

С.Ю. Тесля¹, С.В. Завадюк², М.Я. Втерковський¹, М.А. Тесля¹, М.В. Коваленко¹,
Л.О. Бірюкович¹, О.В. Степанов¹, Т.О. Соловйова¹

¹Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

²Казенне науково-виробниче об'єднання “ФОРТ”

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ДЕТАЛЕЙ ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКУ МАГНІЮ

Технологія інжекційного лиття порошку (ІЛП) дозволяє виготовляти деталі значної складності у великій кількості, при зменшених витратах, у порівнянні з традиційними технологіями обробки металу. Тому вона ідеально підходить для виготовлення компонентів медичних імплантів та протезів. У даній статті досліджено вплив параметрів лиття на точність геометричних розмірів готових деталей. Показано, що за допомогою одночасної зміни таких параметрів як: тиск впорскування та тиск витримки, можливо впливати на остаточні розміри деталі. Метою є отримання номінальних розмірів з мінімальним відхиленням. Також, в даній роботі наведено методику постановки дослідів за допомогою повного факторного аналізу. Використання даної методики під час вибору оптимальних технологічних параметрів дозволить підвищити показники якості деталей ІЛП

Ключові слова: спікання, інжекційне лиття порошку, факторний аналіз.

S. Teslia, S. Zavadiuk, M. Vterkovskiy, M. Teslia, M. Kovalenko,
L. Biryukovych, O. Stepanov, T. Soloviova

INFLUENCE OF INJECTION MOLDING PARAMETERS ON THE GEOMETRIC DIMENSIONS OF PARTS MANUFACTURED BY MAGNESIUM POWDER INJECTION MOLDING

Powder injection molding (PIM) technology enables the production of highly complex parts in large quantities with reduced costs compared to traditional metal processing methods. This makes it an ideal solution for manufacturing components of medical implants and prostheses. This article investigates the influence of molding parameters on the geometric accuracy of finished parts. It is demonstrated that simultaneous adjustment of parameters such as injection pressure and holding pressure can affect the final dimensions of the part. The objective is to achieve nominal dimensions with minimal deviation. Additionally, this study presents an experimental design methodology based on full factorial analysis. The application of this methodology in selecting optimal technological parameters enhances the quality indicators of PIM-produced parts.

Keywords: sintering, powder injection molding, factorial analysis.

Постановка проблеми. На даний час, використання такого передового процесу виробництва як Інкєкційне лиття порошкових сумішей (Metal Injection Molding), дало змогу виготовляти у великій кількості деталі складної конфігурації з точними розмірами, при значно менших матеріальних витратах. Основною перевагою процесу ІЛП є значне зниження кількості механічних операцій таких як: фрезерування, шліфування, токарні роботи та ін. Окрім цього, процес інжекційного лиття порошку дозволяє без додаткових затрат виготовляти конфігурації деталей, які раніше були неможливі або потребували значної кількості виробничих операцій. Дана технологія добре підходить для виготовлення складних деталей у великій кількості, тому широко поширена при виготовленні компонентів для медицини по всьому світу. Так, технологію ІЛП використовують такі компанії як: Smith&Wesson; Colt Manufacturing Company; Forjas Taurus; Glock; Springfield Armoury Inc. та ін. [1]. Проте параметри інжекційного лиття впливають на неоднорідність щільності виливка, що в свою чергу впливає на кінцеві розміри спеченої деталі. Нерівномірність щільності впливає на неоднорідність усадки, деформації деталі, можливість появи тріщини. При не вірно підібраних параметрах лиття можуть виникати внутрішні пустоти, утяжини тріщини після спікання. Також параметри впливають на шорсткість поверхні та загальний зовнішній вигляд. Так як імпланти мають складну геометрію та потребують точних розмірів, і повинні мати мінімальну механічну обробку - проблема отримати точні розміри становиться найбільш актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загалом процес ІЛП можна розділити на чотири етапи. На першому етапі відбувається виготовлення початкового матеріалу “feedstock”. Для цього

© С.Ю. Тесля, С.В. Завадюк, М.Я. Втерковський, М.А. Тесля, М.В. Коваленко,
Л.О. Бірюкович, О.В. Степанов, Т.О. Соловйова

металевий порошок з розмірами частинок до 20 мкм, змішується з полімерним наповнювачем. Далі відбувається формування геометрії деталі на термопласт-автоматах шляхом впорскування розплавленої суміші у прес-форму. На наступному етапі відбувається видалення полімеру з деталей. В залежності від типу полімерного наповнювача “binder”, розрізняють такі види як: каталітичний дебайдинг, термічний дебайдинг, дебайдинг з використанням рідинних розчинників. Після цього, відбувається остаточне спікання металевго порошку у спеціальних високотемпературних печах до отримання суцільного металевго тіла деталі. На відміну від традиційної порошкової металургії, процес ІЛП дозволяє отримувати деталі з різноманітних матеріалів з високою однорідною густиною без внутрішніх дефектів [2].

