

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПОРОШКОВІЙ МЕТАЛУРГІЇ. ДОСЯГНЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ

Порошкова металургія відома досить давно як метод виробництва виробів різноманітної форми і розмірів або створювання принципово нових матеріалів, які іншими шляхами важко чи зовсім неможливо виготовити. Тому вона досить впевнено посідає своє ринкове місце.

Найбільшу частку продукції з порошкових матеріалів (до 85 % за масою) [1] становлять порівняно невеликі вироби машинобудівного призначення (шестерні, кільця, підшипники ковзання, диски тощо). Їх виробництво у світі сильно залежить, зокрема, від основного споживача – автомобільної промисловості. Такі деталі виготовляються здебільшого традиційними методами розсування – одно- і двобічного пресування, мундштучного пресування тощо. Проте за останні десятиріччя спостерігається стійке зростання виробництва порошкових матеріалів деякими іншими способами, особливо коли їх споживачами стала аерокосмічна промисловість. До таких способів, зокрема, належать гаряче ізостатичне пресування, інжекційне формування та адитивні технології.

Гаряче ізостатичне пресування (ГІП – Hot Isostatic Pressing) використовується для виготовлення виробів точної форми масою до 1 тонни (переважно з нержавіючої сталі та жаростійких сплавів) для енергетики, військової та медичної техніки, аерокосмічного машинобудування. Розвитку цієї технології сприяє впровадження удосконалених методів автоматичного проектування та можливість виготовлення деталей зі складною внутрішньою геометрією. Очікується, що виробництво деталей з інструментальних сталей методами ГІП з 2010 р. до 2020 р. зросте на 62 % [2]. Дрібніший сегмент ринку виробів, виготовлених методами ГІП, займає металізування, паяння і вибіркоче точне профілювання поверхонь.

Провідними фірмами-виготівниками обладнання для ГІП – газостатів – є ASEA (Швеція), Kobe Steel Ltd. (Японія), Autoclave engineers inc. та Conway pressure systems (США), ВНИИметмаш (Росія).

Переваги ізостатичного пресування полягають у здатності виготовляти деталі значно більших розмірів, ніж це можливо іншими технологіями порошкової металургії, з практично необмеженими за складністю геометричними формами і високою точністю розмірів. ГІП застосовується для виготовлення виробів з таких малопластичних матеріалів, як жаростійкі сплави, титан, інструментальні сталі з високим коефіцієнтом використання матеріалу. Методами ГІП можуть бути виготовлені деталі, які мають стовідсоткову щільність з ізотропними механічними властивостями. Так, турбінні диски, виготовлені з порошків ізостатичним пресуванням, мають порівняно з литими підвищену міцність і жаростійкість на 7...15 %, збільшений у 1,3...1,8 рази робочий ресурс, та зменшені у 2...3 рази припуски на механічне оброблення (рис. 1). У структурі ринку порошкових деталей в Європі у 2009 р. вироби, виготовлені гарячим ізостатичним пресуванням, становили 3 % (за масою) [1].

Гаряче ізостатичне пресування використовується також для ущільнення попередньо спечених заготовок із закритою поверхневою пористістю.

Проте ізостатичне пресування використовують лише при достатньому розмірі виробничої партії, оскільки це досить дорогий метод з-за низької продуктивності і великої вартості необхідного витратного оснащення.

Інжекційне формування (ІФ - Metal Injection Molding) – формування заготовок із суміші тонкого металевого порошку і 15...30 % (об) пластифікатора, який забезпечує суміші пластичність, шляхом впорскування її і заповнення прес-форми при невеликому тиску і невисокому нагріванні. Перевагами ІФ є придатність процесу для виробів необмежено складної форми з високою точністю розмірів і високою міцністю, тому що тонкі порошки спікаються до практично суцільної щільності; висока продуктивність за рахунок використання багатогніздного оснащення. За механічними властивостями такі вироби успішно конкурують з виробами, виготовленими гарячим пластичним деформуванням. Розміри виробів – від десятих часток грама до 250 г при товщині 0,7...5,0 мм.

Методами ІФ виготовляють вироби з низьколегованих і нержавіючих сталей, сплавів на основі нікелю й кобальту та магнітних матеріалів. Головні споживачі виробів – автомобільна та медична промисловість, виробництво споживчих товарів. Збільшення у подальшому виробництва деталей, виготовлених методами ІФ, пов'язане зі збільшенням попиту на компоненти для стільникових телефонів, комп'ютерів та інших електронних приладів, а також деталей авіаційних двигунів, вогнепальної зброї (рис. 2).



