

**Писаренко В.Г.**КНВО "Форт" МВС України,  
м. Вінниця, Україна**ТЕХНОЛОГІЯ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ  
ПОРОШКОВИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ДЕТАЛЕЙ  
ТОЧНОЇ МЕХАНІКИ****Вступ**

Технологія інжекційного лиття порошкових деталей відома в англomовній літературі під загальною назвою PIM-технологія (Powder Injection Molding). Інжекційне лиття порошку (ІЛП, PIM) вперше було використане в 1920 році, Впровадження PIM технології в виробництво почалося з 80-х років ХХ століття. В будь-якому випадку, до 1990 року, ІЛП потребувало наявності обов'язкової інфраструктури для широкого промислового використання. Швидке зростання кількості та обсягу користувачів останнім часом призвело до спрямування уваги на технології.

Цей спосіб виробництва металевих і керамічних деталей складного і дуже складного профілю з достатньо високими вимогами по точності (9-й і 10-й квалітет) практично без відходів матеріалу і механічної обробки, сьогодні вважається мало затратним [1 - 3]. Зріст застосування таких деталей в США і в країнах Західної Європи приходить на кінець 90-х років, коли менш ніж за рік обсяги продукції виготовленої за цією технологією подвоювались. Темпи зростання застосування деталей, вироблених за допомогою PIM - технологій, в цих країнах залишаються достатньо високими. Технологія лиття порошкових матеріалів під тиском (PIM - технологія) це результат об'єднання лиття полімерних матеріалів з технологіями порошкової металургії. Спеціалізованими напрямками цієї технології є лиття металевих деталей під тиском «Metal Injection Molding» скорочено MIM-технологія і технологія виготовлення таким методом керамічних деталей скорочено CIM-технологія. Загалом ці процеси дуже схожі і відрізняються вони лише за хімічними властивостями порошку та температурою спікання. Такі технології дають величезну перевагу при виробництві деталей зі складними формами й великими обсягами виробництва в порівнянні із традиційними методами.

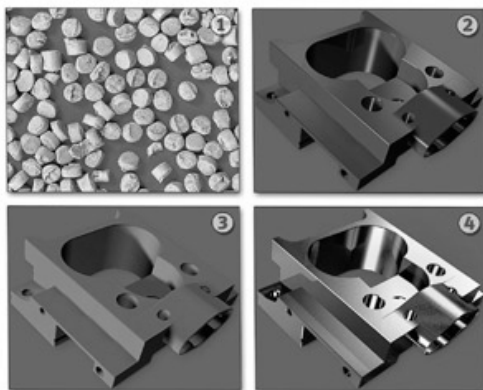
Інжекційне лиття порошку стає більш конкурентоспроможним, коли використовуються складні та витривалі компоненти з високими характеристиками. Окрім того, ІЛП це економний процес, що найбільше підходить для масового виробництва. Визнання широкого спектру використання, матеріалів, властивостей та можливостей тепер допомагають знайти нові способи використання, що сприяють підтримці розвитку даного напрямку.

Вперше, технологія ІЛП була продемонстрована в ті часи, коли інжекційне лиття пластику вважали досить новою технологією. Першим продуктом була керамічна деталь – свічка запалювання для автомобіля. Демонстрації з цементованих карбідів припадають на 60-ті роки, але інжекційне лиття металевих порошків розпочалося в 70-х роках. З плином років було вдосконалено багато продуктів та технологій, проте комерційний успіх не був очевидним аж до 90-х років. Цей довгий процес розвитку характеризували наступні факти:

- первинні технології були приватними та пильно охоронялись;
- необхідні порошки малого розміру (особливо металеві), були важкодоступними;
- недостатність робітників з необхідним рівнем знань;
- перше обладнання було збудоване з нуля із слабкими можливостями контролювання процесу;
- конструктори не мали правил конструювання та не знали властивостей матеріалів;
- оптимізація була неможливою через відсутність наукового обґрунтування ІЛП

**Характеристика технологічного MIM-процесу**

Технологічний MIM процес поділяється на чотири стадії (рис. 1):



**Рис. 1 – Чотири стадії MIM процесу**

**На першій стадії** з порошку і зв'язуючої речовини (пластифікатора) готують так звану «молочну суміш» або компаунд міжнародна назва – Feedstock.

