

УДК 66:621.762

DOI 10.36910/775.24153966.2023.76.7

С. Ю. Тесля¹, М. Я. Втерковський¹, Т. О. Соловйова¹, П. І. Лобода¹, Є. В. Солодкий¹,
Б. А. Котелюх², О. С. Мовчан², О. С. Кучер¹, В. І. Шеремет¹

¹Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

²Національний університет охорони здоров'я України ім. П. Л. Шупика

ЗАКОНОМІРНОСТІ ОТРИМАННЯ ПОРОШКІВ СПЛАВІВ МАГНІЮ РОЗПИЛЕННЯМ РОЗПЛАВУ

Проведено модельні дослідження умов отримання порошків сплавів магнію розпилюванням аргонем високого тиску. Показано, що зі збільшенням швидкості газу від 100 до 400 м/с та температури розплаву від 700 °С до 1000 °С відбувається інтенсифікація процесів диспергування частинок порошків. Встановлено, що отримання частинок менших за 150 мкм досягається розпилюванням за швидкості енергоносія 400 м/с та температури розплаву 1000 °С. Отримані частинки порошків мають середній розмір менше 70 мкм, та сферичну форму. Формування правильної морфології частинки обумовлено значно більшим часом охолодження ніж сфероїдизації. Встановлено, що на поверхні частинок за рахунок вторинної деструкції струменю розплаву відбувається утворення дрібних закристалізованих краплин розплаву.

Ключові слова: розпилювання газом, біоматеріали, біорезорбція, порошки магнію, порошкова металургія

S. Teslia, M. Vterkovskiy, T. Soloviova, P. Loboda, I. Solodkiy,
B. Koteliukh, O. Movchan, O. Kucher, V. Sheremet

THE PROCESS OF MAGNESIUM ALLOYS POWDER PREPARATION BY GAS ATOMIZATION

Model studies of the conditions for obtaining powders of magnesium alloys by gas atomization with high-pressure argon have been carried out. It is shown that with an increase in the gas velocity from 100 to 400 m/s and the melt temperature from 700 °C to 1000 °C, the processes of dispersion of powder particles are intensified. It was established that obtaining particles smaller than 150 μm is achieved by atomization at a speed of the energy carrier of 400 m/s and a melt temperature of 1000 °C. The resulting powder particles have an average size of less than 70 μm and a spherical shape. The formation of the regular particle morphology is due to a significantly longer cooling time than spheroidization. It was established that the formation of small crystallized drops of the melt occurs on the surface of the particles due to the secondary destruction of the melt jet.

Key words: gas spraying, biomaterials, bioresorbable, magnesium powders, powder metallurgy

Постановка проблеми. Сучасне інженерне матеріалознавство вирішує не лише завдання важкої промисловості, але й активно створює матеріали та вироби для вирішення екологічних проблем людства відновної енергетики та медицини [1]. Одним з важливих напрямків сучасних досліджень є розробка матеріалів біорезорбних імплантів для ортопедії [2]-[3]. Створення та впровадження такого класу матеріалів дозволить значно скоротити термін реабілітації та не вимагатиме повторних оперативних втручають для видалення фіксуючих конструкцій після зростання кісток. З погляду біорезорбних матеріалів перспективним є використання магнію, як основного компоненту [4]. В чистому вигляді застосування магнію є обмеженим через низькі механічні властивості та низьку корозійну стійкість. Так, під час взаємодії з плазмою крові відбувається активна взаємодія з виділенням великої кількості водню. Газифікація негативно впливає на оточуючі тканини та регенерацію кісток [5]. Тому досить широкого поширення набуло легування магнію перехідними металами, міддю, кальцієм та цинком. За рахунок введення різної кількості легуючих елементів можливо в широкому діапазоні регулювати період резорбції та механічні властивості [6]. Отримання сплавів магнію, методами литва є досить складним процесом за рахунок високої активності магнію під час взаємодії із киснем. Тому під час плавки та литва застосовують або високий вакуум, або суміш газів SF₆-CO [7]. Використання вакууму обмежене за рахунок активного випаровування магнію та осадженням в камері. Суміш газів SF₆-CO є ефективним

