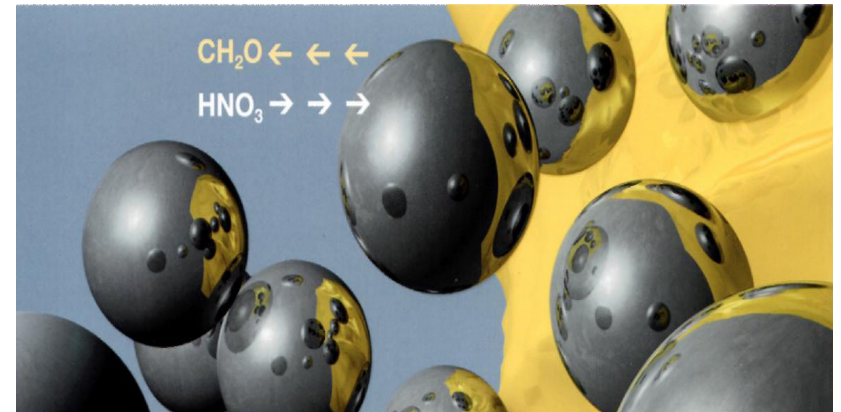


Сучасні технології в машинобудуванні.
Інжекційне лиття порошку



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ.
ІНЖЕКЦІЙНЕ ЛИТТЯ ПОРОШКУ**

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2019

УДК 621.762.4
С91

Автори:

В. Г. Писаренко, В. В. Савуляк, Є. Ф. Боковий, С. В. Завадюк

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №°12 від 26.06.2018 р.)

Рецензенти:

О. А. Гордєєв, доктор технічних наук, професор

О. В. Грушко, доктор технічних наук, професор

І. В. Севастьянов, доктор технічних наук, професор

Сучасні технології в машинобудуванні. Інжекційне лиття порошку : навчальний посібник / В. Г. Писаренко, В. В. Савуляк, Є. Ф. Боковий, С. В. Завадюк. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 242 с.

У посібнику наведено основні положення та теоретичні засади технології інжекційного лиття порошків, принципи проектування заготовок, типові технологічні процеси та їх параметри, характеристики отримуваних виробів, перелік та опис характеристик технологічного обладнання, специфічних можливостей процесу, типового браку, причин та способів його уникнення.

Посібник буде корисним для студентів машинобудівних спеціальностей закладів вищої освіти, інженерів та аспірантів.

УДК 621.762.4

© ВНТУ, 2019

ЗМІСТ

1 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	5
1.1 Історія розвитку інжекційного лиття порошкових матеріалів	5
1.2 Короткий огляд технології інжекційного лиття порошків	6
1.3 Відмінності від пресування	9
1.4 Зв'язок з інжекційним литтям пластмас	10
1.5 Лиття порошку під тиском	11
1.6 Типи порошків, які використовуються для ІЛП	18
1.7 Дебайдинг (видалення зв'язувальної речовини) та його види	26
1.8 Спікання	51
1.9 Застосування технології ІЛП	60
1.10 Огляд маркетингового ринку технології ІЛП: історія, динаміка та прогноз	62
2 ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ, ЩО ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ МЕТОДОМ ІЛП	67
2.1 Фізичні, хімічні та термодинамічні властивості	67
2.2 Теплофізичні властивості	71
2.3 Корозійна стійкість та зносостійкість	72
2.4 Електричні та магнітні властивості	73
2.5 Геометричні властивості	74
2.6 Підсумок важливих властивостей	77
3 РОЗРОБКА, ВИБІР ТА КОНСТРУЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКУ	78
3.1 Використання переваг ІЛП	78
3.2 Вибір деталей для ІЛП	79
3.3 Вибір матеріалів	81
3.4 Вибір конструкції та форми компонентів для ІЛП	83
3.5 Геометричні можливості	85
3.6 Особливості форми та розмірів	87
3.7 Товщина ребра, перегородки та стінки	89
3.8 Отвори та проточки	92
3.9 Різьба та особливості поверхні	95
3.10 Виступи та ступиці	97
3.11 Вирізи	99
3.12 Радіус кута та жолоба	100
3.13 Кути ежекції на поверхнях відливка	101
3.14 Шорсткість поверхні	102
3.15 Приклади деталей для виробництва ІЛП	102
3.16 Концепція показника промислових зразків	105

4	ОБЛАДНАННЯ, ОСНАЩЕННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ	107
4.1	Машини для лиття під тиском	107
4.2	Піч для видалення зв'язувальної речовини	110
4.3	Печі для спікання	112
4.4	Обладнання для отримання робочих газів	114
4.5	Пластини для розташування виробів у печі	116
4.6	Базові засади конструювання оснащення	119
4.7	Технічне обслуговування прес-форми	146
4.8	Комп'ютерне моделювання процесів ІЛП	147
5	ВТОРИННІ ОПЕРАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ІЛП	151
5.1	Вторинна переробка	151
5.2	Деформування заготовки	152
5.3	Механічна обробка	153
5.4	Термічна обробка	154
5.5	Процеси гарячого ізостатичного пресування	156
5.6	З'єднання заготовок	159
5.7	Обробка поверхонь	160
5.8	Стандарти для матеріалів, виготовлених за технологією ІЛП	160
5.9	Контроль параметрів деталі	167
6	СПЕЦИФІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ІЛП	183
6.1	Новітні процеси	183
6.1.1	Машинна обробка та збирання деталей з сирцю	183
6.1.2	Лиття з використанням газу та води	185
6.1.3	Пневматична ізостатична поковка	186
6.1.4	Великі структури	186
6.1.5	Мікроінжекційне лиття порошку (мікро ІЛП)	187
6.1.6	Концепції швидкого створення оснащення	191
6.2	Новітні матеріали	192
6.3	Адитивне виробництво та інжекційне лиття порошків	197
7	ДЕФЕКТИ І ПРОБЛЕМИ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ПРОЦЕСІ ІЛП	200
7.1	Загальні приклади проблем, які виникають при виготовленні деталей ІЛП	200
7.2	Суміш (feedstock)	203
7.3	Дефекти, які виникають при литті заготовок ІЛП	204
7.4	Дефекти дебайдингу	208
7.5	Дефекти спікання	211
	Література	217
	Додатки	218

1 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Історія розвитку інжекційного лиття порошкових матеріалів

Порошкова металургія існувала в Єгипті ще в III столітті до н. е. Стародавні інки з дорогоцінних металевих порошоків робили прикраси та інші артефакти. Суттєвий розвиток виготовлення виробів з порошкової металургії починається з середини XIX століття. Порошкова металургія розвивалася і дозволила отримати нові матеріали, які неможливо було отримати за допомогою традиційного лиття.

Технологія інжекційного лиття порошкових деталей відома в англійській літературі під загальною назвою PIM-технологія (Powder Injection Molding). Впровадження PIM-технології в виробництво почалося з 80-х років XX століття. В будь-якому випадку, до 1990 року, інжекційне лиття порошку (ІЛП) потребувало наявності спеціалізованої інфраструктури для початку широкого промислового використання. Проте швидке зростання кількості та обсягу споживання привело до поширення використання даної технології.

Інжекційне лиття металевих і керамічних деталей складного і дуже складного профілю з достатньо високими вимогами до точності (9-й і 10-й квалітет), практично без відходів матеріалу і механічної обробки, сьогодні вважається малозатратним. Зростання застосування таких деталей в США і в країнах Західної Європи припало на кінець 90-х років XX століття, коли, менш ніж за рік, обсяги продукції, виготовленої за цією технологією, подвоювались. Темпи поширення сфери використання деталей, виготовлених за допомогою даної технології, в цих країнах залишаються достатньо високими. Особливо виправдано виробництво деталей з нержавіючих і дорогих легованих сталей, де, за традиційними методами виробництва, багато матеріалу переробляється у стружку.

Технологія лиття порошкових матеріалів під тиском – 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 керамічних деталей (Ceramic Injection Molding) – CIM-технологія. Загалом ці процеси дуже схожі і відрізняються вони лише за хімічними властивостями порошку та температурою спікання. Такі технології дають величезну перевагу, порівняно з традиційними методами, при виробництві деталей зі складними формами й великими обсягами виробництва.

Інжекційне лиття порошку стає більш конкурентоспроможним, коли виготовляють складні компоненти з високими характеристиками. Окрім того, ІЛП (інжекційне лиття порошку) – це економний процес, що

найбільше підходить для масового виробництва. Широкий спектр використання матеріалів, властивостей та можливостей сприяє динамічному 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 деталей з порошків карбідів цементиту припадають на 60-ті роки ХХ століття, але масове використання інжекційного лиття металевих порошків розпочалося в 70-х роках. З плином часу було вдосконалено багато продуктів і технологій, проте комерційний успіх не був очевидним аж до 90-х років минулого століття. Цей довгий процес розвитку характеризувався такими чинниками:

- первинні технології були приватними та пильно охоронялись;
- дрібнодисперсні порошки, особливо металеві, були важкодоступними;
- недостатня кількість робітників з необхідним рівнем знань;
- перше обладнання мало слабкі можливості контролю процесу;
- конструктори не мали вичерпної інформації про властивості порошкових матеріалів та достатнього досвіду конструювання;
- наукове обґрунтування процесу інжекційного лиття порошків було відсутнє.

В результаті зацікавленості виробників у максимально ефективному використанні матеріалів та у спрощенні виготовлення деталей складної форми метод інжекційного лиття порошків розвинувся у високотехнологічний напрямок сучасного машинобудування.

1.2 Короткий огляд технології інжекційного лиття порошків (ІЛП)

Технологічний процес інжекційного лиття металевих порошків поділяється на чотири стадії (рис. 1.1; 1.2).

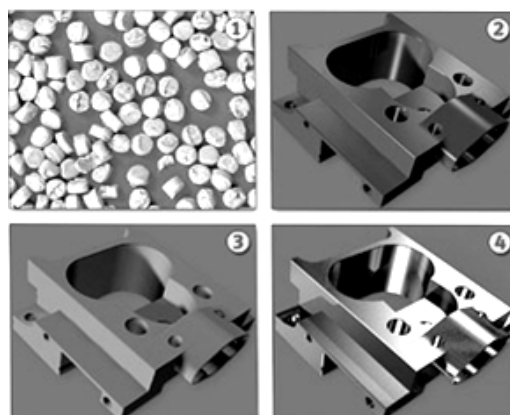


Рисунок 1.1 – Стадії процесу інжекційного лиття металевих порошків

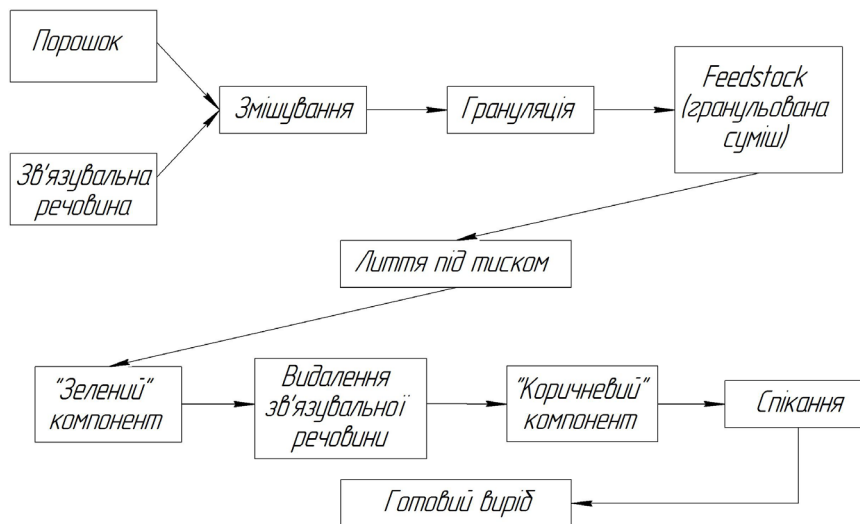


Рисунок 1.2 – Схема технологічного процесу інжекційного лиття

На *першій стадії* з порошку та зв'язувальної речовини (пластифікатора) готують гранульовану «молочну суміш» (Feedstock) або компаунд (рисунок 1.3).

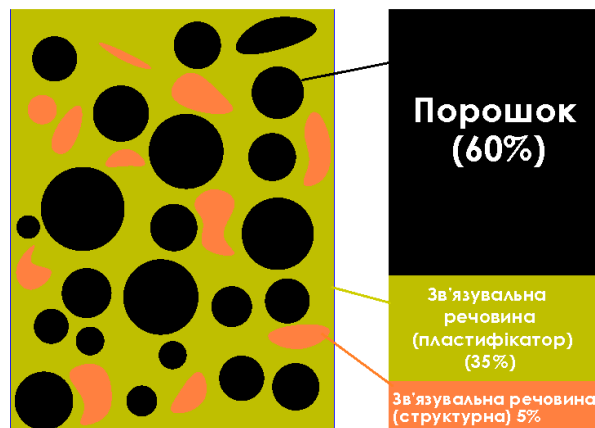


Рисунок 1.3 – Молочна суміш (компаунд) та її приблизний склад

На цій стадії процес ІЛП передбачає поєднання дрібнодисперсного порошку (розміри порошинок зазвичай до 20 мікрметрів) та пластику (зв'язувальної речовини) у пропорції – 60:40. Залежно від щільності спресованої суміші вага готового виробу становить 85–98% від ваги порошку.

Зв'язувальна речовина – полімерна суміш, яка забезпечує змащення та зчеплення порошку. Вона відіграє вирішальну роль для підтримки текучості сировини під час лиття та міцності готової заготовки. Змішування компаунду відбувається при температурі 100–200 °С за допомогою екструдерів з двома шнеками, що обертаються назустріч один одному. На виході екструдера суміш видавлюється та ріжеться на гранули.

На цьому перша стадія технологічного процесу завершується.

Під час *другої стадії* на ливарній машині, подібній до термопластавтомата, з готової суміші формуються заготовки з відповідними припусками на усадку, яка в технології ІЛП може складати до 26% (від об'єму).

Ливарна машина впорскує суміш розправленого полімеру і твердого порошку під тиском в порожнину ливарної форми. Під час цього процесу порошок не зазнає жодних змін, оскільки максимальна температура плавлення зв'язувальної речовини набагато нижча за температуру плавлення порошку. Вилита спресована заготовка охолоджується у порожнині ливарної форми до затвердіння полімеру. Такі спресовані деталі називають – «зеленими» заготовками.

Третя стадія – це видалення зв'язувальної речовини (пластифікатора). Цей процес називають ще розщепленням (дебайдингом). Це етап інжекційного лиття між плавленням та спіканням, в якому основна частина зв'язувальної речовини видаляється шляхом нагрівання, розчинення чи інакше. Техніка видалення зв'язувальної речовини залежить від її хімічного складу і властивостей. Найбільш поширеним та найстарішим методом є термічне розщеплення. Як альтернатива також використовуються хіміко-каталітичні методи або їх поєднання. Видалення відбувається без впливу на сформований порошок. Після видалення зв'язувальної речовини одержані деталі називають «коричневими» заготовками.

Четвертою стадією є спікання. Спікання – це процес з'єднання часток, який відбувається між ущільненими частинками порошку при нагріванні за рахунок активації руху атомів. Але, незалежно від температури активації і виду порошку, в результаті спікання відбувається усадка деталі. Розміри готової деталі менші 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 порошоків та полімерів, тому робочі характеристики продуктів, виготовлених шляхом ІЛП, складають достойну конкуренцію іншим промисловими виробам з металу та кераміки та мають велику перевагу у виготовленні завдяки поєднанню переваг, що притаманні інжекційному литтю та порошковій металургії.

На сьогоднішній день існує багато видів матеріалів (як металів, так і кераміки), що застосовуються в технології ІЛП. До того ж з'являються нові сполуки, які пристосовані до вимог масового виробництва деталей зі зменшеною вагою, пористістю, багатошаровою структурою та іншими корисними властивостями.

Однією з відомих компаній, яка виробляє матеріали для ІЛП, є компанія BASF (Німеччина). Ця компанія виготовляє сировину під торговою маркою Catamold®.

Основою сировини Catamold® є зв'язувальна речовина *поліацеталь*.

Поліацеталь – це напівпрозорий термопластичний матеріал з відмінними технологічними характеристиками, а саме: високою стабільністю розмірів, міцністю й гарною теплостійкістю. Загальні характеристики поліацетала роблять його матеріалом, придатним для використання у виробництві, що вимагає високої точності виробів, і всі ці якості якомога краще підходять для технології інжекційного лиття під тиском.

Однак вирішальною перевагою поліацетала як зв'язувальної речовини в сировині Catamold® є здатність його швидкого каталітичного видалення. У присутності відповідного каталізатора поліацеталь деполімеризується набагато нижче точки плавлення з виділенням газоподібного мономера. Таким чином, властивості зв'язувальної речовини дозволяють видаляти її з відлитого виробу шляхом керованого, поступового виділення газу з твердої речовини, не порушивши геометрії деталі. Невелика кількість зв'язувальної речовини залишається, вона необхідна для надання міцності отриманій порошковій заготовці, що підлягає подальшій обробці. Потім, на ранніх стадіях традиційного циклу термічного випалювання, ця зв'язувальна речовина видаляється. Під час подальшого нагрівання відбувається ущільнення практично до 100% густини матеріалу без застосування додаткового тиску.

Основні переваги ІЛП:

- 1) можливість отримувати деталі складної форми;
- 2) відносно низька собівартість виробництва;
- 3) високі фізичні та хімічні властивості матеріалів.

На прийняття рішення щодо використання ІЛП, крім можливості скористатись зазначеними перевагами, впливають й інші другорядні характеристики процесу, серед яких: висока продуктивність обладнання, високий коефіцієнт використання матеріалу та ін. Прикладом використання ІЛП є виготовлення деталі з зовнішньою та внутрішньою різьбами, що дає можливість уникнути машинної обробки. Гострокутні нарізи, вафельні візерунки, номер деталі та різні символи можуть бути вилиті одразу на деталі.

1.3 Відмінності від пресування

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

Пресування – це широкоживана технологія формування широкого ряду матеріалів (від кераміки до медикаментів). Її основою є створення форми з використанням верхнього та нижнього тисків на порошок у формі (наприклад, пресування таблетки аспірину). Пресування широко використовується для створення форм простої одноосової геометрії, які можна легко вийняти з обладнання. В деяких випадках тиск досягає 840°МПа. Проте, через необхідність ежекції з обладнання, складна форма можлива лише у напрямку стискання. В деяких випадках є можливість

отримувати складну форму в напрямках, перпендикулярних до напрямку стискання, але вони є небажаними. До того ж пресування призводить до неоднорідної щільності стисненого порошку, що обумовлено тертям між порошком та обладнанням. Ця відмінність від ІЛП проявляється також і під час пресування з набагато нижчими тисками. Градієнт щільності, що виникає у заготовках під час пресування класичним методом, спричинює деформацію під час спікання. Натомість, однорідна щільність деталей, отриманих методом ІЛП, зменшує варіювання розмірів після спікання при високій температурі. Тому вироби, виготовлені шляхом пресування порошку, мають такі недоліки, притаманні даній технології:

- після спікання деталі часто обробляють для досягнення заданих розмірів;
- висока залишкова пористість;
- при рідкофазному спіканні можлива значна деформація деталей.

Варто зазначити, що деталі, виготовлені методом ІЛП, мають набагато нижчий рівень відхилень від заданих розмірів порівняно з порошковою металургією.

1.4 Зв'язок з інжекційним литтям пластмас

У попередньому підрозділі було звернено увагу на ІЛП та його зв'язок зі спіканням порошоків. Інжекційне лиття пластмас є ще однією ключовою технологією, яка впливає на ІЛП.

Технологія ІЛП дозволила поєднати переваги інжекційного лиття полімеру та такі фізичні властивості, які притаманні металам і кераміці. Формувальні машини, форми для лиття та навіть цикли лиття схожі між собою. Але після етапу лиття всі схожості закінчуються. Пластмаса, як правило, не обробляється після лиття і, тим більше, не має операції спікання.

Інші відмінності між ІЛП та литтям пластику стосуються властивостей матеріалів та економічної доцільності. В литті пластмас смола є фактором високої вартості, а в ІЛП дуже затратними є процеси видалення сполучних компонентів та спікання, які не притаманні литтю пластмас. Тому, на відміну від вартості полімеру, в литті пластмас вирішальними ціноутворювальними факторами в ІЛП виступають процеси обробки. В багатьох сферах використовуються як компоненти ІЛП, так і пластмас, 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 пластмасами, крім того вони мають термічні, електричні, магнітні, механічні та інші властивості, не властиві полімерам.

Звичайно, лиття пластмас та ІЛП – ці процеси доповнюють один одного; ІЛП використовують лише тоді, коли більш дешеве лиття пластмас не здатне забезпечити отримання необхідних властивостей. Наприклад,

корисна міцність поліетилену, отриманого методом лиття пласмас, менша 20 МПа, в той час як міцність сталі, отриманої ІЛП, більша 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, ніж вартість звичайних полімерів). Не зважаючи на те, що обидві технології використовують однакове обладнання для лиття, концепцію розробки форм та правила лиття, механіко-фізичні властивості ІЛП недосяжні для сучасного лиття пластмас.

Інжекційне лиття порошку – це дуже гнучка технологія виробництва, з широким спектром матеріалів, форм і способів використання. Ще однією альтернативою є двокомпонентне інжекційне лиття, в процесі якого поєднують два матеріали з метою створення шаруватої структури або нестандартної функціональної основи на етапі формування. Виробнику деталей метод ІЛП дозволяє здійснювати економічно вигідне виробництво в широкому діапазоні обсягів (від 5000 штук на рік до 200 000 штук в день). Насамперед, інжекційне лиття з порошку дає великі вартісні переваги при створенні складних форм. Ця перевага є наслідком усунення вторинних операцій, які часто застосовуються для отримання точних компонентів, наприклад, машинна обробка. Також, з того часу, як стало можливим переробляти браковані відливки та ливники, ступінь використання порошкового матеріалу зріс майже до 100%. Це особливо важливо для таких матеріалів з вартісної сировини, як тугоплавкі метали, особлива кераміка та коштовні метали. Отже, технологія ІЛП дає змогу отримати матеріали високої якості, з точними розмірами, у великих кількостях і з великою економією коштів.

1.5 Лиття порошку під тиском

Лиття під тиском – один із найважливіших методів виготовлення виробів з підготовленого компаунду. Цей метод має ряд переваг: висока якість виробів, висока продуктивність, можливість виготовлення широкого асортименту виробів складної конфігурації масою від десятих часток грама до декількох десятків кілограмів, висока точність розмірів, економічність, високий рівень автоматизації. Суть процесу виготовлення виробів литтям під тиском полягає в тому, що компаунд у матеріальному циліндрі ливарної машини плавиться, гомогенізується, нагрівається до необхідної температури лиття а потім, за допомогою шнека або плунжера (залежно від типу машини), впорскується в попередньо замкнену форму, температура якої значно нижча температури розплаву (рис.1.4). Внаслідок охолодження в матеріалі відбувається фазовий перехід матеріалу з в'язкотекучого у аморфний чи кристалічний стани (матеріал застигає).

Якість виливка визначається, головним чином, такими технологічними параметрами:

- час (упорскування, витримки під тиском, охолодження);

- температура (сировини, циліндра й прес-форми);
- тиск (упорскування, витримки, протитиск);
- швидкість упорскування і швидкість шнекової подачі.

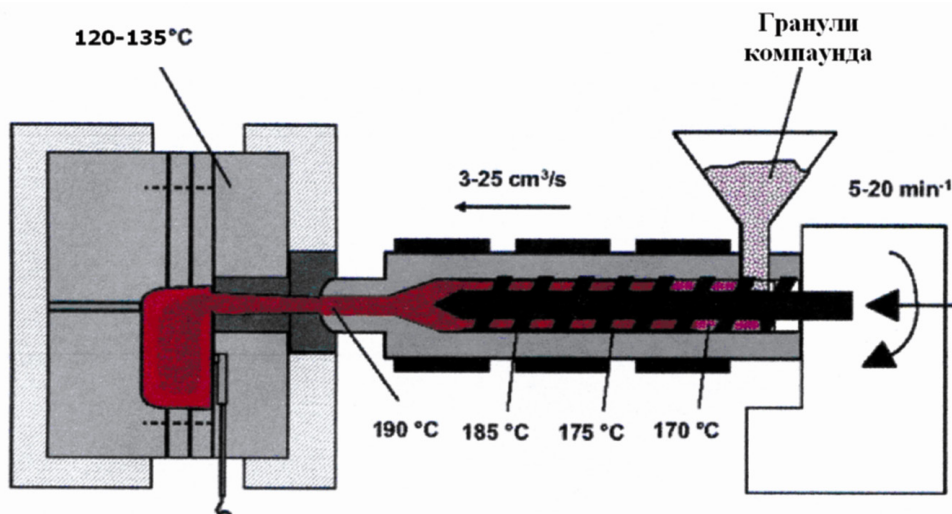


Рисунок 1.4 – Схема інжекційного лиття порошку

Для контролю над процесом необхідна однорідна суміш. Оскільки в'язкість сировини чутлива до складу, неоднорідності можуть завадити потраплянню потоку в порожнину форми для лиття. При збільшенні температури полімер розширюється більше, ніж порошок, внаслідок чого зростає відносний вміст полімеру та відбувається підвищення в'язкості. Тому більшість процесів лиття відбувається при температурах значно більших за температуру плавлення зв'язувальної речовини. Коли суміш піддається деформуванню, частки намагаються зосередитись, вишикуватись в лінію та набути обтічної форми, що призводить до ефективного зниження в'язкості. Завдяки цьому ефекту спостерігається прямо пропорційне зниження в'язкості щодо підвищення ступеня деформації. Це називають дефектним зріджуванням.

Порівняно з традиційними полімерами, сировина Catamold® має вищі показники теплопровідності, щільності та в'язкості. Ці властивості потрібно брати до уваги перед вибором машини для лиття, при проектуванні прес-форми та під час подальшої переробки сировини.

На відміну від багатьох інших матеріалів Catamold® являє собою гомогенний, гранульований матеріал, який не потребує подальшої гомогенізації. Його необхідно розплавляти в максимально м'яких умовах для того, щоб уникнути непотрібного перегрівання й деструкції. Для цього температура нагрівання циліндра має бути в проміжку між 170 °C і 190 °C. Тривалий час пластикації не впливає на загальну тривалість циклу, тому що час охолодження, у кожному разі, перевищує час пластикації.

Для заповнення форми під час процесу лиття необхідно забезпечити раціональну в'язкість сировини за рахунок відповідного тиску в порожнині камери впорскування. Взаємозв'язок між в'язкістю і швидкістю зсуву

поток показаний на рисунку 1.5 на прикладі Catamold® 316LG (по вертикалі – в'язкість, по горизонталі – швидкість зсуву). Рівень в'язкості цього матеріалу вищий, ніж звичайних термопластичних матеріалів.

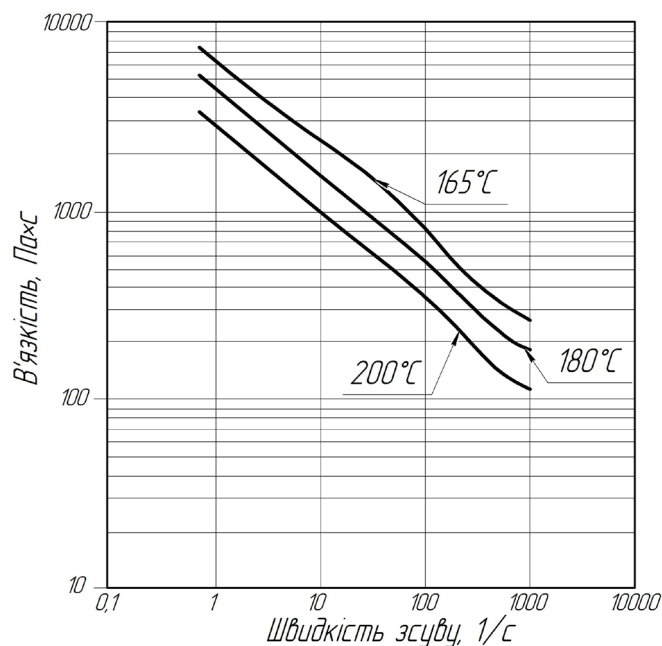


Рисунок 1.5 – Крива потоку для Catamold® 316LG

Псевдопластичність, тобто зниження рівня в'язкості при високому показнику швидкості зсуву матеріалів, що їх використовують для ІЛП, виражена більше, ніж пластиків. Наслідком цього є те, що підвищення тиску при заповненні через ливник з вузьким поперечним перерізом є відносно малим порівняно з більшими ливниками.

Якість заповнення форми значно залежить від швидкості впорскування, геометрії порожнини та температури розплаву й форми. Швидкість упорскування має бути встановлена на такому рівні, щоб повне заповнення порожнини прес-форми відбувалося в межах від 0,5 до 1 секунди. Для більших об'ємів упорскування (понад 30 г) час заповнення порожнини може становити близько 1 секунди. В більшості випадків достатньою є швидкість упорскування у діапазоні від 10 до 30 см³/сек. Для невеликих об'ємів упорскування краще встановити швидкість на рівні 5–10 см³/сек. У випадку, якщо не вдається уникнути утворення пригару, упорскування потрібно починати на низькій швидкості, поки не утвориться ламінарний потік, після чого швидкість може бути збільшена. Момент зміни швидкості визначається під час дослідження заповнення порожнини прес-форми.

Тиск упорскування, що виставляється на термопластавтоматі, має бути встановлений на рівні суми опорів потоку в соплі, ливниковій системі й порожнині. Якщо не вдається досягти та підтримувати цей тиск на постійному рівні, то регулювання якості заповнення має забезпечуватись за рахунок раніше встановленої швидкості упорскування. Якщо опір

виявляється більшим за гранично допустимий тиск машини, то швидкість упорскування зменшується після досягнення межі тиску. В точці впорскування тиск збільшується одночасно зі збільшенням опору потоку і одночасно з затіканням розплаву в порожнину прес-форми (рис. 1.6). Залежно від геометрії прес-форми максимальний гідростатичний тиск упорскування може становити від 600 до 1800 бар. Досягнення об'ємного заповнення, тобто повного витіснення повітря з порожнини прес-форми, означає завершення стадії впорскування. Після цього відбувається перехід до стадії витримки під тиском за сигналом датчика відстані, часу або тиску.

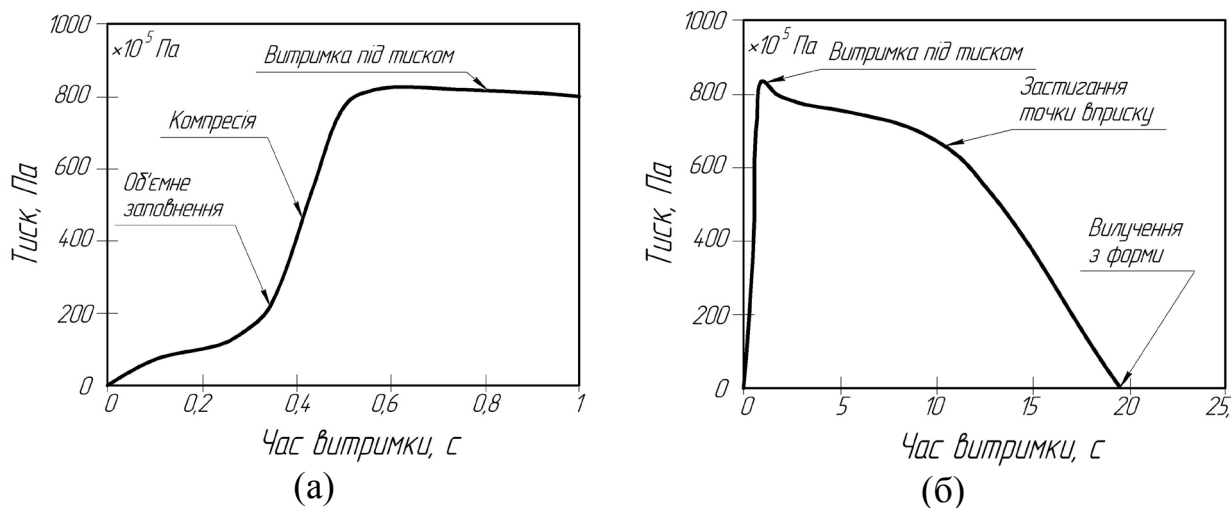


Рисунок 1.6 – Зміна тиску під час лиття:

- а) – стадія початкового утворення форми заготовки;
 б) – стадія остаточного кінцевого формоутворення заготовки

Стадія витримки під тиском починається після завершення стадії впорскування й закінчується, коли в порожнині встановлюється атмосферний тиск. Гідравлічний тиск витримки відключається на машині, як тільки затвердіє ливник і закупориться точка впорскування, тому що після цього тиск більше не може вплинути на відливок. Час затвердіння точки впорскування визначається експериментально вимірюванням ваги відлитого виробу під час установленого часу витримки. Послідовне збільшення тиску після часу затвердіння точки впорскування не приводить до подальшого збільшення ваги. Час витримки обмежений часом затвердіння точки впорскування.

Після завершення стадії витримки під тиском, прес-форму витримують у замкненому стані, і виріб продовжує охолоджуватися до остаточного затвердіння й набуття необхідної твердості, щоб можна було його витягнути з прес-форми. Існує правило: час охолодження (у секундах) дорівнює товщині стінок (у мм), піднесений до квадрата. Після охолодження виробу форма розмикається. Рухома половина форми відходить, як правило, разом з виливком. При досягненні крайнього положення відливок виштовхується за допомогою системи штовхачів або знімається автоматичним маніпулятором.

Процес пресування й охолодження в прес-формі може бути також подано PVT-діаграмою (рис. 1.7), що показує зміну питомого об'єму у вигляді функції температури й тиску. Матеріал впорскується при робочій температурі 180 °С і стискається до тиску витримки (внутрішній тиск у прес-формі становить близько 800 бар) практично без охолодження ($A \rightarrow B$). Одночасно з об'ємним заповненням відбувається стискання матеріалу в порожнині прес-форми. Після досягнення тиску витримки матеріал починає охолоджуватися при фактично постійному тиску й проходить через інтервал кристалізації, під час якого питомий тиск постійно падає, тому що розплавлений матеріал продовжує затікати в порожнину. Таким чином відбувається компенсація об'ємної усадки, що виникає під час охолодження. Наприкінці інтервалу кристалізації (точка B) ливник твердіє і порожнина закупорюється. Матеріал, що надійшов у порожнину до її закупорювання, продовжує охолоджуватися при постійному об'ємі. Тиск падає, оскільки триває усадження матеріалу. Коли тиск досягає атмосферної величини (точка D), виріб перестає перебувати під тиском у порожнині. Це ідеальний час для виймання вилівка з прес-форми.

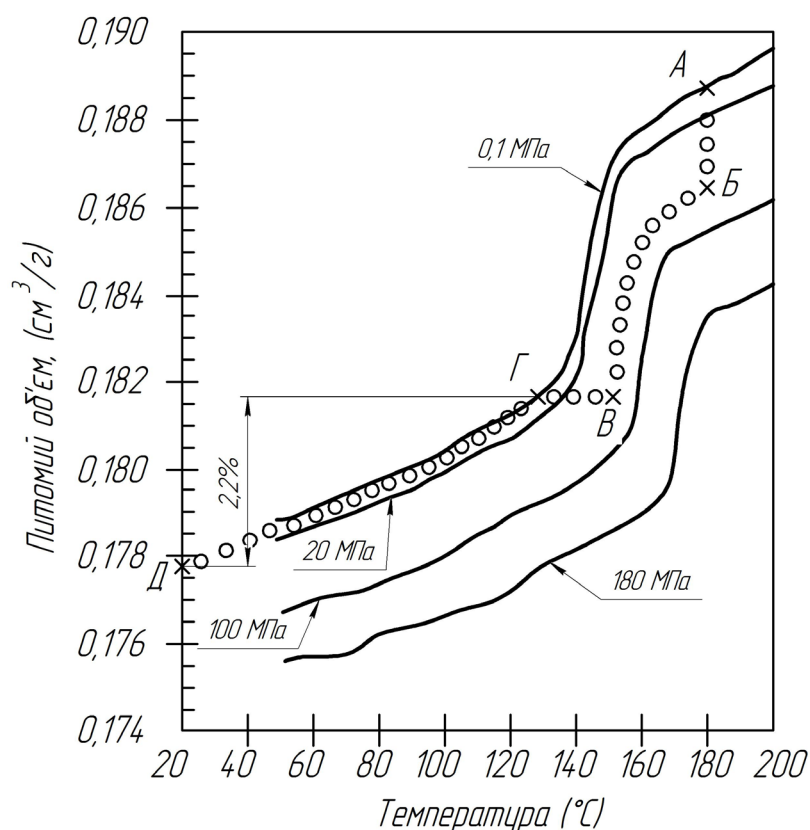


Рисунок 1.7 – PVT-діаграма для Catamold 316LG

Якби тиск витримки був установлений на більш високому рівні, то виріб продовжував би залишатися під тиском у той момент, коли досягається необхідний рівень температури в порожнині прес-форми, наслідком чого буде розтягування виробу в напрямку виймання. Цього

варто уникати ще й через анізотропію. Тому тиск і температура формотворних поверхонь не можуть змінюватися незалежно один від одного. Цей взаємозв'язок також пояснює той факт, що вироби без раковин можуть бути виготовленими тільки в тому випадку, коли точка впорскування розташована в місці максимальної акумуляції матеріалу. Якщо відливок містить ділянки, які застигають значно пізніше, ніж ливник, то подача додаткового матеріалу з метою компенсації об'ємного усадження стає неможливою, а зовнішня поверхня виливка застигає дуже швидко. Загалом порожнини, усадка або пори утворюються в тій частині виливка, де затвердіння матеріалу відбувається в останню чергу.

Відповідно до DIN 16901 усадка відлитого виробу являє собою різницю між розмірами прес-форми й розмірами виливка (в охолодженому стані) щодо розмірів прес-форми. При охолодженні матеріалу від температури розплаву до кімнатної температури спостерігається усадження, яке може бути двох видів: внаслідок тверднення матеріалу (збільшення густини) і лінійного (чи об'ємного) звуження полімеру при пониженні температури. Це усадження проходить, як правило, у різних напрямках по-різному. Розрізняють абсолютне та відносне усадження, а також первинне й вторинне. Первинне усадження матеріалу відбувається у формі протягом циклу лиття, вторинне спостерігається під час охолодження виробу до кімнатної температури після виштовхування з форми. При конструюванні оснащення та при розрахунку формотворних розмірів дуже важливо врахувати фактичне усадження. Коефіцієнти усадження при литті металевих виробів під тиском для сировини ^{Catamold®} наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти усадження при литті матеріалу Catamold®

Catamold®	Коефіцієнт усадження		
	Середній	Мінімальний	Максимальний
Ti	1,1484	1,1445	1,1524
F15	1,1510	1,1470	1,1550
17-4PHB 310G 316LA 316LG 316LH 316LS M2 PANACEA	1,1863	1,1629	1,1710
17-4PHG	1,1784	1,1743	1,1825
FS	1,2824	1,2775	1,2873
W	1,2480	1,2436	1,2524

Процес усадження проілюстровано на прикладі виробу, відлитого з сировини Catamold® 316LG (рис. 1.8). Внаслідок теплового розширення, розміри прес-форми, порівняно з кімнатною температурою, при температурі обробки 130 °C збільшуються приблизно на 0,2%. Цей ефект є протилежним процесу усадження. Якщо тиск витримки встановлений правильно, виріб вилучається з прес-форми при атмосферному тиску й при температурі прес-форми. Розміри неспеченого виробу відразу після виймання відповідають розмірам прес-форми при її температурі. Потім виріб охолоджується при кімнатній температурі і в цей час відбувається ізотропне усадження за об'ємом на 2,2% і по довжині близько 0,7%, залежно від ступеня заповнення. Таким чином, загальне лінійне усадження сирого виробу становить близько 0,5%.

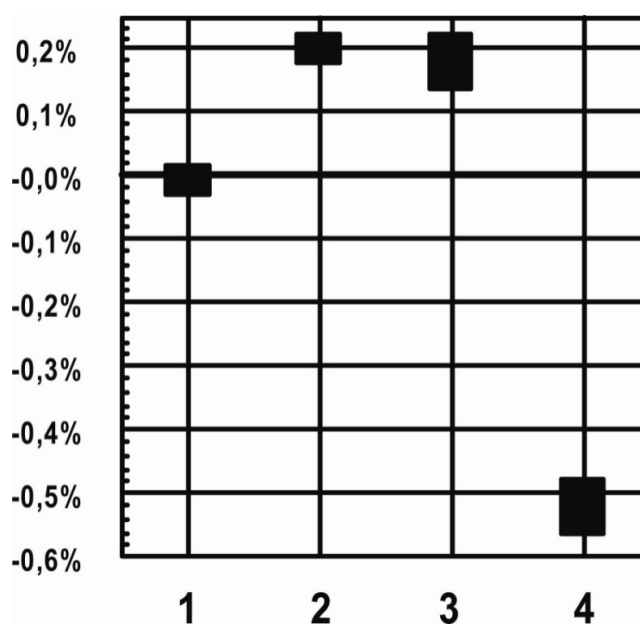


Рисунок 1.8 – Усадження виливка під час процесу лиття:
 по вертикалі – зміна розмірів в відсотках; по горизонталі –
 1. Прес-форма (в холодному стані); 2. Прес-форма (у нагрітому стані);
 3. Виливок (у гарячому стані); 4. Виливок (в охолодженому стані)

Усадження може вплинути не тільки на точність виробу, а й на його якість. Так, наприклад, через нерівномірне охолодження виробу у формі з протилежних сторін можлива різне первинне усадження після вилучення виливка. Через те що стінки мають різну температуру, у виробі спостерігаються нерівномірні усадкові явища за межами форми під час кінцевого охолодження до температури навколишнього середовища. Тому відливки можуть деформуватись в сторону більш нагрітої поверхні, оскільки під час подальшого охолодження розміри даної поверхні продовжують зменшуватись. Отже, для формування якісного виробу важливе значення має рівномірне охолодження формувальної поверхні прес-форми.