Рис. 1. Заготовка корпусу компресора ГТД діаметром 700 мм компанії Rolls-Royce, виготовлена гарячим ізостатичним пресуванням



Рис. 2. Блок напрямних лопатей ГТД зі стільниковим ущільненням, виготовленим методом ІФ

Технології ІФ розвиваються у США, Японії та інших країнах виключно швидкими темпами. Щорічний обсяг виробництва зростає на 22 %. На сьогодні у світі працює понад 250 компаній, які використовують ІФ, з них 48 % в Азії, 29 % у Північній Америці і 23 % в Європі [2].

Для виготовлення виробів використовують порошки з розмірами частинок менше 20 мкм, але бажано, щоб середній розмір частинок не перевищував 10 мкм. Тому головний недолік процесу – висока вартість вихідних порошків.

Перспективним напрямком розвитку технологій інжекційного формування є покращення якості та технологічності виробництва, досягнення ними нової функціональності (наприклад, виготовлення двокомпонентних деталей), розроблення технологій виготовлення мікродеталей тощо.

За останні десятиліття у порошкостій металургії з'явилися деякі нові технології, які дозволяють виготовляти точні за формою і розмірами деталі без оснащення шляхом нанесення матеріалу шар за шаром з використанням системи тривимірного автоматичного виготовлення (3D-CAM). Ці технології отримали загальну назву **адитивне виготовлення** (AB - Additive Manufacturing). Відмінність адитивних технологій від традиційних ґрунтується на пошаровому синтезі виробу шляхом **додавання** шарів матеріалу виробу згідно з програмою, заданою моделлю конструктора. Їх назва походить від англійського дієслова add – додавати, доповнювати, долучати, приєднувати, тому їх можна назвати також **додаваннями**. Ці технології дозволяють виготовляти з високою точністю тривимірні деталі складної структури без закріплення у будь-якому оснащенні.

На практиці використовуються два варіанти **додаваннях**, або адитивних, технологій, які відрізняються за методом формування шарів металу [3].

Перший варіант – **осаджування на основі-підкладці** (ООП - Bed Deposition) – полягає у тому, що на певній основі (робочій платформі) створюється достатній об'єм порошку, в якому послідовно, шар за шаром товщиною 20...50 мкм кожний певним джерелом енергії (найчастіше – лазерним променем) частинки порошку сплавляються, формуючи деталь. Фактично вона, *оточена з усіх боків порошком*, і таким чином, спираючись на невитрачений матеріал, «виросить» знизу вгору. Лазерний промінь плавить порошок та з мікронною точністю створює деталі найскладнішої конфігурації. При цьому отримують деталі зі щільністю понад 99 %.

Різні фірми позначають свої технології цього типу по-різному. Найчастіше мова йде про Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) та Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [3, 4]. Принципової різниці між цими процесами немає. Вони відрізняються лише тим, до якого ступеня доводиться сплавлення частинок порошку: чи порошок лише спікається (Sintering), чи повністю плавиться (Melting) для створення монолітної деталі.

Другий варіант додаваннях технологій – **спрямоване осаджування** (CO – Directed Deposition або Directed Energy Deposition) – полягає у тому, що за схемою 3D-технологій виріб формується на певній основі-підкладці послідовно, шар за шаром, шляхом спрямованого підведення одночасно енергії (лазерний або електронний промінь, електрична дуга) і будівельного матеріалу (у вигляді порошку або порошкового дроту) безпосередньо у місце його побудови, створюючи на початковому етапі міжатомний з'язок між осадженим металом і підкладкою. Тобто виріб *без зовнішньої опори (оснащення)* створюється знизу вгору послідовним нанесенням розплавленого металу на основу-підкладку і наступні шари за певною програмою. Такі технології отримали назви: DMD – Direct Metal Deposition, LENS – Laser Engineered Net Shape, DM – Direct Manufacturing та ін.

Можливості обох процесів наведені у таблиці 1 [2].

SLS-технології знайшли своє місце для виконання замовлень дрібносерійного виробництва, коли інші методи їх виконання занадто складні. Наприклад, виготовлення металевих ливарних форм складної конструкції, прес-форм для лиття під тиском металевих і пластмасових виробів.

Методами SLM-технологій можна виготовляти вироби дуже складної конфігурації з титанових, жароміцних сплавів, зокрема теплообмінники, імпланти тазостегнових суглобів зі складним дизайном поверхні. Поширюється рентабельне виготовлення виробів суто індивідуального використання, зокрема рагликових слухових імплантів, які складаються з дрібних титанових елементів, що повинні мати точність до ± 10 мкм. Автоматизація виробництва з використанням 3D-принтерів дозволяє виготовляти металеві деталі аерокосмічної техніки будь-якої складності й розмірів практично без браку. NASA впровадила цей метод виробництва для виготовлення деталей ракетного двигуна J-2X.