© С. Ю. Тесля, М. Я. Втерковський, Т. О. Соловйова, П. І. Лобода, Є. В. Солодкий,
Б. А. Котелюх, О. С. Мовчан, О. С. Кучер, В. І. Шеремет

та загальноновживаним інструментом для отримання сплавів магнію литвом, але за рахунок високої токсичності та накопичення в атмосфері вказану суміш виводять з використання. Перспективним методом щодо отримання магнієвих сплавів є порошкова металургія [8]. Під час отримання порошків магнію застосовується розпилювання у вакуумі інертним газом [9]. Подальше отримання виробів здійснюється без плавлення, пресування та спікання, що дозволяє значно убезпечити виробництво та масштабувати виготовлення деталей зі сплавів магнію.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Отримання виробів методами порошкової металургії базуються на процесах отримання порошків, пресування та спікання. До одного з найважливіших етапів забезпечення високих експлуатаційних властивостей сплавів магнію із заданою мікроструктурою є етап отримання порошків. В роботах [9]-[11] передбачається отримання порошків сплаву магнію розпиленням газами. Отримані частинки порошків мають близьку до сферичної форму із середнім розміром 20 мкм. Було встановлено, що порошки мають два сімейства частинок: дочірні та основні. Дочірні дрібні частинки утворюються за рахунок вторинного розпаду струменю по механізму десорбції, натомість основні частинки утворюються після завершення розпаду струменю. Було встановлено, не зважаючи на відмінності в поверхневій енергії з розплавами алюмінію, закономірності розпилення в цілому є ідентичними, що значно спрощує вибір технологічної оснастки.

Альтернативним методом отримання порошків без попередньої підготовки розплаву є використання розпилення порошків аргонном електродуговим плавленням дроту [12]. В даному випадку формування розплаву відбувається шляхом запалювання дуги між анодом камери та катодом у вигляді дроту з диспергуючого матеріалу. Утворена краплина розплаву утримується кавітаційно у підвішеному стані та диспергується потоком аргону. Даний метод є привабливим з точки зору отримання порошків для адитивних технологій, однак до недоліків варто віднести низьку продуктивність.

Однією з можливих варіацій методів отримання порошків з розплаву є центробіжне розпилення. В роботі [13] проводили дослідження процесів розпилення сплаву AZ91 відцентровим розпиленням. Формування частинок порошків відбувається шляхом руйнування струменю металу відцентровими силами які виникають під дією диску який обертається. Швидкість обертання диску складала 100 000 об/хв, для уникнення окиснення в камеру подавали гелій з добавками 1-2 % кисню. Кисень відіграє роль пасиваційного газу який знижує ризики детонації та горіння порошків магнію. Частинки порошку мають сферичну та перехідну морфологію у вигляді гантелей. Морфологічні зміни пов'язані як з часом охолодження так і з наявністю кисню в середовищі розпилення який суттєво змінює в'язкість розплаву та поверхневу енергію. Не зважаючи на поширеність методу отримання порошків розпиленням газами, в літературних джерелах обмежено висвітлено теоретичні засади процесів розпилення сплавів магнію. Відсутність аналітичного опису унеможливує прогнозування режимів отримання порошків магнієвих сплавів для медицини із заданим гранулометричним складом та морфологією.

Постановка проблем дослідження. Виходячи з літературних даних, визначення умов розпилення та експериментальне отримання порошків сплавів магнію для подальшого застосування у виробництві біоімплантів є актуальним завданням.

Мета дослідження. Є теоретичний аналіз та експериментальна апробація умов отримання порошків сплавів магнію легованих цинком та рідкісно-земельними елементами, з метою отримання порошків біорезорбних магнієвих сплавів із заданим гранулометричним складом та морфологією.

Викладення основного матеріалу. В роботі проведено дослідження умов отримання промислових сплавів магнію ZK61 та WE46 розпиленням інертним газом за швидкості газу 100, 200, 300, 400 м/с та температури розплаву 700, 800, 900, 1000 °С. Хімічний склад сплавів наведено на в

таблиці 1. Оцінка процесів формування частинок порошків, а саме розміру та форми проводили відповідно до теоретичних засад викладених в роботах [14]-[16].