1.6 Типи порошків, які використовуються для ІЛП

Середній розмір порошку для ІЛП, що є найбільш оптимальним, складає близько 22 мкм. Такий тип порошку може бути виготовлений різними способами, однак відмінності у типі виробництва призводять до розбіжностей у властивостях порошку, а це, в свою чергу, впливає на такі параметри готових деталей, як густина, геометричні розміри, деформація, хімічний склад та ін.

Існує багато металевих сплавів які придатні для використання у технології ІЛП. Однак є й деякі винятки, наприклад, магній та алюміній не типові для ІЛП, тому що мають низьку температуру плавлення та схильні до утворення міцної оксидної плівки на поверхні частинок, що загальмовує процеси спікання.

Залежно від типу виробництва порошки для ІЛП розділяють на: подрібнені за допомогою розпилення газу; розпилення води; чи отримані хімічним або механічним способом.

Ідеальний порошок для ІЛП має відповідати таким критеріям:

- розмір 90% порошку у партії має бути меншим 22 мкм для таких сплавів, як корозійностійкі та низьколеговані. Проте для твердих та жаростійких сплавів розмір має бути менший за 5 мкм;
- висока густина пакування у сталому об'ємі;
- висока якість поверхні для утримання зв'язку з полімером;
- не схильність до утворення агломератів (великих скупчень порошку);
- сферична форма порошку (проте багато типів порошку, що використовуються в ІЛП, неправильної форми, це знижує густину пакування а тому призводить до більшого усадження деталей під час спікання);
- значний коефіцієнт тертя між частинками, що дозволяє зменшити деформацію деталі під час видалення зв'язуючої речовини. При збільшенні розміру порошку зменшується кількість контактів між крупинками, що призводить до деформації;
- відсутність пор у частинках порошку;
- мінімальна вибухонебезпечність і токсичність. Чим менші частинки порошку, тим більша площа поверхні, а тому більша схильність до вибуху, особливо це стосується титану, алюмінію та цирконію.

Розмір частинок порошку

Малі розміри порошку дозволяють отримати максимальну густину при спіканні. При литті мініатюрних деталей чи деталей з високою якістю поверхні використовують, як правило, порошки розміром 5 чи 10 мкм. Проте зі зменшенням розміру порошку зростає його ціна. Тому для деталей невеликої точності та складності з метою зниження собівартості деталей іноді використовують порошки розміром більше 30 мкм.

Розподіл розмірів порошку

Розподіл розмірів дуже важливий, адже не всі частинки порошку є однаковими. Типовий розподіл зображено на рисунку 1.9

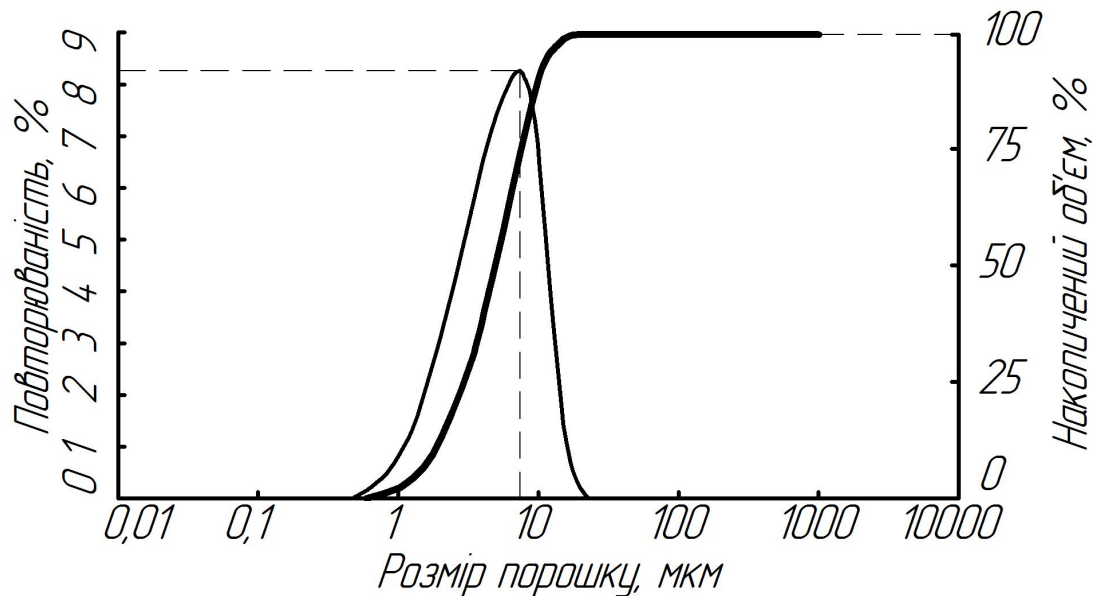


Рисунок 1.9 – Типовий розподіл розмірів порошку, де $D_{10}=2$ мкм, $D_{50}=5$ мкм, $D_{90}=10$ мкм

Розподіл розмірів визначається за допомогою трьох показників: D_{10} , D_{50} та D_{90} , де $D_{10} = 2$ мкм і означає, що розмір 10% частинок порошку в партії менше 2 мкм. Важливо, що значення D_{10} та D_{90} дають уявлення про дану партію порошку. Так, якщо різні партії мають однакове значення D_{50} але різні D_{10} та D_{90} — партії можуть виявляти різні характеристики при змішуванні, литті та спіканні. Порошки з меншим значенням D_{10} краще спікаються, однак погано змішуються з полімером. При великому значенні D_{90} порошок містить багато частинок з великими розмірами, що погіршує спікання та може призводити до деформації або тріщин, оскільки при збільшенні розмірів порошку зменшується кількість контактів. Це, зазвичай, не стосується порошків, отриманих методом газового розпилення, проте порошки, що пройшли додаткову обробку тертям, виявляють велику різницю у значеннях D_{10} та D_{90} в різних партіях, а це, в свою чергу, погано впливає на точність деталей після спікання. Розуміння значень D_{10} , D_{50} та D_{90} для кожної партії матеріалу важливе для отримання стабільної якості виробів.

Форма частинок порошку

Сферична форма порошку найбільш бажана для технології ІЛП, оскільки підвищує густину пакування та текучість суміші; проте невеликі відхилення від правильної форми частинок можуть покращувати деякі характеристики суміші. Зниження деформації деталей при використанні порошків сферичної форми можна отримати шляхом зменшення розмірів частинок, що приводить до утворення більшої кількості контактів між

частинками. На рисунку 1.10 показана приблизна залежність густини пакування від геометрії частинок порошку.

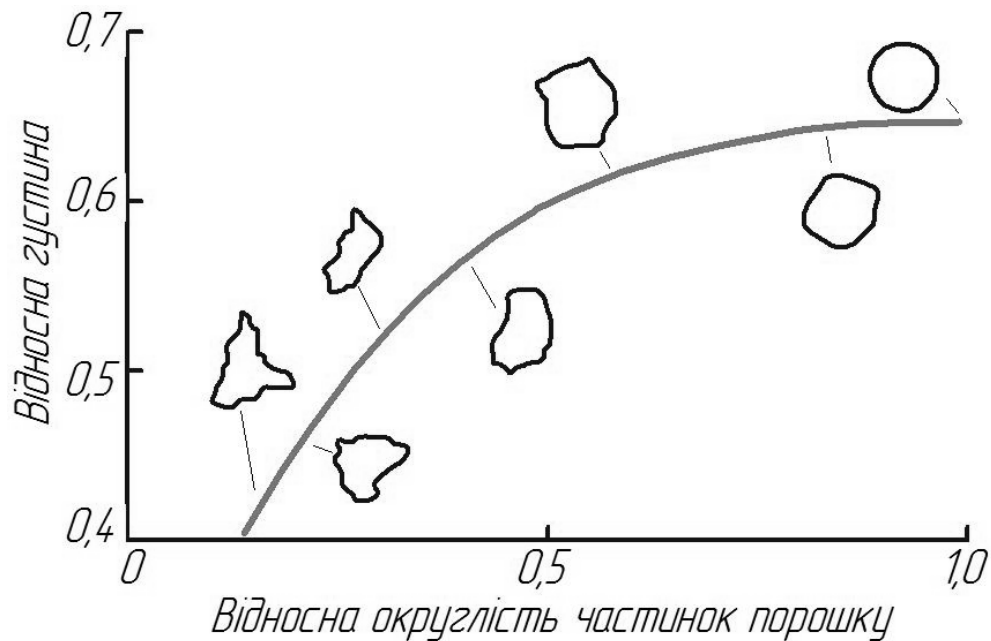


Рисунок 1.10 – Вплив геометричної форми частинок порошку на густину пакування

Сферична форма порошку приводить до більшої густини пакування, що зменшує усадку матеріалу при спіканні. Порошки, розпилені газом, як правило, мають округлу форму та потенційно мають нижчий коефіцієнт усадки при спіканні через високу густину наповнення. Порошки, отримані хімічним шляхом, мають більший коефіцієнт усадження та низьку густину наповнення. Для прикладу, вміст порошку, отриманого газовим розпиленням в суміші з полімером, може складати 60–67% по об'єму, натомість для порошоків, отриманих хімічним шляхом, цей показник сягає лише 50–62% по об'єму.

1.6.1 Стандарти, які застосовуються для порошоків ІЛП

Такі методи тестування, як аналіз просіювання (MPIF 05, ASTM B 214, ISO 4497), швидкість потоку (MPIF 03, ASTM B 213, ISO 4490), уявна густина вільного насипу (MPIF 04, ASTM B 212, ISO 3923-1), що застосовуються для порошкової металургії, погано підходять для порошоків технології ІЛП. Такі методи більше застосовуються для порошоків з великими розмірами частинок, проте порошки ІЛП мають порівняно меншу величину. Такі характеристики порошку, як пікнометрична густина, уявна густина, насипна густина, розподіл розмірів знайшли ширше застосування при класифікації та контролі порошоків ІЛП. Деякі інші технології контролю, наприклад, визначення площі поверхні частинок за методом Brunauer-Emmett-Teller, можуть бути застосовані для спеціальних досліджень.

Пікнометрична густина (MPIF 63, ASTM D2638, ASTM D 4892)

Пристрій для виміру густини (пікнометр) дозволяє виміряти теоретичну густину порошку а також внутрішні порожнини всередині частинок порошку. Наприклад, якщо була виявлена різниця пікнометричної густини між партіями порошку, то, скоріш за все, всередині частинок присутні внутрішні пустоти, що виникли при виготовленні порошку. Також пікнометрична густина застосовується для контролю змішування порошку з в'язучим, що важливо для передбачення коефіцієнта усадки після спікання. Наприклад, значення густини матеріалів дозволяє визначити вагу складників суміші для отримання точного співвідношення компонентів після змішування. Як правило, коефіцієнт усаджування, що використовується для розрахунку формувальної порожнини прес-форми, залежить від об'єму порошку у суміші та кінцевої усадки після спікання. Тому пікнометрична густина важливий показник, що характеризує готову суміш (feedstock).

Уявна густина (MPIF 28 та 48, ASTM B 417 та B703, ISO 3923-1 та 3953)

Уявна густина – це насипна густина порошку. Уявна густина визначає вагу на одиницю об'єму при вільному пакуванні порошку. Це дешевий та ефективний тест для визначення стабільності у різних партіях порошку. Порошок з малими розмірами частинок має велике значення уявної густини та навпаки. Зміна уявної густини може також визначати зміну у шорсткості поверхні частинок порошку. Також, якщо порошок здатен утворювати великі скупчення (агломерати), то уявна густина збільшується.

Набивна густина (MPIF 46, ASTM B 527, ISO 3953)

Набивна густина – це об'ємна густина порошку після того, як він був набитий у проградуирований циліндр до тих пір, поки не була помітна значна зміна об'єму порошку. Даний тест проводять на автоматичному пристрої, який механічно набиває порошок зі швидкістю 100–50 ударів за хвилину; зазвичай, близько 500–1000 ударів достатньо для точного визначення густини. Також дозволяється набивати порошок вручну, якщо автоматичний пристрій відсутній. Такий тест надає інформацію про те, як порошок здатен усаджуватись а також змішуватись зі зв'язуючим. Як правило, чим більша набивна густина, тим більше металевого порошку у готовій суміші (feedstock).

Розподіл розмірів частинок порошку (ASTM B 822-10, ISO 13320-1)

Розподіл розмірів, як правило, визначається за допомогою лазерного розсіювання або за допомогою дифракції. В даній технології вимірюється розсіювання світла навколо частинок, що занурені в рідину. Важливо, що при збільшенні розмірів частинок кут дифракції також збільшується. Даний метод застосовується для частинок розміром від 0,1 до 1000 мкм. На рисунку 1.9 показано розподіл розмірів частинок порошку, що був вимірянний за даною технологією та є типовим для порошків ІЛП.

Таблиця 1.2 – Методи виготовлення порошку та їх характеристики

Метод виготовлення	Відносна собівартість	Приклади сплавів	Розмір частинок, мкм	Форма частинок порошку
Розпилення газом	Висока	Нержавіючі сталі, сплави: F75; MP35N, титан, легувальні домішки	5–45	Сферичний
Розпилення водою	Середня	Такі, як і для розпилення газом, крім титану та титанових сплавів	5–45	Напів-сферична, неправильна
Термічний розклад	Середня	Залізо, нікель	0,2–20	Сферична, голкоподібна
Хімічне осадження	Висока/середня	Вольфрам, молібден	0,1–10	Кутова, сферична

1.6.2 Технології виготовлення порошку ІЛП

Існує багато технологій виготовлення порошків, що можуть застосовуватись для ІЛП. Як правило, їх поділяють на такі види:

- розпилення газом;
- розпилення водою;
- термічний розклад;
- хімічне осадження.

Порошки, виготовлені за такими технологіями, як механічне розмелювання та шліфування, використовуються, коли необхідна незначна кількість порошку як домішка для конструювання спеціального сплаву. Єдиним винятком є науглецювання чистого вольфраму для отримання порошку карбіду вольфраму.

Технологія розпилення металевого порошку інертним газом

За даною технологією метал або сплав розплавляється індукційним нагрівом та подається під тиском у форсунку. Після того як розплав відокремиться від отвору форсунки, він буде розбитий потоком газу під великою швидкістю. Газ розбиває розплав на окремі дрібні краплі, при падінні краплі розплавленого металу застигають та утворюють частинки сферичної форми. Як газ найчастіше використовують азот, аргон чи гелій. Проте повітря також може застосовуватись для деяких типів порошків. Порошки, що розпилюються в присутності кисню сильно окислюються, а тому повітря не рекомендується для переважної більшості інженерних матеріалів, особливо коли кількість оксидів неможливо знизити при спіканні. Розпилення порошку проводиться у великих контейнерах, що дозволяє металу застигати при падінні до того, як він доторкнеться стінок контейнера. Якщо біля виходу форсунки існує турбулентність газу, то на поверхні частинок можуть з'являтися нові утворення, створюючи неправильну форму. Цей дефект може вплинути на густину наповнення а також на характеристику потоку суміші (feedstock). Частинки порошку, що

були отримані за даною технологією, відрізняються розмірами, а тому необхідна операція сортування частинок. Занадто великі частинки порошку можуть бути переплавлені та подрібнені знову. На рис. 1.11 показано частинки, які були розпилені газом. Фотографія зроблена за допомогою електронного мікроскопа.

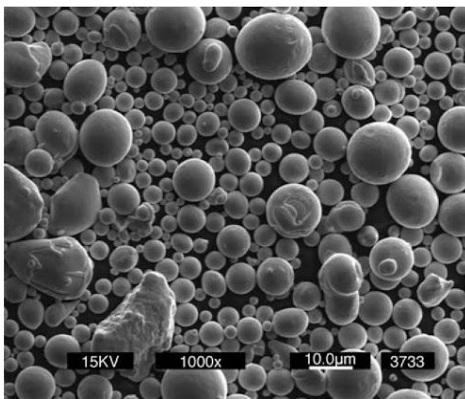


Рисунок 1.11 – Порошок, розпилений газом

Розпилення водою

Процес отримання порошків розпиленням водою схожий до розпилення газом, але замість газу потік розплавленого металу розбивається тиском води. Метал розплавляється до надвисокої температури, завдяки чому вдається отримати частинки порошку малого розміру, що відіграє важливу роль в технології ІЛП. На рис. 1.12 показано порошок, розпилений водою. Як правило, частинки мають трохи неправильну форму та містять велику кількість оксидів. Така неправильна форма частинок сприяє зниженню деформації деталей під час видалення в'язучого. Дана технологія більш продуктивна, порівняно з розпиленням газом, та менш затратна.

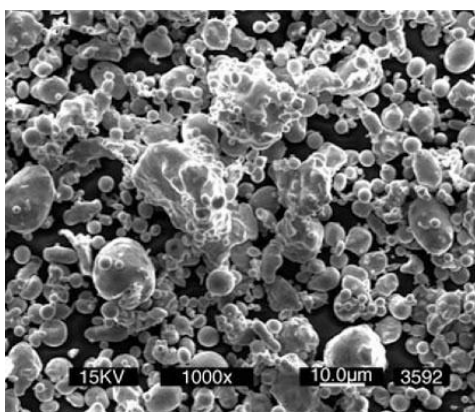


Рисунок 1.12 – Порошок, розпилений водою

Термічне розкладання

Технологія термічного розкладання – це процес хімічного розпаду під час теплового нагрівання. Ця технологія загалом використовується для

отримання порошків нікелю та заліза для ІЛП а також порошків вольфраму і кобальту. За даним методом можна виробляти порошки з хімічною чистотою >99% та розміром частинок від 0,2 до 20 мкм. В даному процесі метал вступає в реакцію з оксидом вуглецю під високим тиском та температурою. Продукт хімічної реакції — карбід металу – в рідкому стані очищується, охолоджується та на наступній операції нагрівається знову в присутності каталізатора. В результаті пари металу конденсуються, утворюючи частинки порошку. Порошки, отримані таким способом, насичені вуглецем, тому вони потребують обробки в атмосфері водню перед спіканням. Також вони можуть бути використані як домішки до різних сплавів. Якщо проводилась операція відновлення, порошок потрібно подрібнити, оскільки в ньому можуть утворитись агломерати (з'єднання частинок порошку між собою). Активність таких порошків при спіканні дещо менша, порівняно з необробленими порошками, тому що дрібні частинки порошку спікаються з великими частинками під час операції відновлення.

Хімічне осадження

Хімічне осадження один із найдавніших методів для виготовлення порошків. Даний процес використовує очищений оксид з подальшим відновленням в присутності вуглецю, утворюючи монооксид або діоксид вуглецю. Водень також може використовуватись для відновлення оксиду порошку до чистого металу. Розмір частинок порошку може бути зменшений за допомогою використання низької температури, проте швидкість реакції також знижується. Процес можна пришвидшити, використовуючи високу температуру, однак в результаті утворюються агломерати, що є небажаним. На рис. 1.13 наведена фотографія порошку вольфраму, виготовленого за такою технологією.

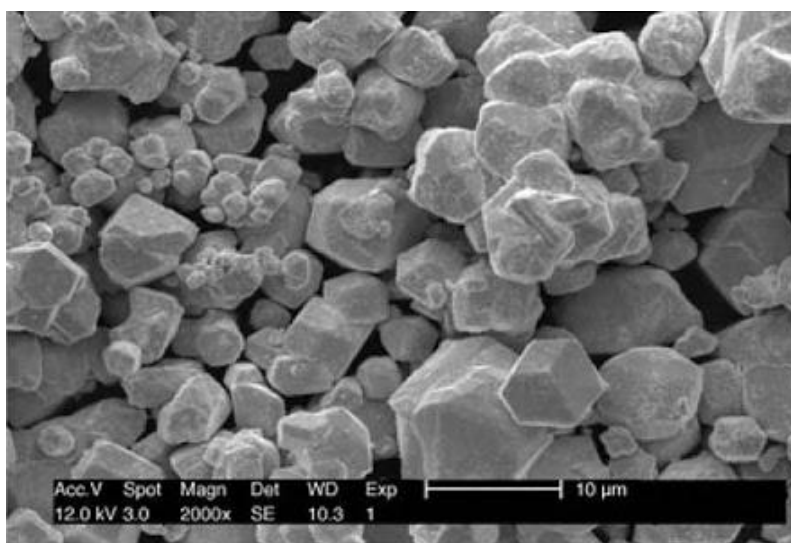


Рисунок 1.13 – Порошок вольфраму

1.6.3 Різні види легування сплавів

Існують три основні методи легування для технології ІЛП: суміш порошків з різних хімічних елементів «elemental»; готовий сплав «prealloy»; суміш високолегованого та низьколегованого компонента «master alloy». Спосіб легування порошку значно впливає на процеси спікання та механічні властивості спеченого матеріалу.

Суміш порошків з різних хімічних елементів («elemental»)

Даний метод полягає у механічному змішуванні легувальних компонентів в необхідній кількості для досягнення потрібного хімічного складу. Процеси розпилення металу газом використовуються для отримання порошків міді та титану. Термічним розкладанням отримуються порошки карбідів заліза та нікелю; хімічним осадженням – порошки вольфраму та молібдену. Механічним шліфуванням та фрезеруванням отримуються порошки електролітичного хрому. Наприклад, суміш порошку може складатися з карбіду заліза та карбіду нікелю (для нікелевих сталей), де вуглець можна отримати напряму з включень вуглецю. Суміш порошку заліза та нікелю можна використати для одержання феромагнетиту $50\text{Fe}/50\text{Ni}$. Тугоплавкі сплави також виготовляються за даною технологією, наприклад, додаванням карбіду заліза та нікелю до чистого вольфраму.

Виготовлення порошку з готового сплаву («prealloy»)

Порошок, що використовується за даним методом, точно збігається за хімічним складом з кінцевим спеченим матеріалом. Зазвичай використовуються порошки, виготовлені газовим або водяним розпиленням, наприклад, нержавіючі сталі, спеціальні сплави та титанові сплави. Як правило, дані порошки дуже стабільні у розмірах.

Суміш високолегованого та низьколегованого компонентів («master alloy»).

Технологія даного методу полягає у механічному змішуванні порошку основи з порошком, який містить високу кількість легувальних елементів. Як правило, для цього використовуються порошки, виготовлені розпиленням водою чи газом. Для прикладу: порошок сплаву $55\text{Cr}38\text{Ni}7\text{Mo}$, розпилений газом, змішується з двома частинами карбіду заліза для отримання нержавіючої сталі 316L. Коли порошок одного хімічного складу змішується з високолегованим компонентом, то при спіканні відбувається вирівнювання процентного складу хімічних елементів по всьому об'єму матеріалу. Даний метод широко розповсюджений для нержавіючих сталей. Проте необхідно уважно вибирати елементи, що поєднуються один з одним. Наприклад, при додаванні до суміші карбіду заліза для отримання нержавіючої сталі необхідно правильно визначати параметри спікання. В процесі спікання необхідно відновити залізо до того моменту, поки не закрилися внутрішні пори в матеріалі.

1.7 Дебайдинг (видалення зв'язувальної речовини) та його види

Під час приготування початкової суміші (фідсток) зв'язувальна речовина має забезпечити оптимальний зв'язок між частинками порошку. Необхідно отримати бажану пластичність суміші при мінімальній кількості речовини. Тому до зв'язувальної речовини висуваються такі вимоги:

- структура зв'язувальної речовини має мати мінімальні абразивні властивості;
- зв'язувальна речовина має оброблятися в діапазоні температур від 20 до 200 °C без шкоди для навколишнього середовища та працівників;
- необхідно уникати у суміші токсичних компонентів;
- зв'язувальна речовина має з'єднуватися з поверхнею порошку та мати низьку здатність до розщеплення під час високих швидкостей зсуву;
- забезпечити механічну міцність відливок для їх надійного вилучення з прес-форми та транспортування.

Зв'язувальна речовина має мати малий кут контакту з металевими частинками. Це забезпечить добре змочування металеві поверхні порошку, що, в свою чергу, покращить процеси змішування та лиття. Зв'язувальна речовина та порошок мають бути інертні один до одного. Полімер речовини не має вступати в хімічну реакцію з металом а також метал не має полімеризувати або деградувати зв'язувальну речовину. Готова суміш (feedstock) має задовольняти різні реологічні вимоги для успішного лиття без дефектів. В'язкість суміші має знаходитись в межах ідеального діапазону: занадто низька в'язкість призведе до відділення зв'язувальної речовини та порошку; з іншого боку – дуже висока в'язкість погіршить процес змішування та пролиття деталі. Крім того, в'язкість суміші має різко зростати під час охолодження для збереження форми деталі під час виштовхування з прес-форми.

Необхідно, щоб зв'язувальна речовина була здатна швидко видалятися під час процесу дебайдингу без руйнування деталі. Під час видалення зв'язувальної речовини зменшується міцність деталі, що значно підвищує імовірність виникнення тріщин. Важливо також поступове видалення зв'язувальної речовини без залишків вуглецю при термічному випалюванні. Бажано, щоб браковані деталі та ливники могли бути перероблені та використані повторно, це значно знижує собівартість виробництва. Зв'язувальна речовина має мати високу теплопровідність та низький коефіцієнт теплового розширення для запобігання формування дефектів при нагріванні.

На практиці важко задовольнити всі перераховані вище вимоги, а тому, як правило, зв'язувальна речовина – це складна система, яка може

складатися з багатьох компонентів. Залежно від складників такі системи можуть поділятися на:

- водорозчинні системи;
- системи на основі органічних розчинників;
- термопластичні системи.

Типові системи зв'язувальної речовини містять в собі структурний компонент (backbone), компонент, що надає пластичність сировині при литті (plasticizer), та інші домішки для стабілізації суміші. В таблиці 1.3 наведено хімічні сполуки, що знайшли найбільше застосування в системах зв'язувальних речовин.

Таблиця 1.3 – Властивості найбільш поширених компонентів зв'язувальних речовин в ІЛП

Назва	Абревіатура	Густина ISO1133 [гр/см ³]	Температура плавлення [°C]	Молекулярна вага [гр/мол]	Застосування
Поліетилен	PE	0.918	108	250000	backbone
Поліпропілен	PP	0.946	170	444000	backbone
Полістирол	PS	1.05	240	400000	backbone
Етилен-вініл-ацеталь	EVA	0.934	96	60000	backbone
Поліметилметакрилат	PMMA	1.18	160	30000	backbone
Парафіновий віск	PW	0.9	58	400	Пластифікатор
Стеаринова кислота	Sa	0.85	70	284	Домішка

Структурний компонент зв'язувальної речовини (backbone) залишається в деталях до тих пір, поки на ранніх етапах спікання між частинками порошку не почнуть утворюватись міцні зв'язки. Досліди показують, що поліетилен високої густини з великою молекулярною вагою забезпечує більшу геометричну стабільність деталей та підвищує якість відливок. Проте використання поліетилену низької густини покращує проліття деталей при інжекційному литті. Поліметилметакрилат (акрилова смола) з середньою молекулярною вагою, як правило, застосовується у суміші з поліетиленгліколем (PEG), що забезпечує міцність і жорсткість відливок.

Як пластифікатор в системах зв'язувальних речовин найчастіше застосовують парафіновий віск (PW). В суміші пластифікатор має найбільшу частку, яка може досягати до 65% за масою. Процес виготовлення деталей зі зв'язувальною речовиною на основі PW займає

досить багато часу. Він потребує двох етапів дебайдингу, на першому етапі відбувається екстракція воску у суміші гексану, другий етап – це термічний дебайдинг у атмосфері аргону. Використання поліетиленгліколю є більш перспективним, адже ця речовина здатна розщеплюватись у воді, що унеможлиблює використання таких вогненебезпечних органічних розчинників, як ацетон, гептан та ін. Здатність розчинятися у воді для PEG суттєво залежить від температури. Використання таких речовини з низькою молекулярною вагою (PEG1000, PEG1500) покращує не тільки змочування металевих часток порошку та характеристики в'язкості, але також впливає на початковий процес дебайдингу. Швидке розплавлення полімеру при досить низькій температурі (37–43 °С) забезпечує формування достатньої кількості пор під час початкової стадії дебайдингу. Що дозволяє остаточно видалити зв'язувальну речовину без дефектів. Використання поліетиленгліколю з високою молекулярною вагою (PEG 8000) запобігає розщепленню зв'язувальної речовини при литті та збільшує міцність відливок.

Як технологічні домішки для зв'язувальних речовин часто використовують такі речовини, як дисперсанти, пластифікатори, стабілізатори та внутрішньомолекулярні змазки. Дисперсанти мають унікальну властивість замінювати зв'язки порошок/порошок та порошок/повітря на порошок/зв'язувальна речовина. Як технологічні домішки часто використовують стеаринову кислоту (SA). Завдяки своїй структурі SA здатна значно знизити сили тертя між частинками порошку, що дозволяє отримати більш гомогенну суміш. Також SA покращує адгезію між зв'язувальною речовиною та металевим порошком шляхом зниження поверхневої енергії. Як поверхнево-активні речовини можуть використовуватись олеїнова кислота та 12-гідростеаринова кислота, однак досліди показують перевагу SA при використанні її у зв'язувальних системах. Стеаринова кислота забезпечує кращі характеристики потоку та низьку в'язкість системи.

Стабілізатори додаються до суміші в основному для попередження утворення агломератів частинок порошку. Внутрішньомолекулярні змазки використовуються для підвищення характеристик лиття. Такі змазки мають низьку молекулярну вагу та в'язкість порівняно з полімерами при температурі процесу. Це зменшує тертя між поверхнею полімеру на частинках та молекулами зв'язувальної речовини.

1.7.1 Водорозчинні системи

Хорошим прикладом зв'язувальних речовин, здатних розчинятися у воді, можуть бути: поліетиленгліколь, поліетиленоксид, поліакриламід. Вони мають у своєму складі повторюваний мономер, що містить атоми кисню або азоту, які є гідрофільними. Металевий порошок зміщується з

такими полімерами, і таким чином зв'язувальна речовина легко видаляється за допомогою води.

Дуже часто метали можуть вступати в хімічні реакції з полімерами або бути каталізатором під час циклу дебайдингу. Необхідно ретельно підбирати металеві порошки для водорозчинної зв'язувальної речовини, щоб між ними не відбувалася хімічна реакція в твердому стані або під час витримки у воді. Було виявлено, що з водорозчинною полімерною зв'язувальною речовиною на основі гідроксиду добре сумісні такі метали: нержавіючі сталі 316, 440С, 420, 304, 17-4РН, інструментальна сталь М2, М4, D4, мідь, срібло, титан, ковар.

Зв'язувальна речовина на основі води і агару була розроблена фірмою Honeywell Powderflo (США) для виготовлення великих деталей в діапазоні від одного до двох кілограм. Така технологія здатна змагатися з литвом за виплавними моделями. Використання такої системи зв'язувальної речовини усуває необхідність окремої операції дебайдингу і дозволяє подальше спікання об'єднати з дебайдингом. В результаті зменшується час циклу і знижується вартість порівняно з полімерними зв'язувальними компонентами.

Зв'язувальна речовина формується гелеутворювальним матеріалом (агар). Гелеутворювальний матеріал є розчинним (для розчинення гелеутворювального матеріалу при температурі плавлення до зв'язувальної речовини додається вода в достатній кількості).

Гелевидний матеріал використовується, в основному, для отримання матеріалу з хорошою здатністю до лиття, високою щільністю і великим потенціалом місткості твердого порошку. У разі перевищення температури (вище 50 °С) молекули полімеру розщеплюються. У цьому стані водорозчинна зв'язувальна речовина має низьку в'язкість і здатна легко відливатися. При охолодженні молекули полімеру закручуються, формуючи осередки, заповнені водою. Іншими словами, в'язкість системи значно збільшується. Таким чином, після короткого часу в холодній формі, відливок стає досить жорстким і його можна вийняти без ушкоджень.

Зазвичай, до суміші додається 55% води за об'ємом, яка виконує дві функції: служить розчинником і переносить суміші, що містять агар. Суміш також може містити різні домішки для різних цілей.

Використання таких гелеутворювальних матеріалів у комбінації зі зміцнювальними домішками зменшує вміст зв'язувальної речовини (зазвичай 2–3% за масою), що потрібно для формування самопідтримувальних об'єктів. Такі зміцнювальні домішки для гелів готують із сумішею солей борної кислоти. Таким чином, складні деталі, виготовлені з агару зі зміцнювальними домішками солей борної кислоти, характеризуються високою міцністю та протистоянням деформації. Дуже важливо, щоб відливок мав достатню міцність для виймання з прес-форми без ушкоджень.

1.7.2 Системи зв'язувальної речовини на основі розчинника

Розчинювальний дебайдинг полягає в зануренні відливка в рідину, яка має розчинити як мінімум одну фазу зв'язувальної речовини, залишаючи відкриту структуру пор для подальшого спалювання. Один з методів розчинювальної екстракції полягає в нагріванні відливка за участі пари розчинника. Інший метод полягає в надкритичній екстракції, коли розчинник заздалегідь піддається стискуванню. Таким чином досягається критичний стан, в якому рідина і пара схожі за фізичними властивостями.

Розчинювальна екстракція широко використовується зі зв'язувальними речовинами на основі полімерних олій. Розчинник підбирається для розчинення олії, але не полімеру. Олія і полімер мають розчинитись один в одному, що дозволяє переносити деталі після первинного дебайдингу. Наприклад, хорошим вибором є олія кокоса або гідрована олія овочів. У початковій стадії відлита деталь занурюється в розчин для видалення олії. Деталі занурюються в теплий розчин на декілька годин. Такі розчини, як етилендихлорид, гептан або трихлоретан нагріваються для збільшення швидкості вилучення олії. Зв'язувальна речовина не має розбухати від адсорбції розчину. Деталь завтовшки приблизно 10 мм занурюється менш ніж на 6 годин в розчин з температурою 40–60 °С. Після занурення, частина нерозчиненої речовини утримує частки разом, поки деталь сушиться. Для підтримки низької концентрації в розчині рідина фільтрується впродовж усього процесу екстракції. На додаток слід зауважити, що швидке висушування після екстракції призводить до утворення тріщин.

Іншим методом може бути нагрів розчину для дії на деталі конденсованої пари, де речовина, що видаляється, і розчин стікають з деталей з часом. Такий метод можна комбінувати з подальшим зануренням. Розчин розчиняє основну масу зв'язувальної речовини, залишаючи структуру основи незмінною. Таким чином розчиняється більшість полімерів без реакції деградації, розчинювальний дебайдинг забезпечує легкий контроль над розмірами і залишковим рівнем вуглецю.

Також слід зазначити, що деякі технології розчинювального дебайдингу небезпечні. Багато розчинів горючі, токсичні або канцерогенні. Це обмежує практичне застосування розчинювального дебайдингу і надає особливе значення системам на основі водного розчинення зв'язувальної речовини.

Ефективним способом видалення є надкритичний дебайдинг. Зв'язувальна речовина на основі воску може бути видалена за допомогою надкритичного дебайдингу. Для прикладу: сировина змішана з порошком SUS 304L і зв'язувальною речовиною на основі парафіну, стеаринової кислоти та поліацеталу в співвідношенні 58:42 за об'ємом. Сировину змішують при температурі 100 °С протягом однієї години.

З цієї сировини відливають зразки деталей на інжекційній машині при тиску 40 МПа і температурі циліндра 90 °С.

Надкритична рідина – це фізичний стан з температурою і тиском вище критичних, передбачається, що це проміжний стан між рідиною і газом.

У таблиці 1.4 порівнюються типові фізичні параметри рідини, надкритичної рідини і газу. З цієї таблиці видно, що надкритична рідина має щільність і коефіцієнт дифузії, як у рідини, і в'язкість, як у газу. Це означає, що надкритична рідина здатна проникати крізь пористе тіло немов газ і розчиняти зв'язувальну речовину як рідина.

Таблиця 1.4 – Фізичні параметри газу надкритичного текучого середовища, рідини і газу

Фізичний стан	Коефіцієнт дифузії, (cm^2/c)	В'язкість ($\text{г}/\text{cm}^3$)	Щільність ($\text{г}/\text{cm}^3$)
Газ	0,1	10^{-4}	10^{-3}
Надкритичне текуче середовище	$10^{-3}-10^{-4}$	$10^{-3}-10^{-4}$	0,3-0,8
Рідина	0	10^{-2}	1

Такий надкритичний стан діоксиду вуглецю (CO_2) здатний розчиняти неполярні молекули або низькомолекулярні матеріали. Він добре розчиняє парафіновий віск, важко розчиняє полярні молекули подібні до бджолиного воску або стеаринової кислоти і зовсім не розчиняє високомолекулярні матеріали подібні до поліетилену або поліпропілену. Така вибіркова здатність до розчинення дозволяє підібрати зв'язувальне, яке залишиться після первинного дебайдингу і збереже форму деталей перед спіканням. На додаток, використання цього процесу дає можливість видалити зв'язувальне з відливка, не окислюючи металевий порошок.

При надкритичному дебайдингу (рис. 1.14) не застосовується висока температура, яка може призвести до термічної напруги або тріщин у деталях. Найпоширенішими розчинниками є діоксид вуглецю, фреон і пропан. Зазвичай в надкритичному дебайдингу робочий тиск зберігається нижче 20 МПа і максимальна температура нижча 100 °С. Устаткування для дебайдингу наведено на рисунку 1.15.

Для дебайдингу зразки встановлюються в ємкість для видалення зв'язувальної речовини, потім рідкий CO_2 закачується під тиском в ємкість. Граничний тиск складає 30 МПа. Під час роботи насоса він охолоджується в діапазоні температур від 5 до -5 °С. Ємкість для видалення зв'язувального об'ємом 100 cm^3 може нагріватися до температури 200 °С. Надкритичний дебайдинг проходить при температурі 55 °С і тиску 20 МПа близько двох годин, потім тиск знижується до атмосферного. Після цього процесу видалення зв'язувальної речовини на основі воску складає 60% за масою, залишкова структурна речовина потім видаляється шляхом термічного нагріву без високого тиску. Остаточна температура зберігається протягом декількох годин для повного видалення

зв'язувальної речовини. Впродовж надкритичного дебайдингу зв'язувальна речовина конденсується в холодній зоні.

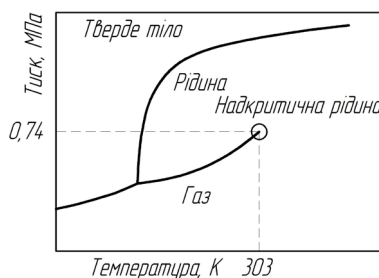


Рисунок 1.14– Фазова діаграма оксиду вуглецю

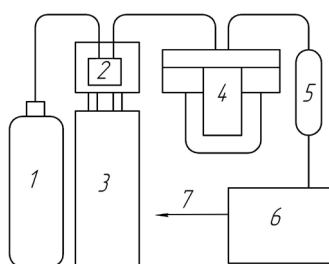


Рисунок 1.15 – Схема устаткування для надкритичного дебайдингу:
 1 – ємкість з рідким CO₂; 2 – гідравлічний насос високого тиску;
 3 – охолоджувальний вентилятор; 4– ємкість для видалення зв'язувальної речовини з вбудованими нагрівачами; 5 – вихлопний клапан;
 6 – уловлювач для зв'язувальної речовини; 7 – вимірювач потоку

Крім того, критичний дебайдинг здатний видаляти зв'язувальну речовину за короткий період часу, ніж термічний дебайдинг. Однак в цьому методі існують такі проблеми, як нестабільність механічних властивостей деталей, особливо міцності на розрив. Причина криється в компонентах зв'язуючого, особливо суттєво впливають залишки кисню і вуглецю в деталях після розкладання стеаринової кислоти. Щоб усунути цю проблему, потрібно розробити зв'язувальну речовину без вмісту стеаринової кислоти.

Існують також інші, використовувані рідко, системи видалення зв'язувальної речовини – це використання гелеутворення, наприклад, суміші целюлози та смоли, а також заморожування водної суспензії, яка містить органічні інгредієнти. В технологічному процесі застовується сушіння для видалення води і створення сітки з відкритою пористістю, достатньою для випаровування зв'язувальної речовини під час термічного процесу. Під час процесу видалення сила зчеплення матеріалу помітно зменшується і необхідна обережність при обробці «коричневих» деталей.

Швидкість розчинювального дебайдингу

Кількість речовини, видаленої шляхом ізотермічного занурення, залежить від декількох чинників процесу: час дебайдингу (t), товщина секції деталі (H) та температура (T) згідно з формулою:

$$t = \frac{H^2}{\beta} \ln \left(\frac{V_B}{1 - \varphi} \right) \exp \left(\frac{Q}{kT} \right),$$

де V_B – об'єм речовини, що підлягає видаленню; коефіцієнт β – залежить від розчинності в розчині; $1 - \varphi$ – первинний рівень речовини (φ – фракція порошку); Q – енергія активації, асоціюється з розчинністю зв'язувальної речовини в розчині; k – це константа Больцмана.

