. Отримані залежності дозволяють прогнозувати та отримувати кінцевий сплав з широким можливим спектром механічних властивостей, сприятливий для виконання різноманітних задач, що стоять перед біорозчинними імплантатами, використовуючи максимально доступні методи литва.

Список літератури

1. Nelson F. R. A Manual of Orthopaedic Terminology, eighth ed./ F. R. Nelson C. T. Blauvelt. – 2015. – P. 209–282.
2. Влияние биологических сред на имплантаты для остеосинтеза / [Росторгуев Д. Е., Масленников Е. Ю., Таранов И. И. и др.] // Кубанский научный медицинский вестник. – 2013. – № 1 (136). – С. 147–151.
3. Design and examination of the new Biosoluble casting alloy of the system Mg-Zr-Nd for osteosynthesis / [Shalomoev V., Aikin N., Chorniy V., Naumik V.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 1. – № 12 (97). – P. 40–48.
4. Effect of cooling rate on the microstructure, mechanical properties of sand-casting Mg–10Gd–3Y–0.5Zr magnesium alloy / [Pang S., Wu G., Liu W. end etc.] // Materials Science and Engineering A. – 2013. – Vol. 562. – P. 152–160.
5. Effect of mould components on the cooling rate, microstructure, and quality of WE43 magnesium casting alloy / [Dybowski B., Kielbus A., Jarosz R.] // Archives of Metallurgy and Materials. – Vol. 59. – № 4. – P. 1527–1532.

6. Influence of cooling rate on microsegregation behavior of magnesium alloys / [Khan M. I., Mostafa A. O., Aljarrah M. end etc.] // Journals of Materials. – 2014. – P. 1–18.
7. Chunmei Y. Effects of cooling rate on solidification microstructure of ZK60 magnesium alloy / [Chunmei Y., Dingfei Z., Peidao D.] // Materials Science Forum. – 2005.– Vol. 488–489. – P. 295–298.
8. Influence of cooling rate on solidification behavior of sand-cast Mg-10Gd-3Y-0.4Zr alloy / [Pang S., Wu G., Liu W. end etc.] // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2014. – № 24. – P. 3413–3420.
9. Microstructure and mechanical properties of NZ30K alloy by semicontinuous direct chill and sand mould casting processes / [Xingwei Z., Jie D., Wencai L., Wenjiang D.] // China Foundry. – Vol. 8. – № 1. – P. 41–46.
10. ГОСТ 804-93. Магний первичный в чушках. Технические условия / [Действ. от 01.01.97]. Москва : Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
11. ГОСТ 3640-94. Цинк. Технические условия / [Действ. от 01.01.97]. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 9 с.
12. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение / [Действ. от 01.01.86]. Москва : Стандартиформ, 2008. – 24 с.
13. ГОСТ 2856-79. Сплавы магниевые литейные. Марки / [Действ. от 01.01.81]. Москва: Изд-во стандартов, 1981. – 4 с.
14. ГОСТ 21073.4-75. Металлы цветные. Определение величины зерна планиметрическим методом / [Действ. от 01.07.76]. М. : Изд-во стандартов, 2002. – 3 с.
15. The microstructure, fracture mechanism and their correlation with the mechanical properties of as-cast Mg-Nd-Zn-Zr alloy under the effect of cooling rate / [Zhang T., Zhao X., Liu J., end etc.] // Materials Science and Engineering A. – 2020. – Vol. A801. – P. 1–11.
16. Effect of Cooling Rate on the Grain Refinement of Mg-Y-Zr Alloys / [Sum M., Sthohn D.H., Easton M.A., end etc.] // Metallurgical and materials transactions A. – 2019. – P. 1–15.
17. Effect of Zn on the microstructure evolution of extruded Mg-3Nd (-Zn)-Zr (wt.%) alloys / [Ma L., Mishra R.K., Balogh M.P. end etc.] // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. A543. – P. 12–21.
18. Tensile properties of extruded ZK60-RE alloys / [Ma C., Liu M., Wu G. end etc.] // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. A349. – P. 207–212.

Одержано 28.12.2020

Айкин Н. Д., Шаломеев В. А., Лукьяненко А. С. Исследование влияния высоких скоростей охлаждения при кристаллизации на структуру и свойства сплава системы Mg-Zr-Nd

Цель работы. Изучение влияния высоких скоростей охлаждения на структурообразование и механические свойства биорастворимого сплава системы Mg-Zr-Nd.

Методы исследования. Металлографический анализ. Определение механических свойств при растяжении (ГОСТ 1497-84). Компьютерное моделирование (ProCast).

Полученные результаты. Определено влияние скорости охлаждения на средний размер зерна и механические свойства исследуемого сплава. Показано, что повышение скорости охлаждения положительно влияет на указанные параметры.

Определено, что сверхвысокая скорость охлаждения (около 55 °C/c), которая обеспечивается охлаждением медной формы в жидком азоте, приводит к образованию сверхмелкой структуры и меняет характер распределения упрочняющих фаз, приводя к их равномерному распределению по объему микроструктуры и значительному повышению механических свойств сплава.

Научная новизна. На основе данных компьютерного моделирования микроструктуры исследуемого сплава Mg-Zr-Nd построено уравнение регрессии, которая позволяет прогнозировать средний размер зерна сплава. Исследовано структурообразование и характер распределения частиц упрочняющих фаз при сверхвысоких скоростях охлаждения (около 55 °C/c), обеспечиваемых охлаждением медной формы в жидком азоте. Полученные эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать механические свойства сплава в зависимости от скорости охлаждения.

Практическая ценность. Полученные эмпирические зависимости позволяют прогнозировать и получать конечный сплав с широким возможным спектром механических свойств, благоприятный для выполнения различных задач, стоящих перед биорастворимыми имплантатами, используя максимально доступные методы литья.

Ключевые слова: магниевый сплав, скорость охлаждения, компьютерное моделирование, упрочняющая фаза, механические свойства, измельчения зерна, имплантат, жидкий азот.

Aikin M., Shalomeev V., Lukyanenko A. Research of the influence of high cooling rates during crystallization on the structure and properties of Mg-Zr-Nd alloy

Aim of study. To study the influence of high cooling rates on the structure formation and mechanical properties of the biosoluble Mg-Zr-Nd alloy.

Research methods. Metallographic analysis. Determination of tensile mechanical properties in (GOST 1497-84). Computer simulation (ProCast).

Results obtained. The influence of cooling rate on the average grain size and mechanical properties of the experimental alloy is determined. It is shown that increasing the cooling rate has a positive effect on these parameters.

It is determined that the ultrahigh cooling rate (about 55 °C/s), provided by the cooling of the copper form in liquid nitrogen, leads to the formation of ultrafine structure and changes the distribution nature of reinforcing phases, leading to their uniform distribution by microstructure and significant improvement of mechanical properties of the alloy.

Scientific novelty. Based on the microstructure modeling data of the experimental Mg-Zr-Nd alloy, a regression equation is constructed, which allows to predict the average grain size of the alloy. The structure formation and the nature of the particle distribution of the strengthening phases at ultrahigh cooling rates (about 55 °C/s), which are provided by the cooling of the copper form in liquid nitrogen, have been studied. Empirical dependences are obtained, which allow to predict the mechanical properties of the alloy depending on the cooling rate.

Practical value. The obtained empirical dependences allow to predict and obtain the final alloy with a wide range of possible mechanical properties, favorable for performing various tasks facing biosoluble implants, using the most available casting methods.

Key words: magnesium alloy, cooling rate, computer simulation, hardening phase, mechanical properties, grain grinding, implant, liquid nitrogen.