Фірма Optomec почала конвеєрне виробництво 3D-принтерів металевих деталей LENS 450, які можуть виготовляти вироби за технологією DMLS з нержавіючої сталі, жароміцних сплавів, титану, нікелю та ін. Принтер LENS 450 має технологічну камеру об'ємом 100 мм³, оптоволоконний лазер потужністю 400 Вт здатен осаджувати метали з продуктивністю до 80 г/год.

Різновидом використання технологій CO - Directed Deposition для аерокосмічних виробів може слугувати лазерне порошкове наплавлення LMD – Laser Metal Deposition. Прикладом може слугувати нанесення на передню кромку турбінної лопатки з жароміцного сплаву висотою 0,7 м шару титанового сплаву з метою захисту її від газоабразивного зношування. Установка DMD фірми POM використовує CO₂-лазер, має швидкість наплавлення 14...147 см³/год. з товщиною шарів 0,3...0,6 мм. Технологія лазерного порошкового наплавлення може використовуватися не лише для ремонту, але й для створення принципово нових градієнтних матеріалів за один технологічний цикл виробництва.

Таблиця 1 – Можливості процесів Bed Deposition і Directed Deposition

	CO - Directed Deposition		ООП - Bed Deposition
	дріт	порошок	
Матеріали	лише дріт	більше різноманіття за складом	вибір порошків порівняно обмежений
Типовий розмір частинок порошку, мкм	-	50...100	20...50
Розмір деталей, см	обмежений розмірами маніпуляційної системи (висота – 100, довжина – 200)		обмежений розмірами технологічної камери (25 × 25 × 25)
Складність деталей	такі, що вільно стоять вертикально		майже без обмежень
Розмірна точність, мм	> 0,2	> 0,1	> 0,1
Швидкість нарощування, см ³ /год	60...100	5...25	5...10
Основа-підкладка	конформні поверхні		гладкі поверхні
Шорсткість R _a , мкм	12,5...8	25...6,3	12,5...10
Товщина шарів, мм		> 0,03...3	

Проблемою додаваних, або адитивних, технологій є необхідність використання високоякісних і досить коштовних порошків. Порошки для адитивних технологій мають бути хімічно однорідними, мати понижений вміст газових домішок, бажано сферичної форми [5, 6]. Середній розмір частинок принаймні на 50 % має бути не більше 40 мкм. Чим менше середній розмір частинок порошку, тим менший крок побудови виробу можна використати, а це означає, що можна досягнути меншу шорсткість поверхні деталі та рельєфніше проробити її дрібні елементи. Але, з іншого боку, якщо порошок має занадто малий розмір частинок, то під час побудови виробу легкі частинки будуть «вилітати» з зони розплавлення, внаслідок чого збільшується мікропористість і шорсткість виробу. Понад 90 % всіх порошків, які застосовуються в адитивному виробництві, отримують методами диспергування розплаву.

Адитивні технології, практично безвідходні на відміну від традиційних, вигідні в умовах дрібносерійного виробництва, вимірюваного десятками або сотнями виробів. Таких виробів, найчастіше складної геометрії, зі спеціальних матеріалів досить багато в авіаційній промисловості, космічній індустрії, енергетичному машинобудуванні і низці інших галузей. Перспективи їх розвитку пов'язані з переходом згаданих технологій з розряду дослідних робіт до використання як основного формату виробництва. Наприклад, фірма Boeing планує максимально розширити використання SLS-технологій у своєму виробництві. Компанія Pratt&Whitney створила сучасний Центр адитивного виробництва на базі технопарку університету Коннектикуту.

Сучасне постіндустріє виробництво характеризується відносно швидкою зміною виробів, причому часто міняються не основні компоненти, що визначають їх функціональні якості, а дизайн – корпусні деталі. При використанні традиційних технологій це вимагає часті зміни оснащення, а іноді й навіть складного і дорогого обладнання, а адитивні технології дозволяють швидко перейти на наявному обладнанні до виготовлення безпосередньо товарного виробу, а не оснащення. Згадані технології перспективні також для виготовлення комплексних вузлів як єдине ціле, а не зі складових частин, що сприятливо впливає на якість і вартість виробу. Особливо це стосується об'єктів зі складною геометрією. Використання адитивних технологій вигідне у разі побудови внутрішніх порожнин цілісних деталей, недоступних за складністю традиційним методам виробництва. Мотивацією тут слугуватиме економічна доцільність.

Отже, як гаряче ізостатичне пресування, так і згадані у статті інжекційне формування та адитивні технології за своїми можливостями мають досить широкі потужності для використання і з кожним роком стають доступнішими, оскільки їх собівартість поступово зменшується. Плануючи перспективні виробы та розробляючи їх ефективне виробництво, необхідно орієнтуватися на нові порошкові матеріали замість традиційних та використовувати технології, які мають перспективи у майбутньому.