Розчинний дебайдинг вимагає, щоб зв'язувальна речовина складалася з двох компонентів, що не розчиняються один в одному, один з компонентів має розчинитися в розчиннику при дебайдингу, але інший компонент має бути стійкий до розчинника, тим самим утримувати частки порошку разом. Для задовільного утримання скріплених між собою часток вимагається, як мінімум, 30% розчинної фази зв'язувальної речовини.

Швидкість дебайдингу залежить від рухомості молекул, як правило, вона вища при більшій температурі та меншому розміру молекул розчинника.

Класична діаграма розчинювального дебайдингу, для екстракції етиленгліколю у воді, показана на рис. 1.16. У даному випадку деталь складається з суміші двох полімерів разом з основою зв'язувальної речовини, що не розчиняється у воді. Після 8 годин вода успішно видалила етиленгліколь, але зі швидкістю, яка зменшувалася з часом.

У початковій стадії розчинювального дебайдингу фракція зв'язувальної речовини змінюється залежно від квадратного кореня часу занурення, як показано на рис. 1.17. Цей рисунок показує вагу фракції віск-полімерного зв'язувального, що видаляється при $t^\circ 80^\circ \text{C}$, залежно від квадратного кореня часу витримки в гептані.

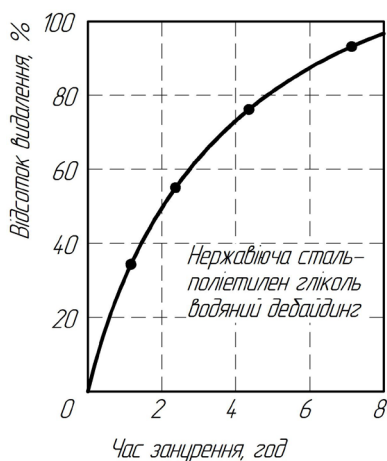


Рисунок 1.16 – Дані з видалення зв'язувальної речовини в розчинювальному дебайдингу (з використанням зразка з нержавіючої сталі завтовшки 6 мм і водорозчинної зв'язувальної речовини поліетиленгліколю)

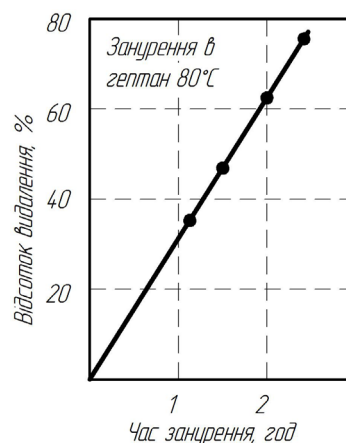


Рисунок 1.17 – Відсоток видалення фракції воско-поліпропіленової зв'язувальної речовини залежно від часу при зануренні в гептан з температурою 80°C

Висока температура розчину викликає розбухання або тріщини деталей ІЛП. Отже, існує оптимальна температура для розчинювального дебайдингу. Висока температура збільшує швидкість дебайдингу внаслідок високої дифузії полімеру і розчинника. Втім, ця температура лежить в діапазоні, при якому деталь зберігає цілісність. Тріщини можуть утворюватися і при низькій температурі. Це відбувається тому, що розчин дифундує в основний компонент полімеру; якщо зворотна дифузія полімеру в розчинник занадто повільна, то відбувається розбухання і утворення внутрішніх тріщин у деталях. З іншого боку, при занадто високій температурі деталь втрачає свою форму внаслідок розм'якшення зв'язувальної речовини. Таким чином, температурний контроль дуже важливий для успішного дебайдингу.

1.7.3 Системи на основі термопластичних полімерів

Термопластичні полімери були розроблені для лиття на інжекційних машинах для виготовлення пластмасових деталей. Молекулярні зв'язки поліпропілену та поліетилену набагато довші за ті, що наявні у воску. Ця різниця виражається у більшій силі зв'язування частинок порошку а також у підвищеній в'язкості розплавленого потоку полімеру. Проте процес розкладу полімерів у атмосфері з низьким вмістом кисню є набагато складнішим.

Термопластичні полімери утворюються за допомогою повторювання невеликих груп мономерів вздовж ланцюга без перехрещування. Кристалічні полімери мають меншу довжину ланцюга, ніж аморфні полімери. Тому аморфні полімери мають кращі пластичні характеристики, ніж кристалічні. При високих температурах два типи полімерів поведуть себе по-різному. Полімери з відносною масою молекул нижче M_1 мають низьку температуру плавлення, що призведе до деформації деталі під час дебайдингу. Полімери з відносною масою молекул більшою за M_2 потребують занадто високу температуру для набуття в'язкого стану. В свою чергу, висока температура призведе до деградації полімеру. Тому в ідеалі відносна молекулярна маса полімеру має знаходитись в діапазоні від M_1 до M_2 .

Полімери стають м'якими та в'язкими при температурі вищій за температуру склування. Полімери крихкі при температурі, нижчій даної. Такі різноманітні властивості, як об'єм, теплове розширення зазнають великих змін в околі температури склування. Температура плавлення та критична напруга на розтяг залежать від молекулярної ваги та довжини молекули. В'язкість полімеру також залежить від молекулярної ваги згідно з рівнянням:

$$\eta = k \cdot M^\alpha,$$

де k та α є константами. Коефіцієнт α дуже близький до одиниці для полімерів, що використовуються в ІЛП.

Полімери з малими ланцюгами мономерів є більш бажаними для використання в технології ІЛП, оскільки вони мають низьку молекулярну вагу. Різноманітні види воску часто застосовуються для ІЛП, тому що вони мають низьку молекулярну вагу, термопластичну природу та низьку точку плавлення. Зокрема це: парафіновий віск, бджолиний віск, та карнаубський віск. Точка плавлення всіх цих типів воску лежить нижче 100 °С.

Реактопласти – це полімери, утворені взаємним перехреснуванням ланцюгів мономерів при високій температурі. В результаті утворюється тривимірна жорстка структура. Один раз сформувавшись, така структура не може бути повторно переформована при нагріванні. Реактопласти при нагріванні зразу випаровуються без фази плавлення. Оскільки такі полімери одразу випаровуються без розм'якшення, це допомагає знизити деформацію деталі під час дебайдингу. Перехреснена структура реактопласту зберігає форму деталей та міцність під час дебайдингу. Додаткова міцність деталі під час дебайдингу зберігає її форму та унеможливує утворення тріщин. Проте такі полімери рідко застосовуються для ІЛП. Оскільки суміші на основі реактопластів неможливо перероблювати та використовувати повторно, то це впливає на вартість деталей. Також дуже важко термічно випалити такі полімери повністю під час дебайдингу. Адже залишається деяка кількість вуглецю, тому, як правило, реактопласти використовуються з металами, які мають підвищений вміст вуглецю.

У 1991 році фірма BASF презентувала нову систему зв'язувальної речовини для порошкового інжекційного литва. Вона може застосовуватись як для металів, так і для кераміки. Цей процес охоплює використання зв'язувальної речовини на основі поліацеталю і технологію дебайдингу на основі каталітичного видалення парами азотної кислоти.

У цій технології використовується запатентована зв'язувальна речовина на основі полімеру поліацеталю. Такий полімер має чудові ливарні та механічні властивості. Він широко використовується в полімерній індустрії під торговою маркою Ultraform. Полімер може бути деполімеризований значно нижче точки плавлення за допомогою кислоти. Ці властивості дозволяють швидко видалити зв'язувальну речовину з «зеленої» деталі, уникаючи деформації.

Основним компонентом є модифікований поліоксиметилен (POM) (поліацеталь), який можна швидко видалити шляхом каталітичного процесу, також до нього додається невелика кількість поліетилену, який не розщеплюється парами кислоти. Хімічна стійкість поліетилену дозволяє транспортувати деталі після дебайдингу до печі спікання без ушкоджень. Домішки підбираються для будь-якого порошку. Кополімери і аморфні полімери додаються до поліацеталю для зниження кристалічності та підвищення стійкості до навантажень зсуву. Порошки з кислотною або лужною поверхнею нейтралізуються шляхом додавання органічних

сполук. Поверхнево активні речовини стабілізують однорідний розподіл часток порошку в полімерній матриці і запобігають утворенню агломератів. У каталітичному дебайдингу використовується азотна кислота. Вона прискорює розщеплювання зв'язувальної речовини (деполімеризація) в «зелених» деталях ззовні всередину. Кипляча азотна кислота (чистота 98%) як каталізатор придатна майже для всіх матеріалів. Рідка кислота HNO_3 є сильним окислювачем, безводні пари кислоти не реагують з більшістю найбільш поширених металевих порошоків: Fe, Ni, Cr, Mo, Si, Ti, WC, Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 . Такі елементи, як кобальт, мідь і мідні сплави окислюються в цій атмосфері. Більшість кобальтових сплавів інертні до атмосфери дебайдингу. Кислота надходить в піч за допомогою насоса, деталі якого виготовлені з кераміки та тефлону. Для азотної кислоти має бути відпрацьована система контролю за її подачею у камеру печі. Оскільки кислота використовується як каталізатор, швидкість подання її в піч має критичне значення. Якщо подачу кислоти (мл/хв) буде завищено, це призведе до надто швидкої хімічної реакції зі зв'язувальною речовиною. Оскільки хімічна реакція проходить за участю теплової енергії, то на деталях може виникнути градієнт температури, що, у свою чергу, призведе до виникнення тріщин. Особливо це стосується великогабаритних деталей та деталей, в яких наявні залишкові напруження після лиття. При заниженій подачі кислоти певна кількість зв'язувальної речовини залихиться у деталях після дебайдингу. Під час термічного дебайдингу, поліацеталь розширюється занадто швидко, що призводить до тріщин у деталях.

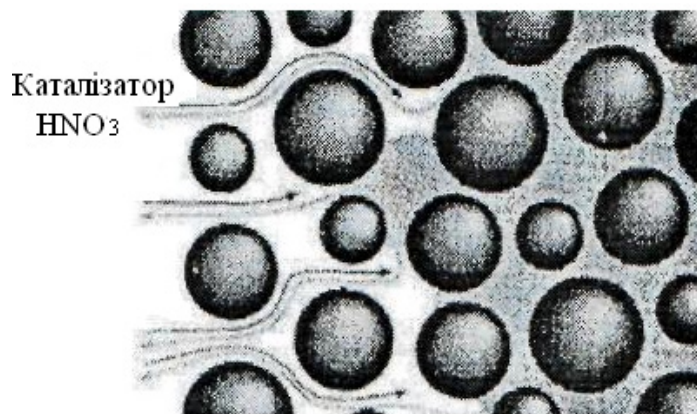


Рисунок 1.18 – Схематичне зображення механізму каталітичного дебайдингу

Температура і концентрація каталізатора, як і розміри часток порошку в деталі, визначають швидкість дебайдингу. Процес проходить при температурі, нижчій точки плавлення зв'язувальної речовини, таким чином забезпечується збереження геометрії деталі. У печі регулюються такі

параметри, як температура, час витримки, швидкість подання азотної кислоти, швидкість подання газу, швидкість вентиляції в печі. Після нагріву реторти і подання продувального газу (азоту) в піч подається азотна кислота. Зв'язувальна речовина (РОМ) деполімеризується в діапазоні температур від 115 °С до 130° С на газоподібний формальдегід, який потім спалюється. Поки пари кислоти не просочуються крізь деталь, деструкція проходить тільки на межі полімеру і атмосфери. З часом межа зсовується до серцевини деталі. Газообмін проходить крізь вільні від полімеру пори, тим самим не створюючи внутрішнього тиску в деталі. Поліацеталь розщеплюється на простіший мономер – формальдегід. Формальдегід має низьку молекулярну масу і швидко переноситься крізь пори. Формальдегід і пари кислоти виносяться з печі в допалювач за допомогою азоту, де формальдегід згорає навіть краще, ніж природний газ. Таким чином, про початок розщеплювання поліацеталу під час процесу дебайдингу сигналізує підвищення температури в допалювачі. Після видалення поліацеталу в деталі залишається поліетилен, який надає відносну міцність. Поліетилен розщеплюється термічним шляхом на стадії спікання.

Технологія видалення сполучної речовини при застосуванні сировини Catamold® , BASF Німеччина.

Сировина Catamold® є унікальним продуктом завдяки здатності зв'язувальної речовини каталітично розкладатися до газоподібної фази. Ця здатність проявляється завдяки хімічній структурі поліацеталу. Ланцюжок поліацеталу містить повторювані вуглецево-кисневі зв'язки. Атоми кисню в полімерному ланцюжку сприйнятливі до дії кислоти, тому під впливом відповідного кислотного каталізатора відбувається послідовне відщеплення CH_2O (формальдегідних) груп від макромолекули. Каталізатором, що використовується для видалення зв'язувальної речовини, є газоподібна азотна кислота, концентрація якої більша 93,5%.

Щоб відбулася реакція з видалення зв'язувальної речовини, необхідно створити певні умови. Деталі розміщують у печі для видалення зв'язувальної речовини і продувають азотом. Процес видалення зв'язувальної речовини при температурі 110 °С, яка є набагато нижчою, ніж інтервал плавлення поліацеталу 150–170 °С, відбувається як прямий перехід твердого полімеру в газоподібний стан. Границя розділу зв'язувальної речовини й газу рухається всередину з лінійною швидкістю від 1 до 2 мм/год. Маленькі газоподібні молекули формальдегіду (точка кипіння мінус 21 °С) легко проходять через уже пористі зовнішні зони виробу й не ушкоджують структуру порошкових часток (рис. 1.19). У той же самий час зв'язувальна речовина все ще зберігає свої властивості, продовжуючи надавати жорсткість виробам під час процесу її видалення, що дозволяє уникнути якої-небудь пластичної деформації й значного відхилення розмірів.

Після закінчення процесу видалення поліацеталю залишається невелика залишкова кількість зв'язувальної речовини, стійкої до кислоти, що надає деяку міцність отриманій порошковій заготовці, яка підлягає подальшій обробці. Ця залишкова органічна фракція відходить під час наступного процесу випалювання.

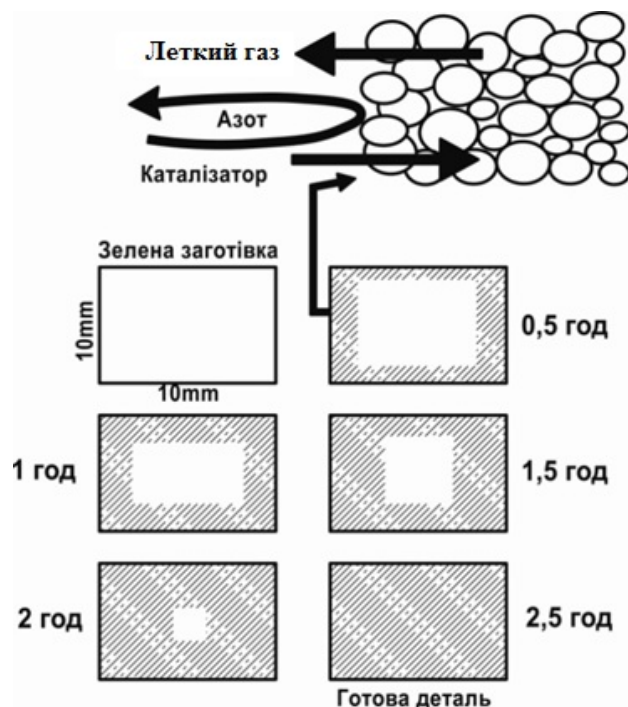


Рисунок 1.19 – Механізм процесу видалення зв'язувальної речовини

На практиці нижня межа температури видалення зв'язувальної речовини перебуває на рівні 100 °С. Така температура дозволяє триматися на безпечній відстані від точки роси азотної кислоти. Верхня межа визначається, в принципі, температурою розм'якшення зв'язувальної речовини (150–170 °С). На практиці верхня межа становить 140 °С. Температура від 110 до 120 °С рекомендується як основна.

Швидкість видалення зв'язувальної речовини може бути збільшена за допомогою подачі кислоти, однак при швидкості вище 40 мл/год і при швидкості подачі азоту 500 л/год концентрація окисних газів і формальдегіду, що утворився після видалення речовини, в деяких випадках може призвести до самозаймання. Такі рекомендації ґрунтуються на досвіді роботи з азотною кислотою, концентрація якої більша 98,5%. Процес видалення зв'язувальної речовини може здійснюватися з застосуванням менш концентрованої кислоти, однак це не бажано. Тривалість видалення зв'язувальної речовини збільшується при збільшенні завантаження печі. Якщо вироби залишаються в печі після закінчення часу видалення зв'язувальної речовини, то це не впливає на якість виробів.

Для контролю процесу рекомендується вимірювати вагу деталей до та після процесу дебайдингу. Кінцева вага виробів дозволяє визначити ступінь видалення зв'язувальної речовини. Про ступінь видалення зв'язувальної речовини можна також судити за свіжою поверхнею розлому виробів. Якщо зв'язувальна речовина не була вилучена з серцевини виробу, то це відразу стає помітним за кольором на лінії розлому. Відсоток видалення має критичне значення, адже якщо навіть невелика кількість поліацеталу залишиться всередині деталі після дебайдингу, він спричинить внутрішній тиск в деталях під час спікання, що призведе до руйнування деталей.

Короткий час видалення зв'язувальної речовини з виробів, відлитих із сировини Catamold®, дозволяє використовувати печі для неперервного видалення зв'язувальної речовини та спікання. У печі безперервної дії також використовується суміш із азоту та каталізатора. Потік газу тече проти напрямку подачі виробів, а потім йде у відвідну трубу для спалювання. Перед надходженням у піч вироби проходять через шлюз попереднього нагрівання, що запобігає конденсації каталізатора на поверхні виробів.

1.7.4 Термічний дебайдинг

Термічний дебайдинг, як правило, застосовується як друга стадія видалення зв'язувальної речовини, яка проходить при більш високих температурах. Використання лише термічного видалення без першої стадії загалом неефективне, такий процес дуже повільний та може спричинити деформацію деталей. А тому використання лише одного етапу видалення не знайшло широкого виробничого використання.

Можна розрізнити такі види термічного дебайдингу: видалення зв'язувальної речовини за допомогою теплового розщеплення та рідкого її видалення, використовуючи матеріали з капілярним ефектом у контакті з деталлю. Термічний дебайдинг являє собою видалення зв'язувальної речовини при поступовому підвищенні температури шляхом нагріву з контрольованим поданням газу при пониженому атмосферному тиску. На рисунку 1.20 показаний поетапний процес термічного видалення зв'язувальної речовини з деталі.

У початковій стадії розплавлена речовина тече до поверхні деталі швидше, ніж випаровується, таким чином, швидкість дебайдингу залежить тільки від температури деструкції.

Середній розмір пор при видаленні зв'язувальної речовини з часом зменшується, оскільки переважає звільнення великих пор. Якщо вони занадто великі, то при подальшому дебайдингу на їхньому місці може утворюватися тріщина. Це головна причина для забезпечення однорідності змішування сировини і уникнення відділення порошку від зв'язувальної речовини під час литва.

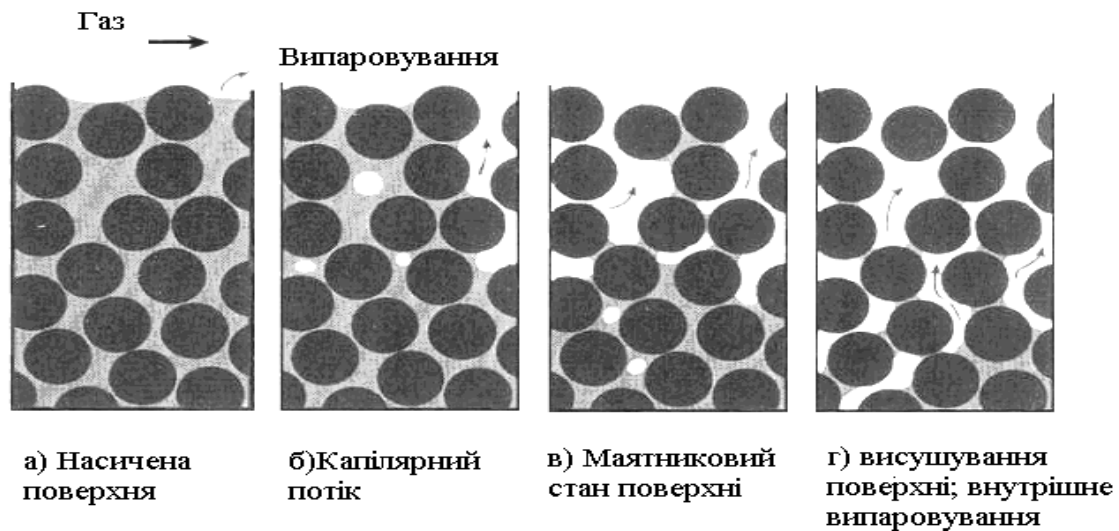


Рисунок 1.20 – Видалення зв'язувальної речовини з поверхні шляхом термічного випаровування

Один з варіантів термічного дебайдингу відбувається при такій температурі, коли зв'язувальна речовина розм'якшується і витікає з деталі за допомогою сил капілярної взаємодії. Витягувальний матеріал (пориста підкладка) в контакт з деталлю забезпечує капілярний потік при зменшенні в'язкості зв'язувальної речовини зі збільшенням температури.

Як альтернатива, зв'язувальна речовина може розкладатися на складові з меншою молекулярною масою (такі як вода, метан, діоксид вуглецю, оксид вуглецю) і випаровуватись під час нагріву, навіть при зовнішньому тиску атмосфери, завдяки просочуванню через пори або при частковому парціальному вакуумі, дифундуючи крізь пори. Різниця між дифузією і просочуванням залежить від тиску парів речовини, що, в свою чергу, визначає легкість, з якою пари проникають крізь пори між частками порошку, і середньої довжини вільного пробігу газу. Довжина вільного пробігу змінюється з тиском, молекулярною вагою газу і діаметром пор. У загальному випадку дифузія домінуватиме при низькому тиску, малих розмірах порожнин і відбуватиметься у вакуумі, у свою чергу, просочування відбувається при зовнішньому тиску. У дифузійному контролі зіткнення відбуваються, в основному, зі структурами пор, тоді як при просочуванні зіткнення відбуваються з іншими молекулами газу. Ефект просочування можна чекати при контрольованому дебайдингу з великими розмірами пор і високим тиском пару, де ламінарний потік контролює швидкість газу, який виходить з відливка. Передача теплоти не обмежує дебайдинг, оскільки зернистість матеріалу збільшує теплову провідність сполуки.

Існує проста відмінність між просочуванням і процесами випаровування. Просочування охоплює рідке видалення речовини, інші вимагають термічного розкладання та випаровування. Контрольована дифузія очікується, коли середня довжина вільного пробігу пари

компонентів перевищує радіус пор приблизно на порядок. Нижче цих умов швидкість видалення пари з відливків залежатиме більше від частоти молекулярних зіткнень із стінками пор, ніж від частоти зіткнень з іншими молекулами газів; таким чином, в'язкість не враховується. Середня довжина вільного пробігу між зіткненнями молекул газу обернено пропорційна тиску. Зазвичай, довжина вільного пробігу збільшується при збільшенні молекулярної маси і зменшенні тиску газу. Контрольована дифузія очікується при низькому загальному тиску в деталях, виготовлених з мілких часток. З іншого боку, контрольоване просочування очікується при високому загальному тиску газу і великих розмірах часток.

На останній стадії дебайдингу вигорання починається зсередини відливка. Потім поверхня сушиться шляхом випарювання при поверхневих зв'язках. Швидке випарювання відбувається при високій температурі і атмосфері, яка постійно замінюється новим газом. Однак ці умови можуть також призводити до тріщин, якщо вони застосовуються занадто агресивно.

На практиці дебайдинг не є ізотермічним, також зв'язувальна речовина не складається з одного компонента. Звичайний цикл процесу послідовно складається з ізотермічних витримок і періодів повільного нагріву. Цей процес протікає зі складними хімічними реакціями, в яких беруть участь полімери, розчинники, пластифікатори та ін. Основними типами термічного дебайдингу є:

- дебайдинг з контрольованою дифузією;
- капілярний керований дебайдинг.

Дебайдинг з контрольованою дифузією

За умови, коли довжина вільного пробігу газу набагато більша діаметра пор, очікується наявність дифузійного контрольованого дебайдингу. Дифузія газів покращується з високою пористістю відливка і великими розмірами пор, при низькій молекулярній вазі пари, високій температурі та високому тиску пари.

Для скорочення часу дебайдингу за допомогою дифузії, базовими принципами мають бути: використання тонких секцій, великих часток порошку, високих градієнтів тиску (з низьким внутрішнім тиском, таким як вакуум), висока пористість відливка і висока температура дебайдингу. На жаль, усі ці параметри неможливо регулювати окремо. Розмір часток підбирається з міркувань реології, спікання, пакувальної щільності. Насправді, при збільшенні щільності для зменшення розмірної точності час дебайдингу збільшується. У випадку високого тиску утворюється внутрішній тиск, який може зруйнувати відлинок.

У системах низького тиску використовується вакуумний насос для неперервного видалення продуктів розщеплення зв'язувальної речовини.

При використанні полімерів необхідна відносно висока температура видалення (400–600 °C). У цьому випадку продукти розщеплення після видалення частково конденсуються в холодних пастках вакуумної печі.

Нагрів зазвичай проводиться при швидкості 2–5 °С/хв до 400 °С і витримкою 2 години. Газ постійно продувається через камеру нагріву протягом всього нагрівання для видалення продуктів розщеплення. Коли зв'язувальна речовина буде повністю видалена з деталі, камера печі швидко нагрівається до температури спікання. Основна перевага цього способу полягає в тому, що деталі не охолоджуються і не переносяться до повного спікання. Однак цей процес відносно повільний, устаткування дуже дороге, до того ж, оскільки зв'язувальна речовина розплавляється раніше, ніж здатна вигоріти, деталі схильні до деформації. На додаток, в цьому процесі відсутній точний контроль за рівнем вуглецю, який потрібний для багатьох сталей.

Найпоширеніші компоненти зв'язувальних речовин, що видаляються шляхом термічного розщеплення, оснований на таких простих структурах, як поліетилен або поліпропілен. Ці два полімери швидко руйнуються при температурах близько 400 °С, також тиск їх пари при температурі 350 °С порівняно низький. Це пояснює високу чутливість до швидкості нагріву при дебайдингу.

Капілярний керований дебайдинг (рис. 1.21)

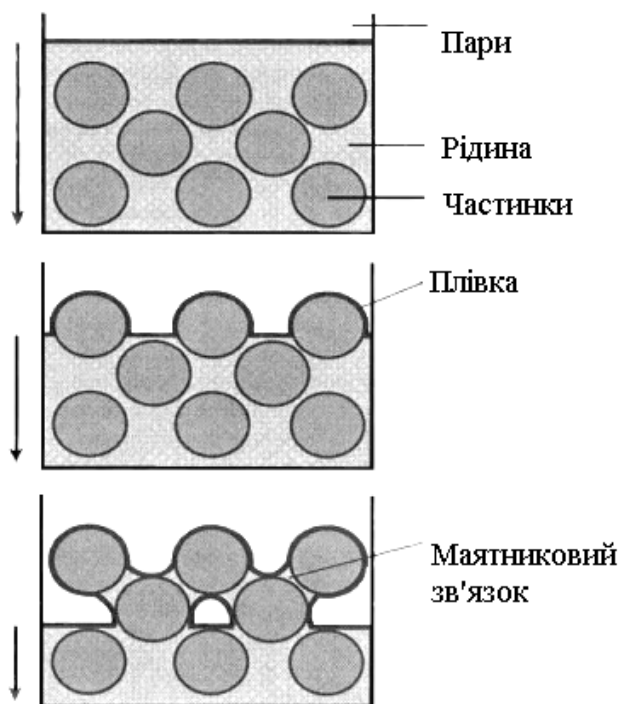


Рисунок 1.21 – Капілярний дебайдинг

Друга форма термічного дебайдингу охоплює спрямовану капілярну течію. Відливоч розміщується на пористій підкладці і нагрівається до температур, при яких в'язкість компонента достатньо низька, щоб почалася капілярна течія. Зв'язувальна речовина може скупчуватися в пористій підкладці або випаровуватися далі з відкритої пористої структури

підкладки. На додаток, пористий матеріал підкладки може бути ущільнений порошком, який допомагає підтримувати тонкі частини відливка під час процесу.

Потік розплавленої речовини починається завдяки силам капілярної взаємодії. Хороша пориста підкладка не має вступати в хімічні реакції, мати невеликі розміри пор і високу пористість.

Час дебайдингу залежить від товщини секції і в'язкості потоку. Дебайдинг має проходити при високій температурі, оскільки в'язкість рідини зменшується зі зростанням температури. Поверхнева енергія потоку впливає на тривалість дебайдингу, тому що висока поверхнева енергія сприяє високому капілярному тиску і, таким чином, збільшує потік. Вплив пористості такий же, як і для проникності пари. У випадку з двома розмірами часток швидший дебайдинг буде проходити з більшою різницею в розмірах часток.

Для швидкого капілярного дебайдингу краще використовувати підкладки з дрібними частками, а у відливках краще використовувати матеріал з великими частками з великою пористістю. Зв'язувальна речовина має бути з низькою в'язкістю потоку та великою поверхневою енергією. В'язкість потоку залежить від типу сполуки, органічні речовини довше видаляються шляхом капілярного дебайдингу, ніж водняні.

У початковій стадії підкладки не мають зв'язувальної речовини, а відливки насичені нею. Таким чином, коли речовина розплавляється, різниця в насиченості призводить до спінування і перенесення сполуки з відливка. Невеликі пори в підкладках сприяють видаленню зв'язувальної речовини з великих пор відливка, залишаючи тільки маятникові зв'язки між частками. Не вся зв'язувальна речовина може бути видалена шляхом капілярного дебайдингу, оскільки зв'язки між частками будуть зруйновані. Тому для видалення залишку потрібне випаровування.

Капілярний дебайдинг застосовується в декількох варіантах, і він може комбінуватися з термічним спалюванням багатьох зв'язувальних речовин на основі термопластів. Майже всі великі деталі для видалення зв'язувальної речовини використовують капілярний дебайдинг, який також може бути доповнений розчинювальними парами. Такий дебайдинг широко використовується для карбідів, великих металевих компонентів, а також для нержавіючих сталей.

Зазвичай зв'язувальна речовина, яка використовується для капілярного дебайдингу, містить віск, який найкраще вилучається за допомогою порошку або пористої підкладки. Відливки і підкладка нагріваються зі швидкістю 5 °C/хв до 250 °C. Перш ніж деталь охолоне, як мінімум 50% речовини вилучається під час витримки при цій температурі, потім очищається порошок. Оскільки не вся зв'язувальна речовина видаляється з відливка, завдяки мінімальному насиченню деталі зберігають міцність для подальшого транспортування. Залишкова

кількість компонента речовини вилучається шляхом спалювання через відкриту пористу структуру при швидкості нагріву близько 10 °С/хв. При температурі від 450 °С до 550 °С деталі нечутливі до швидкості нагріву, оскільки зв'язувальна речовина була вже вилучена. Якщо капілярний процес триватиме до високих температур, то поганий контакт з атмосферою погіршуватиме видалення зв'язувальної речовини. Видалення всмоктувального матеріалу з деталі може бути ускладнене, оскільки після охолодження зв'язувальна речовина приклеює цей матеріал до поверхні деталі.

Для збільшення швидкості дебайдингу використовують пористі підкладки з низькою щільністю і невеликими розмірами пор.

Для прикладу на рисунку 1.22 зображені діаграми видалення 80% зв'язувальної речовини залежно від часу шляхом капілярного дебайдингу при постійному розмірі часток і різних розмірах пор підкладки.

Як і у більшості видів дебайдингу, час зменшується зі зростанням температури. Для швидкого капілярного дебайдингу необхідно, щоб підкладка мала невеликі розміри порошку, була пористою, а деталь мала невелику товщину.

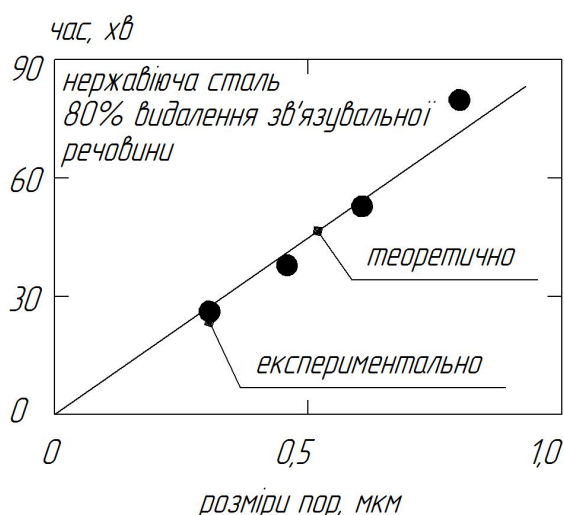


Рисунок 1.22 – Дані щодо капілярного дебайдингу зразка з нержавіючої сталі та зв'язувальної речовини на основі воску

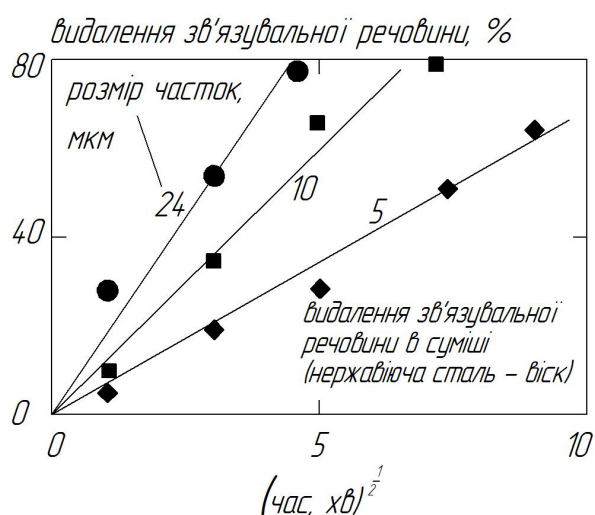


Рисунок 1.23 – Кількість видаленої речовини залежно від квадратного кореня тривалості капілярного дебайдингу

Кінетика капілярного дебайдингу продемонстрована на рисунку 1.23. Показана залежність кількості видаленої зв'язувальної речовини від квадратного кореня часу, і, як видно, речовина видалається швидше у відливках з матеріалу з великими розмірами часток. Однак через залишкове насичення не вся зв'язувальна речовина може бути видалена шляхом капілярного дебайдингу.

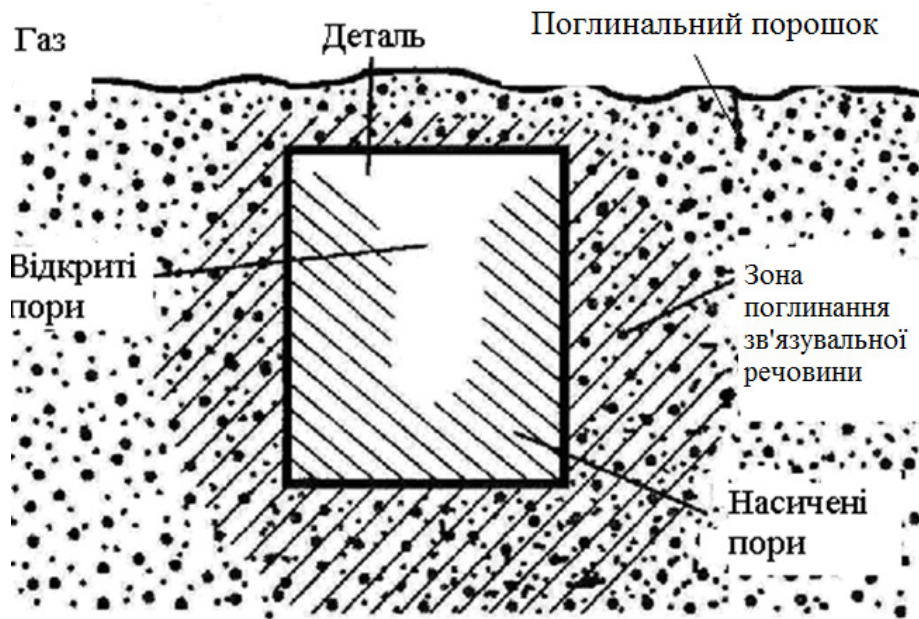


Рисунок 1.24 – Ілюстрація капілярного дебайдингу

У капілярному дебайдингу підкладки використовуються для підтримки і збереження форми деталі. Можна застосовувати насипний порошок із діоксиду алюмінію, графіту, кремнію, цирконію або іншого тонкого порошку, який оточує деталь, як показано на рисунку 1.24. Насипний порошок створює однорідний нагрів і допомагає запобігти деформації неміцної деталі. Якщо всмоктувальний матеріал має розмір пор менший, ніж в деталях, тоді швидкість дебайдингу може збільшитися. Фільтрувальний папір і різні пористі підкладки також можуть виконувати цю роль. У капілярному дебайдингу є дві обов'язкові операції. Перша операція полягає в охолодженні деталі після того, як приблизно половину зв'язувальної речовини було видалено. І друга – це відділення деталей від підтримувальних підкладок перед спіканням. Інші операції – це нагрівання деталей для деструкції зв'язувальної речовини та операція попереднього спікання для створення міцності деталі перед видаленням підтримувальної підкладки.

У термічному дебайдингу існує критична швидкість видалення без деформації деталі. Згідно з цим була вивчена швидкість контрольованого термічного дебайдингу для забезпечення постійної швидкості видалення.

На рисунку 1.25 показано один з таких випадків для нітриду кремнію та поліетилену. При високих температурах швидкість дебайдингу збільшується, у зв'язку з цим необхідне уповільнення нагріву. Далі, якщо формуються внутрішні парові кишені, в яких зростає тиск, зовнішній тиск допомагає його компенсувати. З іншого боку, більшість видів термічного дебайдингу проводять у контакті з пористою підкладкою, це забезпечує капілярне відсмоктування зв'язувальної речовини.

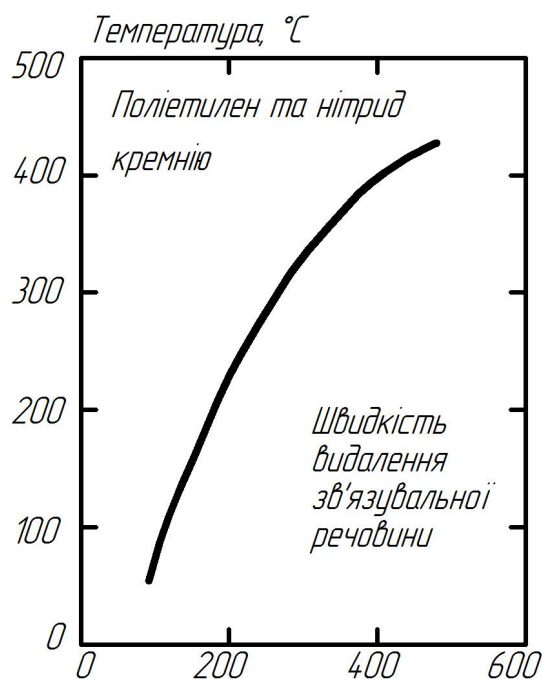


Рисунок 1.25 – Критична швидкість нагріву при термічному дебайдингу нітриду кремнію з поліетиленом як зв'язувальної речовини

1.7.5 Властивості зв'язувальної речовини та її вплив на суміш (feedstock)

Реологічні властивості потоку

Реологічні характеристики, особливо в'язкість суміші, відіграють важливу роль при заповненні порожнини прес-форми під час процесу лиття. В'язкість суміші підвищується при збільшенні вмісту металевого порошку. Для утворення пластичного потоку напруга зсуву має перевищувати межу пластичності. Для вимірювання реологічних характеристик використовуються капілярні та обертові реометри. В капілярних реометрах вимірюється падіння тиску і швидкість потоку під час прошовування суміші через невеликий отвір. Обертові реометри вимірюють крутний момент для змішування суміші як функцію від часу. Капілярні реометри добре повторюють умови, які відбуваються під час лиття, а тому широко застосовуються для вимірювання таких параметрів, як швидкості зсуву та в'язкості сумішей ІЛП.

Відносна в'язкість, яка визначається як в'язкість суміші у взаємозв'язку з в'язкістю зв'язувальної речовини збільшується при додаванні металевого порошку. Значення відносної в'язкості прямує до нескінченності, коли кількість порошку перевищує критичний ліміт. Такий критичний ліміт ще називають критичне завантаження порошку. Для сферичних однакових частинок таке критичне завантаження складає 63,7% (за об'ємом). Вплив завантаження порошку у формі рівномірно розташованих сферичних частинок на в'язкість рідини був описаний згідно з рівнянням Ейнштейна

$$\eta_r = 1 + 2.5\phi,$$

де η_r – відносна в'язкість, ϕ – завантаження порошку.

Дане рівняння було розроблено Ейнштейном і може бути використаним для завантаження меншого 15%. На основі цього рівняння було проведено багато досліджень для розрахунку залежності в'язкості від завантаження порошку. Найбільш достовірною моделлю, що описує залежність відносної в'язкості та відносного завантаження порошку має вигляд

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_b} = A (1 - \phi_r)^{-n},$$

де η_r – відносна в'язкість, ϕ_r – відносне завантаження порошку, експонента n дорівнює 2, а коефіцієнт A – як правило, дорівнює одиниці. Залежність відносної в'язкості для різних систем показана на рис. 1.26.