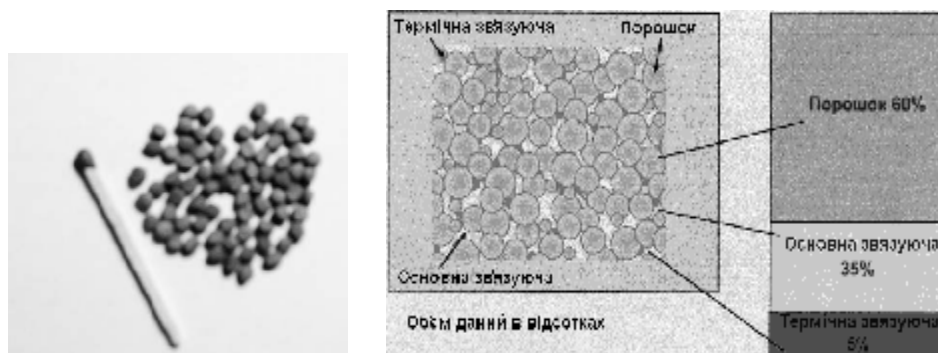


Рис. 2 – Молочна суміш (компаунд)

У цій базовій формі, процес ІЛП передбачає поєднання порошку та пластику у пропорції – 60 % порошку, та 40 % - сполучного матеріалу. В залежності від щільності, готовий виріб важить від 85 до 98 % ваги порошку. Порошки, зазвичай, мають досить малі розміри часток – до 20 мікрметрів (20  $\mu\text{m}$  чи  $\approx 0,0008$  дюймів).

Зв'язуюча речовина – полімерна суміш, яка забезпечує змащення та зчеплення порошку. Вона відіграє вирішальну роль для підтримки текучості сировини під час лиття та міцності готової заготовки. Сполучник (зв'язуюча речовина) як видно на рис. 2 складається з двох частин це – основна зв'язуюча і термічна зв'язуюча. Основна зв'язуюча випаровується під час розчеплення, а термічна під час спікання. Хімічні властивості зв'язуючої речовини впливають на процес її видалення.

Змішування такої суміші виконується при підвищеній температурі від 100 до 200  $^{\circ}\text{C}$  і за допомогою двохшнекових екструдерів. На виході еструдера суміш перемелюється в гранули. Шляхом дозування кількості порошку або зв'язуючої речовини можна змінювати величину усадки та інші параметри.

Комбінація порошку та сполучної суміші і являє собою сировину (компаунд) для виробництва.

**На другій стадії** з суміші порошку, де розміри його частинок від 0,001 до 0,02мм, і полімерного зв'язуючого матеріалу, проводять формовку деталей на литтєвій машині, аналогічній термопластавтомату з відповідними припусками на усадку, яка в РІМ процесі доходить до 26 % на сторону. Процес називають інжекційним литтям. Це гідростатична техніка лиття, що застосовується до лиття пластику при відносно низькій температурі і тиску.

Ливарна машина впорскує суміш розправленого полімеру і твердого порошку під тиском до порожнини ливарної форми. Під час цього процесу лиття, порошок не зазнає ніяких змін, оскільки максимальна температура плавлення сполуки набагато нижча за температуру плавлення порошку. Литьєва спресована заготовка охолоджується у порожнині ливарної форми до затвердіння полімеру. Такі спресовані деталі називають – «зеленими заготівками». Схематику процесу інжекційного лиття порошку дивись рис. 3.