Як вихідний матеріал для розпилення взято чушки сплавів ZK61 та WE46. Підготовка розплаву проводилась шляхом індуктивного плавлення в графітовому тиглі за температури 800 градусів з ізотермічною витримкою 20 хв. Перед плавленням камера вакуумувалась для видалення адсорбованого кисню, після досягнення тиску менше 10^{-2} Па в порожнину тигля подавали високочистий аргон.

Таблиця 1

Сплав	Хімічний склад сплавів магнію					
	Хімічні елементи					
	Mg	Zn	Y	Zr	Gd	Nd
ZK-61	Бал.	5,5	-	0,4		-
WE-43	Бал.	0,2	4	0,4	1,2	2,1

Після плавлення та гомогенізації розплав через металоприймач діаметром 3 мм подавався в камеру розпилення. Диспергування у фокусі форсунки досягається шляхом дії на струмінь розплаву потоку високо чистого аргону. Камера розпилювання має два проміжних блоки в нижній частині камери частинки після сфероїдизації продуваються аргоном зі доабвками 1 % кисню, з метою первинної пасивації поверхні частинок порошків та уникнення можливих детонаційних процесів. Також в камері розпилення присутня окрема система для видалення порошків з розміром частинок менше 5 мкм, оскільки дана фракція є не стабільною та досить небезпечною в експлуатації.

Під час аналітичного опису процесу отримання порошків магнію розпилення розплавів важливе місце займає оцінка в'язкості. За рахунок обмеженої інформації щодо властивостей розплавів на основі WE та ZK оцінку величини динамічної в'язкості розплаву проводили виходячи з моделі Хірая та Чанга-Крамба [14]:

$$\mu_m = A \exp\left(\frac{B}{RT}\right)$$

$$A = \frac{1,7 * 10^{-7} * \rho^{0.667} T_m^{0.5} M^{-0.167}}{\exp\left(\frac{B}{RT_m}\right)}$$

$$B = 2.65 * T_m^{1.27},$$

де μ_m – в'язкість розплаву, мПа·с; R – універсальна газова стала ($8,31 \text{ Дж} \times \text{моль}^{-1} \text{К}^{-1}$);
 T – температура розплаву, °К; T_m – температура ліквідус, °К; ρ – густина сплаву за кімнатних температур, кг/м³; M – молярна маса, кг×моль⁻¹.

Вихідні дані для оцінки динамічної в'язкості розплавів на основі сплавів магнію наведено в таблиці 2. Результати щодо зміни в'язкості в залежності від температури розплаву наведено на рисунку 1. Як можна побачити введення легувальних елементів різної природи не суттєво змінює величину в'язкості в широкому інтервалі температур, тому в подальших розрахунках прийнято усереднене значення динамічної в'язкості. Збільшення температури розплаву знижує динамічну в'язкість, за рахунок збільшення рухливості атомів складових сплаву. Дані уявлення узгоджується із теоретичним уявленнями щодо будови розплавів [17].

Іншим важливим параметром під час отримання порошків розпилюванням є поверхневий натяг розплаву. Для мікро легованих сплавів магнію, поверхнева енергія суттєво не змінюється від температури та місту легувальних елементів, тому для попередньої оцінки процесів розпилювання сплавів ZK-61, WE-46 поверхневу енергію прийнято за 0,5 Н/м [18].

Табл. 2.

Вихідні дані для оцінки динамічної в'язкості сплавів ZK-61, WE-46

Сплав	Атомна вага, кг×моль ⁻¹	Густина, кг/м ³	Температура ліквідус, °C	Температура розплаву, °C
ZK-61	0,180	1800	630	700
				800
WE-46	0,230	1850	650	900
				1000

Виходячи із засад порошкової металургії, формування виробів з порошків здійснюється методами пресування. Як відомо [19], одними з ключових факторів, які визначають процес компактування (пресуємість, формуємість, міцність пресовок, щільність тощо) є гранулометричний склад та морфологія порошків. Під час розпилювання порошків інертним газом, регулювання середнього розміру частинок найчастіше проводять шляхом зміни технологічних параметрів процесу розпилювання (температури розплаву, швидкості газу, діаметром сопла тощо).