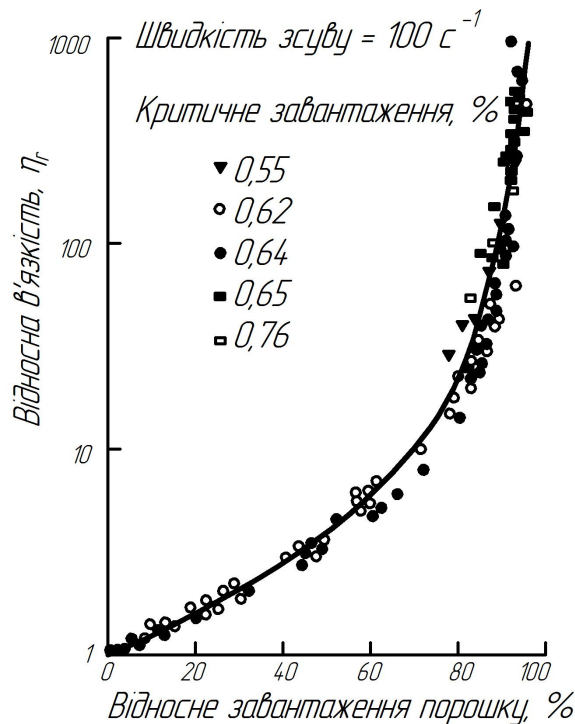


Рисунок 1.26 – Залежність відносної в'язкості від завантаження порошку

Вплив швидкості зсуву на в'язкість

В'язкість суміші для ІЛП дуже чутлива до швидкості зсуву. При низьких швидкостях зсуву суміші ІЛП мають точку пластичності, що відповідає високій в'язкості. Коли діюче навантаження перевищує точку пластичності, в'язкість суміші зменшується зі збільшенням швидкості зсуву. При високих швидкостях зсуву збільшується кількість частинок порошку в об'ємі, що приводить до збільшення в'язкості. Таке явище відсутнє при низьких рівнях завантаження порошку, оскільки в такій

суміші високий вміст полімеру. Поверхнево активні домішки знижують в'язкість суміші, але не змінюють форму кривої в'язкості залежно від швидкості зсуву.

Вплив температури суміші на в'язкість

В'язкість суміші зменшується при збільшенні температури. Ефект зменшення в'язкості при збільшенні температури буде сильнішим для сумішей ІЛП порівняно з ненаповненими зв'язувальною речовиною. Значне зменшення в'язкості суміші відбувається завдяки комбінації ефектів зменшення в'язкості зв'язувальної речовини та одночасно зміни об'ємної частки металевого порошку в зв'язку з різницею в теплових коефіцієнтах розширення. Зниження в'язкості суміші при високих температурах може бути використано для збільшення завантаження порошку під час процесу лиття. Також низька в'язкість полегшить змішування суміші на початковій стадії. Проте лиття суміші ІЛП при високій температурі може призвести до збільшення часу циклу лиття а також призвести до дефектів, пов'язаних з високим усадженням полімеру.

Вплив характеристик частинок порошку на в'язкість

В'язкість суміші зростає зі зменшенням розмірів частинок порошку. Малий розмір частинок приводить до збільшення сумарної площі поверхні та сил тертя між частинками, внаслідок чого збільшується в'язкість суміші. Порошок, який має високу насипну густину, потребує меншої кількості зв'язувальної речовини для отримання потрібної в'язкості для лиття. Завантаження порошку в суміш може бути значно збільшене при використанні порошку з високою насипною платністю. Порошок з великою різницею в розмірах частинок може покращувати насипну густину та водночас зменшувати в'язкість суміші для будь-якого процентного відношення. Залежність відносної в'язкості від композиції порошку (вміст малих за розміром частинок) для бімодальної суміші при завантаженні порошку 55% і з розміром частинок 21 мкм показано на рис. 1.27.

Форма металевих частинок має значний ефект на відносну в'язкість суміші. Частинки неправильної форми завдяки своїй високій силі тертя порошку та низькій насипній густині приводять до збільшенню відносної в'язкості компаунда. Сферичні частинки неправильної форми ідеально підходять для інжекційного лиття порошку завдяки хорошим якостям потоку та низькій силі тертя. Критична загрузка порошку зменшується коли частинки порошку стають менш сферичними. Суміш ІЛП з сферичними частинками порошку має більшу критичні загрузку. Утворення агломератів порошку також призводить до збільшення в'язкості. Зі збільшенням розмірів агломератів порошку збільшується і в'язкість системи. Залежність відносної в'язкості від форми частинок порошку показано на рисунку 1.27.

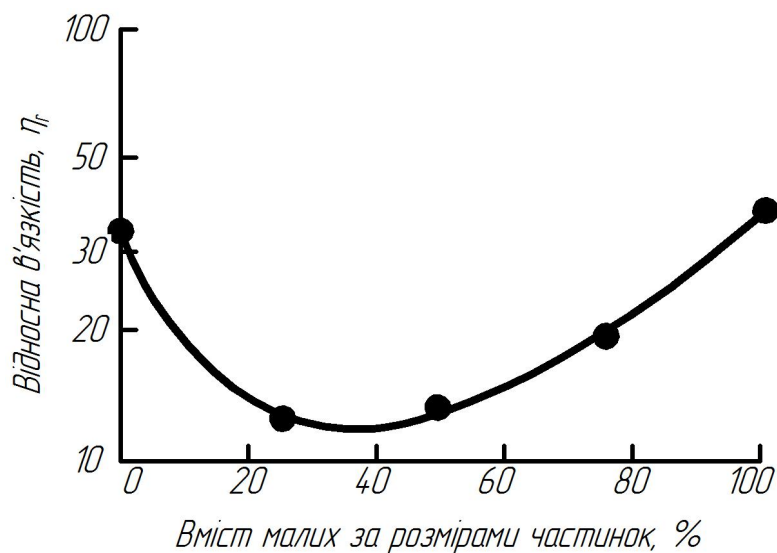


Рисунок 1.27 – Залежність відносної в'язкості від кількості малих (за розмірами) частинок в композиції

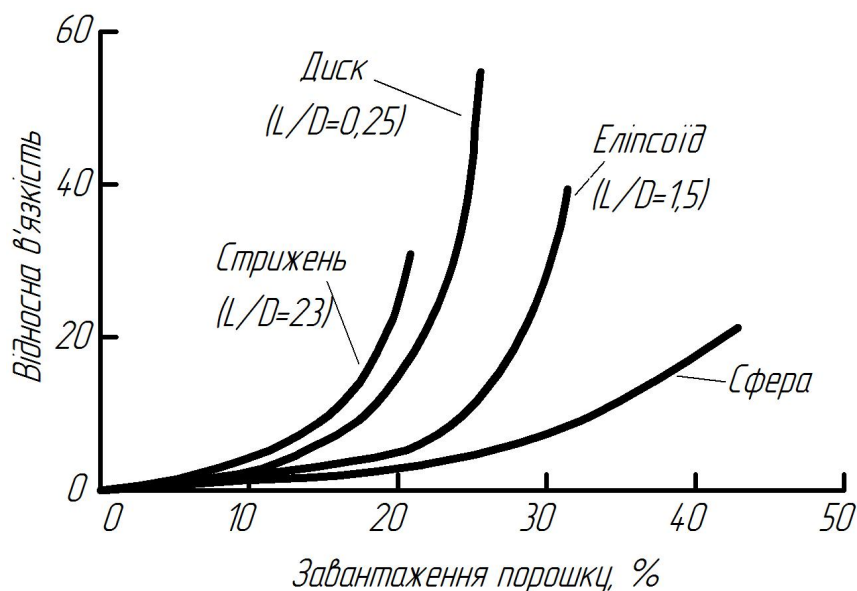


Рисунок 1.28 – Ефект впливу форми частинок порошку на відносну в'язкість системи при збільшенні завантаження порошку

Затвердіння матеріалу: теплопровідність та теплоємність

Під час процесу інжекційного лиття, після заповнення порожнини прес-форми, відливок охолоджується до температури форми під впливом зовнішнього тиску. Тиск повністю знижується, коли відливок повністю охолонув. Різниця у теплових характеристиках між зв'язувальною речовиною та металевими частинками порошку призводить до виникнення внутрішньої напруги у відливку під час охолодження. Це може призвести до деформації відливка або до тріщин після вийняття з прес-форми. Суміш для ІЛП має значно збільшувати свою в'язкість під час охолодження для запобігання деформації.

Теплові характеристики суміші ІЛП можуть бути визначені за правилом змішування

$$A_f = A_b + \phi(A_m - A_b),$$

де A_f – властивості суміші, A_b – властивості чистої зв'язувальної речовини, A_m – властивості металу, та ϕ – завантаження порошку.

Суміш має мати високу теплопровідність для зменшення вірогідності формування усадкових тріщин. Значення теплопровідності дорівнює середньому значенню теплопровідності полімеру та металевого порошку й може бути обчислено за формулою

$$k_f = \frac{k_b(1 - A\phi)}{1 - B\phi},$$

де k_f – теплопровідність суміші, k_b – теплопровідність зв'язувальної речовини, A та B – константи, ϕ – завантаження порошку.

Теплоємність суміші може бути також розрахована за допомогою правила змішування. Залежність теплоємності суміші (залізний порошок та віск) від збільшення кількості металевого порошку (за масою) показана на рис. 1.29. Як видно з рисунка, значення теплоємності, отримані в експерименті, відповідають розрахунковим значенням.

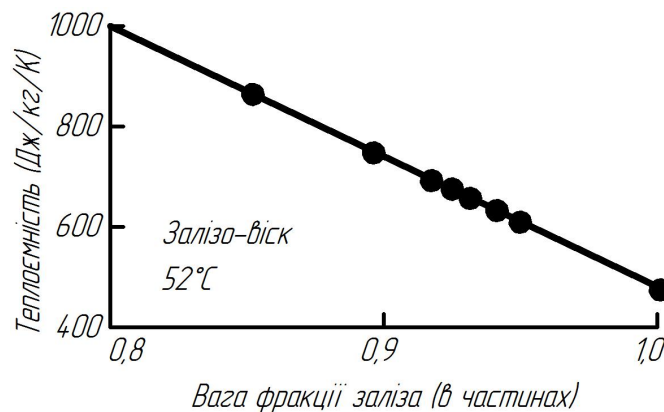


Рисунок 1.29 – Зменшення теплоємності суміші при збільшенні фракції металевого порошку

1.7.6 Газова атмосфера під час дебайдингу

Порошок і технологічний газ суттєво впливають на гази, що виділяються, і остаточні властивості деталей, що спікаються. З іншого боку, точну природу розкладання зв'язувальної речовини легко визначити за допомогою мас-спектрометра. Було виявлено, що продукти метану контролюють остаточний вміст вуглецю в деталях, які спікаються, і на це може впливати порошок, атмосфера технологічних газів і програма спікання.

Механізми термічного дебайдингу складаються з реакції розплавлення і подальшого формування газів з розкладанням структурного зв'язувального компоненту. Газові продукти реакцій видувуються з зони спікання неперервним поданням нагрітого технологічного газу в піч. Швидкість розкладання залежить, в основному, від атмосфери, товщини стінок деталі і температури, але в особливих печах дебайдингу такі параметри, як тиск, потік газу та ін. також можуть впливати на умови дебайдингу. Також на процес видалення зв'язувальної речовини впливають початкові властивості порошку та кількість порошку в суміші сировини.

Існують три моделі, що описують піролітичне видалення зв'язувальної речовини з «зеленого» тіла:

- 1 – випарювання;
- 2 – окислювальна деградація;
- 3 – термічна деградація.

Процес випарювання можливий тільки для зв'язувальної речовини з низькою молекулярною вагою, оскільки така зв'язувальна речовина легко піддається випарюванню без розриву хімічних ланцюжків. Окислення розпочинається з реакцій розриву зв'язків внаслідок присутності кисню і триває доки не сформується неактивні продукти реакцій. Такий вид дебайдингу можливий тільки в окислювальних атмосферах з такими легкопоновлюваними матеріалами, як залізнікелеві сталі. Термічна деструкція полімеру відбувається шляхом хаотичного розділення полімерних ланцюжків.

1.8 Спікання

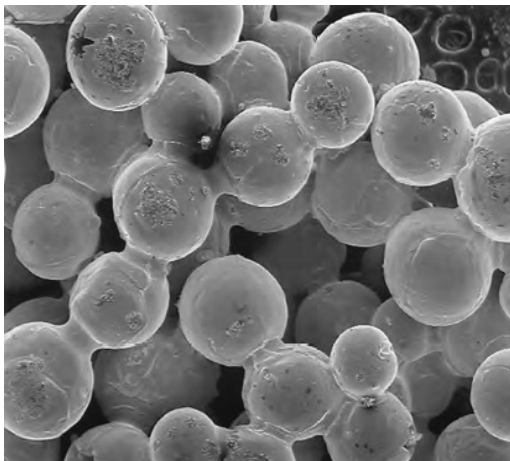


Рисунок 1.30 – Електронна мікрофотографія спікання порошку бронзи

Спікання – це термічний процес, в якому окремі частинки об'єднуються для забезпечення необхідної міцності готової деталі. Процес спікання в ІЛП-технології аналогічний операції, яка використовується для традиційної порошкової металургії. Процес здійснюється в контрольованій атмосфері, іноді у вакуумі, при температурі нижчій за температуру плавлення металу (як правило, температура твердофазного спікання складає 0,7–0,8% від температури плавлення металу). Перевагою захисної атмосфери є зниження оксиду на поверхні частинок порошку. Площа оксидної поверхні збільшується зі зменшенням розміру частинок. Оскільки ІЛП-технологія використовує дрібнодисперсні порошки, то захист від

окислення має значно більше значення, ніж в традиційній порошковій металургії.

Процес спікання описується як термічна обробка зі з'єднанням часток в цілісну структуру. Механізм такої обробки полягає в масоперенесенні. Він відбувається внаслідок термічної активації та подальшого зниження поверхневої енергії часток через утворення шийок між такими частками. На рисунку 1.30 показано фотографію утворення шийок між сферичними частинками бронзи під час спікання.

Механізми за допомогою яких відбувається процес усідання матеріалу під час спікання:

- 1) об'ємна дифузія через вакансії;
- 2) дифузія меж зерен;
- 3) поверхнева дифузія;
- 4) в'язкий і пластичний потоки;
- 5) газова дифузія.

Спікання проходить за три етапи:

- 1) утворення шийок між частками;
- 2) зростання зерен і зниження пор;
- 3) закриття і округлення пор.

Атмосфера спікання дуже важлива для набуття кращих остаточних властивостей матеріалів. Головне завдання атмосфери – це забезпечення теплопередачі, зниження кількості оксидів, з'єднання часток, стехіометричний і мікроструктурний контроль, видалення залишків зв'язувальної речовини зі зразків, які спікаються, тощо.

Існують, в основному, чотири види атмосфери спікання:

1. *Нейтральна*: такі інертні гази, як азот, аргон, корисні для захисту матеріалів від небажаних реакцій. Спікання у вакуумі також належить до нейтральних систем, які використовуються для відвертання небажаних реакцій в активних матеріалах. Однак іноді азот може призводити до утворення нітриду, наприклад, у процесі спікання деталей з титану;

2. *Окислення*: такий вид атмосфери стримує процеси дифузії внаслідок високої стабільності оксидів хрому і титану. Тому окислювальні атмосфери широко використовуються для кераміки, де початкова сировина містить оксиди;

3. *Відновлювальна атмосфера*: спеціальні гази, які індукують реакції зниження стабільної фази, що покращує зв'язування часток між собою. Хороший приклад цього процесу – це зниження оксидів під час спікання в атмосфері водню.

4. *Декарбонізація*: деякі гази схильні до декарбонізації, такі як водень і кисень можуть бути використані для зниження вмісту вуглецю і зрівнювання хімічних складів деяких вуглецевих сплавів.

Склад атмосфери може змінюватися під час циклу температурної обробки з метою виконання різних металургійних функцій, тому оптимізація атмосфери печі стає дуже важливим аспектом для отримання

деталей високої якості. Також на економічну ефективність процесу впливає швидке вирішення проблем і точний моніторинг атмосфери печі.

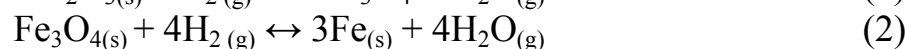
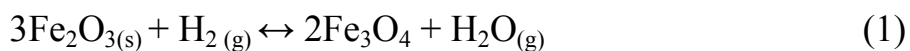
1.8.1 Термохімічний аспект порошкової металургії

Металеві порошки, які використовуються для виробництва деталей, що спікаються, зазвичай покриті по поверхні шаром різних включень, особливо киснем, азотом, воднем, водою, оксидом вуглецю, діоксидом вуглецю. Кількість включень залежить від специфіки порошків, умов зберігання, технологічної обробки, механізму виробництва порошку та ін. Цей хімічний аспект може бути важливим для процесів МІМ, оскільки такі шари часто ініціюють формування металевих зв'язків між частками порошку впродовж спікання. Остаточні властивості залежать від виконання процесу, наприклад, твердість і корозійна стійкість також пов'язані зі зменшенням небажаних компонентів.

Ці реакції проходять як до процесу, так і при спіканні, і вимагають кращого вивчення газових продуктів процесу ІЛП. Деякою мірою вони змінюють атмосферу навколо деталей в печі, що може призвести до різної якості деталей, що спікаються. Розпізнавання цих зразків і часових проміжків утворення газових продуктів реакції допоможе вирішити безліч проблем виробництва, а також встановити кращі параметри виробництва деталей ІЛП. Деякі з цих реакцій між атмосферою, сторонніми включеннями і порошками описані нижче.

Зниження оксидів кисню в атмосфері водню

Хімічні реакції зниження оксидів заліза в атмосфері водню контролюються термічно. У відновній атмосфері при температурі вище 300 °С відбувається перетворення Fe_2O_3 на Fe_3O_4 згідно з реакцією (1). Ближче до температури 500 °С відбувається відновлення чистого заліза згідно з реакцією (2). Ці температури можуть коливатися з точкою роси водню. У обох реакціях виділяється водяна пара і споживається водень.

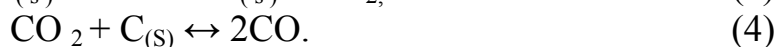
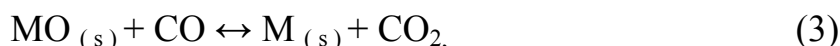


Вуглетермічний процес відновлення оксидів

Вуглецеві сталі інтенсивно використовують в порошковій металургії для виготовлення точних деталей, схильних до механічного навантаження. Вони можуть містити як окремих графіт, так і фази карбиду. Більш того, вуглець може бути виявлений як забруднююча домішка: графіт використовують як лубрикатор для пресованих деталей (у порошковій металургії), також він входить до складу багатьох зв'язувальних компонентів у виготовленні ІЛП-сумішей. Неповне видалення цих матеріалів призводить до збільшення вмісту вуглецю в деталях.

Взаємозв'язок між вуглецем і металами (оксидами) є предметом дослідження впродовж останніх 100 років. Було запропоновано декілька

механізмів взаємодії, але й досі вони не до кінця вивчені. Найбільш поширеною теорією є відновлення оксиду металу за допомогою газів CO і CO₂ згідно з реакціями (3) і (4)



Інший механізм інтерпретації відновлення оксидів з використанням термічної дисоціації проходить згідно з реакціями 5 і 6:



У цьому механізмі дві тверді складові реагують між собою з отриманням газу CO і нового твердого складу.

Вуглецювання і зневуглецювання

Карбіди можуть виникати і розкладатися впродовж спікання, ґрунтуючись на реакціях з оксидом вуглецю або метаном. Так само, вуглець в твердому стані може взаємодіяти з атмосферою.



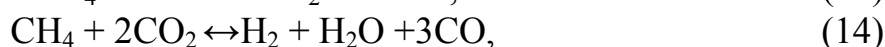
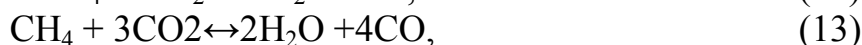
MC_(s) – карбід; M_{C(s)} – вуглець, впроваджений в залізо.

Контроль над парами води дуже важливий для багатьох продуктів спікання. Реакція взаємодії між сталлю і парами води



Під час збільшення кількості води ефект зневуглецювання посилюється. У цій реакції формуються, в першу чергу, оксид вуглецю і водень, тому для ефективності контролю видалення вуглецю слід використати атмосферу з низьким вмістом вуглецю.

У такій системі можливі декілька реакцій, особливо важливо звернути увагу на п'ять продуктів реакцій або реагентів (CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄). Деякі з таких реакцій наведені нижче:



Розрахунок вірогідності кожної реакції впродовж спікання вимагає повного контролю парціального тиску кожного з цих газів.

Азотування

При спіканні сталей в атмосфері азоту можливе їх часткове азотування. Тести спікання деталей з порошку Fe-C при температурі 1120 °C показують, що рівень азотування пропорційний квадратному кореню з парціального тиску при концентрації азоту приблизно 0,015% (за масою) та використання стовідсоткової азотної атмосфери при тиску 1 атм.

Для сплаву Fe-1.5 Mn-1.5 Cr-0.25 Mo концентрація азоту склала 0,044% (за масою) після спікання в напівзакритому нержавіючому контейнері при температурі 1120 °C (рис. 1.31).

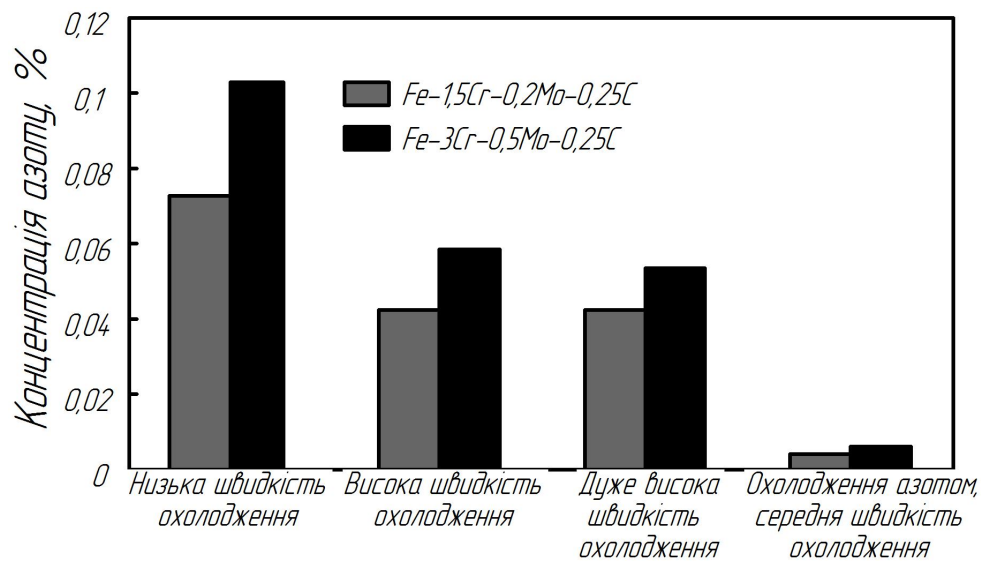


Рисунок 1.31 – Кількість азоту в сталях Fe-1,5 Cr і Fe-3Cr після спікання в атмосфері 90%N₂/10%H₂ при температурі 1120 °C і різних швидкостях охолодження

Ефект азотування особливо важливий для нержавіючих сталей з великим змістом хрому, оскільки ці елементи схильні утворювати нітрид хрому при високих температурах.

Склад атмосфери, яка використовується для спікання, залежить від металу, який спікають. Для багатьох пористих металевих деталей атмосфера спікання містить водень. Атмосфера має бути інертною, містити сполуки вуглецю або такі сполуки, щоб вуглець знаходився в рівновазі зі сталлю, тобто вміст вуглецю в порошку не має змінюватись.

Різні марки сировини Catamold®, наведені в таблиці 1.4, спікаються в присутності захисного газу. Для спікання низьковуглецевих нікелевих сталей і нержавіючих сталей використовується чистий водень. Для низьколегованих сталей, що містять вуглець, який подається у вигляді металевих порошків, при спіканні в присутності азоту, певна його кількість потрапляє в матеріал. Введення або часткове видалення вуглецю через атмосферу спікання звичайно не практикується, тому що це

пов'язано зі значними труднощами. Нержавіюча сталь також може спікатись у вакуумі. При відповідному контролі процесу можна одержати нержавіючі сталі навіть із наднизьким вмістом вуглецю.

Таблиця 1.4 – Середовище випалювання (приклади)

Catamold®	Водень	Азот	Вакуум
FN02	▼		→
FN08	▼	▼	→
8620		▼	→
42CrMo4		▼	→
100Cr6		▼	→
430	▼		→
316L	▼		→
17-4PH	▼		→
W	▼		→

▼ – Рекомендація → – Можливе застосування

Той факт, що в ІЛП використовується порошок меншої фракції, ніж той, який використовуються в порошковій металургії, означає, що внаслідок підвищеної поверхневої енергії частинок спікання проходить набагато легше.

Оскільки «коричневі» деталі пористі, відбувається велике усадження при спіканні, і температура спікання має ретельно контролюватися, щоб зберегти форму і запобігти «просіданню».

Готова деталь має щільність, яка впритул наближається до теоретичної і, як правило, перевищує 95%, а механічні її властивості аналогічні властивостям кованого металу того ж складу.

Спікання містить у собі термічно активований рух матеріалу, що приводить до зменшення питомої поверхні порошкових часток. Збільшення кількості точок контакту між частками та зменшення пористості приводить, у макроскопічному плані, до усадження виробу. Метою спікання є зменшення або видалення пор в матеріалі заготовок, які мають високу пористість після видалення зв'язувальної речовини.

При випалюванні (спіканні) виробів із сировини Catamold® після стадії видалення зв'язувальної речовини необхідно пам'ятати про те, що відливки усе ще містять невелику залишкову кількість зв'язувальної речовини. Тому температурний профіль (рис. 1.32) містить стадію витримки при 600°C для повного термічного розкладання цих полімерів. Максимальна температура випалювання залежить від матеріалу. Швидкість охолодження має становити приблизно від 5 до 10 °C за хвилину, однак, залежно від типу печі, ця швидкість може змінюватися в процесі охолодження. Подальше охолодження відбувається згідно з технічними характеристиками печі.

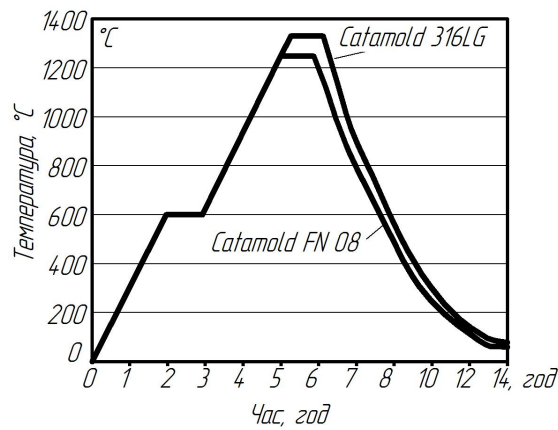


Рисунок 1.32– Температурний профіль спікання

Вплив високих температур приводить до виникнення процесу усадження матеріалу, специфічного для кожного конкретного типу, що ілюструє дилатометрична крива, наведена на рисунку 1.33. Виміри проводилися відповідно до температурного профілю, наведеного на рисунку 1.31.

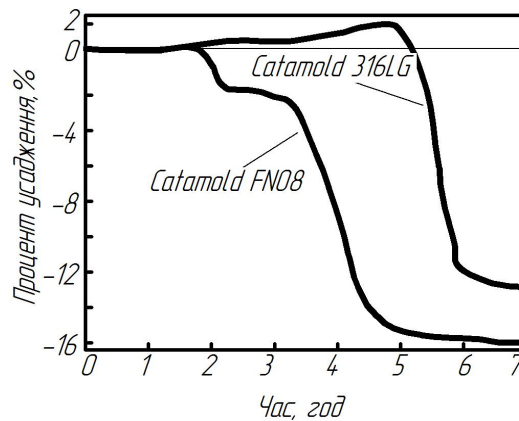


Рисунок 1.33 – Профіль усадження

Заслуговує на увагу той факт, що усадження виробів з Catamold® 316LG починається значно пізніше, при температурі 1100 °C. Однак повне усадження цього матеріалу виявляється істотно меншим внаслідок високого ступеня заповнення й досягається при більш високих температурах. Щоб одержати мінімальні припустимі відхилення розмірів, необхідно одержати максимальну усадку. Якщо процес спікання припиняється до моменту досягнення кінцевого асимптотичного параметра, то навіть невелика різниця температур в печі приводить до значного розкиду розмірів виробу.

Допустимі відхилення лінійних розмірів при усадженні, які звичайно досягаються при литті під тиском металевих виробів, наведено в таблиці 1.5. Відповідно до стандарту DIN 2768 Міжнародної організації зі стандартизації наведені типові допуски, які можуть застосовуватися для інжекційного лиття під тиском металевих виробів.

Таблиця 1.5– Допустимі відхилення розмірів металевих виробів при литті під тиском

Номинальні розміри, мм	Допустиме відхилення, ± мм
> 3	0,05
3÷6	0,06
6÷15	0,075
15÷30	0,15
30 ÷ 60	0,25
> 60	±0,5% від розміру

Точність розмірів, що досягається в дійсності, залежить, крім іншого, і від якості виробничого устаткування. На рисунку 1.34 показані стадії процесу інжекційного лиття під тиском металевих виробів, під час яких відбувається усадження. Очевидно, що спікання надає найбільшу можливість для зменшення розміру й тому заслуговує на особливу увагу.

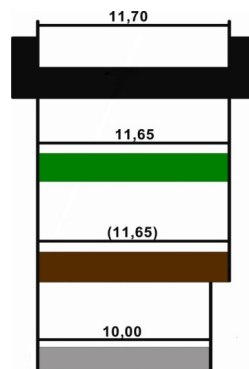


Рисунок 1.34 – Типове усадження на різних стадіях процесу

Зверху вниз: виріб в прес-формі (чорний колір); відливок після видалення з прес-форми («зелений» виріб); виріб після видалення зв'язувальної речовини («коричневий»); виріб після випалювання («сірий»).



Рисунок 1.35 – Деталь до спікання (відливок) (а)
і деталь після спікання (б)

На рисунку 1.35 показано «коричневий» відливок до спікання і вже готову деталь після спікання. На рисунку наочно видно значне усадження деталей.

Типові параметри, які можна одержати при правильній переробці матеріалів Catamold®, наведені в таблиці 1.6. У деяких випадках ці показники можуть істотно змінюватися залежно від технологічного процесу.

Таблиця 1.6 – Типові механічні властивості виробів, отриманих з матеріалів Catamold®

Catamold ®	Умови	Щільність [г/см ³]	Границя теку- чості $\sigma_{0,2}$ [МПа]	Межа міцності на розрив $\sigma_{п}$, [МПа]	Видов- ження	Твердість
FN02	Спiкання у H ₂ цементация	7,5	150	250	25	100HV10 600HV10
FN0205	Спiкання в N ₂ термообробка термообробка	7,5	170	380	3	120HV10
			800	950	3	340HV10
			1000	1200	2	600HV10
FN08	Спiкання у H ₂ цементация	7,5	210	380	15	120HV10
			400	700	3	600HV10
	спiкання в N ₂ термообробка		1100	1250	3	210HV10
			1100	1900	3	400HV10
8620	Спiкання у H ₂ цементация нiтроцементация	7,4	400	650	5	190HV10 650HV1 800HV1
42CrMo4	спiкання в N ₂ термообробка	7,4	400 1250	650 1450	6 2	180HV10 45 HRC
100Cr6	спiкання в N ₂ термообробка	7.4	500	900	5	230HV10 60 HRC
430	спiкання у H ₂	7.6	200	350	30	125HV10
316L	спiкання у H ₂	7,8	180	510	50	120 HV10
17-4PH	спiкання у H ₂ термообробка термообробка	7,6	660	950	3	320HV10
			950	1100	8	38HRC
			1050	1180	8	42HRC
M2	спiкання в N ₂ термообробка	8,1	800	1200	1.2	520HV10 66HRC
W	спiкання у H ₂	17,8				320 HV1

Спiкання Catamold® FN02 й FN08 у присутності чистого водню дає практично структуру безвуглецевого фериту. Збiльшення твердостi Catamold® FN08 до 120HV, порiвняно з чистим залiзом (Catamold® FS: 60HV), є основною причиною для сплавлення з нiкелем. Початковий максимальний вміст вуглецю в розмірі 0,3–0,5% зберiгається в присутності азоту й приводить до утворення переважно перлітної структури, що потiм легко пiддається гартуванню.

Catamold® 8620, 42CrMo4 й 100Cr6 випалюються в присутності азоту. Твердість Catamold® 8620 може бути збiльшена до 650 HV10. Пiсля вiдповiдної термообробки Catamold® 42CrMo4 можна одержати межу мiцностi на розрив 1450 МПа разом з гарною твердістю. В Catamold®

100Сг6 зазвичай можна одержати рівень твердості в розмірі 700 HV10 (60°HRC).

Що стосується Catamold® 316LG, випалюванням у вакуумному середовищі можна одержати дуже низький вміст вуглецю, менше 0,03%. При такому спікання отримуємо більш грубозернисту структуру з меншою кількістю мікропор, ніж при випалюванні в присутності водню. Типова межа міцності на розрив становить 510 МПа, а твердість – 120 HV10. Цей матеріал легко проходить стандартні випробування на корозійну стійкість.

Спікання Catamold® 17–4PH у присутності водню дає практично непористу двофазну структуру з твердістю близько 320 HV10. Бажану дисперсійну твердість у розмірі 42 HRC можна одержати шляхом термообробки. Цей матеріал також показує гарний опір корозії.

1.9 Застосування технології ІЛП

Дана технологія лиття порошків під тиском застосовується в усіх індустріальних сферах, наприклад, в автомобільній промисловості, при виробництві коштовностей, запчастин 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 (96–99%) і набагато кращі механічні властивості порівняно з виробами, виготовленими за технологією порошкової металургії. У той час як твердість вихідних порошків у процесі порошкового спікання відіграє найважливішу роль, то при литті порошків під тиском цей фактор практично не має ніякого значення. Найсуттєвішою часткою вартості при великих обсягах виробництва є вартість прес-форми, а витрати в процесі інжекційного лиття металевих виробів переважно визначаються вартістю сировини.

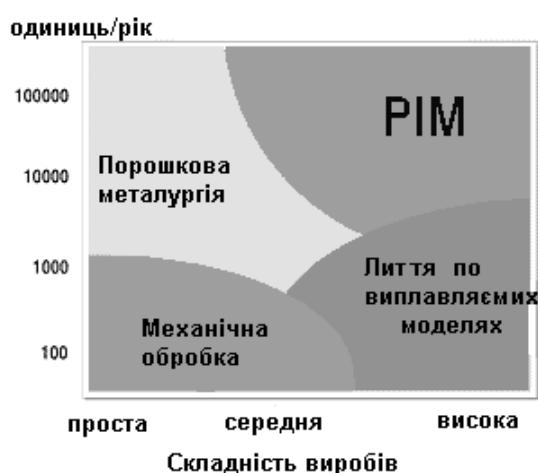


Рисунок 1.36 – Діаграма застосування технології ІЛП

Враховуючи, що ІЛП-сировина недешева, то найширше впровадження припадає на виробництво невеликих за розміром деталей.

Процес інжекційного лиття порошку дає мінімальні допустимі відхилення розмірів і відмінні якості поверхні. Порівняно 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 сталі можуть взагалі не піддаватися термічній обробці. Величезні переваги цей процес дає при виробництві дуже точних виробів у тих випадках, коли відповідний матеріал дуже важко або взагалі не піддається механічній обробці на верстатах.

Метод інжекційного лиття металевих виробів відкриває значні можливості для його автоматизації. Важливим кроком у напрямку до використання цих можливостей є виробництво обладнання для неперервної переробки сировини Catamold®, яке вже працює на сьогодні у багатьох компаніях.



Рисунок 1.37 – Деталі, виготовлені за допомогою ІЛП-технології

Такі компанії, як Swatch, Seiko, Citizen вже давно використовують цей метод для виготовлення корпусу годинника і ланок для браслетів наручних годинників.

ІЛП-технологією все частіше користуються при виготовленні деталей оправ окулярів.

В останні роки ІЛП-технологія застосовується в автомобільній промисловості при виготовленні деталей для дверних замків, деталей рульового управління і трансмісії, замків запалювання тощо. Знайшлося застосування ІЛП-технології також і в медичній галузі. Так, ІЛП-технологія вже давно застосовується при виготовленні зубних брекетів, титановий порошок використовується для зубних штифтів, імплантатів для опорно-рухового апарату і серцево-судинної системи та при виробництві мініатюрного хірургічного інструменту.

1.10 Огляд маркетингового ринку технології ІЛП: історія, динаміка та прогноз

Перше повне статистичне дослідження технології ІЛП було проведено у 1996 році, коли об'єм сукупних продажів складав близько \$378 мільйонів, розподілених на більше ніж 219 компаній. Як правило, це були невеликі фірми, у яких середній обсяг продажів складав близько \$1,9 мільйона. Кількість виробників і споживачів деталей ІЛП продовжувала зростати і у 2000 році складала близько 570, охоплюючи такі великі компанії, як Херох, Kodak, DowChemical, Тусо, Panasonic, Olympus, Osram, T&N Technology, Sumitomo Cement, Nippon Tungsten, Kawasaki та Cannon. За 26 років середній темп зростання індустрії ІЛП склав близько 20% за рік, проте за останні 10 років темп зменшився до 9% за рік. Тільки у 2001 році було зафіксовано спад (рис. 1.38). За останню декаду 2015 року зростання виробництва ІЛП склало від 8 до 14% залежно від регіону. Північна Америка показала найнижчу динаміку, в той же час в Азії було помітно найбільше зростання. Статистичні дані вказують на те, що спочатку на типовому виробництві ІЛП працювали від 10 до 20 робітників, з двома або трьома машинами для лиття та двома печами для спікання. Як правило, суміш готувалась безпосередньо на виробництві.

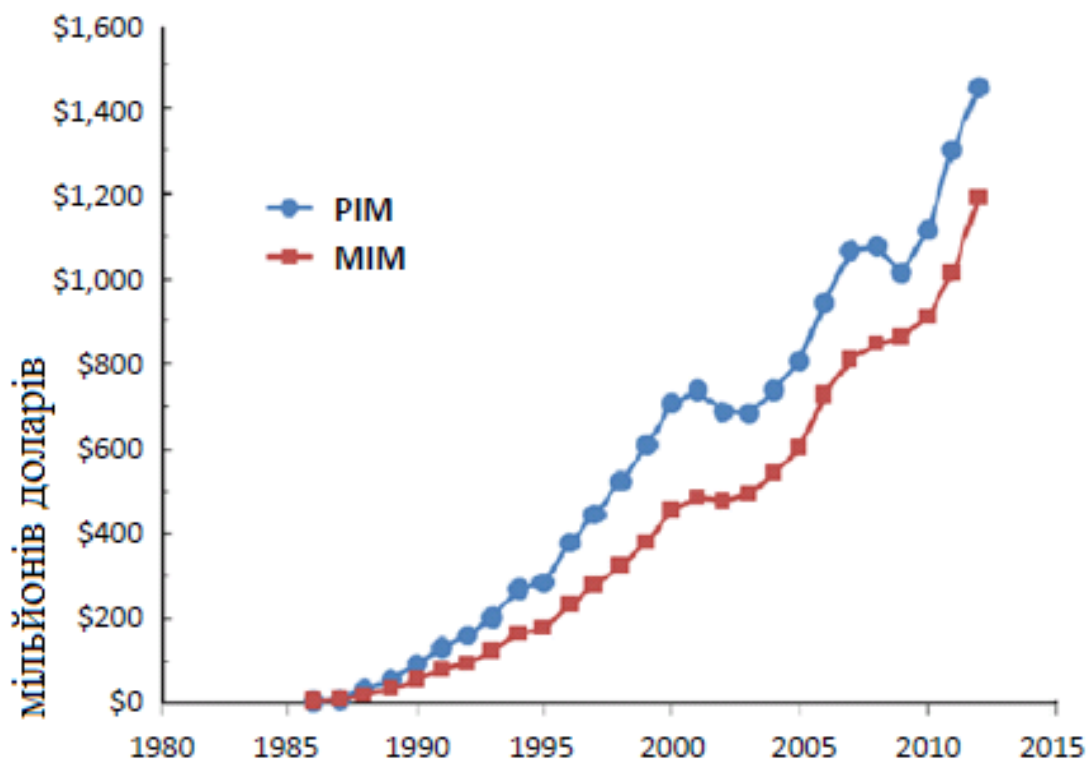


Рисунок 1.38 – Історія розвитку обсягу продажів деталей ІЛП (Powder Injection Molding) та інжекційного лиття металевого порошку (Metal Injection Molding)

Сукупний обсяг продажів в 2015 році склав близько 2,1 мільярда доларів і, згідно з маркетинговими дослідженнями, очікуються темпи розвитку близько 11,9% з 2016 по 2025 роки (рис. 1.39). Загалом значні темпи розвитку пов'язують з такими галузями промисловості, як автомобільна, аерокосмічна, медична та виробництво споживчих товарів.