**Третя стадія** це видалення зв'язуючої речовини (пластифікатора). Цей процес називають ще розчепленням – це етап інжекційного лиття між плавленням та спіканням, в якому основна частина зв'язуючої речовини видаляється шляхом нагрівання, розчинення, кристалізації чи інших способів. Техніка розчеплення залежить від складу сполучника. Термічне розчеплення є найбільш поширеним та найстарішим методом, проте використовують і інші альтернативні хіміко-каталітичні методи або поєднання методів. Видалення проходить не зачіпаючи при цьому сформованого порошку. Після видалення зв'язуючої речовини одержані деталі називають «коричневими заготівками».

**Четверта стадія - спікання** – це процес з'єднання часток, який відбувається між ущільненими порошками при нагріванні до точки активації атомного руху. У багатьох порошків це починається задовго до температури плавлення. Один загальний результат спікання це усадка деталі. До речі, готова деталь зазвичай на 15 % менша від розміру порожнини форми, в яку вона була влита. Остання порція полімеру видаляється під час нагрівання порошку до температури спікання. Після спікання немає жодних ознак присутності порошків та полімерів, тому робочі характеристики продуктів, виготовлених шляхом ІЛП, складають достойну конкуренцію іншим промисловими виробам з металу та кераміки, та мають велику перевагу за рахунок властивостей, притаманих полімерам.

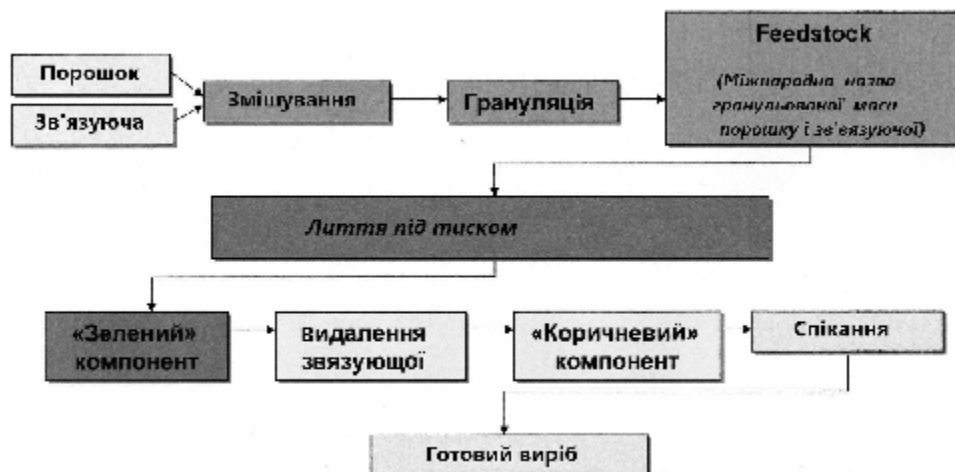


Рис. 3 – Схематика процесу інжекційного лиття порошку

### Основні показники

Інжекційне лиття порошку дозволяє виготовити широкий спектр готових компонентів з високими технічними показниками та складною формою.

Матеріали, використовувані в процесі ІЛП мають багато спільного з керамікою та сплавами. До того ж з'являються новітні сполуки, які пристосовуються до вимог масового виробництва деталей з меншою вагою, пористою та багатшаровою структурою та корисними властивостями.

Однією з відомих компаній з виробництва необхідних матеріалів для РІМ-технологій є компанія BASF. Ця компанія виготовляє сировину під торговою маркою Catamold®.

Основа сировини Catamold® становить зв'язуюча речовина поліацеталь, це напівпрозорий термопластичний матеріал з гарними технологічними характеристиками - високою стабільністю розмірів, високою міцністю й гарною теплостійкістю. Чудові загальні характеристики поліацеталю роблять його кращим матеріалом для використання у виробництві, що вимагає високої точності виробів, і всі ці якості, як не можна краще, підходять для технології інжекційного лиття під тиском.