Точність геометричних розмірів та необхідних механічних властивостей готових деталей сильно залежить від вибору правильних технологічних параметрів процесу ІЛП. Етап інжекційного лиття найбільш важливий, адже на даному етапі виникає велика кількість проблем. Для нього характерні такі різновиди дефектів як: пустоти, поверхневі западини, не заповнені зони деталі, лінії спаїв потоків, тріщини. Хоча дані дефекти можуть бути не помітні на відливці, вони однозначно проявляють себе на наступних операціях видалення зв'язувальної речовини (пластифікатору) та спіканні [3].

Як було зазначено професором Randall M. German в роботі [4] – варіація кінцевого розміру деталі після спікання прямо пропорційна до варіації ваги відливки деталі, та підпорядковується рівнянню:

$$\frac{dL_s}{L_s} = \frac{1}{3} \frac{dM_g}{M_g} \quad (1)$$

де, dL_s – розсіювання розміру деталі; dM_g – розсіювання ваги відливки; L_s – розмір деталі після спікання; M_g – вага деталі.

Таким чином, вага відливки має вагомий вплив на розмірну точність деталей після спікання і є важливим параметром контролю на початковому етапі виготовлення деталей по технології ІЛП.

Постановка проблем дослідження. Авторами роботи [5] було використано традиційні методи формування такі як лиття та екструзія для виготовлення стандартних компонентів із сплаву WE43 у біомедичних цілях. Авторами зазначається, що дані методи є економічно неефективними для створення індивідуалізованих деталей складної геометрії, які повинні відповідати вимогам до міцності, пластичності та корозійної стійкості. У зв'язку з цим, технології, що базуються на використанні зв'язувачів, зокрема лиття під тиском з металевим порошком (МІМ), а також адитивні методи виробництва (АМ), що ґрунтуються на процесах спікання, показали перспективність у виготовленні складних деталей, близьких до кінцевої форми. Такі деталі включають біодеградовані кісткові гвинти, судинні стенти та хірургічні імпланти з сплаву WE43, які можуть вироблятися у великих обсягах із високою ступеню відтворюваності.

Мета дослідження. Відповідно, метою даної роботи є визначення параметрів інжекційного лиття, які мають найбільший вплив на вагу відливки та розміри готової деталі після спікання. Одним із головних завдань є пошук оптимальних параметрів лиття, при яких розміри спечених деталей відповідають номінальним розмірам креслень з мінімальними відхиленнями.

Викладення основного матеріалу. У даній роботі, планування експерименту було здійснено по методу Бокса-Уілсона [6]. Цей метод дозволяє проводити досліди невеликими серіями. У кожній серії змінюються всі параметри по певним правилам. Досліди проводять так, щоб після математичної обробки результатів минулої серії можливо спланувати наступну серію дослідів.

На основі практичного досвіду та минулих досліджень [7]–[11] встановлено, що із всіх параметрів інжекційного лиття, на вагу відливок найбільш впливають такі технологічні параметри, наведені в таблиці 1.

Табл. 1

Параметри інжекційного лиття

№	Назва параметру	Розмірність	Кодування
1	Швидкість впорскування матеріалу	см ³ /с	– X ₁
2	Тиск впорскування	бар.	– X ₂
3	Тиск витримки	бар.	– X ₃
4	Температура прес-форми	°С	– X ₄

Процес лиття проводився на термопласт-автоматі Engel 50/110 з ЧПК та модифікованим вузлом впорскування. Матеріал для випробування: порошок Магнію WE43, фірми «Sigma aldrich», Німеччина. Основні рівні та інтервали варіювання факторів вказані в таблиці 2.