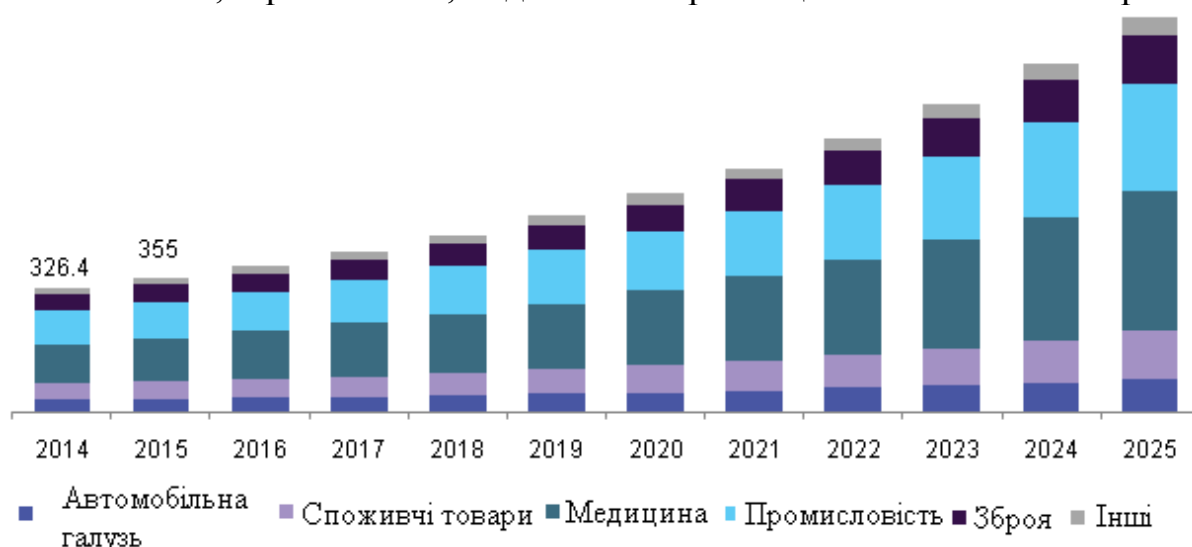


Рисунок 1.39 – Прогноз розвитку обсягу продажів (млн USD) деталей ІПП в Північній Америці з 2014 по 2025 рік

Найбільш поширеним матеріалом для ІПП є нержавіюча сталь, даний тренд почався ще у 90-х роках ХХ ст. завдяки випуску корпусів годинників і зубних протезів. Після нержавіючої сталі найбільш поширеним матеріалом є низьколеговані сталі. З керамічних матеріалів можна виділити оксид алюмінію. Близько 20% обсягу продажів займають такі матеріали, як титан, сплави вольфраму, мідь, інструментальні сплави та ін. Так, відсоток продажів порошків нержавіючих сталей для технології ІПП у 2012 році склав близько 53%; для низьколегованих сталей – 37%; вольфрамових сплавів – 10%; сплавів нікелю та заліза – 7%; титанових сплавів – 4%; міді – 3%; кобальто-хромових сплавів – 2%; інструментальних сплавів – 2%; нікелевих сплавів – 2% та сплавів для електроніки (Kovar та Invar) – 1%.

Стабільним ринком для ІПП є галузі автопромисловості та виготовлення електронних компонентів до таких виробів, як мобільні телефони, комп'ютери, планшети та ін., даний ринок збуту складає близько 40% від всього обсягу. Як правило, в регіоні Північної Америки домінує виготовлення компонентів зброї та деталей для медичної галузі; для Азії характерно домінування виготовлення деталей ІПП для електронної галузі (комп'ютери, телефони); в Європі розповсюджено виробництво ІПП-деталей для автомобільної галузі. Виготовлення деталей з кераміки найбільш розповсюджено в Північній Америці, натомість інші регіони спеціалізуються на виготовленні металевих компонентів. В таблиці 1.7 наведена коротка порівняльна характеристика виробництва ІПП по регіонах.

Таблиця 1.7 – Порівняльна характеристика виробництва ІЛП

Регіон	Частка фірм ІЛП, %	Частка сукупного обсягу продажів, %	Частка робітників галузі ІЛП, %	Частка використання порошку для ІЛП, %
Азія	49	48	61	53
Європа	27	26	18	23
Північна Америка	21	24	19	21
Інші	3	2	2	3

Одним із найбільш помітних трендів у розвитку індустрії ІЛП є значне зменшення темпів розвитку у Північній Америці порівняно з регіонами Азії. У 1997 році в Північній Америці нараховувалось близько 48% виробників ІЛП від усієї кількості, проте на даний час лише 24%. Також обсяг установленого промислового обладнання для ІЛП знизився з 57% до 21%. Частка європейських виробників не змінилася за останні 15 років та складає від 25 до 31%. Проте виробництво ІЛП в регіонах Азії показало стрімке зростання, з декількома новими та великими компаніями в таких країнах, як Південна Корея, Тайвань, Таїланд, Китай а також Індія, Японія та Сінгапур, де виробництво ІЛП давно займає передові позиції. На сьогоднішній день найбільші виробництва ІЛП нараховують близько 1500 робітників та більше 200 машин для лиття. Що цікаво, кількість фірм ІЛП у Північній Америці на сьогодні знизилась до 95.

Зі збільшенням сукупних обсягів продажів відповідно почала зростати і кількість обладнання для ІЛП. Так, наприклад, у 2012 році налічувалось вже 2614 термопластавтоматів, призначених для лиття деталей ІЛП, з них близько 10% – для лиття з низьким тиском (для виготовлення компонентів з кераміки та карбідів). Серед процесів видалення зв'язувальної речовини найбільш поширеними є три основні види: термічний піроліз (43%), дебайдинг з використанням води або іншого розчинника (35%) та каталітичний дебайдинг (21%). Також у 2012 році налічувалось близько 1167 печей для спікання, зі значною кількістю печей безперервної дії.

Технологія ІЛП у виготовленні компонентів зброї

На сьогодні, частка сукупного обсягу продажів компонентів зброї, виготовлених за технологією ІЛП, складає близько 7%. Ускладнення конструкції виробів та зменшення їх розмірів сприяє використанню ІЛП у даній галузі. Найбільш поширеними матеріалами для виготовлення деталей зброї є нержавіючі сплави та низьколеговані сталі. Проте також інколи використовуються й такі більш екзотичні матеріали, як титан (рис.1.40). Серед виробників деталей ІЛП для зброї поширені такі сплави: МІМ-420; МІМ-4140; МІМ-8740; МІМ-8620 та 17-4РН.



Рисунок 1.40 – Спусковий гачок, виготовлений з титану за технологією ІЛП (в зеленому та спеченому станах). Виробник: MimestoSpA, Італія

Північній Америці значно посилилось завдяки збільшенню військового бюджету на амуніцію.

У Європі налічується близько 50 виробників деталей ІЛП. Неможливо напевно визначити відсоток фірм, які залучені до виробництва деталей зброї. Проте відомо, що такі знамениті компанії, як Glock (Австрія); HSProdukts (Хорватія) та концерн Калашніков (Росія) мають власне виробництво за технологією ІЛП. Також компанія HSProdukts співпрацює з американською фірмою Springfield Armoury Inc та постачає компоненти зброї на американський ринок. Компанія MimestoSpA, яка розташована в місті Сантадер (Іспанія), є одним з трьох найбільших виробників деталей ІЛП у Європі, а також є важливим постачальником деталей зброї.

Також виробники деталей ІЛП все частіше беруться за виготовлення деталей підвищеної маси та складності. Так на рисунку 1.41 зображено фотографію підствольної частини рушниці, що виготовляється в компанії MimestoSpA, Іспанія. Вага спеченої деталі складає близько 200 гр. Особливі



Рисунок 1.41 – Підствольна частина рушниці, виготовлена в компанії MimestoSpA, Іспанія

Одним із перших, хто запровадив виробництво деталей зброї за технологією ІЛП, був один з найстаріших виробників зброї в Північній Америці RemingtonArms у 1984 році. На сьогодні збройова промисловість Північної Америки є одним із основних споживачів деталей ІЛП, близько 40% деталей (за вагою) виготовляються для даної галузі. Також на неї припадає найбільша частка від сукупних продажів деталей ІЛП, близько 25%. В останні роки виготовлення деталей ІЛП для збройової промисловості в

Північній Америці значно посилилось завдяки збільшенню військового бюджету на амуніцію. У Європі налічується близько 50 виробників деталей ІЛП. Неможливо напевно визначити відсоток фірм, які залучені до виробництва деталей зброї. Проте відомо, що такі знамениті компанії, як Glock (Австрія); HSProdukts (Хорватія) та концерн Калашніков (Росія) мають власне виробництво за технологією ІЛП. Також компанія HSProdukts співпрацює з американською фірмою Springfield Armoury Inc та постачає компоненти зброї на американський ринок. Компанія MimestoSpA, яка розташована в місті Сантадер (Іспанія), є одним з трьох найбільших виробників деталей ІЛП у Європі, а також є важливим постачальником деталей зброї. Також виробники деталей ІЛП все частіше беруться за виготовлення деталей підвищеної маси та складності. Так на рисунку 1.41 зображено фотографію підствольної частини рушниці, що виготовляється в компанії MimestoSpA, Іспанія. Вага спеченої деталі складає близько 200 гр. Особливі труднощі виготовлення такої деталі полягають у дотриманні прямолінійності поверхонь.

Індустрія ІЛП Китаю зазнала стрімкого зростання за декілька останніх років. У 2006 році обсяг сукупних продажів деталей ІЛП в Китаї оцінювався на рівні \$60 мільйонів, проте вже у 2012 році він складав близько \$230 мільйонів. Одним із перших

виробників ІЛП в Китаї, що спеціалізуються на виготовленні деталей зброї, є компанія Shandong Jinzhu Material Technology Co. Ltd, компанія була основана у 1996 році.

Індійська компанія Indo-US MIMTec PVT є одним з найбільших виробників деталей ІЛП у світі, а також значним постачальником компонентів для зброї, виготовлених за технологією ІЛП. Компанія Indo-US стверджує, що на сьогоднішній день виготовляє деталі для більш ніж 20 виробників зброї в Європі та Північній Америці, має майже 175 різновидів компонентів для зброї, виготовлених ІЛП.

2 ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ, ЩО ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ МЕТОДОМ ІЛП

Після спікання властивості, притаманні ІЛП, зазвичай відповідають тим, які можна отримати за допомогою інших методів виробництва. Винятки стосуються металевих матеріалів, які набувають міцності шляхом деформації, як це відбувається при куванні. Продукти, отримані за допомогою ІЛП, окрім високих механічних властивостей мають цілу низку таких якостей, як легкість обробки, висока корозійна та зносостійкість. Також завдяки спіканню суміші порошків можна отримати сплави, які неможливо отримати за допомогою традиційного лиття.

2.1 Фізичні, механічні, хімічні та термодинамічні властивості

Як правило, хімічні, фізичні та базові термодинамічні властивості (такі як теплоємність) матеріалів ІЛП збігаються з довідковими. Велика увага була приділена вивченню методів отримання порошків з композиційними технічними характеристиками і способів ущільнення порошків без їх забруднення. Оскільки обробка відбувається в умовах близьких до стерильних, продукти ІЛП мають більшу чистоту, ніж отримані за допомогою альтернативних процесів. Це значною мірою полегшує взаємодію спеціальної атмосфери і заготовки, з якої водень або вакуум допомагають провести ефективне видалення домішок під час нагрівання.

Густина деталей, отриманих методом ІЛП, часто має значення, нижче за теоретичне (від 96% до 98%). Пори, що залишилися, мають незначний розмір (менші за розмір порошку) і розподіляються рівномірно. Завдяки формі пор, близькій до сферичної, вони не є концентраторами напружень і не ініціюють появу тріщин у виробі під час експлуатації.

Оскільки сформований виріб має залишкову пористість 2–4%, що відповідає характеристикам литого металу за щільністю та пористістю, то можна вважати процеси ІЛП та лиття аналогами за цим показником. Такі показники, як кристалічна структура, теплоємність, модуль пружності, температура плавлення та коефіцієнт поперечної деформації Пуассона мають характерні для кованих виробів значення.

Механічні властивості деталей, виготовлених ІЛП, домінують над усіма іншими показниками. Для металів первинне значення мають властивості пружності та пластичності, в той час як показник розриву зазвичай для кераміки та цементованих карбідів. Механічні властивості виробів, отриманих методом інжекційного лиття порошку, корелюють з аналогічними матеріалами, отриманими традиційними технологіями і методами. Порівняння меж текучості для сплавів ІЛП та аналогічних матеріалів (алюміній, мідь, залізо, низьколеговані сталі, нержавіючі сталі, магнітні сплави, титанові сплави, вольфрамкові сплави, суперсплави на

основі нікелю, електричні сплави та інструментальні сталі), отриманих традиційними методами, показано у вигляді діаграми розкиду на рисунку 2.1.

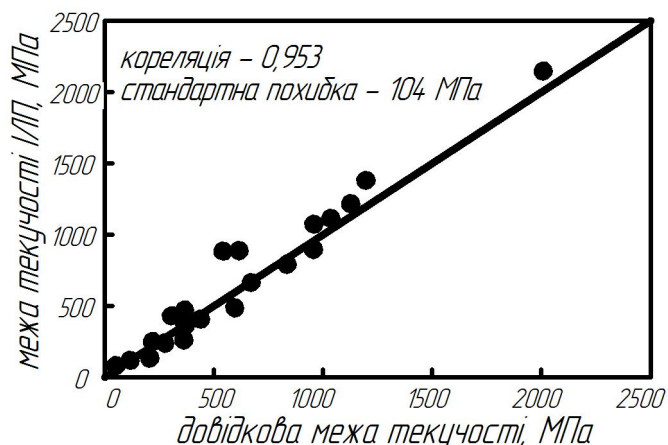


Рисунок 2.1 – Діаграма розкиду меж текучості для металів та сплавів ІЛП порівняно з довідковими значеннями для тих же складів

Оскільки ІЛП є технологією формування, то межа текучості – це один з найважливіших параметрів розробки. Рис. 2.1 показує стійку кореляцію між показниками ІЛП та наведеними в довідниках зі значним статистичним взаємовідношенням 0,953. Слід зауважити, що 40% сплавів мають більшу міцність при виготовленні методом ІЛП. Також слід відмітити, що в результатах досліджень спостерігається велике розсіювання стосовно чистоти, мікроструктури та термічної обробки сплавів і матеріалів.

Наприклад, нержавіюча сталь 17-4 PH (AISI 630) є одним із найбільш широкоживаних сплавів ІЛП. Вона складається з приблизно 17% хрому, 4% нікелю, 4% міді та незначної кількості домішок марганцю, сірки, ніобію або танталу. Після спікання та термічної обробки до стану H1025 (який досягається при температурі 552 °C) продукт ІЛП набуває міцності 980 МПа, але це значення може коливатись від 965 МПа до 1040 МПа.

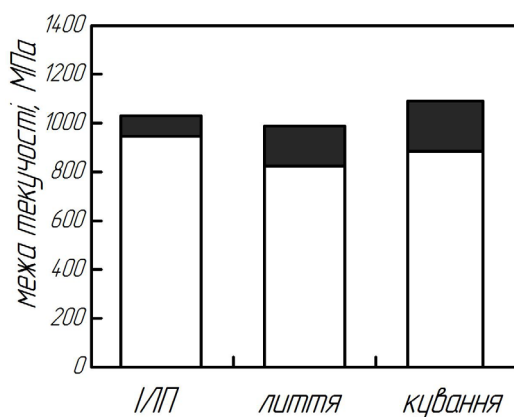


Рисунок 2.2 – Діапазон зміни межі текучості термічно обробленої сталі 17-4PH, виготовленої ІЛП, литтям та куванням

Як показано на рисунку 2.2, діапазон зміни міцності сталі 17-4 PH, виготовленої методом ІЛП, розташовується вище, ніж для литого матеріалу, і знаходиться в межах характеристик кованого матеріалу. Більше того, міцність на розтяг матеріалів, отриманих ІЛП, литтям та куванням теж знаходиться на приблизно однаковому рівні (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняння механічних властивостей при кімнатній температурі для нержавіючої сталі 17-4 PH (AISI 630) в стані H102

Властивість	Продукт ІЛП	Продукт лиття	Кований продукт
межа текучості, МПа	від 965 до 1040	від 830 до 1000	від 890 до 1105
межа тимчасової міцності, МПа	від 1030 до 1190	від 890 до 1070	від 1030 до 1180
твердість, HRC	від 36 до 38	від 37 до 38	від 38 до 39
видовження до руйнування %	від 8 до 12	від 6 до 11	від 4 до 12

На рисунку 2.3 показаний взаємозв'язок між граничним видовженням та межею текучості. Деякі з наведених на рисунку 2.3 сплавів вибирають з додатковими вимогами до корозійної стійкості або магнітної реакції, які вважаються важливішими за механічні властивості.

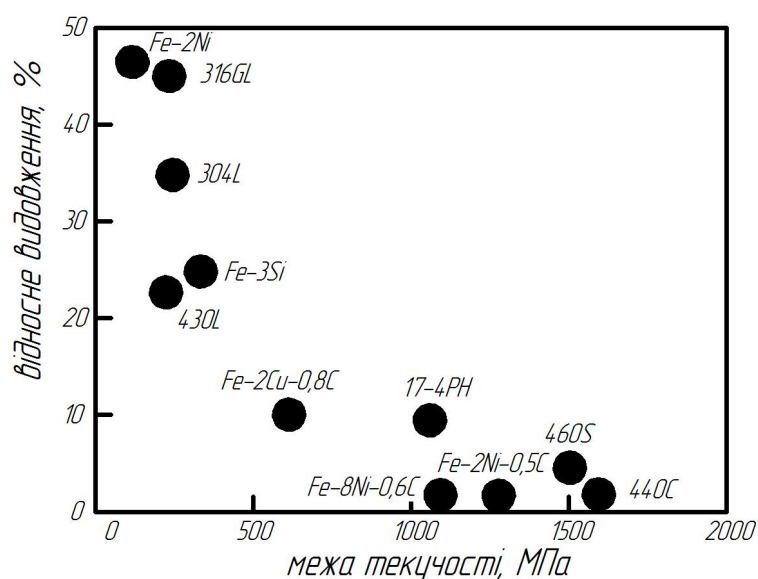


Рисунок 2.3 – Взаємозв'язок граничного видовження та межі текучості для деяких базових сплавів ІЛП

Показники витривалості та тріщиностійкості можуть бути достатньо високими для металів ІЛП. Наприклад, нержавіюча сталь 17-4PH, вироблена методом ІЛП, матиме витривалість (10 мільйонів циклів) більше 500 МПа, що складає 42–49% межі міцності на розрив. І навпаки, традиційна пресувальна металургія та металургія спікання порошку мають

меншу межу міцності та коефіцієнт відношення межі витривалості до межі міцності на розрив, який, зазвичай, дорівнює 35%. Більш цікавим є використання неоднорідних мікроструктур ІЛП з метою значного підвищення витривалості до зношування. В одному прикладі було зафіксовано підвищення витривалості до зношення з 475 МПа до 575 МПа у сталі ІЛП Fe-2Ni-0,5Mo-0,5C (4605), яке було досягнуто шляхом управління циклом спікання. Для цього сплаву довідковий показник витривалості до зносу становить приблизно 430 МПа, а витривалість до зношення змінюється від 280 до 370 МПа, якщо його виготовити шляхом традиційного пресування та спікання порошку.

На рисунку 2.4 показаний графік витривалості до злому (вимірної в трьох точках) декількох керамічних виробів ІЛП з метою порівняння з довідковими даними. На цьому графіку розміщені дані алюмінію, цирконію, карбиду кремнію, нітриду кремнію та різноманітних видів цементованих карбідів. Бездоганне співвідношення відповідатиме прямій лінії. В даному випадку 50% розглянутих структур ІЛП мають показники вищі за довідкові. Кореляція між витривалістю до розлому та довідковим показником витривалості до розлому становить 0,955, що має свідчити про наявність зв'язку. Іншими словами, якщо будуть відомі довідкові показники властивостей крихких матеріалів, то властивості матеріалів, отриманих методом ІЛП, без сумнівів відповідатимуть їм.

Схожі тісні взаємозв'язки спостерігаються і при використанні крихких матеріалів. Якщо структури виготовляються методом ІЛП, значні розбіжності між довідковими показниками властивостей витривалості на розрив не спостерігаються.

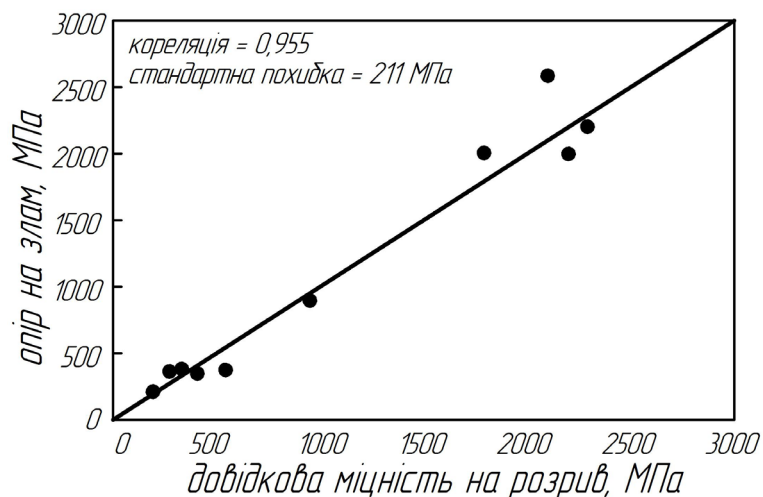


Рисунок 2.4 – Опір кераміки до злому, показаний як пряме порівняння характеристик продуктів ІЛП з довідковими даними

У таблиці 2.2 зведені дані втомної міцності матеріалів Catamold®. Вироби, виготовлені з цього матеріалу, мають високу втомну витривалість порівняно з матеріалами, отриманими технологіями порошкового

пресування, тому отримання сталей методом ІЛП може з успіхом застосовуватися й у тих випадках, коли вироби піддаються динамічним навантаженням.

Таблиця 2.2 – Втомна міцність виробів, отриманих з матеріалів Catamold®

Catamold®	FN02	8620	42CrMo4
Після спікання	150 МПа	200 МПа	150 МПа
Після термообробки	250 МПа	500 МПа	500 МПа

Проте слід зауважити, що залишкова пористість, яка присутня в матеріалах ІЛП (2–4%), впливає на механічні властивості матеріалів по-різному. Так, на рисунку 2.5 показано залежність механічних властивостей (дано у відсотках від властивостей кованих матеріалів) від залишкової пористості для порошкових матеріалів, отриманих методом спікання. Як можна побачити з графіків, залишкова пористість суттєво погіршує такі параметри, як ударна в'язкість та відносне видовження, водночас слабо впливає на міцність на розрив.

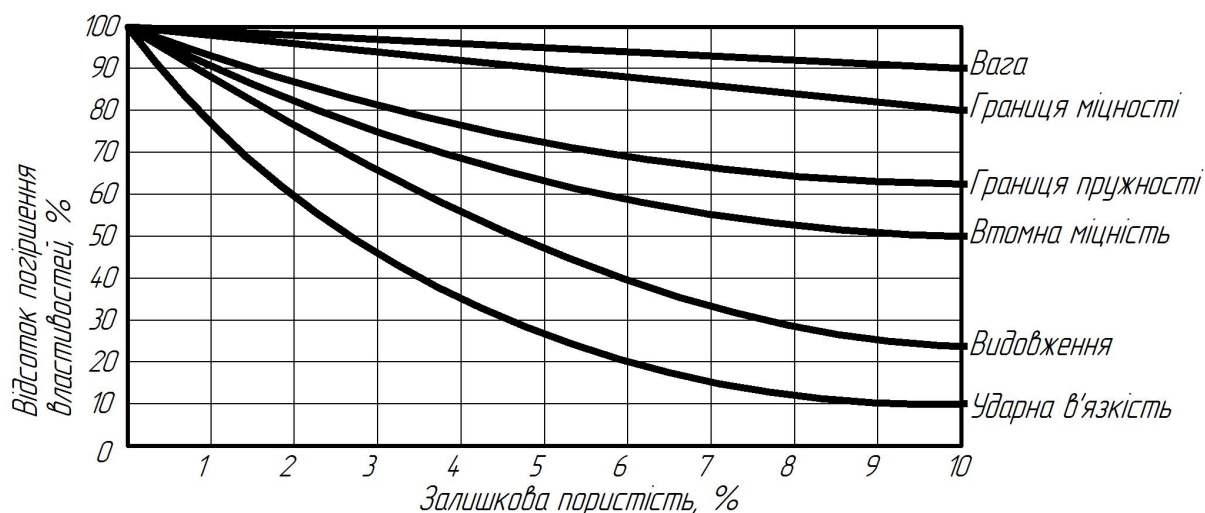


Рисунок 2.5 – Вплив залишкової пористості на механічні властивості матеріалу

2.2 Теплофізичні властивості

Теплофізичні характеристики кераміки та металу, вироблених методом ІЛП, напряму пов'язані з іншими техніками формування. Наприклад, отримані методом ІЛП, W-10Cu та AlN, активований за допомогою ітрію, мають теплопровідність 220 Вт/(м °С) і 237 Вт/(м °С) відповідно.

В таблиці 2.3 наведені початкові дані теплопровідності та термічного розширення деяких загальних матеріалів, отриманих методом ІЛП.

Таблиця 2.3 – Теплофізичні властивості матеріалів, отриманих методом ІЛП

Матеріал	Теплопровідність W/(м °С)	Термічне розширення, 10 ⁻⁶ /°С
Al-1Cu	200	20
AlN-6Y ₂ O ₃	230	6
Mo-15Cu	170	7
W-10Cu	209	6
W-20Cu	247	7

2.3 Корозійна стійкість та зносостійкість

Опір до корозії нержавіючих сталей ІЛП прирівнюється до корозійної стійкості нержавіючих сталей, отриманих методом механічної обробки або лиття. В деяких випадках у деталей ІЛП цей показник навіть вищий. Фактична стійкість до корозії залежить від умов обробки та тесту на корозію. Наприклад, сплави з високим вмістом хрому показують кращий опір до корозії, але якщо хром взаємодіє з нітридами, окисами або іншими складовими внаслідок забруднення, то опір до корозії значно зменшується. Зазвичай, висока щільність спікання, пов'язана з ІЛП, забезпечує належний рівень опору.

Як перший огляд властивостей сплавів нержавіючої сталі ІЛП рисунок 2.6 порівнює сплави на кількісній карті межі текучості та опору до корозії. Як зауважувалось раніше, є декілька варіацій міцності при використанні методу ІЛП. Більш того, спостерігається зміна корозії залежно від обробки та тестування.

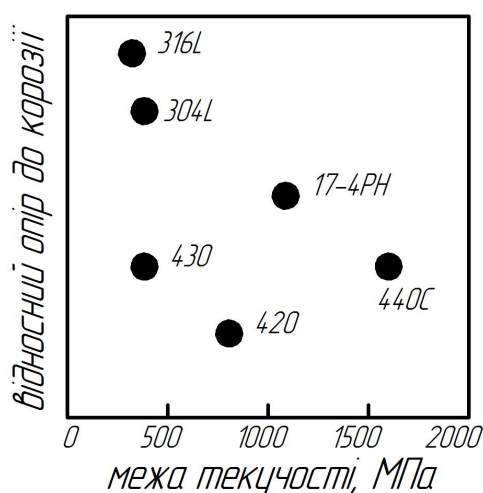


Рисунок 2.6 – Показники опору до корозії та межі текучості, використані для характеристики звичайної нержавіючої сталі ІЛП

Сировина Catamoid® наведена у вигляді стійких до корозії марок, а також у вигляді низьколегованих сплавів.

Наприклад, проводилось тестування нержавіючої сталі 316L, отриманої шістьма різними процесами ІЛП, з залученням семи корозійних тестів. Після чого отримані характеристики порівнювались з характеристиками кованої сталі 316L. Було виявлено, що результати деяких комбінацій процесів ІЛП показали кращий опір до корозії, в той час як інші показали гірші результати. Незважаючи на неоднозначні результати, дійшли висновку, що нержавіюча сталь 316L, отримана методом ІЛП, може протистояти корозії в різних середовищах так само, як і кована.

Більш того, було проведено тест на опір до зношування деяких структур ІЛП, також інструментальної сталі. Якщо мікроструктура впливає на виникнення пор або кластерних твердих гранул, то твердість буде низькою, що призведе до зниження опору до зносу. З іншого боку, були винайдені деякі продукти ІЛП з високим опором до зносу. Наприклад, інструментальна сталь ІЛП, оброблена невеликою кількістю дихлориду кальцію, набуває тридцятикратного збільшення коефіцієнта протистояння зносу порівняно з кованою інструментальною сталлю. Інші значні покращення зносостійкості спостерігаються після додавання в нержавіючу сталь нітриду титану та бориду хрому, тому очевидно, що ІЛП здатне створити унікальні структури, які капіталізують властивості процесу. В даному випадку йдеться про можливість створення мікроструктур зі змішаними фазами, з покращеними показниками зносостійкості та протистояння корозії.

2.4 Електричні та магнітні властивості

Залишкові пори знижують як електричні, так і магнітні властивості. Тому при використанні ІЛП дуже важливим є спікання до великої щільності, якщо компонент буде задіяний або в електричному, або в магнітному колах. Широка доступність залізного, кобальтового та нікелевого порошку дозволила використати ІЛП у виробництві м'яко-магнітних систем. Одним із відкриттів було те, що властивості матеріалів ІЛП часто вищі за литі аналоги через присутність у них залишкових пор, залишкової напруги або залишкових домішок. Саме через це литі матеріали програють матеріалам ІЛП.

Матеріали ІЛП можна порівняти з довідковими даними відносно електричних і магнітних властивостей. Як перший приклад рисунок 2.7 показує магнітне насичення трьох магнітно-активних матеріалів, отриманих методом ІЛП (чисте залізо, залізо-нікелевий та залізо-кобальтовий сплави) і надає порівняння цих властивостей з довідковими показниками, та тими, що отримані з використанням пресування та спікання порошку.

Дуже важко досягти високої магнітної чутливості, але аморфні порошки Fe-Nd-B піддаються інжекційному литтю та спіканню до повної щільності, в результаті чого отримуємо високоякісні магніти. Більша частина твердих магнетиків мають прості форми, тому ІЛП не дуже підходить для їх виробництва. Матеріалам притаманна зміна електричних та магнітних властивостей, але ІЛП, як правило, перевищує сподівання користувачів. В деякій сферах, де застосовують залізо-нікелевий сплав ІЛП, компоненти ІЛП значно перевершують ті, що були отримані методом машинної обробки.

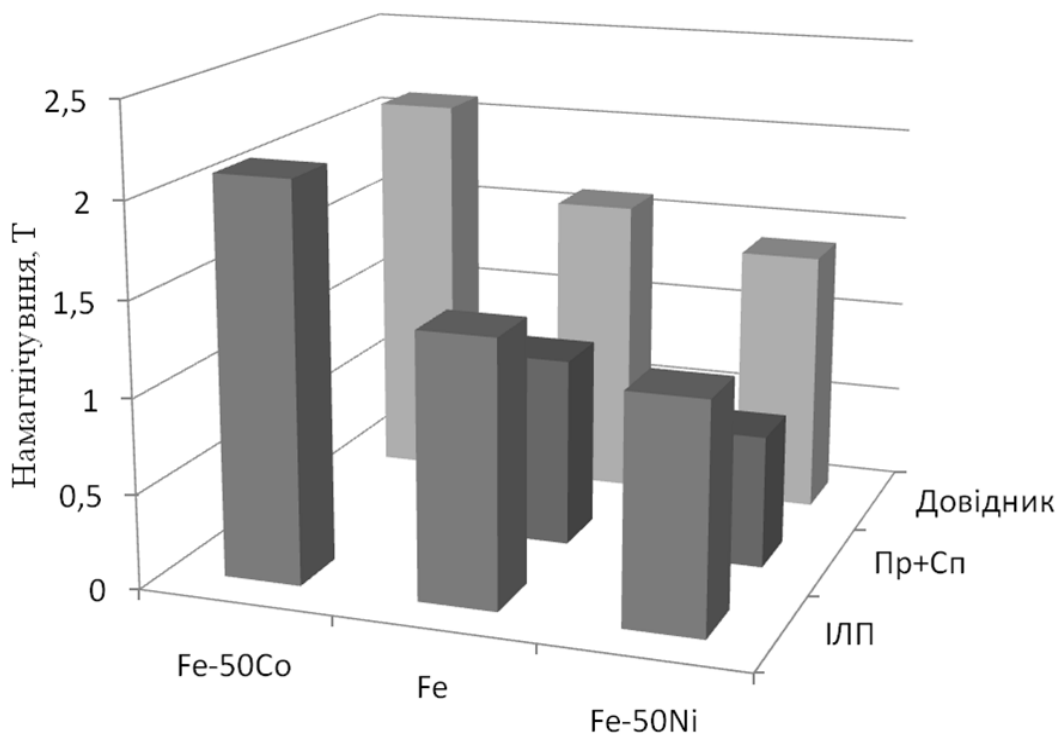


Рисунок 2.7 – Порівняння значень магнітного насичення магнітно-активних матеріалів, отриманих методом ІЛП, пресування і спікання порошку, та довідкових значень

2.5 Геометричні властивості

Не дивлячись на те, що велика кількість складних геометричних об'єктів може бути створена методом ІЛП, деякі геометричні характеристики виявляються дуже привабливими. Визначення схожостей на ранньому етапі допомагає досягти більшого технічного та економічного успіху. В таблиці 2.4 наведені основні приклади обмежень поряд із бажаними та допустимими особливостями.

Щоб допомогти зрозуміти базовий набір геометрії, варто поглянути на рисунок 2.8, на якому зображений логарифмічний графік співвідношення ваги та максимальних розмірів для більш ніж 220 деталей ІЛП.

Таблиця 2.4 – Номінальні концепції розробки компонента ІЛП

<p><i>Обмеження:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - внутрішні порожнини або зарубки на внутрішніх отворах; - повинен мати округлі краї та кут конусності відливки для ежекції
<p><i>Бажані особливості:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - найбільші габарити менші за 125 мм; - товщина стінки менша за 10 мм; - рівна поверхня
<p><i>Допустимі особливості розробки:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - комплексність форми (глухі отвори, гексагональні отвори та отвори під кутом один до одного); - ідентифікаційні номери, виступи, шипи та текстури на поверхні деталі; - гвинтова різьба, внутрішня різьба та зовнішня різьба, за необхідності

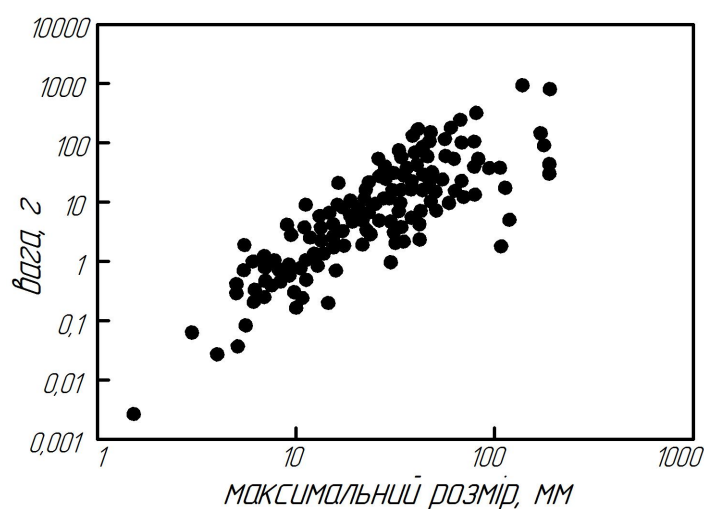


Рисунок 2.8 – Діаграма розсіювання ваги та максимальних габаритних розмірів продуктів ІЛП

Загальна статистика цих 220 деталей ІЛП наведена в таблиці 2.5, звідки видно, що серединний компонент ІЛП має максимальний габарит не більше 26 мм і 8 г середньої маси. В цьому наборі прикладів найдовший компонент мав довжину 193 мм та масу 43 г, в той час як найважчий компонент має масу 1097 г і максимальний габарит 137 мм. Це говорить про те, що ІЛП варто застосовувати для виробництва деталей з меншою вагою.

Таблиця 2.5 – Загальна характеристика 220 деталей, виготовлених ІЛП

Властивість	Найбільший розмір, мм	Маса компонента, г
Максимум	193	1097
Мінімум	1,5	0,003
Середній	34	32

Технологією ІЛП можна виробляти і великі компоненти, але такі структури характеризуються низьким обсягом виробництва. З точки зору

економії, велика кількість факторів свідчить проти великих структур в ІЛП. Насамперед, оснастка є більш дорогою, оскільки компонент стає більшим. По-друге, обладнання для обробки стає більшим і вимагає більших вкладень капіталу та амортизаційних витрат. По-третє, цикли лиття, видалення зв'язувальних речовин та спікання уповільнюються, що призводить до сповільнення процесу внаслідок збільшення розміру. Це створює подвійні проблеми, оскільки великі затрати викликають більші амортизаційні витрати та уповільнюють цикл, що призводить до підвищення вартості компонента. Відповідно, ці вартісні фактори змушують ІЛП орієнтуватись на більші обсяги виробництва деталей, що мають невеликі розміри.

Зазвичай, ІЛП показує кращі результати, коли максимальні розміри знаходяться в діапазоні між 0,1 та 125 мм. Товщина стінки зазвичай невелика і майже незмінна для забезпечення швидкого видалення зв'язувальних речовин.

ІЛП часто застосовується тоді, коли компонент має мати чіткі допуски, але критичні розміри досягаються шляхом машинної обробки після спікання.

Проста форма має лише декілька особливостей, в той час як деталі точної механіки мають мільйони особливостей для ІЛП. Звичайні успіхи ІЛП охоплюють декілька розмірів – корпус ручного годинника є гарним прикладом доцільності технології. Найбільш перспективні компоненти, що виробляються на сьогоднішній день, мають приблизно 130 технічних умов, пов'язаних з габаритами.

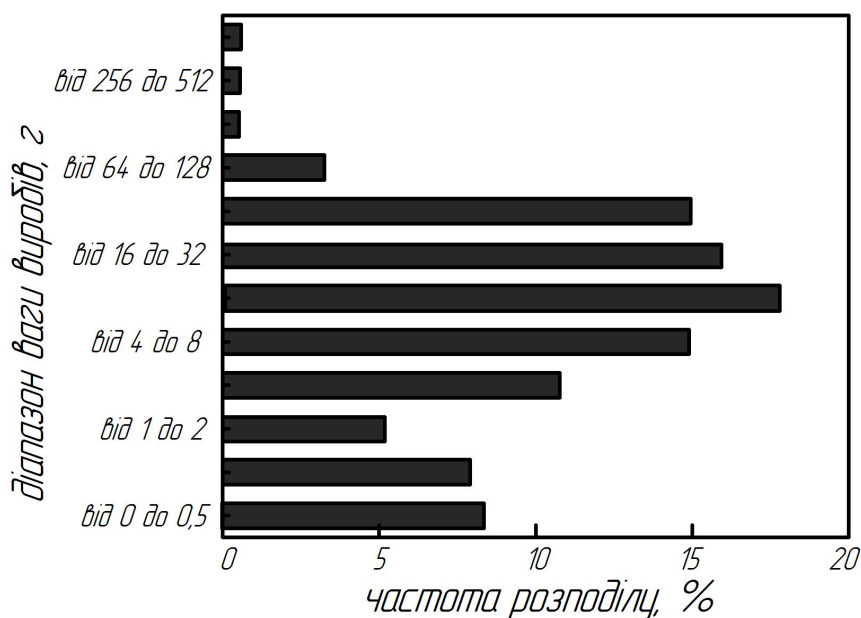


Рисунок 2.9 – Частотний розподіл найчастіше виготовлюваних виробів ІЛП

На рисунку 2.9 показаний розподіл маси декількох сотень компонентів ІЛП із сталі та нержавіючої сталі з двома максимальними точками. Одна з

них пов'язана з такими дуже малими структурами (вага не більша 0,5 г), як зубні скоби, а інша охоплює діапазон від 8 до 16 г. Враховуючи деякі попередні статистичні дані, стає очевидним, що ІЛП переважає у формуванні менших компонентів.

2.6 Підсумок важливих властивостей

Інжекційне лиття порошку може привести до успіху лише тоді, коли при виготовленні звертається велика увага на конструкцію та розробку а також залучається експерт, який допомагає прийняти рішення в процесі розробки. Консультації з експертом, який знається на ІЛП, безсумнівно, приведуть до зниження вартості, підвищення якості, збільшення працездатності обладнання й погодження задуманої функції та особливостей процесу ІЛП. Через високу вартість обладнання ІЛП має тенденцію до збільшення обсягів виробництва. Більш того, оскільки процес є дорогим, його варто застосовувати лише для компонентів з високими параметрами, яких неможливо досягнути шляхом лиття пластику. Коли деталі можна поєднати в один компонент ІЛП, з'являється ще декілька переваг, серед яких головними є зменшення кількості вимірювань та операцій складання.