Однак вирішальною перевагою поліацеталю, як зв'язуючої речовини в сировині Catamold®, є здатність її швидкого каталітичного видалення. У присутності відповідного каталізатора поліацеталь деполімеризується набагато нижче точки плавлення з виділенням газоподібного складового мономера. Таким чином, каталітичне видалення зв'язуючої речовини дозволяє видаляти її з відлитого виробу шляхом керованого, поступового виділення газу із твердої речовини по лініях усадки не заліпивши серцевину виробу. Невелика кількість зв'язуючої речовини залишається, вона необхідна для надання міцності отриманій порошковій заготівці, що підлягає подальшій обробці. Потім ця зв'язуюча, на ранніх стадіях традиційного циклу випалу, легко видаляється. Під час наступного випалу відбувається ущільнення практично до теоретичних показників металевого матеріалу без застосування тиску. Технологічні властивості висококонцентрованої сировини Catamold®, у процесі лиття під тиском, та її видалення на етапах випалу, описуються в нижченаведених розділах

Основні переваги ІЛП полягають: перше – у складності форми, друге – низькій ціні та третє – високих технічних характеристиках. Досягнення цілі полягає у перетині цих трьох факторів., На прийняття рішення щодо використання ІЛП впливають і інші другорядні властивості, серед яких висока продуктивність обладнання, високий коефіцієнт використання матеріалу, гладенька поверхня готового виробу та висока витривалість.

### Відмінності від пресування

Іноді виникає плутанина у відмінностях між інжекційним литтям з порошку та альтернативними методами, основою яких є пресування.

**Пресування** – це загальноновживана технологія формування широкого ряду матеріалів – від кераміки до медикаментів. Її основою є створення форми з використанням верхнього та нижнього тиску на порошок у формі (наприклад пресування таблетки аспірину). Пресування широко використовується для створення форм низької висоти, які можна легко вилучити з обладнання. В деяких випадках тиск досягає 840 МПа. Проте, через необхідність ежекції з обладнання, комплексність форми зумовлена лише напрямком стискання. Існує декілька властивостей, перпендикулярних напрямку стискання, але навіть вони є

забороненими. До того ж, пресування призводить до відхилення щільності стисненого порошку, яке обумовлене тертям між порошком та обладнанням.

Ця відмінність від ІЛП є незмінною при пресуванні з набагато нижчими тисками. Оскільки градієнти щільності спричиняють деформацію під час спікання, однорідна щільність у ІЛП дає рівномірні розміри після усадки за допомогою спікання з використанням високої температури. Тому деталі, виготовлені шляхом пресування порошку:

- спікаються при низьких температурах, на яких усадка неможлива;
- часто обробляються на обладнанні після спікання для відповідності заданим розмірам;
- якщо спікання призвело до повної щільності, то вони можуть мати недостатньо рівномірні

розміри;

- якщо не відбувається спікання – властивості погіршуються і виникає залишкова пористість.

Варто зазначити, що спечені щільні деталі, виготовлені шляхом ІЛП, мають набагато нижчий рівень відхилення від заданих розмірів. Отже, після спікання до повної щільності, процес ІЛП здатний до якісного контролю розмірів. Покращення властивостей шляхом підвищення щільності дає змогу процесу розвиватися.

### **Зв'язок з інжекційним литтям пластику**

У попередньому розділі було звернено увагу на ІЛП та його зв'язок зі спіканням порошків, яке використовується у пресуванні. Інжекційне лиття пластику є ще однією ключовою технологією, яка впливає на ІЛП. Звичайно, одразу після винайдення ІЛП, стало модно використовувати пластичне лиття при виробництві продукції з металу та кераміки. Формувальні машини, форми для лиття та навіть цикли лиття схожі між собою. Для демонстрації цих схожостей використовувалась велика кількість пластичних інструментів, тому очевидно, що ІЛП має багато спільного з литтям пластику. Але після етапу лиття всі схожості закінчуються. Пластик не має нічого спільного з обробкою після лиття, такою як спікання та 15% зменшення розміру. В подальшому, процес лиття пластику не розділяє погляди ІЛП стосовно управління складом та мікроструктурою після лиття.