Табл. 2

Найменування	Фактори впливу			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Основний рівень	15	800	800	120
Інтервал варіювання	10	200	200	20
Верхній рівень	25	1000	1000	140
Нижній рівень	5	600	600	100

Матриця планування експерименту подана в таблиці 3. Кожна стрічка матриці представляє собою окремий дослід з визначеними параметрами (де “+1” відповідає верхньому рівню, та “-1” відповідно нижньому рівню). З метою зменшення похибки вимірювання результатів, для кожного дослідження було проведено 6 циклів інжекційного впорскування (паралельні дослідження). З метою дослідження впливу здвоєних ефектів -- коли зміна одночасно двох параметрів призводить до якісно нового результату, в таблиці подано такі ефекти взаємодії:

1. Швидкість впорскування - Тиск впорскування — X₁ × X₂
2. Тиск впорскування – Тиск витримки — X₂ × X₃
3. Тиск впорскування - Температура прес-форми — X₂ × X₄

Табл. 3

Матриця планування дослідження								
Номер дослідження	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ * X ₂	X ₂ * X ₃	X ₂ * X ₄
1	1	1	1	1	-1	1	1	-1
2	+	-1	1	1	-1	-1	1	-1
3	+	1	-1	1	-1	-1	1	1
4	+	-1	-1	1	-1	1	-1	1
5	+	1	1	-1	-1	1	-1	-1
6	+	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1
7	+	1	-1	-1	-1	-1	1	1
8	+	-1	-1	-1	-1	1	1	1
9	+	1	1	1	1	1	1	1
10	+	-1	1	1	1	-1	1	1
11	+	1	-1	1	1	-1	-1	-1
12	+	-1	-1	1	1	1	-1	-1
13	+	1	1	-1	1	1	-1	1
14	+	-1	1	-1	1	-1	-1	1
15	+	1	-1	-1	1	-1	1	-1
16	+	-1	-1	-1	1	1	1	-1

Повний факторний експеримент дозволяє кількісно оцінити лінійні ефекти та всі їх взаємодії. Для повного факторного експерименту типу 2⁴ (де 2 – кількість рівнів, а 4 – кількість факторів). Рівняння регресії включно з ефектами взаємодії можна представити у вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 \quad (2)$$

У таблиці 3, у першому стовпці міститься фіктивний фактор X₀. Він вводиться для оцінки вільної перемінної рівняння b₀. У якості вихідних параметрів оптимізації виступають вага відливки (y_в) та довжина деталі після спікання (y_д).

Для кожної строки матриці планування по результатам n було розраховано середнє арифметичне значення параметрів оптимізації:

© С.Ю. Тесля, С.В. Завадюк, М.Я. Втерковський, М.А. Тесля, М.В. Коваленко,
Л.О. Бірюкович, О.В. Степанов, Т.О. Соловйова

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju} \quad (3)$$

Для визначення відхилення параметру оптимізації від його середнього значення. Для кожної строки матриці планування було розраховано дисперсію дослідів:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2 \quad (4)$$

Похибка дослідів визначена як квадратний корінь дисперсії дослідів:

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2} \quad (5)$$

При умові рівномірного дублювання дослідів однорідність всіх дисперсій було перевірено по критерію Кохрена (G_p).

$$G_p = \frac{S_{max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = 0,19 \quad (6)$$

В нашому випадку, розрахунковий критерій Кохрена G_p становить 0,19. Табличне значення для 16 дослідів при умові проведення 6 паралельних дослідів становить $G_T = 0,2034$. Розрахований критерій Кохрена менше за табличний ($G_p < G_T$), отже дисперсії вважаються однорідними.

Розраховані середні значення параметрів оптимізації та їх дисперсій для кожного дослідів подані в таблиці 4:

Табл. 4

Розраховані параметри ваги відливка

Назва параметру	Номер дослідів							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{y}_j$	5,617	5,611	5,554	5,565	5,619	5,616	5,553	5,563
S_j^2	0,000111	0,000037	0,000021	0,000026	0,000059	0,000013	0,000125	0,000067
S_j	0,010558	0,006113	0,004633	0,005115	0,007731	0,003564	0,011171	0,008159
Назва параметру	9	10	11	12	13	14	15	16
$\bar{y}_j$	5,613	5,629	5,549	5,568	5,617	5,633	5,550	5,567
S_j^2	0,000016	0,000008	0,000025	0,000016	0,000017	0,000006	0,000058	0,000046
S_j	0,004033	0,002805	0,004957	0,003971	0,004119	0,002483	0,007601	0,006812

Так як дисперсії дослідів прийнято вважати однорідними, далі було розраховано дисперсію повторюваності експерименту:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 = 4,0754e - 05 \quad (7)$$

Де N – кількість дослідів, або кількість строк матриці планування.

Згідно результатів розраховано коефіцієнти моделі. Вільну перемінну b_0 визначають по формулі:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j = 5,589 \quad (8)$$

Коефіцієнти регресії, що визначають лінійні ефекти та ефекти взаємодії визначають по формулам (8) та (9) відповідно. Розраховані коефіцієнти подані в таблиці 5.