За допомогою ІЛП можна отримати багато матеріалів, але є декілька з них, які домінують в галузі і пропонують рішення для великого спектра інженерних завдань. Коли існує складність в машинній обробці матеріалу (інструментальна сталь, титан, кераміка або нержавіюча сталь), тоді аспект формування ІЛП стає дуже корисним. Не варто жертвувати геометричними особливостями компонента ІЛП, але є певні геометричні характеристики, при дотриманні яких технологія буде мати найбільший успіх. Це веде до спеціалізації на невеликих компонентах (близько 25 мм) зі складною формою, які розроблені для етапу лиття. Деякі особливості конструкції можуть створити проблеми, і їх варто долати після спікання, в той час як інші властивості можна отримати під час лиття без додаткових витрат. Завданням технолога ІЛП є визначення проблем та можливостей, що можуть виникнути в процесі ІЛП.

Властивості, яких можна досягти за допомогою ІЛП, можуть змінюватись залежно від ділянки виробництва; однак вони значно наближаються до того ж діапазону, який наведено в інженерних посібниках. Через декілька років з'являться нові матеріали, що будуть спеціально розроблені для процесу ІЛП. Сюди входять багатошарові (жорстко-м'які, магнітні-немагнітні та провідні-непровідні) об'єкти, пористі метали та порожнисті об'єкти. Ці майбутні можливості допоможуть ІЛП увійти в інші сфери, в яких воно матиме значні переваги, що їх розробники зможуть використати для нових цілей.

3 РОЗРОБКА, ВИБІР ТА КОНСТРУЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКУ

3.1 Використання переваг ІЛП

Процес ІЛП застосовується до складних компонентів з металу, кераміки, твердих сплавів та металокераміки. Вартість ІЛП великою мірою залежить від розміру компонентів, складності оснащення, тривалості циклу лиття, швидкості розщеплення і спікання та інших важливих факторів. Як і в литті пластику, тут доступний широкий спектр форм, але деякі особливості суттєво впливають на складність обробки та вартість. Нижче наведені декілька особливостей, які буде розглянуто:

- застосування деяких хімічних елементів дозволяє знизити вартість порошку, тому консультація щодо вибору матеріалів може допомогти отримати краще співвідношення ціна/якість;
- використання стандартного обладнання та матеріалів дозволить співпрацювати з більшим колом постачальників та приведе до зниження кінцевої вартості;
- застосування плавних та поступових змін товщини стінок деталі є ефективним способом забезпечення якості заповнення форми;
- сировина має мати доступ до всіх частин компонента для того, щоб упевнитись в заповненні усіх частин форми, може бути використане моделювання;
- сировина має належним чином охолоджуватись наприкінці циклу лиття; товсті ділянки мають низький рівень теплообміну, який уповільнює цикл лиття, збільшуючи його вартість;
- ресурс стійкості оснащення залежить від багатьох факторів, а саме: хімічного складу порошку, зв'язувальної речовини та умов лиття; в деяких випадках більш дорогі хімічні елементи або порошок можуть значно знизити зношувальність оснащення;
- ІЛП притаманна присутність дефектів лиття, але деякі зміни конструкції можуть допомогти перемістити їх в некритичні місця, що, в свою чергу, допоможе уникнути дорогих операцій після спікання;
- рівні поверхні допомагають встановлювати компонент під час термічної обробки, але якщо немає гладкої поверхні, необхідно застосувати особливу опору;
- малі допуски значно підвищують вартість деталі, тому геометричні допуски мають бути економічно обґрунтовані;
- інколи вторинні операції є дешевшим методом досягнення мети;
- проблеми життєвого циклу (переробка, природна сумісність, ремонт, обслуговування) можна вирішити на ранній стадії проектування, якщо постачальник порошку буде залучений до процесу розробки;

3.2 Вибір деталей для ІЛП

Як вибрати деталі для інжекційного лиття порошку? Просту відповідь можна отримати, поглянувши на рисунок 3.1, на якому зображена схема прийняття рішень.

Спочатку потрібно визначити річний обсяг виробництва. Історично склалось так, що інжекційне лиття порошку найкраще задовольняє потреби виробництва при виробничому обсязі від 5000 до 100 000 000 штук в рік. Якщо потреби потраплять в цей проміжок, то слід розглянути інженерні технічні умови. Інкжекційне лиття порошку найбільш ефективно при наявності хоча б десяти геометричних характеристик (габарити, розміщення, обробка поверхні та інші), але не більше ста. Є компоненти ІЛП, які виходять за ці межі, але вони зустрічаються досить рідко.

Наступним кроком є вибір матеріалів, причому варто зауважити, що всі матеріали ІЛП, які піддаються спіканню; мають бути досить доступними. Це стосується кераміки, металу, сплавів і різноманітної металокераміки. Проте в металах слід уникати міцних оксидів, реактивних металів і токсичних металів (саме через це берилій, свинець, марганець і магnezій використовуються дуже рідко). Іншою проблемою є матеріали з низькою температурою плавлення, які варто використовувати при литті під тиском. Зазвичай, матеріали, що плавляться при температурі, вищій за 1000 °С, ширше застосовуються в ІЛП.



Рисунок 3.1 – Схематичне дерево прийняття рішень доцільності застосування ІЛП

Ще одною причиною використання ІЛП є вартість обробки поверхні. Для рівних поверхонь вартість машинної обробки є домінуючою, а для нерівних поверхонь висока вартість обробки пов'язана з великими затратами часу на обробку. Отримання гладкої поверхні жорстких матеріалів дається дуже важко та потребує великих витрат, тому деталі, які важко піддаються механічній обробці або мають складну геометрію, є найкращими для ІЛП.

На основі вищесказаного наведені нижче міркування додають привабливості використанню методу ІЛП:

- компоненти, що потребують використання важкооброблюваних матеріалів;
- конструкція, що затрудняє доступ охолоджувальної та змащувальної рідин під час обробки;
- утворення поверхонь з висотою мікронерівностей від 0,2 до 5 мкм;
- конструкція, при якій відбувається значне зміщення ваги в процесі обробки.

Оскільки дрібнодисперсні порошки, що використовуються в ІЛП, мають велику вартість, то такі деталі характеризуються збільшенням вартості виробництва порівняно зі звичайним литтям. В ІЛП, як правило, вартість механічної обробки становить 15%, або менше ціни продажу самого компонента. З цієї причини ІЛП може бути конкурентним, якщо лиття пов'язане зі значною часткою машинної обробки.

Одною з причин вибору методу ІЛП є ефективна щільність. Це маса компонента, поділена на загальний об'єм, з якого буде починатись обробка. Концепція ефективної щільності показана на прикладі сталевого виробу ІЛП (рис. 3.2). Вага заготовки для виготовлення деталі фрезеруванням – 99,8 г; вага виготовленої деталі – 13,52 г; 86,28 г відходить у стружку. Цей приклад показує, що ІЛП допомагає уникнути великих втрат матеріалу при обробці.

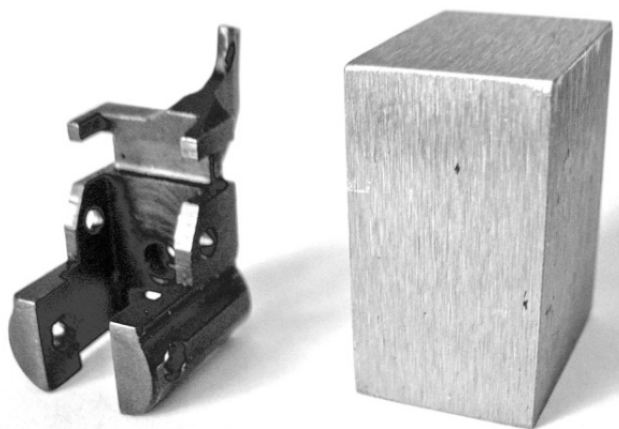


Рисунок 3.2 – Деталь і вихідна заготівка

Компоненти, отримані шляхом інжекційного лиття порошку, мають значно вищу ефективну щільність, вказуючи на те, що машинна обробка займає дуже багато часу та має низьку економію.

Рисунок 3.3 показує розподіл ефективної щільності для більш ніж 50 компонентів ІЛП зі сталі та нержавіючої сталі. Ці дані показують, що виробництво більшості компонентів ІЛП стосується форм, що мають низьку ефективну щільність при виготовленні методами механічної обробки.

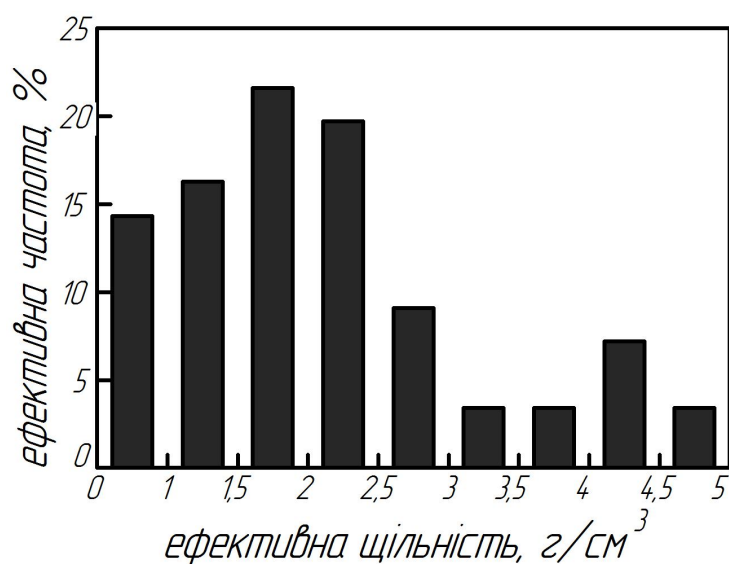


Рисунок 3.3 – Гістограма розподілу ефективної щільності сталевих компонентів ІЛП

3.3 Вибір матеріалів

Комерційне виробництво порошку для процесу ІЛП – це відносно нова сфера діяльності. Але сьогодні існує велика кількість доступних матеріалів, що мають необхідний розмір часток. Продукти ІЛП розподіляються на декілька категорій:

- феросплави (конструкційні сталі, нержавіючі сталі, інструментальні сталі, залізонікелеві магнітні сплави та такі особливі феросплави, як інвар та ковар);
- звичайна оксидна кераміка (оксид алюмінію, кварц та цирконій, а також їх суміші);
- вольфрамові сплави (важкі сплави вольфраму та вольфрам-мідь);
- металокераміка, тверді сплави.

Окрім цих матеріалів різко зростає активність в розробці особливих матеріалів, до складу яких входять алюміній, цінні метали, титанові сплави, нікель, сплави на основі нікелю, молібден, молібден-мідь та кераміка на основі таких безкисневих сполук, як карбід кремнію та нітрид кремнію.

Зміна хімічних складових пов'язана з отриманням додаткових переваг технології. Наприклад, в нержавіючій сталі дуже часто використовується структура 316L (Fe – 19%, Cr – 9%, Ni – 2%, Mo < 1%, в питомій вазі), оскільки вона має велику міцність та опір до корозії. Однак такий матеріал досить складно спікається. Але змінені структури зі збільшеним вмістом хрому дозволяють спростити процес спікання. Особливо це стосується тих структур, які мають високий вміст молібдену (до 6%), хрому (до 22%) або кремнію (до 3%). Не зважаючи на їх високу вартість, вони забезпечують отримання найкращих властивостей, яких можна досягти при литті, штампуванні або механічній обробці. При виборі матеріалу для компонента ІЛП необхідно зважати як на економічність, так і на отримувані властивості. В табл. 3.1 наведено матеріали ІЛП та промислові галузі, де їх застосовують.

Таблиця 3.1– Галузі, в яких знайшли застосування матеріали ІЛП

Група матеріалів	Призначення	Сплави	Особливі властивості
<i>Нержавіючі сталі</i>	Медична галузь, електроніка, спортивні товари, аерокосмічна галузь, побутові товари	17-4PH 316L 420, 440C 310	Міцність, термообробка, корозійна стійкість, пластичність, Твердість, зносостійкість, термообробка Корозійна та температурна стійкість
<i>Низьколеговані сталі</i>	Деталі машин, побутові товари	Серії 1000 Серії 4000 Серії 52100	Поверхнєве гартування Загальне застосування Висока зносостійкість
<i>Інструментальні сталі</i>	Ріжучі інструменти по дереву та металу	M2/M4 T15 M42 S7	61-66 HRC 63-68 HRC 65-70 HRC 55-60 HRC
<i>Титан</i>	Медична галузь, аерокосмічна, побутові товари	Ti Ti-6Al-4V	Легка вага Легка вага, висока міцність
<i>Мідь</i>	Електроніка, радіатори охолодження	Cu W-Cu , Mo-Cu	Висока тепло- та електропровідність Висока теплопровідність, низьке теплове розширення
<i>Магнітні сплави</i>	Електроніка, соленоїди та ін.	Fe-3%Si Fe-3%Co	Високий електричний питомий опір Високе магнітне проникнення
<i>Вольфрам</i>	Зброя, електроніка, спортивні товари	W Сплави W	Густина Густина та жорсткість
<i>Тверді сплави</i>	Ріжучі інструменти, зносостійкі поверхні	WC-5Co WC-10Co	Висока твердість Висока жорсткість
<i>Кераміка</i>	Зносостійкі поверхні, сопла та ін.	Оксид алюмінію Оксид цирконію	Загальне застосування Висока зносостійкість

Обмеження у виборі матеріалів для інжекційного лиття полягає в доступності порошку. Якщо матеріал є в наявності (або може бути виготовлений на замовлення), то ІЛП може мати великі виробничі можливості. Звичайно, вартість порошку значно впливає на кінцеву вартість деталі, але доступність порошку стоїть на першому місці. Немає сумнівів, що при наявності більше 300 постачальників дрібнодисперсного порошку майже будь-який матеріал може бути вироблений за прийнятною ціною.

Гранульований порошок для ІЛП пакують в поліетиленові мішки, які розміщують в одноразові ємкості або в сталеві бочки. Як правило, при правильному зберіганні готова суміш не потребує сушіння перед та після виймання з упаковки. Після відбору необхідної кількості матеріалу необхідно ретельно закрити поліетиленовий мішок, оскільки він (порошок) вбирає атмосферну вологу, що може призвести до виникнення проблем під час лиття (порожнини газу). Наступне сушіння допомагає відновити притаманні властивості сировини, однак у деяких серйозних випадках повністю відновити властивості матеріалу неможливо.

3.4 Вибір конструкції та форми компонентів для ІЛП

Завдяки ІЛП можна отримати майже будь-яку форму, але ціна завжди є найважливішим фактором при застосуванні технології ІЛП. Для досягнення успіху конструкція має відповідати обов'язковим вимогам. З іншого боку, існує багато ситуацій, коли додаткові властивості можуть принести користь, але вони не є критичними для досягнення успіху. В деяких випадках ці додаткові властивості можна отримати при використанні ІЛП з невеликими затратами. Тому точні геометричні характеристики є одною з сильних сторін процесу ІЛП. В таблиці 3.2 наведені можливі переваги конструкції при виготовленні ІЛП.

Таблиця 3.2 – Переваги ІЛП

✓	високий рівень складності форми, який іноді потребує невеликих додаткових витрат
✓	зменшена або відсутня машинна обробка, кінцева обробка
✓	високий коефіцієнт використання матеріалу – 95–98%
✓	пильний контроль за розмірами
✓	гнучкість вибору хімічного складу, матеріалів та мікроструктури
✓	виробництво багатофазних мікроструктур для підвищення опору до зносу або збільшення міцності
✓	висока якість спеченої поверхні
✓	орієнтованість на автоматизацію та масове виробництво
✓	визначені дані про робочі характеристики в різних сферах використання

В табл. 3.3 наведено три загальні класифікації властивостей, характерні процесу ІЛП – ті, яких слід остерігатись, допустимі властивості та бажані властивості, що гарантують успіх ІЛП.

Таблиця 3.3 – Номінальні рекомендації щодо конструкції компонентів ІЛП

Бажані властивості	плавна зміна товщини розрізу; найбільший габарит менший 125 мм; розміри більші за 0,1 мм; маса менша за 1 кг; товщина стінки менша 10 мм; комбіноване складання в одну литу деталь; як мінімум одна гладенька поверхня для опори під час спікання; допустимість дефектів поверхні – ліній розриву, відміток від штовхачів
Допустимі властивості конструкції	несиметричні, призматичні, квадратні та деталі довільної форми отвори – допустимі різної форми, також глухі та наскрізні; отвори під кутом один до одного; зрізи, пази, щілини, заглиблення несиметричної форми; ребра жорсткості та опорні бази для складання; поверхні з насічкою та вафельні поверхні; виступи, маточини та штифти; зовнішня спіральна різьба або зубці; зовнішня або внутрішня різьба; номер партії або логотип
Небажані властивості	закриті порожнини; зрізи на внутрішніх отворах; гострі кути або краї більше базового радіуса на 0,05°мм; довгі деталі без ухилу або конусності з отвором ежекції меншим 0,1 мм в діаметрі; стінки, тонші за 0,1 мм; тонкі, вузькі ділянки, що прилягають до товстих ділянок компонента, який має товщину понад 25°мм; компоненти важчі 1 кг.

На рисунку 3.4 наведено дев'ять проблем, з якими стикаються конструктори виробів, виготовлених за технологією ІЛП.

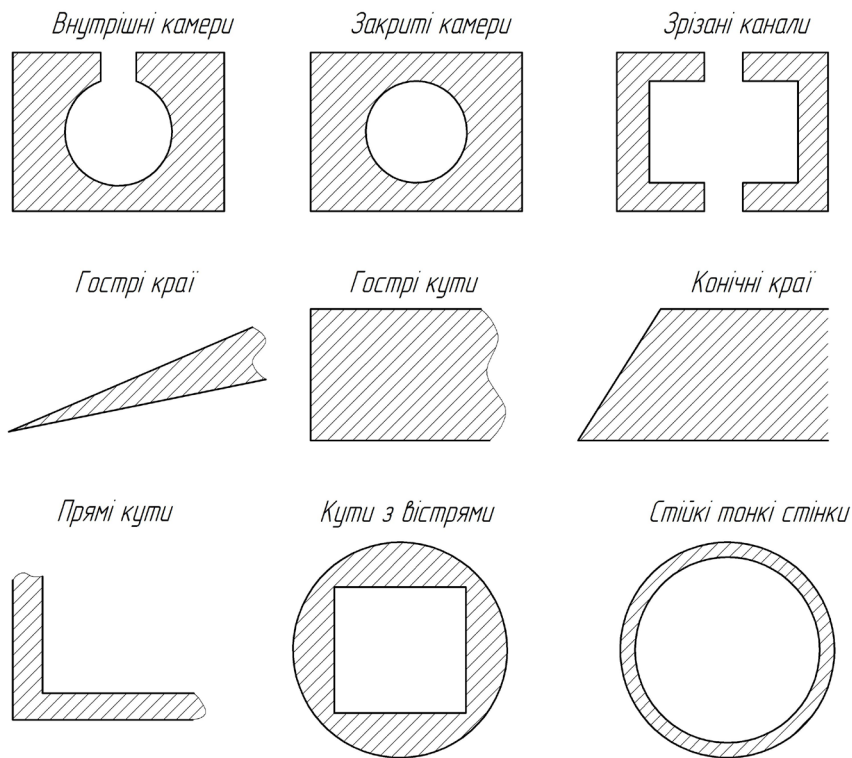


Рисунок 3.4 – Деякі геометричні властивості, які ускладнюють процес інжекційного лиття та спікання

3.5 Геометричні можливості

Перший фактор – це загальний розмір компонента. Є три обмежувальні фактори:

- площа поперечного перерізу (обмежена потужністю тиску машини для лиття);
- максимальна довжина (обмежена прес-формою або її основою, або опорним стрижнем машини для лиття);
- максимальна товщина (яка не є прямим обмеженням, але цикли лиття та розщеплення значно сповільнюються при збільшенні товщини).

Великі зони поперечного перерізу потребують більшої машини для лиття.

Деякі фірми ІЛП можуть обробляти компоненти з площею поперечного перерізу до 77 см², але у виробництві компоненти з такою зоною поперечного перерізу зустрічаються відносно рідко. Збільшення вартості, пов'язане з використанням великих машин для лиття, як правило, призведе до відмови від використання методу ІЛП для виробництва великих деталей.

Довжина деталі та її площа напряму обмежені не процесом, а розміром встановленого обладнання.

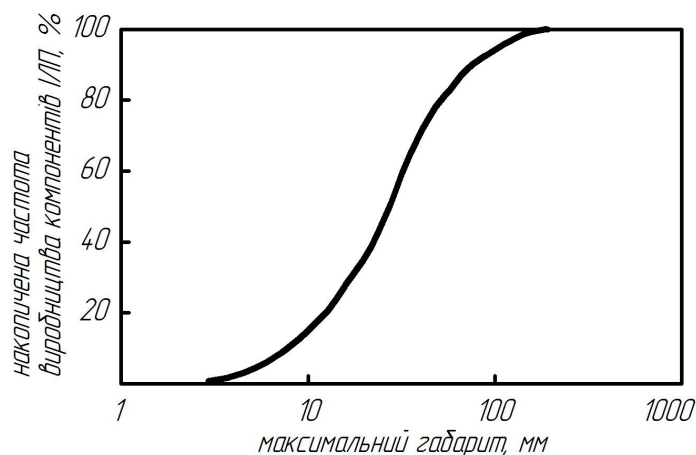


Рисунок 3.5 – Накопичувальний розподіл частоти виробництва габаритів компонента

На рисунку 3.5 показаний кумулятивний розподіл деталей ІЛП, що мають довжину від 1,5 до 193 мм. Середній показник (50%) – 26°мм або трохи більше в максимальному розмірі.

Ще один метод визначення можливості виготовлення компонента ІЛП базується на складності. Це визначення умов та інформації, необхідної для вибору компонента. Для більшості продуктів ІЛП зміст

інформації коливається до 100 геометричних властивостей, які, зазвичай, зображуються на інженерному кресленні. В ІЛП є можливість отримання додаткової складності при незначних затратах, оскільки додаткові особливості можуть бути отримані шляхом зміни оснащення, що ніяким чином не вплине на затрати виробництва. На жаль, лише певний набір особливостей приносить економічні і практичні результати. Тому перевага ІЛП полягає у відсутності машинної обробки та врахуванні витрат на оснащення, яке потім оновлюється знову і знову. Немає потреби залучати додаткові кошти, доки процес зберігає цю комплексність, а саме: достатню точність, яка заміщає обробку поверхні. Можливе також виготовлення деталей з такими додатковими конфігураціями, як ідентифікаційні номери, ребра, отвори, штифти для складання, петлі і різьби без збільшення виробничих витрат. Це призведе лише до збільшення вартості оснащення.

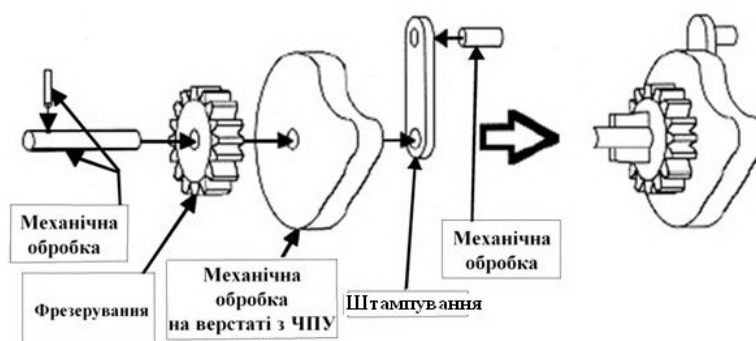


Рисунок 3.6 – Поєднання декількох дискретних компонентів ІЛП в один компонент

В деяких випадках вартість сировини ІЛП вища порівняно з альтернативними технологіями формування, але високий рівень використання матеріалу може привести до зниження виробничих затрат.

Цей аспект має велику цінність, коли сировина дорога (наприклад, коштовні метали для ювелірних виробів або дорогі матеріали). Ще більшу перевагу метод ІЛП має за необхідності утворення складного нероз'ємного виробу з декількох простіших (див. рис. 3.6), оскільки економія матеріалу значно зростає. Однак особливості, пов'язані з чіткими допусками, дещо зменшують переваги ІЛП, оскільки для забезпечення високої продуктивності процесу, як правило, вдаються до збільшення розмірів деталі ІЛП, після чого вона піддається машинній обробці з метою отримання кінцевого розміру.

3.6 Особливості форми та розмірів

Інжекційне лиття порошку дуже схоже на лиття пластику за багатьма особливостями конструкції. Звідси випливає той факт, що ІЛП використовує ті самі машини для лиття та концепції оснащення, що притаманні литтю пластику. Тому майже всі геометричні властивості, притаманні пластику, можливі і для ІЛП. Більшість обмежень ІЛП має економічний характер (інші технології здатні створити форму з меншими затратами) або призводить до складності при вилученні деталі з форми. Слід зазначити, що форми з великою кількістю виступів під різними кутами чи форми зі складними внутрішніми особливостями вимагають значних витрат. ІЛП та пластик тяжіють до виробництва об'єктів з тонкими стінками.

Для кращого розуміння можливостей ІЛП в отриманні розмірів та форми в таблиці 3.4 наведені типові та граничні значення параметрів компонентів ІЛП. В таблиці 3.4 типові значення мають загальний характер, в той час як максимальні і мінімальні значення наведені для показу можливостей процесу.

Таблиця 3.4 – Кількісні можливості інжекційного лиття порошку

Атрибут	типовий	мінімальний	максимальний
Товщина стінки, мм	10	0,1	125
Зміна товщини стінки	×2	-	×30
Найбільший габарит, мм	25	2	1000
Коефіцієнт пропорційності	8	1	70
Допуски, % (відхилення)	0,3	0,03	2,0
Кількість розмірних вимог	40	20	130
Маса компонента, г	10	0,003	17 000
Матеріал	Сплави (суміші)	чистий елемент	Композити
Властивості	Довідкові	Не важливо	Найкращі
Орієнтовна вартість деталі, грн	9,00	0,52	3500,00
Обсяг виробництва в рік, шт.	300 000	2 000	100 000 000

Конструкція компонента суттєво впливає на успіх інжекційного лиття порошку. Попереднє визначення ІЛП як виробничого процесу допомагає здійснити зміни конструкції, що дозволить полегшити процес виробництва. Конструкція компонента тяжіє до спрощення, забезпечуючи при цьому наявність усіх функціональних властивостей.

Приклади покращення конструкції показані на рисунку 3.7. Для кожного елемента показні два альтернативних варіанти покращення технологічності. Альтернатива допомагає отримати такі ж самі продукти при зниженні виробничих затрат на процес ІЛП.

Для прикладу, у випадках *а* і *б* (рис. 3.7) механічна обробка забезпечує постійну товщину стінок, мінімізуючи розсіювання та роблячи процес розщеплення швидшим. У випадку *б* жорсткість конструкції досягається за допомогою ребра, яке в подальшому спричинить зміну ваги. Для випадку *в* плавний перехід від товстої ділянки до тонкої веде до зменшення внутрішніх напружень після лиття. У випадку *г* глухий отвір збільшено з метою уникнення товстої ділянки під отвором. Приклад *в* показує рекомендовану заміну гострих країв на заокруглені з переміщенням ваги від робочих точок. Приклад *д* показує розширення виступу з метою отримання рівномірної товщини ділянки.

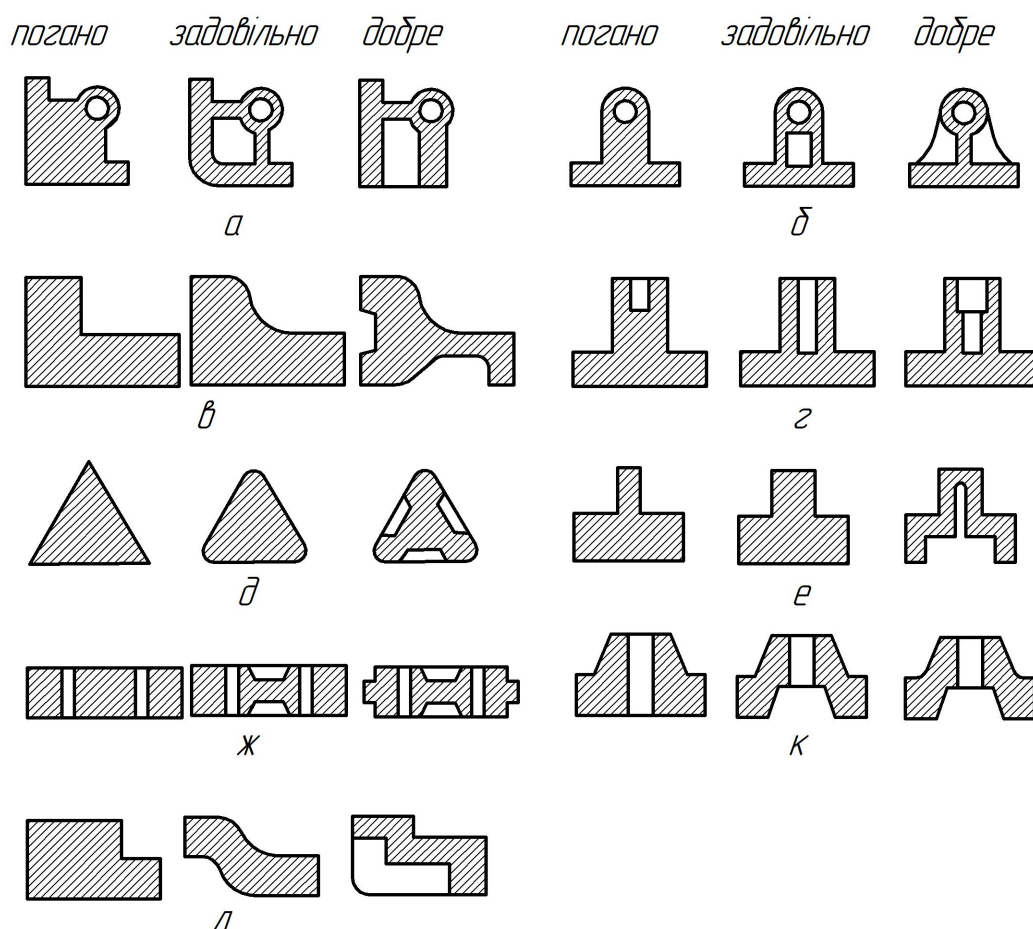


Рисунок 3.7 – Зміна форми деталі для підвищення технологічності процесу ІЛП

Наскрізні отвори у прикладах *d* та *e* створюють товсті (тонкі) ділянки, яких можна уникнути при зміні конструкції. Нарешті, приклад *l* показує, що при зміні кривої ділянки можна запобігти злиття, що дозволяє отримати бажану рівномірну товщину стінки.

3.7 Товщина ребра, перегородки та стінки

Важливо зберігати однорідність товщини стінки і бажано, щоб вона була тонкою для забезпечення перенесення тепла, що дозволить мінімізувати вірогідність виникнення дефектів. Так, на рисунку 3.8 показана деталь з технологічними пазами для зменшення ваги деталі та покращення процесу дебайдингу. Товщина стінки в ІЛП зазвичай невелика і може бути менше 10% від найбільшого розміру. Відношення максимального габариту до товщини стінки називається співвідношенням геометричних розмірів і для ІЛП воно, в середньому, становить 8, але може коливатись від 1 до 70. Характерна товщина стінки становить 10 мм або менше. Тому ІЛП краще підходить для довгих, тонких або плоских структур. Товсті стінки також використовують, але тут виникають проблеми збільшення витрат та сповільнення процесу виробництва. Важливим параметром є гнучкість S , визначена через товщину стінки t , поділену на квадратний корінь площі компонента A , перпендикулярної до найтоншої стінки

$$S = t / \sqrt{A}$$

Середня гнучкість в ІЛП дорівнює 0,3, але, як і співвідношення розмірів, вона варіюється від 0,066 до 1. Це означає, що в більшості компонентів ІЛП одна орієнтація має меншу товщину, аніж дві інші.

Різкий перехід від товстої стінки до тонкої є більшою проблемою аніж поступовий. Зміна товщини в два рази між тонкою і товстою стінками є типовою і являє собою гарний приклад комбінації, показаної на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Приклад компонента ІЛП, що містить поєднання тонких та товстих ділянок

Як показано на рисунку 3.9, набагато вигідніше використовувати поступову зміну товщини стінки на проміжку, який дорівнює трьом висотам виступу. Це дозволяє мінімізувати різницю термічних напружень між ділянками, що виникає під час нагрівання (тонкі ділянки нагріваються швидше). Якщо сходинок на поверхні є ключовим завданням, тоді краще зберігати товщину стінки незмінною, як показано на рисунку 3.10.

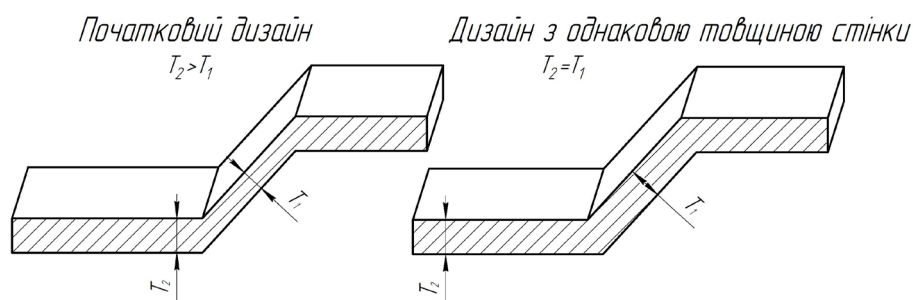


Рисунок 3.9 – Зміна конструкції компонента ІЛП для підвищення його якості та технологічності

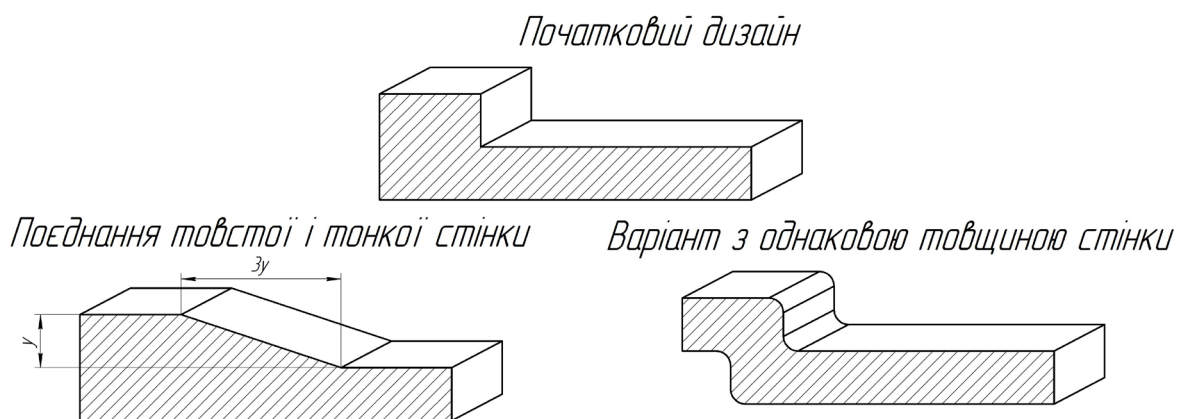


Рисунок 3.10 – Зміна форми східчастої конструкції для підвищення ефективності ІЛП

Компонент зі змінною товщиною стінки можна перетворити в компонент зі сталою товщиною стінки, як показано на рисунку 3.10. Альтернативою є переміщення тонкої стінки для збільшення її товщини, як показано на рисунку 3.12. Початкова геометрична форма у вигляді ластівчиного хвоста призводить до виникнення тонкої ділянки між пазом та зовнішньою стінкою, тому краще збільшити товщину стінки. Метод ІЛП буде більш успішним, якщо товщина стінки буде збільшена до балансового значення передачі тепла. Також слід зауважити, що машинна обробка кутових поверхонь занадто дорога, тому ІЛП має великі вартісні переваги при такій формі деталі (рис. 3.11).

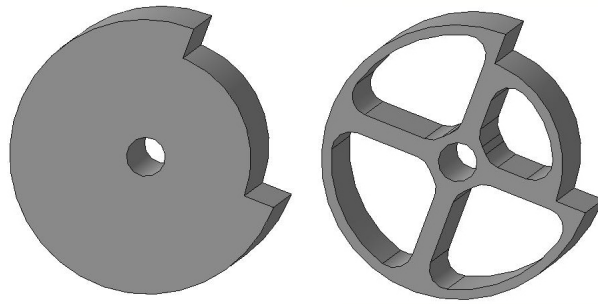


Рисунок 3.11 — Зміна початкової масивної конструкції для зменшення маси та забезпечення постійної товщини стінки.

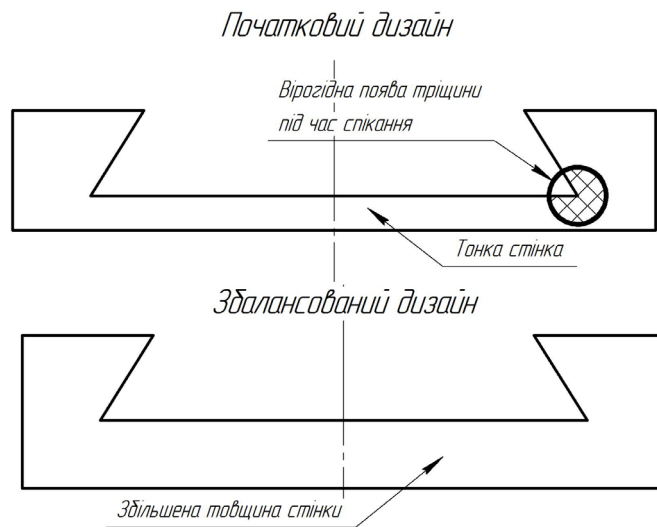


Рисунок 3.12 – Форми у вигляді «ластівчиного хвоста»

Більш того, використання ребер також допоможе надати структурі жорсткості без великого збільшення ваги. Виробники деталей методами машинної обробки зазвичай уникають використання ребер, оскільки це підвищує вартість процесу, але в ІЛП все навпаки – ребро допомагає зменшити вагу та вартість. На рисунку 3.13 показане просте ребро, в той час як на рисунку 3.14 зображений приклад внутрішніх ребер в компоненті ІЛП.



Рисунок 3.13 – Просте ребро для надання жорсткості та зв'язування двох ділянок компонента ІЛП

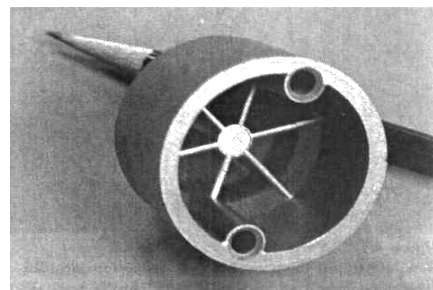


Рисунок 3.14 – Ребра жорсткості на внутрішній частині корпуса

Як показано на рисунках 3.15 та 3.16, ширина ребра не має перевищувати товщину стінки, в багатьох випадках вона становить біля 50% товщини стінки. При перетині ребер варто застосувати заглиблення для того, щоб товщина перерізу була пропорційна товщині стінки.

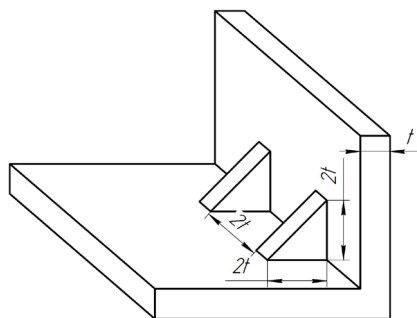


Рисунок 3.15 – Рекомендації щодо розміру та розміщення ребра для компонента ІЛП

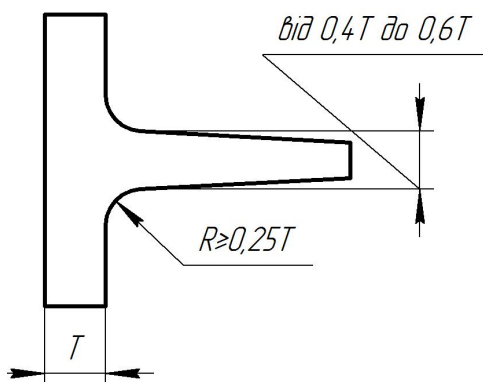


Рисунок 3.16 – Загальні правила конструювання ребра для деталей ІЛП

Рівномірні стінки та ребра не завжди можливі. Траплялись випадки, коли досягався успіх зі зміною товщини 30:1, але часто компонент деформується під час обробки. Проте, щоб уникнути відокремлення порошку та з'єднувальної речовини й виникнення дефектів в місці зміни товщини, слід використовувати поступові зміни товщини ділянки, якщо це можливо.

3.8 Отвори та проточки

Додавання отворів є звичним для компонентів ІЛП і воно можливе в таких формах:

- круглі та еліпсоподібні отвори;
- отвори у вигляді літери «D»;
- гексагональні або квадратні отвори;
- конічні отвори;
- наскрізні отвори;
- глухі отвори.

Для зниження вартості потрібно розташовувати отвори на одній лінії з розмиканням форми. В іншому випадку для проведення додаткових дій знадобиться зміна оснащення.

Зазвичай існує декілька обмежень щодо розміру отвору. Діаметр, як правило, обмежується можливістю формування та розміщення вставки у форму, але є можливість створення отворів розміром 0,1 мм. Більшість отворів в структурі ЛПІ короткі з невеликою осовою пропорцією (відношенням глибини до діаметра), але завдяки додатковим зусиллям можна отримати коефіцієнт пропорційності близько 70. Розташування отвору біля краю деталі може призвести до розтріскування деталі, але можливе (рис. 3.17).