Список літератури

1. Молоденская К. В. Особенности технологии, свойства и области применения пористых спеченных материалов. [Електронний ресурс] Режим доступу: www.rosgorprom.com/images/sb2013_pdf/Sb2013ed_31.pdf
2. Чернышев Л. И. Порошковая металлургия – трудности и перспективы современного этапа развития / Л. И. Чернышев, Д. А. Левина // Порошковая металлургия. – 2013. – №11/12. – С. 144–150.
3. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической техники / А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко, И. Г. Лавренко. – К. : КВИЦ, 2016. – 304 с.
4. Коломієць С. М. Сучасні технології виробництва деталей машин / С. М. Коломієць // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2015. – № 158. – С. 74–79.

5. Использование титановых порошков в методах 3D печати изделий / А. А. Джуган, В. Е. Ольшанецкий, А. В. Овчинников и др. // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2016. – № 2. – С. 77–81.
6. Глотка О. А. Аналіз вітчизняних жароміцних порошків на нікелевій основі, які застосовуються в адитивних технологіях / О. А. Глотка, О. В. Овчинников // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 2. – С. 39–42.

Одержано 28.11.2017

© Канд. техн. наук В. М. Плєскач

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

Pleskach V. Modern technologies in powder metallurgy. Achievements and prospects

ОБ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

В работе [1] автором была предпринята попытка улучшить подход для ряда практических случаев (например исследований в области металлургии и материаловедения) к созданию и оценке полнофакторных и дробных матриц планирования экспериментов (прежде всего для случаев ненасыщенных планов типа 2^3 и 2^{3-1}).

Использование же насыщенных матриц, когда число линейных уравнений, заданных в кодовом масштабе, равняется числу переменных, в качестве которых выступают коэффициенты этих уравнений, при стандартном планировании получают оценочные результаты которые, независимо от выбора центров планов, практически не содержат полезной информации. В то же время попытки использования композиционных надстроек из-за смешения полей распределения угловых коэффициентов и факторов влияния, отличающихся от стандартных единичных значений, приводит к результатам, не отвечающих принципу ротатабельности [2]. Это делает бессмысленным оценку ошибок расчетных значений функции отклика при их одинаковых отклонениях относительно центра ортогонального плана (из-за сильного отличия результатов таких оценок).

Полностью насыщенные матрицы ортогональных планов обязательно включают различные комбинации факторов у смешанных эффектах их совместного влияния, что приводит к уравнениям вида:

$$y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + b_3x_{3i} + b_{12}x_{1i}x_{2i} + b_{13}x_{1i}x_{3i} + b_{21}x_{2i}x_{3i} + b_{123}x_{1i}x_{2i}x_{3i}, \quad (1)$$

в которых, кроме вышеуказанных недостатков, невозможно корректно оценивать эффективность отдельных смешанных оценок касательно конкретных влияний, определяющих их факторов.

В случае ненасыщенных планов ортогональных моделей в отсутствии учета смешанных эффектов полезно использовать коэффициенты множественной корреляции R , сопровождая их определением эмпирической ковариации (относительного корреляционного момента) согласно формулы, приведенной в работе [1, 3].

$$\text{Cov}(x_{1(2)}, y) = \frac{\sum_i^n x_{1(2)i} y_i}{n-1} \quad \text{при} \quad \sum_i^n (x_{1(2)i} - \bar{x}_{1(2)}) = 0. \quad (2)$$

Поскольку ковариация устанавливает глубину корреляционной связи, то для достижения приемлемого результата факторы влияния должны иметь единоразрядные значения [1]. Далее полезно привести корректный вывод формулы для оценки R , используя для упрощения техники вывода только двух угловых коэффициентов b_1 и b_2 в дискретном векторном поле их значений при заданных нормированных характеристиках (+1, -1) факторов влияния.

Как следует из схемы для плоского векторного поля (рис. 1), имеем 4 пары кодовых единиц ортогонального плана 2^2 . В случае же объемного векторного поля (ортогональный план 2^3) имеем 8 троек единичных факторов (полный факторный эксперимент). То есть, полнота заполнения факторного пространства в виде сферы с координатными точками (полюсами) на ее поверхности в этих случаях отвечает двум симплексам (в первом – в виде вписанного в сферу тетрагонального тетраэдра с элементами симметрии ($\sqrt{4}2m$), а во втором – полносимметричного гексаэдра ($m3m$)). Для простейшего случая 4-х линейных уравнений соответствующие составляющие в виде векторов $\bar{r}_{1(2)}$

определяют множественный коэффициент корреляции как корень из суммы их квадратов, то есть $R = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}$, где