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j x_{ij} \quad (9)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j x_{ij} x_{ij} \quad (10)$$

Перевірку значимості коефіцієнтів регресії проведено за допомогою t-критерія Стюдента. Для цього розраховуємо похибку у визначенні i-го коефіцієнту регресії:

$$S\{b_0\} = + \sqrt{\frac{S_y^2}{nN}} \quad (11)$$

де N – кількість дослідів в матриці планування, n – число паралельних дослідів.

Критерій Стюдента визначено для кожного коефіцієнту регресії по формулі (11). Результати розрахунку приведено в таблиці 5.

Табл. 5

Розраховані коефіцієнти регресії								
	b₀	b₁	b₂	b₃	b₄	b₁₂	b₂₃	b₂₄
Коефіцієнти регресії	5,589	-0,005	0,03027	-0,0008	0,00177	0,00215	0,69306	0,00192
Критерій Стюдента	—	7,610	46,459	1,215	2,718	3,293	1063,707	2,942

Коефіцієнт регресії вважається значимим, якщо розрахункове значення перевищує табличне значення. У нашому випадку при рівномірному дублюванні дослідів, ступінь свободи складає:

$$f = (n - 1)N = (6 - 1) * 16 = 80 \quad (12)$$

Відповідно, табличне значення t-критерія Стюдента при 5%-му рівні значимості складає 1,99. Як можна побачити з таблиці 5, лише один розрахований критерій (1,215) не перевищує даного значення. Отже коефіцієнт регресії b_3 можливо виключити з рівняння.

Також було визначено дисперсію адекватності $S_{ад}^2$ моделі. Вона характеризує розсіювання емпіричних значень вихідних параметрів відносно розрахункових, визначених по знайденому рівнянню регресії. Дисперсію адекватності визначають по формулі:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)} = 3.68e - 05 \quad (13)$$

Перевірку адекватності знайденої моделі проведено по F-критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{3.68e - 05}{4.0754e - 05} = 0.9 \quad (14)$$

Табличне значення для F-критерію Фішера при ступені свободи 11 становить $F_T = 1,8 \sim 1,9$. Розраховане значення критерію більше за табличне, отже знайдену модель можна вважати адекватною.

Після процесу інжекційного лиття, для тестових відливок були здійснені операції видалення воскового пластифікатора та стеаринової кислоти. Дані речовини видаляли шляхом промивання зразків гексаном при 45 °C протягом 900 хв. Решту зв'язувальної речовини видаляли в комбінованій печі для спікання шляхом термічного розщеплення. Кінцевим етапом є операція спікання. Тестові заготовки спікались при температурі 640 °C зі швидкістю нагріву 2 °C/хв. в атмосфері високочистого аргону протягом 64 годин. Залишкова пористість зразків становила 1,3%±0,1%. Після спікання середня щільність деталей складала 1,8 г/см³.

На спечених зразках були проведені виміри лінійного розміру (18,2 мм). Заміри проводились за допомогою мікрометра ДСТУ ГОСТ 6507:2009. Даний розмір є вихідним параметром (y_j). З метою дослідження впливу параметрів лиття на даний контрольний розмір деталей, було проведено розрахунки згідно формул (2) - (14). Результати розрахунків приведено в таблицях 6 та 7.

В таблиці 7 наведені розраховані коефіцієнти регресії. Враховуючи, що розрахований коефіцієнт Стюдента для таких факторів як b_3, b_4, b_{24} не перевищує табличного значення 1,99, можемо виключити вплив таких параметрів як: тиск витримки, температура прес-форми та ефект взаємодії “Тиск впорскування - Температура прес-форми” на кінцеві розміри деталі.

Розраховані параметри розміру деталі

Назва параметру	Номер досліджу							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{y}_j$	18,208	18,207	18,173	18,180	18,213	18,217	18,178	18,198
S_j^2	0,000137	0,000067	0,000147	0,000120	0,000147	0,000067	0,000177	0,000457
S_j	0,011691	0,008165	0,012111	0,010955	0,012111	0,008165	0,013292	0,021369
Назва параметру	9	10	11	12	13	14	15	16
$\bar{y}_j$	18,210	18,218	18,180	18,195	18,203	18,210	18,163	18,188
S_j^2	0,000040	0,000097	0,000160	0,000190	0,000187	0,000120	0,000267	0,000177
S_j	0,006325	0,009832	0,012649	0,013784	0,013663	0,010955	0,016329	0,013292

Табл. 7

Розраховані коефіцієнти регресії

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{23}	b_{24}
Коефіцієнти регресії	18,196	-0,0052	0,014	0	-0,0004	0,00312	2,271	0
Критерій Стьюдента	—	4,03	11,14	0	0,32	2,42	1761,92	0

Грунтуючись на коефіцієнтах регресії із таблиці 5 та 7 можна зробити висновок, що в обох випадках, вирішальний вплив на вагу відливка та геометричні розміри деталі має ефект взаємодії тиску впорскування - тиск витримки.