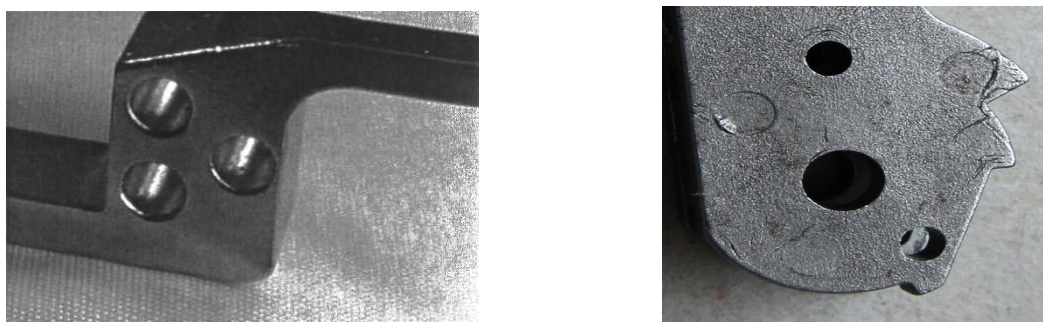


Рисунок 3.17 – Приклад отвору, розташованого дуже близько до зовнішньої стінки

Глухі отвори бажано формувати конусними, з заокругленням в нижній частині деталі для уникнення вакууму під час виймання з матриці. Коли є декілька отворів, бажано щоб інтервал між отворами дорівнював товщині стінки або діаметру отвору. Можливе також поєднання отворів, яке може відбуватись під довільним кутом. При перехрещенні отворів бажано, щоб один з них мав форму літери «D» для забезпечення гладкості поверхні отриманого перехрещення (рис. 3.18).

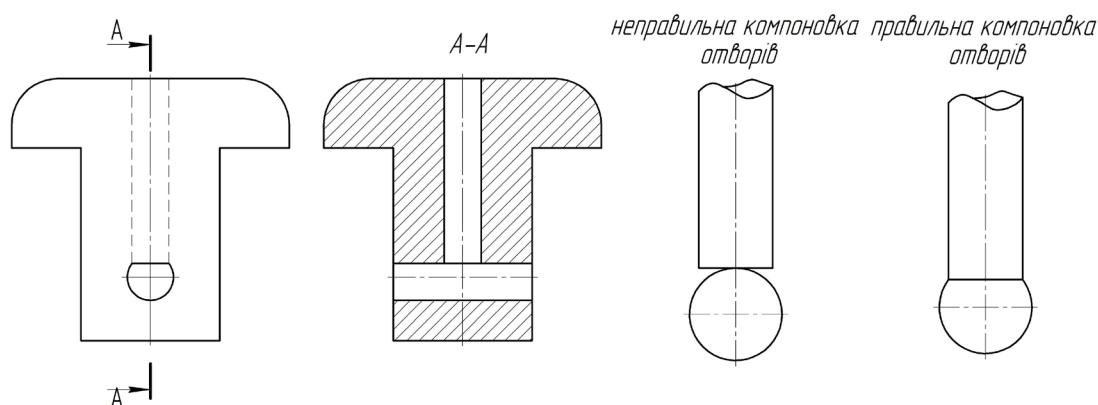


Рисунок 3.18 – Правильне і неправильне компонування перехресних отворів

Одною новою особливістю конструкції ІЛП є додавання отворів або пазів з метою зменшення маси навіть тоді, коли це не має функціонального значення. Простий приклад цієї концепції наведено на рисунках 3.19 і 3.20.

В даному випадку (рис. 3.19) нижня сторона умисно видалена для зменшення ваги. Виїмки корисні тоді, коли ділянка деталі не несе великого навантаження. Якщо виготовляти таку деталь методом машинної обробки, то, зазвичай, ця ділянка залишиться незайманою з метою мінімізації часу обробки та витрат. В ІЛП це є перевагою, оскільки утворення виїмок приведе до зменшення маси.

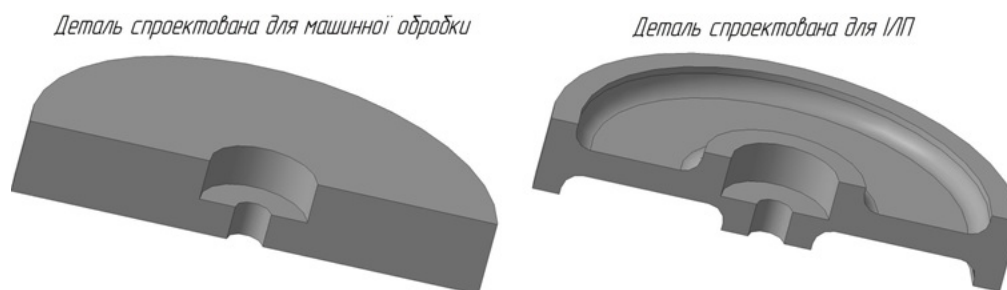


Рисунок 3.19– Зменшення маси виробу ІЛП порівняно з машинною обробкою за рахунок утворення додаткових елементів



Рисунок 3.20 – Деталь ІЛП з пазами в нижній частині для зниження ваги та зменшення товщини стінки

Вирівнювання глибини пазів впливає на вартість прес-форми. На рисунку 3.21 наведено приклад з двома варіантами. Перший з пазом, розташованим вздовж лінії розподілу, який є більш дорогим, але тут залишаються бокові стінки. Другий варіант пов'язаний з фрезеруванням паза перпендикулярно до лінії розподілу, це зменшує витрати на оснащення і при цьому бокові стінки будуть видалені. Якщо це дозволяє конструкція, вигідніше буде використовувати другий варіант.

Прийняття рішень щодо використання отворів або пазів залежить від функцій та необхідної міцності. Але ці особливості показують можливості нових конструкцій ІЛП, в яких дозволено підвищення складності та додавання нових якостей. В деяких випадках такі дії можуть знизити масу компонента на 50% без втрати необхідних властивостей. Цим ІЛП кардинально відрізняється від машинної обробки.

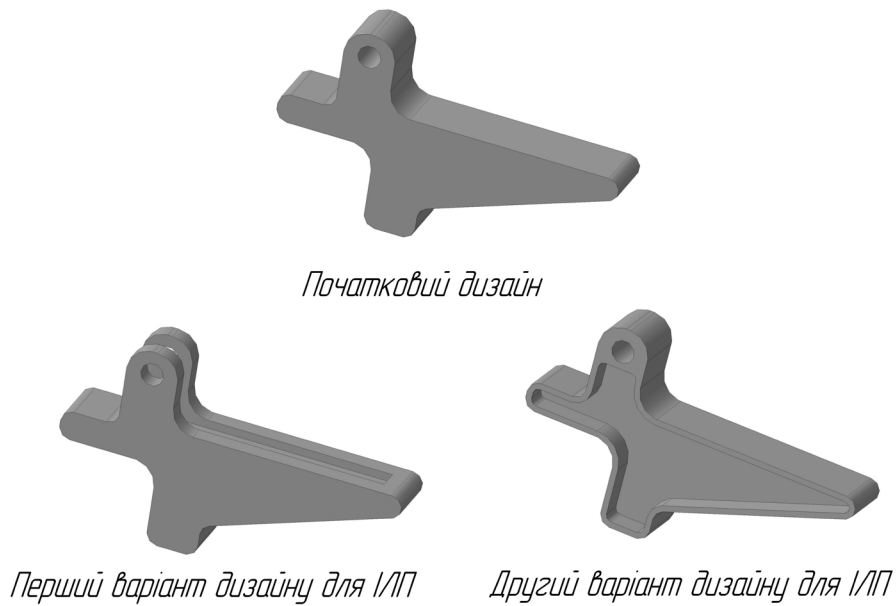


Рисунок 3.21 – Зображення механічного важеля та варіанти зменшення його ваги

3.9 Різьба та особливості поверхні

Як правило, кожна особливість прес-форми відбивається на компоненті ІЛП. Сюди входять такі бажані особливості поверхонь, як вафельні поверхні та поверхні з насічками, а також такі небажані особливості, як подряпини. На рисунку 3.22 наведено фото поверхні з насічками на хірургічному інструменті, отриманому за допомогою ІЛП. Також можливе нанесення тексту (назви підприємства або номера деталі) та текстури з використанням випуклих та штампованих надписів. На рисунку 3.23 наведено приклад обох форм нанесення.

Інший метод полягає у використанні дробиноструминного апарата для отримання матового покриття на деталях ІЛП. Додавання цих особливостей пов'язане з невеликими додатковими витратами.

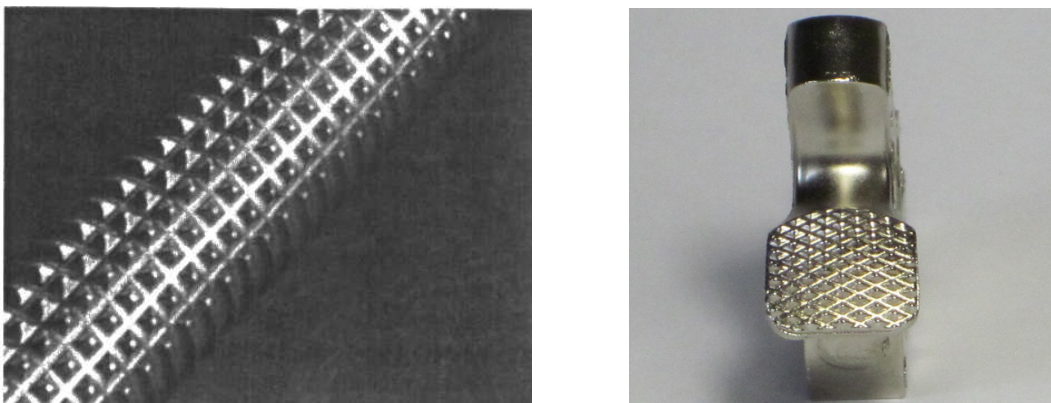


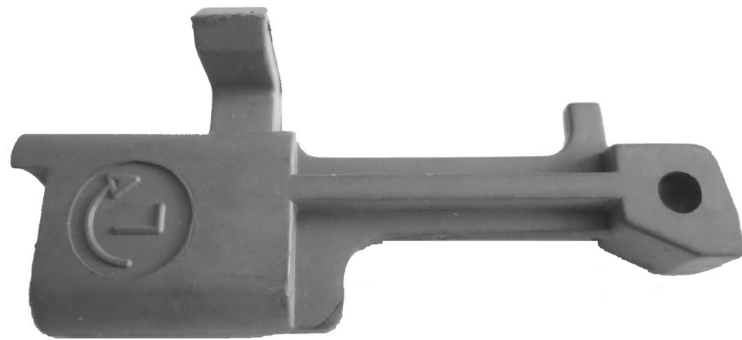
Рисунок 3.22 – Поверхні з насічками, отримані за допомогою ІЛП



а



б



в

Рисунок 3.23 – Ідентифікація та інші позначення на компонентах ІЛП з використанням: а) рельєфних надписів; б) штампованих надписів; в) приклад деталі прицільного механізму автоматичної зброї з нанесеними позначеннями.

Схожим способом можна нанести зовнішню або внутрішню різьбу безпосередньо в процесі лиття. Це може бути корисним, коли деталь виготовляється з матеріалів, що важко піддаються машинній обробці. При нанесенні зовнішньої різьби бажано зберігати просту геометричну форму компонента для застосування прес-форми з роз'ємною матрицею, що дозволяє залишити невеличку ділянку гладенькою в тому місці, де різьба перетинається зі швом форми. На рис. 3.24 показано приклад такої ситуації.

Отримати внутрішню різьбу можна за допомогою мітчиків, що обертаються; їх вилучають з отвору незадовго до ежекції деталі з форми. В тому випадку, коли різьба має бути точною, найкраще буде її наносити після спікання. Як правило, нарізання різьби на цій стадії не залежить від процесу ІЛП. Однак ІЛП дозволяє здійснити дуже точне формування чорнових розмірів, тому остаточне нарізання різьби має бути швидким, оскільки воно приводить до невеликої зміни ваги.

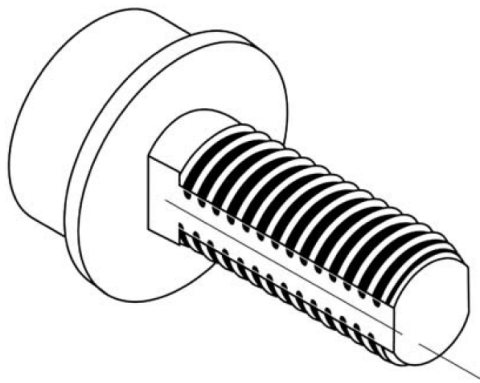


Рисунок 3.24 – Різьба, вилита безпосередньо на компоненті ІЛП з використанням плоскої поверхні на лінії розподілу

3.10 Виступи та маточини

Інша перевага ІЛП полягає в можливості внесення змін до структури. На відміну від машинної обробки, що має високий ступінь використання матеріалу, в ІЛП можна додавати конструктивні елементи шляхом звичайної зміни оснащення. Декілька прикладів можна взяти з лиття пластмас. Наприклад, додавання виступів та маточин для вирівнювання, надання жорсткості, з'єднування, індексації. На рис. 3.25 показано 4 різні види маточин для вирівнювання та з'єднання. Основною їх функцією в литті пластмас є складання з використанням цвяхів, гвинтів або заклепок.

Стінки маточин мають бути трохи тоншими, ніж товщина прями кальної стінки – від 60 до 70%. Тут ІЛП має перевагу, оскільки отримання такого ж результату методом машинної обробки вимагатиме значних витрат матеріалу та часу обробки.

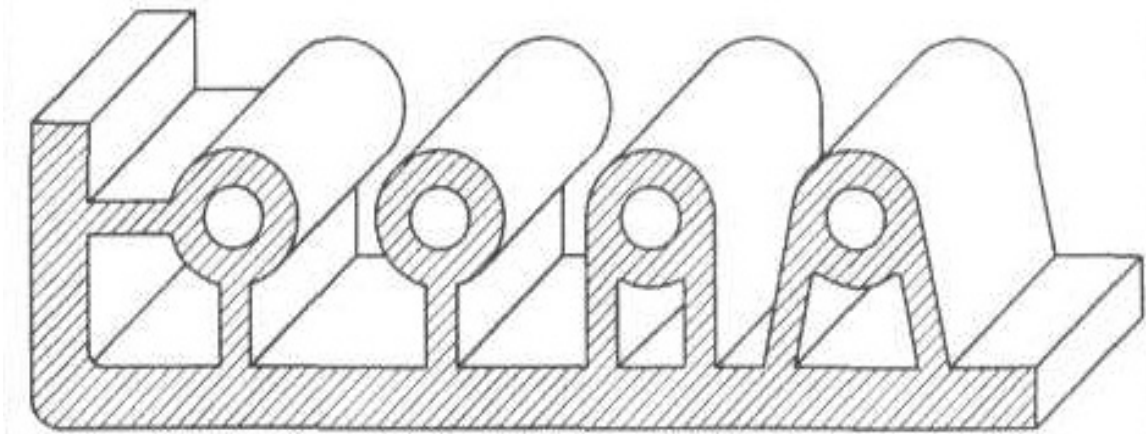


Рисунок 3.25 – Можливі конструкції ступиці для компонентів ІЛП

Виступи також використовуються під час складання або для вирівнювання. Типові виступи являють собою невеликі рельєфні циліндри або конуси на поверхні, діаметр та висота яких менші за товщину стінки.



Рисунок 3.26 – Різні конструкції виступів

На рисунку 3.26 показані стояк та виступ, утворені на деталі комп'ютерного приводу для дисків. Якщо виступ призводить до збільшення напруги, тоді його необхідно зміцнити за допомогою ребер жорсткості.



Рисунок 3.27 — Деталі кріплення прикладу автоматичної зброї, виготовлені за технологією ІЛП.

На рисунку 3.27 показані «зелені» відливки та спечені компоненти ІЛП для зброї, в яких виготовлені пази для зниження ваги деталей. Варто звернути увагу, що обидві особливості показують переваги використання процесу ІЛП перед методом машинної обробки у випадку внесення змін до структури. Інакше кажучи, ситуації, які ведуть до значної втрати маси, більше підходять для ІЛП, ніж для машинної обробки.

3.11 Вирізи

Є можливість виконання вирізів як на внутрішній, так і на зовнішній поверхнях компонента. На рис. 3.28 зображена насадка з цементованого карбіду з зовнішнім вирізом.

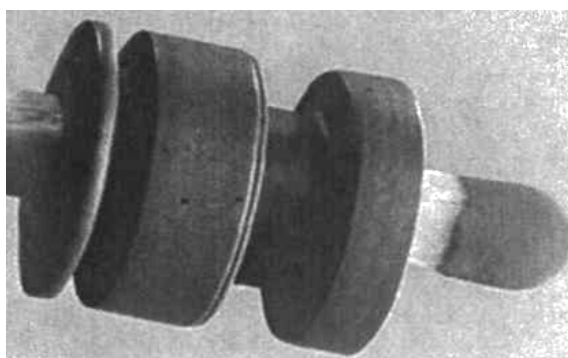


Рисунок 3.28– Приклад вирізу, вилито на корпусі насадки з цементованого карбіду

Дві можливі ситуації, в яких можна використовувати зовнішні вирізи, показані на рисунку 3.29. За можливості, розміщення шва форми на вирізі дозволяє спростити конструкцію оснащення. Можливі також конічні та кутові вирізи.

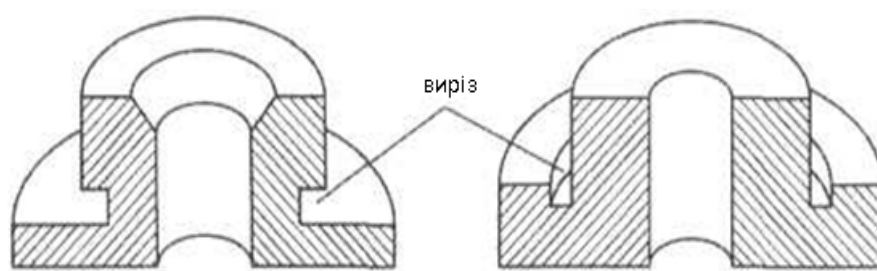


Рисунок 3.29 – Два варіанти вирізу, можливі в ІЛП

Внутрішні вирізи потребують великих витрат та використовуються рідко. Одним із способів є розміщення пластикової вставки в порожнину, після чого вона заливається сировиною ІЛП. Вставка виймається з порожнини, наприклад, при використанні водорозчинного полімеру за рахунок розчинення.

3.12 Радіус кута та жолоба

Криві поверхні не є великою проблемою ІЛП, проте розмір часток визначає мінімальний радіус кривизни. Розміри мають бути більшими в 10–20 разів від розміру частки. Крім того, циркуляція сировини біля гострих кутів може стати причиною проблем. Тому гості краї мають обмежене використання в ІЛП: по-перше, складна обробка гострого кута форми, по-друге, труднощі при заповненні такої деталі. На додаток, гострі краї є концентраторами напружень, що може стати причиною передчасного виходу прес-форми з ладу, тому для збільшення строку роботи оснащення рекомендується використовувати заокруглені краї. Оскільки частки не можуть групуватись для заповнення занадто малих елементів, існує певне обмеження для радіуса кута або краю, яке становить 0,05 мм, але показник 0,075 мм є більш реалістичним.

Зазвичай, заокруглені краї ідеальні як для зовнішніх (кутів), так і для внутрішніх (жолобів) поверхонь. Якщо є необхідність в складному радіусі, тоді краще використати машинну обробку після спікання, оскільки спікання само по собі тяжіє до притуплення гострих кутів, тому заокруглені краї є природною ознакою матеріалів спікання.

Потрібно зауважити, що матеріали ІЛП, як правило, мають занижену в'язкість та чутливі до концентраторів напружень. А тому слід приділяти особливу увагу радіусам та галтелям з метою пониження напруження концентратора. Тріщини в кутах можуть проявлятися на всіх етапах процесу: лиття, дебайдинг, спікання, а також навіть при наступній термообробці деталей та їх експлуатації. Як можна побачити з рисунка 3.30, фактор концентрації напруження (K) рівномірно зростає поки співвідношення радіус/товщина дорівнює 0,4. Робоче навантаження, яке припадає на кут, дорівнює розрахунковому навантаженню, помноженому на коефіцієнт K . В ідеальному випадку співвідношення радіус/товщина має бути більше 0,5.

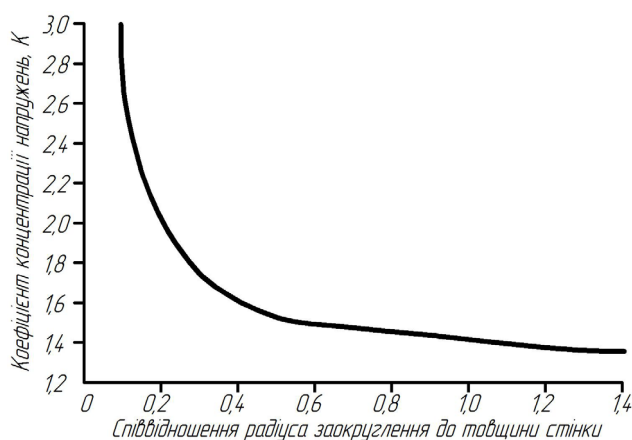


Рисунок 3.30 – Залежність концентрації напружень від співвідношення радіуса заокруглення та товщини стінки

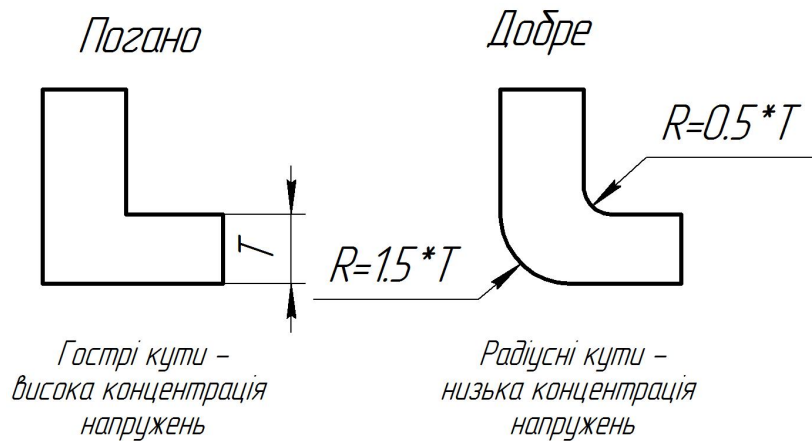


Рисунок 3.31 – Загальні правила конструювання кутів на деталях ІЛП

3.13 Кути ежекції на поверхнях відливка

Ежекція з форми буде простішою при наявності конуса, який знаходиться на одній лінії з напрямком ежекції (як правило, він знаходиться під прямим кутом до шва форми). Кут нахилу обов'язковий для всіх поверхонь, але при збільшенні глибини деталі у прес-формі збільшується ймовірність заклинювання деталі в формі, що призводить до збільшення зусилля ежекції, що, в свою чергу, може стати причиною пошкодження (тріщини або глибокі сліди) викидного поршня.

Використання конуса для полегшення виштовхування відливка є одним із заходів зниження вартості при розробці конструкції ІЛП. В більшості випадків буде достатньо кута нахилу лише в $0,5^\circ$ – 1° ; але в деяких випадках кут нахилу поверхні може становити до 2° . Якщо кут нахилу відсутній, то існує ймовірність виникнення проблеми з виштовхуванням деталі з прес-форми.

Різні види конуса для внутрішнього діаметра показано на рисунку 3.32. Конус з обох сторін потребує менший допуск на діаметр ніж той, що зроблений лише з однієї сторони.



Рисунок 3.32 – Різновиди внутрішнього конуса

3.14 Шорсткість поверхні

Після спікання шорсткість поверхні виробів із сировини Catamold® залежить від розміру порошкових гранул і самого порошку. Застосування цієї сировини дозволяє одержати вироби з гладкою поверхнею. Вироби з нержавіючих сталей із щільністю близько 99% від теоретичного значення можуть бути відполіровані. Деталі з низьколегованих сталей легко піддаються «воронінню», а також хромуванню або нікелюванню.

Таблиця 3.5 – Шорсткість поверхні виробів, отриманих з матеріалів Catamold®

Сировина	Catamold® FN08	Catamold®316LG
Параметр шорсткості		
K	9.2 мкм	10.4 мкм
R	1.4 мкм	1.6 мкм

3.15 Приклади деталей для виробництва ІЛП

На рисунку 3.33 показано декілька можливих поєднань геометричних особливостей, які допоможуть оцінити можливість використання складної форми в інжекційному литті. На цьому прикладі показані отвори, штифти, ребра, гнізда, пази, важелі тощо.

Успішна конструкція деталі, ІЛП, має допускати не критичне розміщення шва форми, відмітин системи штовхачів та ливників. Дуже часто ливник розташований на шві форми, тому ці дві відмітини присутні одночасно. В багатьох випадках вони розташовані на ділянках, які не мають функціонального значення. Шви форми можуть бути розташовані вздовж країв компонента, причому вони будуть майже непомітні.

На рисунку 3.34 показана ймовірна ситуація, при якій шов форми розташований на краю. В процесі розробки конструкції розробник може спрогнозувати розміщення цих недоліків в тих зонах, в яких вони не призводять до погіршення функціональності та естетичності. Наприклад, на рисунку 3.35 показано, що ливники на корпусі для годинника розташовані під механізмом (ситуація, коли недолік на кінцевому продукті не помітний).

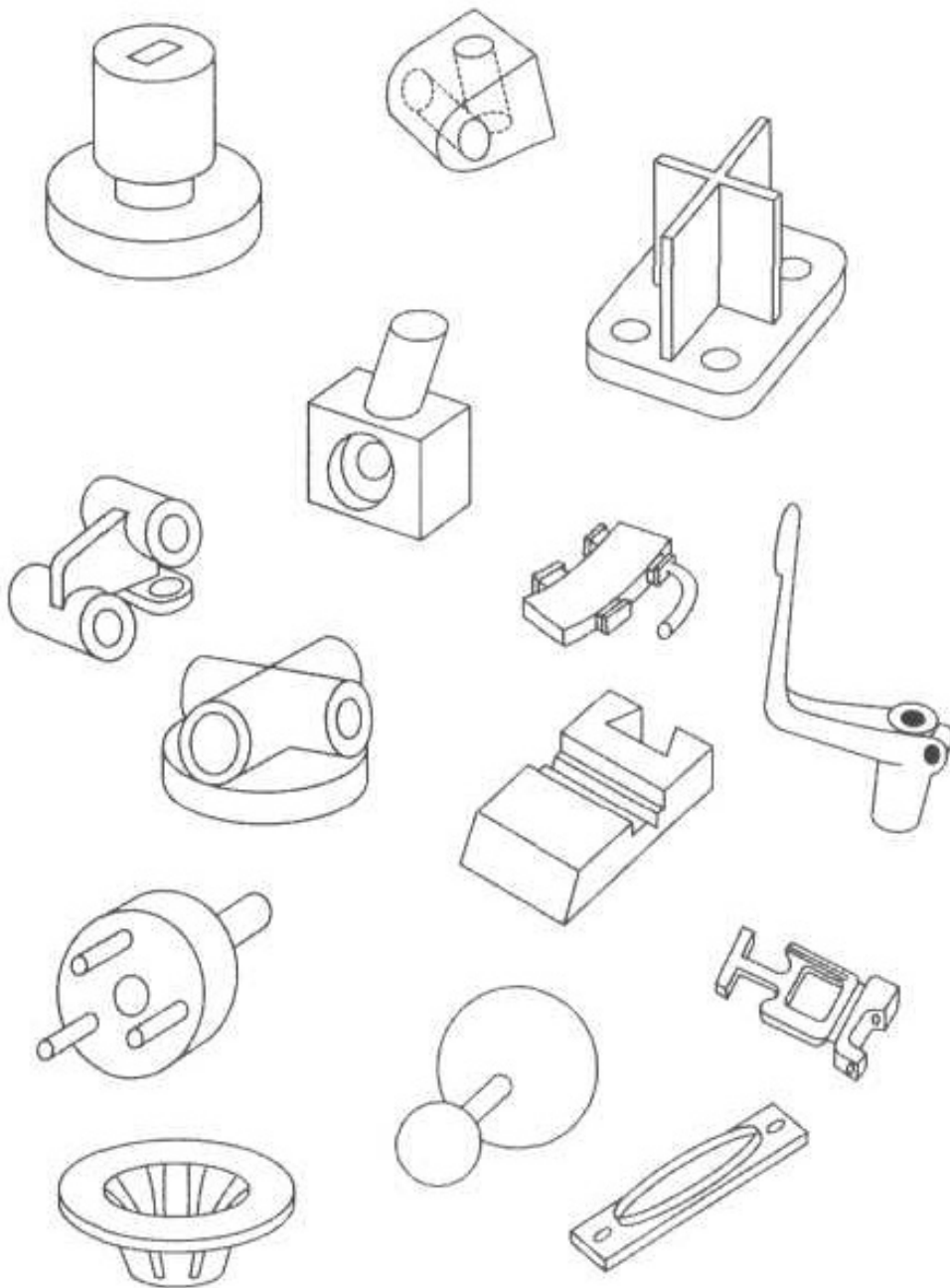


Рисунок 3.33 – Ескізи деяких геометричних форм та поєднань властивостей, можливих при використанні ІЛП

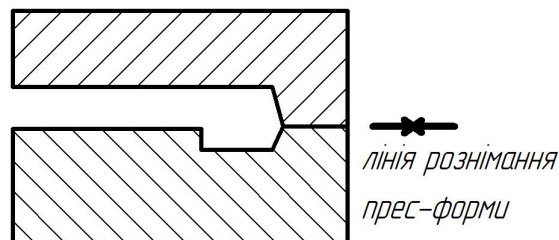


Рисунок 3.34 – Типова схема розміщення лінії рознімання для компонентів ІЛП

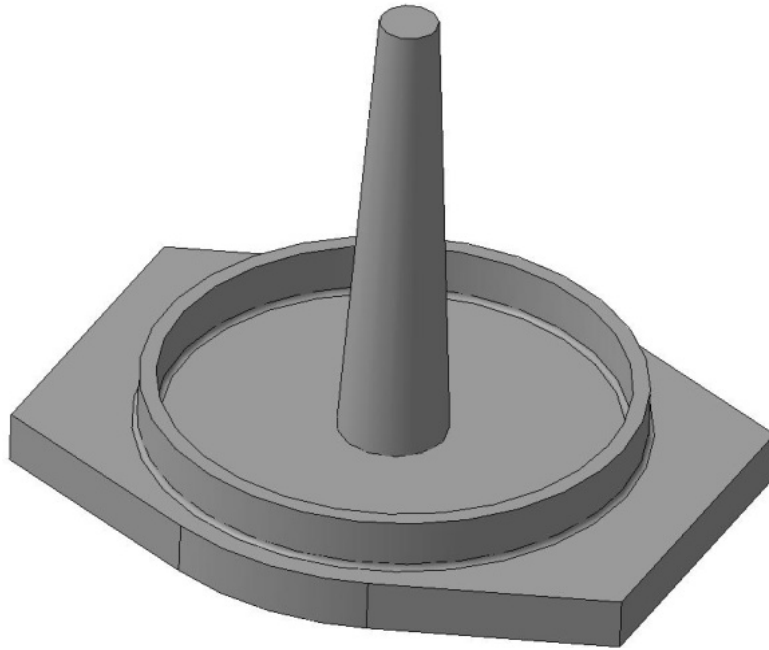


Рисунок 3.35 – Приклад розміщення ливникового каналу в некритичній ділянці

Доступна велика кількість матеріалів у вигляді мілкового порошку, що їх можна успішно використовувати для ІПП. На основі ключових функціональних характеристик сучасні матеріали можна розподілити за категоріями:

- біологічно сумісні (нержавіюча сталь, кобальт-хром, титан);
- корозійностійкі (нержавіюча сталь, титанові сплави, нікель, кобальт-хром);
- електропровідні (кварц, алюміній);
- здатні до накопичення електронного заряду (залізо-нікель, вольфрам-мідь, Ковар, Інвар);
- теплопровідні (алюміній, вольфрам-мідь, молібден-мідь, нітрид алюмінію);
- з високою густиною (важкі сплави вольфраму);
- жаростійкі (карбід кремнію, нітрид кремнію, алюміній, суперсплави, вольфрам, молібден, тантал, титан);
- магнетики (залізо, залізо-нікель, залізо-кремній);
- конструкційні (низьколеговані сплави сталі, нержавіюча сталь, інструментальна сталь);
- зносостійкі (цементовані карбіди, інструментальна сталь, карбід кремнію, нітрид кремнію, алюміній, цирконій).

В таблиці 3.6 наведена ключова інформація про геометричні та технічні характеристики ІПП.

Таблиця 3.6 – Основні характеристики ІЛП

Характеристика	Поточний діапазон властивостей або характеристик
Загальна категоризація	Формовані, окремі, тривимірні компоненти
Обсяги виробництва	Від 5000 до 100 000 000 шт. на рік
Найменша вага	Менше 1 г, траплялись приклади з вагою 0,003°г
Найбільша вага	До 200 г, траплялись приклади з вагою до 1 кг
Технічні вимоги	Від 10 до 100 вимог, типова кількість вимог – 40, траплялись приклади до 130 вимог
Складність форми	Успішно працює з вирізами, отворами, глухими отворами та деталями складної форми
Коефіцієнт еліптичності	Довгі та тонкі деталі, звичайні товсті та тонкі, товщина стінки обмежена
Найменша товщина стінки	Зазвичай до 1 мм, в особливих випадках до 0,1 мм
Найбільша товщина стінки	Зазвичай до 25 мм, траплялись приклади 125°мм
Співвідношення розмірів товстий–тонкий	Типове значення – 8, але може змінюватись від 1 до 70
Матеріали	Феросплави, окиси, вогнетривка кераміка або жорсткі метали
Рівень щільності	Теоретично 96–100% від щільності литого матеріалу
Пористість	Можлива, але не бажана
Строк дії форми	50 тис. штук для абразивів, 500 тис. штук для сталей
Виробнича частота	Від декількох до 100 штук за хвилину
Виробнича вартість	Середні, економія за рахунок зменшення обсягу механічної обробки
Кінцеві властивості	Конкурентоспроможні
Типові допуски	Типово близько 0,3% від розміру
Характер поверхні	Гладенька, але не дзеркальна

3.16 Концепція показника промислових зразків

Розуміння зв'язку між властивостями матеріалу, геометрією, економікою та вибором процесу лежить в основі поняття «розробка». Успіх ІЛП залежить від оцінки можливостей процесу та впевненості в тому, що поєднання властивостей компонента знаходиться в межах цих можливостей. Основні переваги і властивості процесу ІЛП наведені нижче:

- менші форми порівняно з деталями, отримуваними литтям (розміри, маса та товщина стінки);
- досягнення, в процесі ІЛП, кінцевої форми компонентів, які погано піддаються машинній обробці;
- можливість отримання криволінійних поверхонь, які, зазвичай, потребують машинної обробки по декількох осях;
- менша шорсткість поверхонь порівняно з традиційними технологіями;
- можливість поєднання декількох деталей різної форми в одну;
- можливість отримувати тонкі та глухі отвори, ребра, виступи, різьбу, написи.

Для деяких комбінацій геометрія – характеристика, вибір критерію оцінювання дуже простий в той час, як використання інших процесів вимагає його синтезу. При прийнятті рішення слід оцінити проблеми та визначити домінантні фактори. Наприклад, при виборі матеріалу дуже часто домінуючими є лише декілька критеріїв. Як критерій оцінювання застосовують показник промислових зразків. Цей показник базується на групі домінантних властивостей конструкції і був вперше застосований для аерокосмічних матеріалів.

Як приклад використання концепції показника промислових зразків здійснимо вибір матеріалу для точних вимірювальних інструментів. Припустимо, що прилад має зберігати просторову стабільність на мікроскопічному рівні при врахуванні температури навколишнього середовища та зміні внутрішніх напружень. Для протидії зміні напружень потрібна висока стійкість або високий модуль пружності, тоді як коефіцієнт низького термічного розширення мінімізує просторові зміни температурного характеру. Зрештою, велика теплопровідність забезпечить теплову рівновагу з місцевими циклами нагрівання та охолодження. Тому найвдаліший матеріал має мати високу теплопровідність k , низький коефіцієнт термічного розширення α та високу жорсткість, яка визначається модулем пружності E

$$I = \frac{Ek}{\alpha}$$

Варто зауважити, що конструкція буде більш досконалою тоді, коли ці три фактори будуть якомога більш наближені до ідеального значення. При цьому показник I дає підставу вважати, що ідеальним матеріалом буде діамант (якщо нехтувати ціною). Якщо ціна буде виступати як домінанта, то іншим варіантом буде кремній, а якщо до уваги буде взято виробництво (кінцева вартість, а не вартість матеріалу), то найкращим матеріалом виявиться сплав нікелю та заліза – інвар (Fe-36Ni). Дійсно, компоненти ІЛП, виготовлені з інвару, дуже широко використовуються в виробництві мікроелектронних інструментів.

Більш того, геометричні характеристики можна згрупувати та розділити за категоріями, але наприкінці виробничого процесу їх часто визначають після завершення конструювання. На цій стадії домінують вартісні фактори. Проте якщо для виробництва обрано процес ІЛП, то деякі зміни можуть значно зменшити витрати та покращити поєднання конструкції й процесу. На жаль, якщо ми хочемо використати всі переваги ІЛП, концепція показника промислових зразків має брати до уваги фактори, пов'язані з литтям, що значно ускладнює визначення показника промислових зразків. Звідси випливає, що кінцевий показник якості може містити властивості матеріалу, якості процесу та економію компонента.

4 ОБЛАДНАННЯ, ОСНАЩЕННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Машини для лиття під тиском

Переробка сировини в певну форму відбувається в машині для лиття. Для кожного компонента створюється форма з розмірами, які враховують величину усадки матеріалу, яка виникає під час спікання. Під час виробництва сировина (компаунд) нагрівається для пом'якшення полімеру, після чого вона переміщується в порожнину форми. При заповненні форми суміш твердих часток та розтопленого полімеру за консистенцією схожа на зубну пасту. Після заповнення прес-форми сировина охолоджується з метою збереження потрібної форми. Охолоджений твердий компонент виймається з машини, і цикл лиття повторюється.

Машини, що їх зазвичай використовують в МІМ-технології, за суттю схожі на машини для лиття пластмас – термопластавтомати (ТПА). Відмінностями ливарних машин, що використовуються в МІМ-технології, є зносостійкість та геометрія шнека. Ці особливості залежать від початкової сировини.

Для вибору ТПА необхідно точно знати технологічні властивості сировини, об'єм упорскування, зусилля запирання, механізм інжекції, механізм закріплення форми і багато інших факторів. ТПА мають бути обладнані функцією контролю роботи машини, оснащені новітнім комп'ютером і найсучаснішим програмним забезпеченням, що спрощує функцію контролю технологічного процесу і роботу оператора. Кожна фаза процесу лиття під тиском впливає на параметри виробу і має контролюватись. Користуються великим попитом термопластавтомати таких фірм: ARBURG, ENGEL, Sodick Co (рис. 4.1).

Крім ТПА ці фірми виготовляють додаткове оснащення для автоматизації технологічного процесу – лінійні роботи, комплекти приладдя для захоплення виробів різної конфігурації, системи транспортування, безпеки, проектування та виготовлення прес-форм; здійснюють навчання операторів; впроваджують також зв'язок через Інтернет, що дозволяє оперативно допомогти виробнику у випадку аварії або інших неполадок, складних для визначення.



Модель термопластавтомата фірми ENGEL



Модель термопластавтомата компанії ARBURG



Електрична інжекційно-литтєва машини серії Turanl компанії Sodic

Рисунок 4.1 – Термопластавтомати для інжекційного лиття порошку

Процес ІЛП – це ефективна промислова технологія для виробництва деталей у великому обсязі. Така технологія, втім, вимагає автоматизації процесу для збільшення ефективності. Ринок пропонує великий вибір автоматичних систем для переміщення та утримання деталей. Існують два основних види таких систем: автоматичний маніпулятор і перевантажувальний пристрій XYZ. Автоматичні маніпулятори (рука робота), показані на рисунку 4.2, – найбільш універсальні системи, вони пропонують насправді необмежену свободу руху, охоплюючи й обертання. Але перевантажувальний пристрій XYZ часто характеризується більшими швидкістю та точністю в позиціонуванні деталі. Автоматичні

маніпулятори більше підходять для знімання великих деталей з термопластавтомата, а перевантажувальний пристрій XYZ застосовується для розміщення деталей на підкладках перед дебайдингом.