Інші відмінності між ІЛП та литтям пластику стосуються властивостей та економії. В литті пластику смола є фактором високої вартості. Але в ІЛП дуже затратними є процеси видалення сполучних компонентів та спікання, які не притаманні литтю пластику. Тому, на відміну від смоли в литті пластику, вирішальними ціноутворюючими факторами в ІЛП виступають процеси обробки. В багатьох сферах використовуються як компоненти ІЛП так і пластику, тому ці процеси достатньо споріднені. Не зважаючи на це, їх властивості дуже відрізняються, починаючи з маси компонента. Метал та кераміка мають набагато більшу щільність порівняно з пластиком, оскільки вони мають термічні, електричні, магнітні, механічні та інші властивості, не властиві пластику.

Звичайно, лиття пластику та ІЛП це взаємодоповнюючі процеси; ІЛП використовують лише тоді, коли більш дешево лиття пластику не здатне забезпечити отримання необхідних властивостей. Наприклад, корисна міцність поліетилену, отриманого методом лиття пластику, менша 20 МПа, в той час як сталь ІЛП міцніша в 20 - 100 разів. Лише особливі системи полімерів зі зміцненим волокном (наприклад Кевлар-епоксид) можуть зрівнятись з її властивостями (їх вартість в 10 - 100 разів більша аніж вартість звичайних полімерів). Не дивлячись на те, що обидві технології використовують однакове обладнання для лиття, концепцію розробки форм та правила лиття, інженерні властивості ІЛП недосяжні для сучасного лиття пластику.

### **Гнучкість МІМ технології**

Інжекційне лиття з порошку це дуже гнучка технологія формування, яка використовує широкий спектр матеріалів, форм, способів використання та можливостей виробництва. Серед майже усіх традиційних інженерних матеріалів, ІЛП також може створити особливі матеріали такі як карбід силікону, суперсплави на основі нікелю, інтерметали, коштовні метали та композити, зміцнені керамічним волокном. Це одною альтернативою є спільне лиття, при якому два матеріали поєднують з метою створення шаруватої структури або нестандартної функціональної основи на етапі формування.

В альтернативі, литі складові можна з'єднувати до спікання для того щоб збільшити складність форми. Ця можливість дає змогу створення корозійних бар'єрів, поверхні тертя, електричних схем або структур високої в'язкості.

Для виробника компонентів, ІЛП дає змогу досягти великих обсягів виробництва. Різноманітні компоненти ІЛП виробляють по 200 000 штук в день. З іншого боку, можливі і невеликі об'єми виробництва, такі як 5000 деталей на рік. Тим не менш, як і всі інші технології, суттю цих процесів є економія. Інжекційне лиття з порошку дає великі вартісні переваги при створенні складних форм. Ця перевага виникає з усунення вторинних операцій таких як машинна обробка, які часто застосовуються при отриманні

точних компонентів. Також, з того часу як стало можливим переробляти заготовки (шлаки, пошкоджені вироби), ступінь використання матеріалу виріс майже до 95%. Це особливо важливо для матеріалів з дорогої сировини, таких як тугоплавкі метали, особлива кераміка та коштовні метали. Тому ІЛП - це тривимірна технологія формування, яка базується на дискретних компонентах, створених на основі лиття пластику. Ця технологія дає змогу отримати матеріали високої якості з точними розмірами у великих кількостях і з великою економією коштів.

### Сфери застосування

МІМ-технологія лиття під тиском металевих виробів застосовується у всіх індустріальних областях, наприклад, в автомобільній промисловості, при виробництві коштовностей, запчастин, металевих конструкцій і медичного устаткування, а також при виготовленні різних механізмів. Процес лиття під тиском металевих виробів відкриває нові можливості для дизайну виробів. Вироби, відлиті за допомогою цього процесу, мають більш високу щільність (96 - 100 %) і набагато кращі механічні властивості в порівнянні з виробами виготовленими технологією порошкової металургії. У той час як твердість вихідних порошків у процесі порошкового спікання відіграє найважливішу роль, то при литті під тиском металевих виробів, цей фактор практично не має ніякого значення. Найбільшим фактором вартості при великих обсягах виробництва є вартість прес-форми, то витрати в процесі інжекційного лиття під тиском металевих виробів переважно визначаються вартістю сировини.