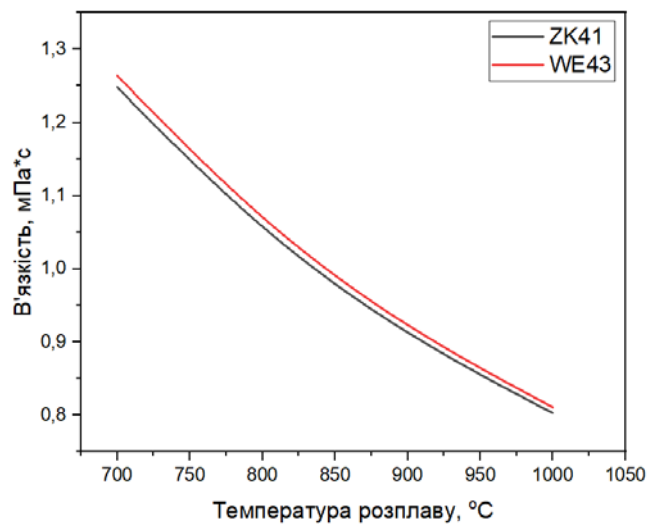


Рис. 1. Теоретична зміна в'язкості розплавів ZK-61, WE-46 в залежності від температури перегріву розплаву

Варто відмітити, що в практиці отримання порошків найчастіше застосовують таке відношення тиску газу та розміру сопла, щоб досягнути вибухового руйнування струменю металу у факелі розпилення. Ефект вибуху супроводжується руйнуванням великих краплин розплаву з утворенням багатьох дрібних. Вибуховий механізм розпилювання дозволяє отримати високий рівень виходу придатної фракції та високу гомогенність порошку. В роботі передбачається оцінку середнього розміру частинок порошку входячи з моделі Г. Любанської [14], [15]:

$$d_{50} = K \sqrt{\frac{\eta_m \sigma_m d_0}{\eta_g U_g^2 \rho_m} \left(1 + \frac{m}{G}\right)},$$

де K – інструментальна константа (120-150); η_m – кінематична в'язкість розплаву, м²/с; σ_m – поверхнева енергія розплаву, Н/м; d_0 – діаметр сопла, м; η_g – кінематична в'язкість газу, м²/с; U_g – швидкість газу, м/с; ρ_m – густина металу, кг/м³; m – потік металу, кг/с; G – потік газу, кг/с

Аналіз результатів впливу температури розплаву та швидкості газу наведено на рисунку 2. Зі збільшенням температури розплаву, за інших рівних умов, відбувається збільшення ступеню дисперсності продуктів диспергування за рахунок зниження в'язкості розплаву (рис. 1). Відповідно, для подрібнення первинного пасма розплаву струмінь газу в зоні розпилення витрачає меншу кінетичну енергію на руйнування, що дозволяє підвищити інтенсивність подрібнення первинних та вторинних краплин розплаву. Вплив швидкості енергоносія є досить неоднозначним, з одного боку збільшення швидкості газу призводить до активізації диспергування розплаву з отриманням більш дрібних частинок порошку. З іншого боку за високих швидкостей дуття підвищується коефіцієнт теплопередачі, що знижує ефективність подрібнення, на що вказує затухаюча обернено пропорційна залежність зміни розміру частинок від швидкості енергоносія (рис. 2).

З погляду отримання виробів з порошків сплавів магнію, оптимальний розмір частинок порошків змінюється в залежності від конкретних умов експлуатації та технології компактування.