Враховуючи очевидний зв'язок між вагою відливки та розміром деталі, було розраховано коефіцієнт кореляції між середньою вагою деталей та їх розмірами після спікання згідно формули:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = 0,912 \quad (15)$$

Розрахований коефіцієнт кореляції складає 0,912. Даний коефіцієнт наближається до 1, що свідчить про сильний взаємозв'язок між вагою відливки та розміром спеченої деталі.

Висновки.

У результаті даного дослідження було визначено, що найбільший вплив серед параметрів інжекційного лиття на вагу відливка та розміри деталі має ефект взаємодії тиску впорскування та тиску витримки. Таким чином, при одночасній зміні даних параметрів можливо, в певних межах, впливати на номінальні розміри готової спеченої деталі. Також, встановлено, що вага відливка після операції інжекційного лиття має істотний вплив на геометричні розміри деталі. Отже, можна припустити, що вага деталі може слугувати контрольним параметром під час лиття для забезпечення стабільної розмірної точності деталі та зменшення кількості бракованих деталей.

Необхідно відмітити, що метод проведення досліджу згідно повного факторного аналізу є дієвим інструментом для дослідження впливу параметрів інжекційного лиття на якість деталей виготовлених по технології Інжекційне лиття порошку.

Робота виконана за фінансової підтримки Міністерства освіти та науки України (проект № 0123U100934).

Література

1. Williams Nick Metal Injection Moulding in the firearms industry: A global perspective / Nick Williams // PIM International. – 2014. – Vol. 8. – P. 76.
2. Heaney Donald F. Handbook of metal injection molding / Donald F. Heaney. – Woodhead Publishing Limited, 2012. – 604 p.
3. Yarlagadda P. K. D. V., 2002, "Development of an Integrated Neural Network System for Prediction of Process Parameters in Metal Injection Moulding / P. K. D. V. Yarlagadda // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 130–131. – P. 315–320.

4. Randall M. German Green Body Homogeneity Effects on Sintered Tolerances / M. German Randall // Powder Metallurgy. – 2004. – Vol. 47. – P. 157-160.
5. In Situ X-ray Synchrotron Radiation Analysis, Tensile- and Biodegradation Testing of Redox-Alloyed and Sintered MgCa-Alloy Parts Produced by Metal Injection Moulding // Martin Wolff, Heike Helmholtz, Monika Luczak [et al.] // Metals. – 2022. – Vol. 12. . – P. 353.
6. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.
7. Tseng W. J. Statistical Analysis of Process Parameters Influencing Dimensional Control in Ceramic Injection Molding / W. J. Tseng // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 79. – P. 242–250.
8. Optimization of Process Conditions in Powder Injection Moulding of Microsystem Components Using a Robust Design Method: Part I. Primary Design Parameters / R. Urval, S. Lee, S. V. Atre [et al.] // Powder Metallurgy. – 2008. – Vol. 51 . – P. 33–142.
9. Process Simulation of Powder Injection Moulding: Identification of Significant Parameters During Mould Filling Phase / S. V. Atre, S. J. Park, R. Zauner [et al.] // Powder Metallurgy. – 2007. – Vol. 50. – P. 76–85.
10. Barriere T. Determination of the Optimal Process Parameters in Metal Injection Molding From Experiments and Numerical Modeling / T. Barriere, B. Liu, J. C. Gelin // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 143-144. – P. 636–644.
11. Simulation of the Sintering Densification and Shrinkage Behavior of Powder-Injection-Molded 17-4 PH Stainless Steel / Y. S Kwon, Y. Wu, P. Suri [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2004. – Vol. 35. – P. 257–263.
12. Investigation of Mouldability for Feedstocks Used Powder Injection Moulding / C. Karatas, A. Sozen, E. Arcaklioglu, S. Erguney [et al.] // Materials and Design. – 2008. – Vol. 29. – P. 1713–1724.

Рецензент: Мініцький Анатолій Вячеславович, д. т. н., проф. КІП ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