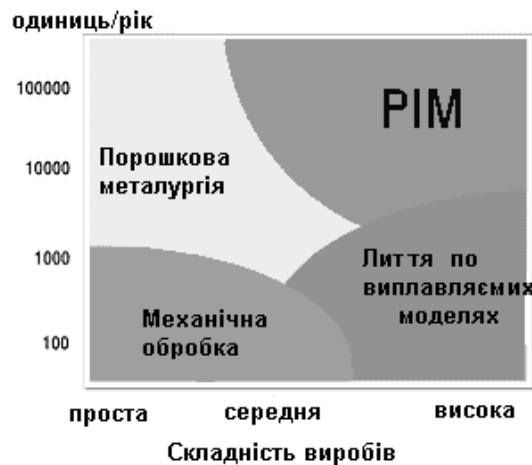


Рис. 4 – Діаграма застосувань.

Враховуючи, що ПІМ-матеріали не дешеві то найбільше впровадження ПІМ-технології пройшло на виробництво невеликих за розміром деталей.

У порівнянні з точним литтям, процес інжекційного лиття під тиском металевих виробів дає мінімальні допустимі відхилення розмірів і відмінні якості поверхні. У порівнянні зі сталевими виливками, структура в процесі металевого лиття під тиском є гомогенною по всій товщині виробу. Тенденція до деформації під час наступної термічної обробки виражена набагато менше. Нержавіюча й низьколегована сталь може взагалі не піддаватися термічній обробці. Величезні переваги цей процес надає при виробництві дуже точних виробів, у тих випадках, коли відповідний матеріал дуже важко або взагалі не піддається механічній обробці на верстатах.

Метод інжекційного лиття під тиском металевих виробів надає значні можливості для його автоматизації. Важливим кроком у напрямку до використання цих можливостей є виробництво обладнання для безперервної переробки сировини Catamold® яке вже працює у цей час у багатьох ПІМ-компаніях.

Слід відмітити, що перші впровадження МІМ-технології прийшлися при виготовленні стрілецької зброї. В цій галузі МІМ-технологія набирає нових перспектив. Багаторічну співпрацю поєднує Австрійську компанію Wittmann Battenfeld з Індійською фірмою IndoUS MIM Tec Pvt. Ltd. Фірма заснована в 2001 році і за короткий час стала однією з відомих у світі виробників лиття металевих виробів стрілецької зброї.

Найбільша частина деталей, виготовлених МІМ-методом, належить промисловості по виготовленню годинників. Такі компанії як Swatch, Seiko, Citizen вже давно використовують цей метод для виготовлення корпусу годинника і ланок для браслетів наручних годинників.



Рис. 5 – Деталі виготовлені за допомогою МІМ-технології

В останні роки МІМ-технологія застосовується в автомобільній промисловості при виготовленні деталей для дверних замків, деталей рулевого управління, деталей трансмісії, замків запалювання і т. д.

Найшлось застосування МІМ-технології також і в медичній галузі. Так, МІМ-технологія вже давно приміняється при виготовленні зубних брикетів, титановий порошок використовується для зубних штифтів, імплантатів для опорно-рухомого апарату і серцево-судинної системи і при виробництві мініатюрного хірургічного інструменту.

Можна ще і ще називати галузі промисловості де впевненим кроком йде впровадження МІМ, СІМ технологій.

#### **Висновок**

В роботі представлені основи прогресивної технології створення зносостійких деталей точної механіки точним литвом металевих порошків.

#### **Література**

1. Липатов Ю.С. Будущее полимерных композиций / Ю.С. Липатов // К.: Наук. Думка, 1984.
2. Калиничев Э.Л. Оборудование для литья под давлением: Расчет и конструирование / Э.Л. Калиничев, Е.И. Калиничева, М.Б. Саковцева // М.: Машиностроение, 1985.- 256 с.
3. Ashby, Mike and Johnson, Kara 'Materials and Design, the Art and Science of Materials Selection in Product Design' Butterworth Heinemann, Oxford, 2002.

Надійшла 1.07.2012