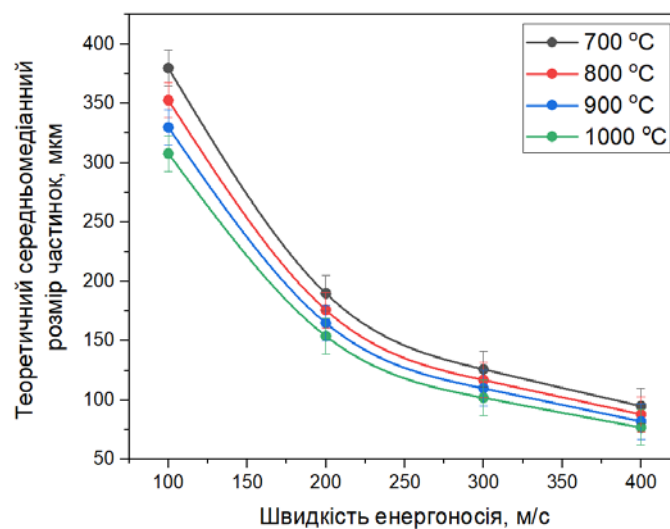


Рис. 2. Теоретична оцінка середньомедіанного розміру частинок сплавів ZK-61, WE-46 в залежності від швидкості енергоносія та температури розплаву

Найбільш раціональним є використання поліфракційних порошків із середнім розміром частинок менше 150 мкм. За таких умов від час пресування частинки порошків більш дрібної фракції будуть заповнювати порожнечу яку утворюють каркас із крупних частинок тим самим підвищуючи відносну щільність виробу. Тому для отримання порошків сплавів ZK-61, WE-46 обрано режим обробки за якого: 1) швидкість енергоносія – 300 м/с; 2) температура розплаву – 1000 °C; 3) плавлення під тиском аргону.

Однак, не лише розмір частинок порошків визначає закономірності процесі подальшого компактування, але й морфологія частинок. Відомо [20], що порошок не правильної форми гірше ущільнюється, але мають високу міцність пресовок, а сферичні навпаки. Під час отримання порошків магнію, з урахуванням різних технологій подальшої консолідації доцільним є отримання сферичних частинок, що особливо важливо під час отримання виробів 3д друком. З метою прогнозування морфології частинок порошків було проведено оцінку часу охолодження та сфероїдизації, відношення між якими дозволяє оцінити імовірність отримання частинок правильної форми.

Час охолодження:

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{c \gamma d}{6 \alpha_{\text{к}}} \ln \left(\frac{t_m - t_r}{t_k - t_r} \right),$$

де c – теплоємність розплаву, 34 Дж/(кг*К) [21]; γ – густина розплаву, 1504.4 кг/м³ [21]; t_m, t_k, t_r – температури розплаву, кристалізації та енергоносія.

Час сфероїдизації розраховується відповідно до формули:

$$\tau_{\text{сф}} = \frac{3\pi\eta_m}{\sigma_m} (R - r),$$

де η_m – кінетична в'язкість розплаву; σ_m – поверхневий натяг 0,5 Н/м; R, r – радіуси сфероїдизованій каплі, та первинного пасма.

Для більшості теоретичних розрахунків процесів розпилювання визначення коефіцієнту тепловіддачі конвекцією може бути визначено емпіричною формулою Д. Н. Ляховського [22], [23]:

$$\alpha_k = (3,4 - 0,2 \frac{t_m}{1000}) \sqrt{\frac{U_r}{d}},$$

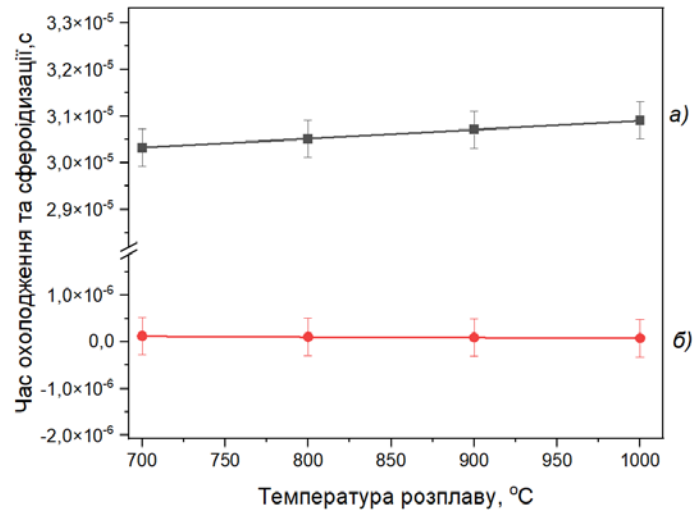
де U_r – швидкість газу, м/с; d – діаметр каплі розплаву, м.

Результати розрахунків наведено на рисунку 3. Час охолодження (рис. 3, а) за інших рівних умов значно вище від часу сфероїдизації (рис. 3, б). Таке відношення дозволяє припустити імовірність отримання частинок порошків сферичної форми. Проте, під час розпилювання особливу увагу варто приділяти кількості атомів кисню в диспергувальному об'ємі. За умов збільшення кількості кисню відбувається значне окиснення поверхневих шарів і відповідне збільшення в'язкості. Зміна тепло-фізичних властивостей може суттєво змінювати відношення між часом охолодження та часом сфероїдизації. Відповідно, отримання частинок сферичної форми є ускладненим за даних умов.

За встановлених оптимальних умов розпилення було отримано порошки сплавів ZK-61, WE-46 розпилюванням аргонем високого тиску. На рисунку 4 наведено гранулометричний склад порошків та морфологію частинок. Середній розмір частинок порошків для обох матеріалів складає близько 70 мкм. Близькі відношення гранулометричного складу порошків сплавів зумовлені близькою природою та величиною тепло-фізичних властивостей. Отримані порошки мають менший середній розмір частинок, ніж під час аналітичної оцінки (рис. 2), що може бути обумовлено розпилення в режимі вибуху, який проявляється стрибком ступеню диспергування, та практично не може бути аналітично оцінений за рахунок одночасної дії різних параметрів.

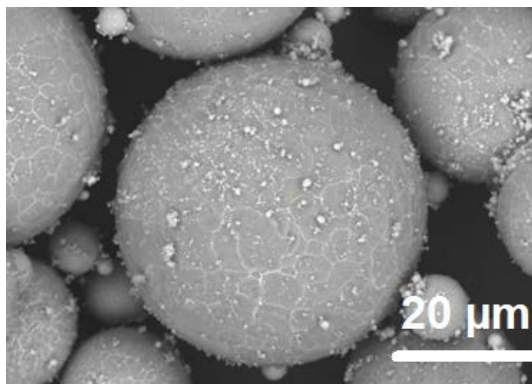
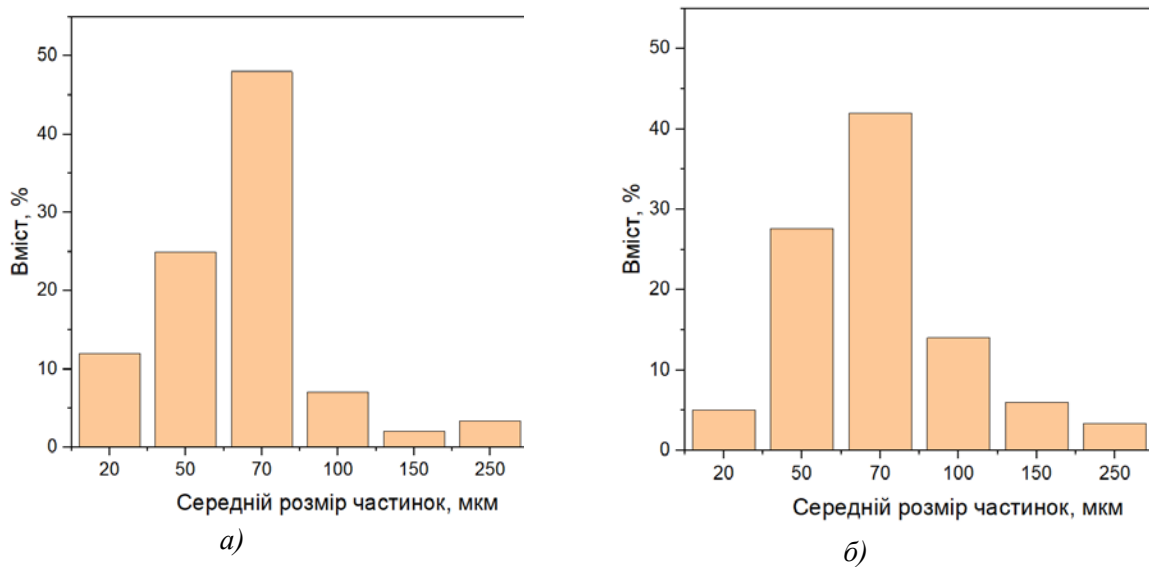
Морфологія частинок порошків має характерну сферичну форму, що узгоджується з даними щодо розрахунку часу охолодження та сфероїдизації. На поверхні частинок відмічається утворення вторинних краплин, що може бути зумовлено явищами вторинної деструкції струменю розплаву, що узгоджується з даними роботи [9].

Висновки. Проведено модельну оцінку параметрів розпилювання сплавів магнію ZK-61, WE-46, встановлено, що отримання частинок порошків середнім розміром менше 150 мкм можливо за температури розплаву 1000 °С, та швидкості газу 400 м/с. Модельні дослідження часу охолодження та сфероїдизації вказують на імовірність отримання частинок сферичної форми. Середній розмір частинок порошків склюють 70 мкм. Морфологія порошків сферична з не однорідними проявами вторинної деструкції струменю розплаву, що проявляється у вигляді дрібних краплин на поверхні частинок. В подальших дослідження доцільним є визначення умов компактування отриманих порошків різними методами, з метою встановлення режимів формування виробів біомедичного призначення.

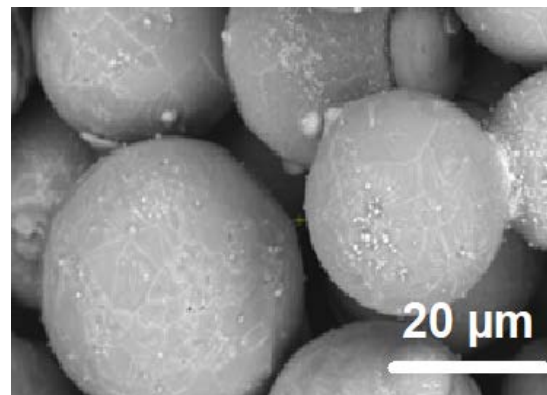


а) час охолодження; б) час сфероїзації

Рис. 3. Зміна часу охолодження та сфероїзації від температури розплаву за швидкості газу 400 м/с



в)



г)

Рис.4. Гранулометричний склад та морфологія частинок порошків ZK-61 (а, в), WE-46 (б,г)

Література

1. Nanocrystalline apatites: From powders to biomaterials / C. Drouet та ін. *Powder Technology*. 2009. Т. 190, № 1-2. С. 118–122. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.041>
2. Pietrzak W. S., Sarver D., Verstynen M. Bioresorbable implants – practical considerations. *Bone*. 1996. Т. 19, № 1. С. S109–S119. URL: [https://doi.org/10.1016/s8756-3282\(96\)00139-1](https://doi.org/10.1016/s8756-3282(96)00139-1)
3. Čapek J., Vojtěch D. Powder Metallurgical Techniques for Fabrication of Biomaterials. *Manufacturing Technology*. 2015. Т. 15, № 6. С. 964–969. URL: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/mt/15/6/964>
4. Amukarimi S., Mozafari M. Biodegradable magnesium based biomaterials: An overview of challenges and opportunities. *MedComm*. 2021. Т. 2, № 2. С. 123–144. URL: <https://doi.org/10.1002/mco2.59> (дата звернення: 22.11.2023).
5. Gas formation and biological effects of biodegradable magnesium in a preclinical and clinical observation / Y.-K. Kim та ін. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2018. Т. 19, № 1. С. 324–335. URL: <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1451717> (дата звернення: 22.11.2023).
6. Haghshenas M. Mechanical characteristics of biodegradable magnesium matrix composites: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2017. Т. 5, № 2. С. 189–201. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.05.001> (дата звернення: 22.11.2023).
7. Emami S., Sohn H. Y., Kim H. G. Formation and Evaluation of Protective Layer Over Magnesium Melt Under SF6/Air Atmospheres. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. Т. 45, № 4. С. 1370–1379. URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0059-2> (дата звернення: 22.11.2023).
8. Biodegradable Magnesium Alloys for Personalised Temporary Implants / R. E. Hendea та ін. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023. Т. 14, № 8. С. 400. URL: <https://doi.org/10.3390/jfb14080400> (дата звернення: 22.11.2023).
9. Ünal A. RAPID SOLIDIFICATION OF MAGNESIUM BY GAS ATOMIZATION. *Materials and Manufacturing Processes*. 1992. Т. 7, № 3. С. 441–461. URL: <https://doi.org/10.1080/10426919208947431> (дата звернення: 22.11.2023).
10. Date K., Iwaoka T. Investigations on Manufacturing of Magnesium Alloy Powder by Air Atomization. *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2020. Т. 61, № 9. С. 1790–1797. URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans.y-m2020834> (дата звернення: 22.11.2023).
11. Meyers E. A., Carrillo M. C. The Production of AZ31 Alloys by Gas Atomization Method and Its Characteristics / *The Journal of Prevention of Alzheimer's Disease*. 2020. С. 1–2. URL: <https://doi.org/10.14283/jpad.2020.42> (дата звернення: 22.11.2023).
12. Ultrasonic atomization of magnesium alloy AZ61 based on the TIG melting method / J. Jaros та ін. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-2301-9> (дата звернення: 22.11.2023).
13. LABRECQUE, C., ANGERS, R., TREMBLAY, R., & DUBE, D. (1997). *Inverted disk centrifugal atomization of AZ91 magnesium alloy*. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36(3), 169–175. doi:10.1016/s0008-4433(97)00007-4
14. Hirai M. Estimation of Viscosities of Liquid Alloys / Masazumi Hirai // ISIJ International. – 1993. – Т. 33, № 2. – С. 251–258. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.251>
15. Н. Lubanska. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals [Електронний ресурс] / Н. Lubanska // The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society. – 1970. – С. 45–49. – Режим доступу: <https://doi.org/10.14283/jpad.2020.42>
16. A mathematical model of the spray deposition process [Електронний ресурс] / E. Gutierrez-Miravete [та ін.] // Metallurgical Transactions A. – 1989. – Т. 20, № 1. – С. 71–85. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/bf02647495> (дата звернення: 22.11.2023). – Назва з екрана.

17. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей / Я. И. Френкель. – Москва : Наука, 1975. – 592 с.
18. Bohdansky J., Schins H. E. J. Surface tension and density of the liquid earth alkaline metals Mg, Ca, Sr, Ba. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 1968. Т. 30, № 9. С. 2331–2337. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(68\)80241-6](https://doi.org/10.1016/0022-1902(68)80241-6)
19. Бальшин М. Порошковое металловедение. / М. Бальшин. – Москва : Metallurgizdat, 1948. – 332 с.
20. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавки сполук : Підручник / А. М. Степанчук. – К.: НТТУ «КПІ», 2006. – 353 с.
21. Thermophysical Properties of Magnesium in Solid and Liquid States / R. N. Abdullaev та ін. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2022. Т. 31. С. 384–40.
22. Ляховский, Д. Н. Конвективный теплообмен между газами и взвешенными частицами / Д. Н. Ляховский // Журнал технической физики. -1940.-Т. 10, № 12.-С. 999.
23. Ляховский, Д. Н. Конвективный теплообмен сферических взвешенных частиц с окружающей средой / Д. Н. Ляховский // Котлотурбостроение. -1947.-Т. 29, №5.-С. 29-31.

Рецензент: д. т. н., проф. Мініцький Анатолій В'ячеславович. КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