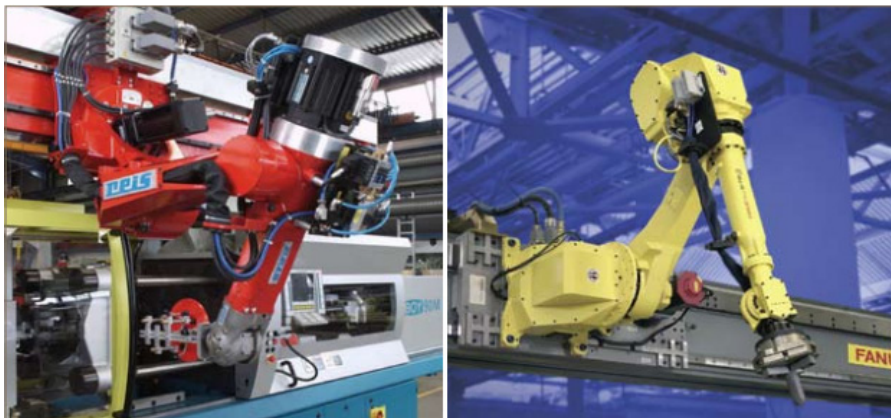


Рисунок 4.2 – Роботизовані маніпулятори: вбудований у термопластавтомат (зліва), підвісний маніпулятор (праворуч)

Залежно від міцності зеленої деталі, системи зв'язувальної речовини і складності форми деталі поводитись із «зеленою» деталлю потрібно дуже акуратно. Необхідно це враховувати при виборі автоматичної системи для переміщення «зелених» деталей. Крім типу системи позиціонування, важливо вибрати тип захоплення. Пристрій захоплення має надійно взяти та утримувати деталі й встановити їх в потрібній позиції. Механізм захоплення (рис. 4.3) має бути спеціально сконструйований для кожної деталі для зниження ризику пошкодження відливка. І тому найкращим є використання вакууму. Але такий тип захоплення вимагає плоскої поверхні для розташування присосок. Також відливки ІЛП значно важчі, ніж відливки ненаповненого полімеру, а тому вакуумні присоски не завжди працюють достатньо надійно. Магнітні захоплювачі також застосовуються для феромагнітних матеріалів. І загалом мають більші переваги, ніж вакуумні системи.

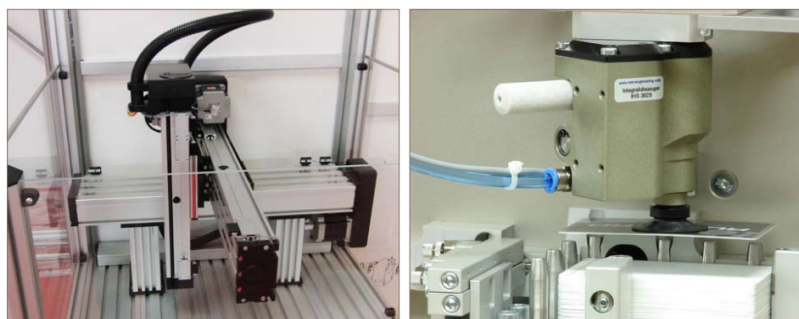


Рисунок 4.3 – Трикоординатний перевантажувальний пристрій (зліва) та вакуумний захоплювач (справа)

4.2 Піч для видалення зв'язувальної речовини

Очевидно, що одним або декількома ТПА з прес-формами обладнання для ЛП-технології не вичерпується, оскільки необхідно видалити з відливка зв'язувальну речовину а потім провести спікання виробу. 80% від вартості комплекту обладнання складають спеціальні печі для видалення зв'язувальної речовини і подальшого спікання. Якщо в термопластавтоматі проводиться формування конфігурації виробів з урахуванням наступного усадження, то в печах виконуються процеси формування готової деталі.

На першій стадії дебайдингу зв'язувальна речовина має бути видалена з відливка без зміни геометрії деталі та її цілісності. Залежно від типу речовини та її характеристик обирається відповідне обладнання для первинного видалення. На рисунку 4.4 показано піч для видалення зв'язувальної речовини з деталей у рідкому середовищі.



Рисунок 4.4 – Печі для видалення зв'язувальної речовини в рідкому середовищі

Видалення зв'язувальної речовини на основі поліацеталю (наприклад Catamold фірма BASF) проводять в парах азотної кислоти, для цього використовують печі каталітичного дебайдингу (рис. 4.6).

На рисунку 4.5 показано схему видалення зв'язувальної речовини (дебайдинг). Вироби розміщуються в печі на спеціальних пластинах. Щоб забезпечити ретельне змішування газової суміші, піч обладнана вентилятором. Невелика кількість каталізатора дозовано подається в піч за допомогою насоса, а потім каталізатор випаровується в керамічній або металевій чаші. Як транспортувальний газ використовується азот. Для лабораторної печі об'ємом 50 л потрібно близько 40 г/год азотної кислоти та 500 л/год азоту.

Деякі виробники поставляють печі об'ємом до 430 літрів. Для видалення зв'язувальної речовини використовують печі циклічної дії або тунельні печі. В першому випадку це обладнання являє собою об'ємну

камеру з герметичними дверима. Процес видалення зв'язувальної речовини дозволяє також використовувати тунельні печі для безперервної обробки, що є звичайною практикою при інжекційному литті металевих виробів із застосуванням продуктів Catamold®.

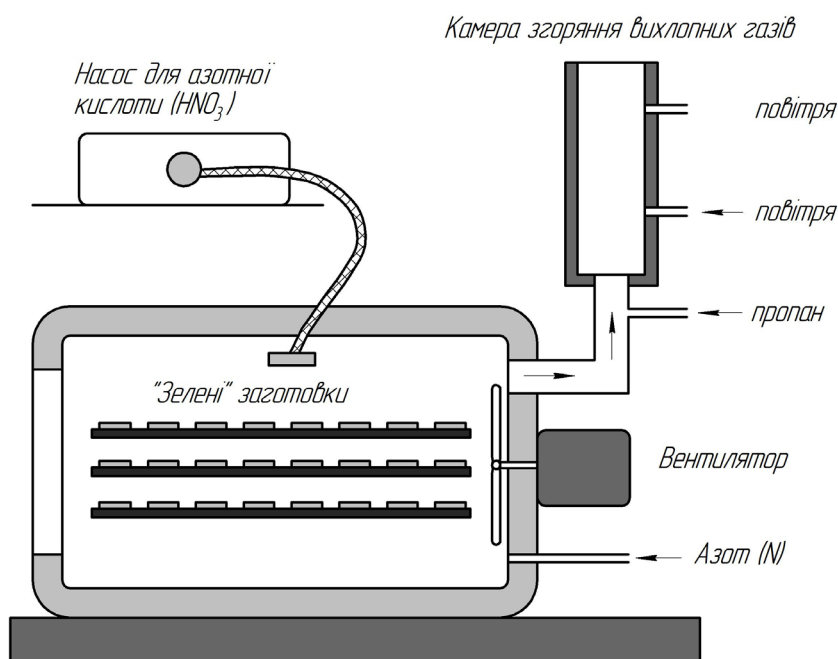


Рисунок 4.5 – Схема видалення зв'язувальної речовини

Процес видалення зв'язувальної речовини починається з циклу продування тривалістю одну годину, під час якого в печі встановлюється інертне середовище і одночасно відбувається нагрівання виробів і самої печі до 110 °С. Занадто тривалий час обробки не впливає негативно на якість виробів, і навпаки, занадто короткий час приводить до появи браку. Тому рекомендується починати з тривалого часу, потім зменшувати час видалення зв'язувальної речовини доти, поки не почне збільшуватись вага виробу, а потім повернутися до попередньої величини встановленого часу видалення зв'язувальної речовини.

Час обробки для повністю завантаженої печі може збільшуватися на 50% порівняно з експериментальними завантаженнями, особливо це стосується дрібних деталей.

Гази, що утворюються в процесі обробки, утилізуються в камері згоряння у два етапи. Під час першої стадії хімічно активний газ спалюється при дефіциті кисню в пропановому полум'ї. Надлишкова азотна кислота й закис азоту, що утворився з азотної кислоти, переважно відновлюються до азоту, тому що формальдегід має сильні відновні властивості. Під час другої стадії відбувається повне згоряння в умовах додаткової подачі повітря.



Рисунок 4.6 – Піч для видалення зв'язувальної речовини фірми Elnik Systems (США)

4.3 Печі для спікання

На ранніх етапах розвитку технології ІЛП, деталі проходили операцію попереднього спікання після термічного дебайдингу при температурі близько 1000 °С. Після даної операції деталі були достатньо міцними для їх транспортування в іншу піч і подальшого спікання при більш високій температурі. На сьогоднішній день тільки невелика кількість виробників використовує подвійне спікання. Як правило, такий процес використовується для спеціальних сплавів та нержавіючих сталей з низьким рівнем вуглецю. Переважна більшість печей спікання для ІЛП оснащена пастками для зв'язувальної речовини та спеціальною системою продування деталей робочим газом. Це дозволяє сумістити операції термічного видалення речовини та кінцевого спікання без зміни хімічного складу готових виробів. Такі печі значно скорочують цикл спікання та знижують затрати на електроенергію. Залежно від типу матеріалу, що підлягає спіканню, використовуються печі з відповідними характеристиками. Так, наприклад, для спікання нержавіючих сплавів, титану, легованих сплавів використовують печі, оснащені ретортами зі сплаву молібдену (рис. 4.7).

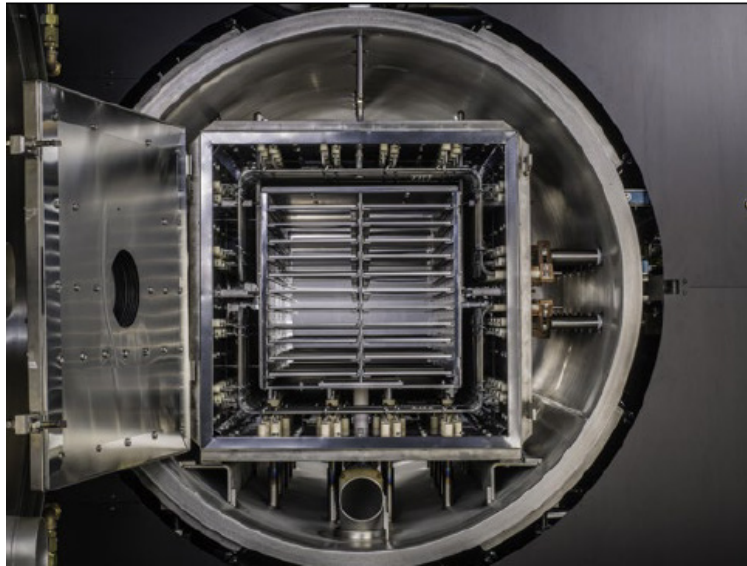


Рисунок 4.7 – Реторта, виготовлена з молібденового сплаву (піч MIM3045, Elnik Systems, США)

Керамічні матеріали спікаються при значно вищих температурах, ніж сталь (близько 1700 °С) в присутності кисню. Тому для спікання даних матеріалів використовують печі, оснащені графітовими ретортами та нагрівачами (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Вакуумна піч серії GraphMIM 3045, Elnik Systems, оснащена графітовою ретортою

Для технології ІЛП можуть використовуватись як печі, які пристосовані для обробки однієї партії деталей за один цикл, так і печі безперервної дії. На рис. 4.9 схематично показано принцип роботи та будову печі безперервної дії.

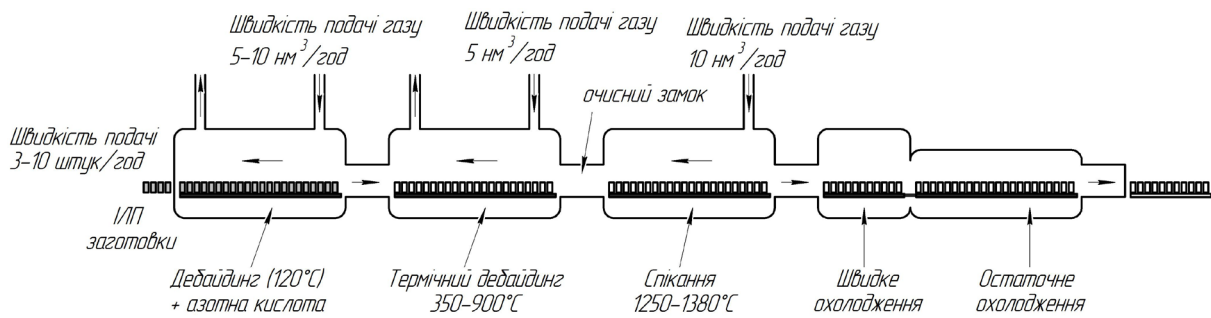


Рисунок 4.9 – Схематична будова печі безперервної дії для технології ІЛП (тип первинного дебайдингу: каталітичний)

Як правило, деталі ІЛП спікаються в печах з одним циклом. Це, зазвичай, вакуумні печі з холодними стінками з об'ємом від 50 до 500 літрів, в яких елементи нагріву, захисні екрани та кріплення зроблені з молібдену або графіту. Один цикл роботи, залежно від об'єму печі, може тривати від 14 до 24 годин. Натомість конвеєрні печі набагато продуктивніші та потребують менше електроенергії на одиницю продукції. Також такі печі мають перевагу в більш точному розподілу температур в робочій зоні нагріву. Це пов'язано з об'ємом робочої зони та розташуванням деталей. Так, наприклад, у випадку з печами циклічної дії точність спікання залежить від чотирьох факторів: атмосфери, часу циклу, температури та розташування деталей. Та чим більший розмір реторти для печі циклічної дії, тим далі розташовані деталі від нагрівачів і тим більший перепад температур всередині печі. В печі безперервної дії деталі розташовані на конвеєрі на одній лінії, а тому перепад температур значно менший, що відіграє позитивну роль у розмірній стабільності спечених деталей. З точки зору продуктивності, конвеєрні печі мають найбільшу перевагу. Так, навіть мала за розмірами піч безперервної дії може випускати до 65000 шт. деталей за добу. Натомість піч циклічної дії зі схожою енергетичною потужністю здатна випускати тільки близько 10000^{шт.} деталей за добу. Як показує практика, це знижує виробничі витрати у випадку з конвеєрною піччю на 30%.

4.4 Обладнання для отримання робочих газів процесів дебайдингу та спікання

Як робоча атмосфера для спікання в технології порошкового інжекційного лиття можуть використовуватись інертні гази (азот або аргон) та такі активні гази, як водень. Існують декілька способів отримання інертних газів з повітря залежно від необхідних об'ємів та чистоти. В промисловості, як правило, добувають інертні гази за допомогою криогенного способу або методом коротко-циклової адсорбції.

Кріогенне розділення повітря

Атмосферне осушене повітря являє собою суміш, яка містить (за

обсягом) кисень 21% , азот 78%, аргон 0,9% та інші інертні гази, вуглекислий газ, водяна пара та ін. Для отримання технічно чистих атмосферних газів повітря піддають глибокому охолодженню і зріджують (температура кипіння рідкого повітря при атмосферному тиску -194,5 °С.)

Процес виглядає так: повітря засмоктується багатоступеневим компресором, проходить спочатку через повітряний фільтр, де очищається від пилу, потім вологоосушувач, де відділяється сконденсована при стисненні повітря вода, і водяний холодильник, який охолоджує повітря, що забирає утворене при стисканні тепло. Для поглинання вуглекислоти з повітря вмикається апарат – декарбонізатор, що заповнюється водним розчином їдкого натру. Повне видалення вологи та вуглекислоти з повітря має істотне значення, оскільки, замерзаючи при низьких температурах, вода і вуглекислота забивають трубопроводи і доводиться зупиняти установку для відтавання та продування.

Пройшовши осушувальну батарею, стиснене повітря надходить в так званий детандер, де відбувається різке розширення та, відповідно, його охолодження і зріджування. Отримане рідке повітря піддають дробовій перегонці або ректифікації в ректифікаційних колонах. При поступовому випаровуванні рідкого повітря спочатку випаровується переважно азот, а залишки рідини все більше збагачуються киснем. Повторюючи подібний процес багаторазово на ректифікаційних тарілках колон, отримують рідкий кисень, азот і аргон потрібної чистоти. Можливість успішної ректифікації ґрунтується на досить значній різниці (близько 13 °С) температур кипіння рідких азоту (-196 °С) та кисню (-183 °С). Дещо складніше відокремити аргон від кисню (-185 °С). Далі розділені гази відводяться для накопичення в спеціальні криогенні ємності, з яких надходять для власного використання або на продаж.

Криогенний спосіб поділу повітря дозволяє отримати гази найвищої якості – кисень до 99,9%, аргон і азот до 99,9995%. Продуктивність може становити до 70000 м³/год.

Метод коротко-циклової адсорбції (КЦА)

Адсорбційний спосіб використовується для отримання азоту і кисню, оскільки він забезпечує при низькій собівартості відмінну якість.

Принцип отримання азоту за допомогою КЦА простий, але ефективний. Повітря подається в адсорбер – вуглецеві молекулярні сита при підвищеному тиску і температурі зовнішнього середовища. В ході процесу кисень (O₂) поглинається адсорбентом, в той час як азот (N₂) проходить через апарат. Адсорбент поглинає газ до стану рівноваги між адсорбцією і десорбцією, після чого адсорбент необхідно регенерувати, тобто видалити з поверхні адсорбенту поглинені компоненти. Це можна зробити або шляхом підвищення температури, або шляхом скидання тиску. Зазвичай в коротко-цикловій адсорбції використовують регенерацію за допомогою скидання тиску. Невелика тривалість циклів адсорбції і регенерації, зазвичай в межах декількох хвилин, і дала власне назву

процесу – «коротко-циклова адсорбція». Чистота азоту за цією технологією 99,999%, а продуктивність таких станцій може становити від 10 до 6000 м³/год.

Отримання водню

Існують дві основні схеми отримання водню.

Електролізні заводи

Для невеликих споживачів водню пропонуються електролізери продуктивністю від 0,5 до 1000 м³/год. Виробництво технічного водню шляхом електролізу охоплює основні послідовно реалізовані стадії: електролітичне розкладання води на водень і кисень $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$; каталітичне очищення отриманого водню від кисню; його стиснення в поршневих компресорах; адсорбційне осушення; заповнення в балони або контейнери.

Паровий риформінг

Використовуючи джерело вуглеводнів і процес риформінгу, можна зробити водень в малих, середніх, великих обсягах і тієї якості, яке потрібно споживачеві. Зазвичай пропонуються установки від 100 до 5000 м³/год, нафтопереробні заводи використовують установки, продуктивність яких більше 20000 м³ / год. Процес виглядає так: вуглеводи (метанол, пропан, природний газ, нафта), які використовуються як паливо, змішуються з паром, нагріваються до 480 °С і розділяються в реакторі, використовуючи заснований на нікелі каталізатор, за простою формулою



Вміст водню в подальшому збільшують на залізному каталізаторі, відбувається реакція CO і H₂O, в результаті отримуємо H₂ і CO₂. Подальші ступені процесу видаляють конденсат, зменшується температура і тиск, а далі водень очищується в адсорбційній установці. Після неї водень має чистоту 99,9995 і тиск 15–30 бар.

4.5 Пластини для розташування виробів у печі

Головне завдання підтримувальних пластин під час спікання полягає в тому, що вони не мають перешкоджати максимальній усадці. Тип пластин для розташування виробів у печі для видалення зв'язувальної речовини залежить від геометрії виробів. Пластини мають бути досить гладкими й не взаємодіяти з виробом. Відстань між виробами має забезпечувати вільний газообмін. Довгі виступаючі елементи виробу, що зависають у просторі, схильні до згинання, тому необхідно використовувати підтримувальні пластини (рис. 4.10) Якщо не вдається уникнути деформації виробу, то під час проектування прес-форми необхідно застосувати перемички, ребра або

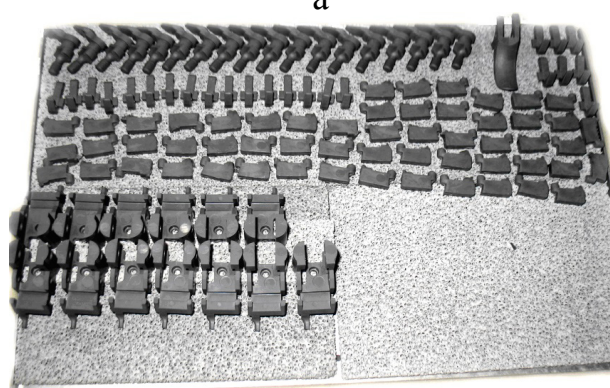
інші підтримувальні елементи, які зможуть вирішити цю проблему. Однак тоді вводиться механічна обробка для видалення зайвих елементів. Час видалення зв'язувальної речовини можна скоротити, якщо помістити вироби на перфорований лист або на дротяну сітку і в такий спосіб забезпечити вільний газообмін.



а



б



в



г

Рисунок 4.10 – Розміщення виробів на керамічній перфорованій пластині:
 а – молібдено-цирконієві пластини; б – розміщення деталі з елементами,
 що звисають; в – розміщення деталей на пластині;
 г – підготовлені деталі для випалювання

Температура спікання, що використовується в технологіях порошкової металургії і МІМ, як правило, близька до точки плавлення матеріалів, які спікаються. Для запобігання небажаних реакцій між деталлю і металевою полицею застосовується інертна кераміка. Для безперервних печей підкладка складається з цільних керамічних плиток, в той же час в печах на одну партію використовуються піддони з тугоплавких сплавів і кераміки як ізолювальної прошарку. У печах з графітовим муфелем піддони з деталями зазвичай також складаються з графіту. Прямий контакт графіту з більшістю металевих сплавів при температурі спікання веде до утворення рідкої фази в точці контакту. У печах з муфелем з тугоплавких матеріалів застосовуються підкладки з молібденових сплавів. Оскільки молібден реагує з металевими деталями при спіканні, слід застосовувати ізолювальний бар'єр у вигляді інертної кераміки.

Найчастіше при спіканні як ізолятор застосовується кераміка на основі оксиду алюмінію, за винятком спікання титанових сплавів. При

температурі 900 °С оксид алюмінію піддається фазовим перетворенням, тому швидке охолодження в даному діапазоні температур призводить до виникнення тріщин в кераміці. На практиці частіше застосовують оксид алюмінію чистотою 91% як менш дорогий і більш поширений матеріал. Також популярним є застосування підкладок з оксиду алюмінію з додаванням цирконію. Такий матеріал має високу міцність, і в ньому не виникають небезпечні напруги під час швидкого охолодження.

Титан і його сплави при спіканні розміщуються на підкладках зі стабілізованого оксиду цирконію. Оскільки титан має схильність до утворення хімічних сполук з киснем і більшістю інших елементів, хімічна чистота матеріалу підкладки дуже важлива для запобігання абсорбції кисню з підкладки. Найкращим вибором для титану є цирконій, стабілізований оксидом ітрію. Також застосовують підкладки з цирконію, стабілізованого кальцієм, але ймовірність сторонніх включень в кальції набагато вища. Підкладки з чистого ітрію дорожчі і рідко зустрічаються. Керамічні матеріали, як правило, містять такі небажані домішки, як Na_2O ; SiO_2 ; FeO ; Fe_2O_3 . Дані домішки насичують деталі зі сплавів титану киснем при спіканні і після процесу окислюються заново.

Протягом спікання при високій температурі деталі МІМ мають низьку міцність і сили гравітації досить, щоб деформувати деталі. Тому більшість конструкторів намагаються спроектувати деталь з плоскою поверхнею, яка використовується як основа для укладання деталей на кераміці. Коли деталь не має плоскої поверхні можливі три варіанти вирішення проблеми.

1. Додати в деталь додаткову підпорку і відливати разом з деталлю. Після спікання даний приплив необхідно видалити механічною обробкою. Недолік: підвищена витрата матеріалу і додаткові операції механічної обробки, що збільшує вартість деталі.

2. Виготовлення так званих активних підкладок з матеріалу з такою ж усадкою, як і сама деталь. Такі підкладки можуть виготовлятися з відходів ливників із даного матеріалу. Недоліком такого способу є необхідність виготовлення додаткового оснащення для лиття підкладок.

3. Виготовлення кераміки спеціальної форми, яка повторює форму деталі, що спікається. Недоліком даного способу є підвищена вартість даної кераміки. Такий спосіб найчастіше виправданий при масовому виготовленні деталей.

Дана кераміка може бути виготовлена одним з трьох способів.

1. Необхідний контур кераміки може бути отриманий механічним шляхом. Даний спосіб підходить для виготовлення кераміки в кількості декількох штук. При збільшенні кількості підкладок у зв'язку з високою твердістю кераміки такий метод стає дуже витратним.

2. Інший спосіб полягає в механічній обробці кераміки низької твердості, покриттям контуру підкладки шаром тонкодисперсного керамічного порошку і спікання до отримання потрібної твердості. Такий спосіб дешевший ніж попередній.

3. Третій спосіб полягає у виготовленні форми, відливанні суспензії кераміки в форму і спіканні до потрібного розміру. Даний метод використовують при виготовленні підкладок у великій кількості.

4.6 Базові засади конструювання оснащення

Прес-форма для ІЛП схожа на ту, що використовується в інжекційному литті пластику, але формувальні порожнини прес-форм для ІЛП мають більший розмір через усадження при спіканні. Як правило, кількість гнізд у прес-формі невелика, це пов'язано з тим, що сировина ІЛП має високу в'язкість.

Конструкція форми та технологічний процес залежать один від одного. Конструювання прес-форми набуло високого розвитку в галузі лиття пластмас. ІЛП часто використовує ті ж самі принципи, що і для лиття пластмас. Проте слід брати до уваги ряд особливостей, що відрізняють фідсток для ІЛП від полімерних сумішей для інжекційного лиття пластмас.

Фідсток – це суміш полімеру (зв'язувальної речовини) та металевого порошку, а тому слід враховувати низку особливостей, притаманних даній суміші:

а) у зв'язку з великою кількістю металу (до 60% від об'єму) фідсток, порівняно з полімером, має низьку теплоємність, значну теплопровідність, а також високу в'язкість. Ці фактори обумовлюють швидку втрату фідстоком температури при вприскуванні матеріалу у прес-форму, що, у свою чергу, збільшує в'язкість матеріалу та знижує наповненість форми деталі. Тому при виборі місцезнаходження точки впорскування необхідно, щоб довжина потоку була рівномірною по всій деталі, а час впорскування – мінімальним;

б) також у зв'язку з присутністю металевого порошку коефіцієнт стиску для фідстоку набагато менший, ніж для полімеру. Отже, при впорскуванні суміші в деталь потік розширюється менше, що призводить до погіршення змочування стінок та утворення вільної течії. Тому в деталі перед точкою впорскування бажано розміщати стінку або знак для запобігання утворенню вільної течії;

в) під час впорскування фідстоку при великих швидкостях зсуву, особливо в точках звуження, суміш має здатність до розщеплення на окремі фракції металу та полімеру. Це призводить не тільки до погіршення шорсткості та зовнішнього вигляду деталей в місцях точок впорскування, але й до нерівномірної усадки деталі. Розщеплення суміші веде до надмірної концентрації металевого порошку на окремих ділянках деталі та, в свою чергу, впливає на нерівномірність спікання та деформацію деталі;

г) оскільки середня температура прес-форм для фідстоку має бути близько 130 °С, деталі після закінчення фази охолодження більш крихкі порівняно з полімером. Цей фактор потребує збільшення кількості штовхачів у прес-формі, а також збільшення кутів нахилу формуючих;

д) однією з поширених проблем при литті деталей за технологією ІЛП є різка нерівномірність розподілу металевих частинок в полімерній матриці деталі після лиття. Така нерівномірність викликана розтягуванням гарячого полімеру при неправильному виштовхуванні деталі з матриці прес-форми. Дані розтяги можуть бути непомітні на відлитих деталях, проте після видалення зв'язувальної речовини під час дебайдингу в місцях розтягу утворюються тріщини. Такі тріщини є непоправним браком. Найбільшою проблемою при виробництві деталей за технологією ІЛП є те, що такі дефекти можуть бути виявлені лише після стадії дебайдингу;

е) однією з причин нерівномірної усадки деталі під час спікання є неоднорідна густина відливої деталі. Внаслідок великої в'язкості суміші під час фази підживлення на окремих ділянках деталі, наближених до точки впорскування, густина відливки більша, ніж у віддалених точках. Під час спікання відливок усаджуються до однорідної густини, отже, деталі з неоднорідною густиною більш схильні до деформації та нестабільності геометричних розмірів.

Одним із важливих параметрів контролю під час лиття є вага відливка. Коливання ваги може спричинити помітні відхилення геометричних розмірів деталі після спікання.

Розташування точки впорскування на деталі може мати вирішальне значення для подальшої усадки деталі при спіканні. Як приклад можна навести нерівномірну усадку прямокутної деталі, показаної на рис. 4.11.

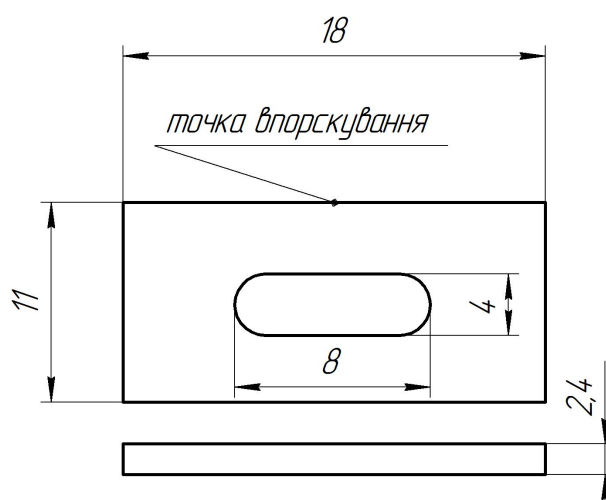


Рисунок 4.11 – Ескіз деталі та розташування точки впорскування

Внаслідок розташування точки впорскування з однієї сторони у відливка виник великий перепад у густині деталі, що призвело до нерівномірної усадки (рис. 4.12) після спікання. Розбіжність у розмірах довжин двох протилежних стінок склала: $18,18 \text{ мм} - 18,05 \text{ мм} = 0,13 \text{ мм}$.

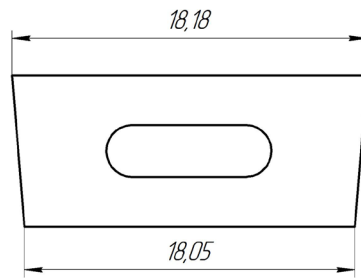
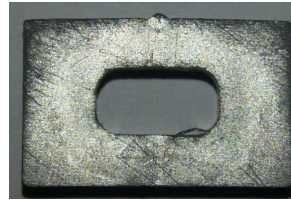


Рисунок 4.12 – Деформація деталі після спікання внаслідок неправильного розташування точки впорскування

На рисунку 4.13 показані фото відливка до та після спікання. На відливку після спікання можна помітити лінію стику двох потоків матеріалу, що виникла під час впорскування фідстоку.



а)



б)

Рисунок 4.13 – Відливок до (а) та після спікання(б)

У таких випадках для запобігання деформації деталей після спікання доцільно використовувати декілька точок впорскування, що урівноважить тиск впорскування по всьому об'єму деталі;

ж) важливим параметром, що впливає на неоднорідність густини відливка та його вагу, є температура стінок формувальної матриці прес-форми. Оскільки теплове розширення полімеру набагато більше порівняно з металом, у однаковому об'ємі при різних температурах міститься різна кількість металевого порошку. Так, наприклад, вага відливка, що був виготовлений з температурою формувальної матриці 140 °С, буде менша, ніж з температурою формувальної матриці 130 °С, що, у свою чергу, призводить до розбіжності у геометричних розмірах після спікання. Отже, важливим параметром для контролю є температура формувальної прес-форми. Проте не достатньо контролювати лише температуру рідини, що циркулює в каналах прес-форми. На температуру прес-форми істотно можуть впливати також такі параметри, як діаметр охолоджувальних каналів, вага прес-форми, температура навколишнього середовища та цикл роботи термопластавтомата. Так, на початку робочої зміни та в кінці температура формувальних поверхонь може відрізнятись, що також впливає на вагу деталі. Для ілюстрації цього факту було проведено дослід, в якому при литті масивної деталі вагою більше 300 г виконувались заміри ваги деталі впродовж робочої зміни.

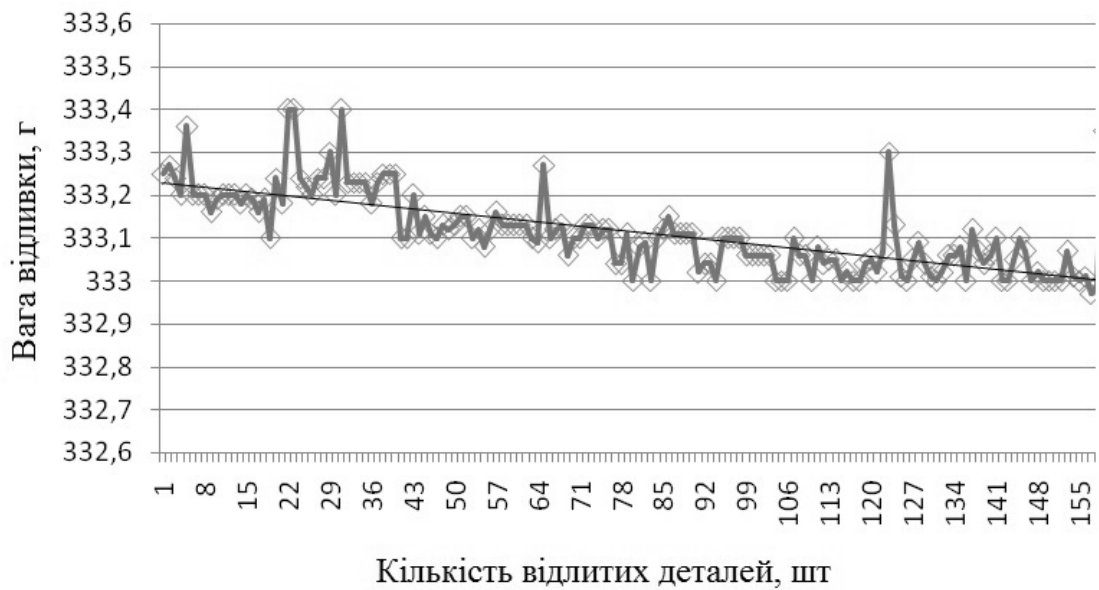


Рисунок 4.14 – Залежність ваги відливка від кількості виготовлених деталей

Всього було відлито 155 деталей. Як показано на рисунку 4.14, вага деталі зменшується з кількістю відлитих деталей. Зменшення ваги пов'язано з нагрівом великогабаритної прес-форми. Особливо таке коливання помітно на важких, об'ємних відливках.

Також нерівномірний розподіл температури по об'єму деталі може

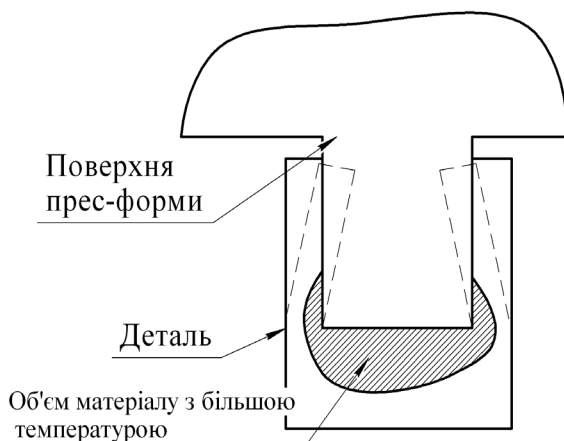


Рисунок 4.15 – Нерівномірний розподіл температури в П-подібних деталях та їх деформація

викликати її деформацію під час спікання. Особливо це помітно на деталях П-подібного профілю та глибоких пазах (рис. 4.15). Деформацію деталей з таким профілем можна помітити на пластмасових деталях. Вона відбувається внаслідок нерівномірного охолодження внутрішньої та зовнішньої стінок. Проте у випадку з технологією ІЛП деталі після лиття деформуються рідко внаслідок низької теплової

усадки. Але зони відливка з більшою температурою мають низьку густину, а тому деформація деталі може проявитися тільки після спікання. Отже, при проектуванні прес-форм слід звернути увагу на рівномірне охолодження усієї поверхні формувальної деталі, особливо в деталях із глибокими пазами;

и) для деталей, виготовлених за технологією ІЛП, необхідно уникати

мість з великою товщиною. Як правило, труднощі можуть виникати в деталях з товщиною перерізу більше 10 мм. Це пов'язано не тільки з ускладненням видалення зв'язувальної речовини, але також з виникненням утягання на поверхні деталі при литті. Проте найбільшою проблемою при литті деталей з великою товщиною є утворення вакуумних порожнин в тілі деталі. Це явище пов'язане з усадженням полімеру після остигання деталі. Як показано на рисунку 4.16, при збільшенні товщини стінок матеріал на поверхні застигає швидше, ніж в центрі деталі. Стінки стають більш жорсткими і подальше усадження відбувається від центра до стінок деталі, тим самим утворюючи вакуумні порожнини.

Таких дефектів можна уникнути розташуванням точки впорскування якнайближче до максимального перерізу деталі, а також збільшенням діаметра точки впорскування;



Рисунок 4.16 – Дефект, що може виникнути в зонах накопичення об'єму матеріалу

к) для виймання деталей складної конфігурації з прес-форми бажано використовувати роботизовані маніпулятори. Це допоможе запобігти небажаній деформації гарячих деталей при падінні. Проте в такому випадку слід передбачити розташування відливка в прес-формі так, щоб забезпечити надійне захоплення деталі маніпулятором.

Деталі простої конфігурації можуть виштовхуватись з прес-форми без використання маніпулятора. Проте в цьому випадку не слід розташувати контр-штовхачі в прес-формі на шляху падіння деталі. Це може призвести до небажаних забоїв на поверхні деталі та зіпсування зовнішнього вигляду деталі;

л) на відміну від інжекційного лиття пластмас при роботі з технологією ІЛП неможливо контролювати геометричні розміри деталі безпосередньо після лиття. Процеси спікання можуть значно вплинути на рівномірність усадки деталі та її геометрію. Для отримання точних розмірів деталі, як правило, необхідно передбачити подальшу доробку формувальної прес-форми для відповідності розмірів деталі після спікання кресленню деталі. А тому доцільно на формувальних поверхнях прес-форми для деталей з точними розмірами нижче 12 квалітету залишати припуск з метою доробки цих поверхонь відповідно до геометрії деталі після спікання.

Для успішного виготовлення деталей за МІМ-технологією насамперед слід усвідомлювати всі її переваги та недоліки. Правильне розуміння причин виникнення відхилень дає змогу спроектувати контрольований технологічний процес з прогнозованим результатом.

Можна виділити такі джерела виникнення відхилень та їх вплив на геометрію деталі після спікання:

1. Матеріал

1.1 Відхилення внаслідок неоднорідності матеріалу у партії.

1.2 Коливання коефіцієнта усадження матеріалу між партіями.

2. Процес інжекційного лиття

2.1 Вплив нестабільної роботи термопласт-автомата на коливання розмірної точності деталі після спікання.

2.2 Вплив параметрів лиття на негомогенність відливка.

2.3 Прес-форма

2.3.1 Деформування деталі під час вилучення відливка з порожнини форми.

2.3.2 Відхилення розміру прес-форми від середини номінального розміру деталі.

2.3.3 Вплив розміщення точки впорскування на нерівномірність густини відливка.

3. Процес видалення зв'язувальної речовини (дебайдинг)

3.1 Просідання деталей під дією сили гравітації внаслідок видалення зв'язувальної речовини.

3.2 Деформація внаслідок вивільнення напружень після лиття.

4. Спікання

4.1 Деформація відливка під дією сили гравітації.

4.2 Відхилення геометричних розмірів унаслідок нерівномірного розподілу температури по об'єму печі.

4.3 Вплив кераміки та молібденових піддонів на деформацію деталей під час спікання.

4.4 Неізотропне зменшення розмірів спеченої деталі внаслідок нерівномірної густини відливка.

Загалом, допуск на лінійний розмір можна розрахувати за такою емпіричною формулою

$$T_l = T_M \cdot X_l \cdot X_d \cdot X_C,$$

де T_M – різниця між мінімальною та максимальною усадкою матеріалу;
 X_l ; X_d ; X_C – коефіцієнти, які характеризують вплив процесів лиття, дебайдингу та спікання на відхилення лінійного розміру після спікання.

Тобто, кожен наступний етап збільшує варіювання кінцевого розміру деталі.

Вплив вищеперерахованих чинників на геометрію спеченої деталі не є рівномірним. Він може коливатися залежно від складності деталі, її форми, ваги та необхідних допусків на лінійні розміри. А тому розглянемо кожен етап процесу більш детально.

Коливання усадки матеріалу між партіями.

У таблиці 4.1 наведені значення коефіцієнтів максимальної та мінімальної усадок для матеріалу Catamold згідно з сертифікатом, наданим виробником. Також, на основі різниці максимальної та мінімальної усадок, було обчислено можливі відхилення для лінійних розмірів у діапазоні від 1 до 150 мм (таблиця 4.2).

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнтів усадки матеріалу Catamold

Максимальна усадка	Мінімальна усадка	Середнє значення	Різниця між макс. та мін. усадками
1,2204	1,2116	1,216	0,0088

Таблиця 4.2 — Розрахунок відхилення розмірів деталі після спікання

Ч.ч.	Розмір у прес-формі, мм	Максимальний розмір, мм	Мінімальний розмір, мм	Різниця, мм	Квалітет допуску, який відповідає даному відхиленню	Процент відхилення від номіналу, %
1	1	0,82	0,83	0,01	7	1,0
2	3	2,46	2,48	0,02	8	0,7
3	6	4,92	4,95	0,03	9	0,5
4	8	6,56	6,60	0,04	10	0,5
5	10	8,19	8,25	0,06	10	0,6
6	12	9,83	9,90	0,07	10	0,6
7	15	12,29	12,38	0,09	11	0,6
8	20	16,39	16,51	0,12	11	0,6
9	25	20,49	20,63	0,14	11	0,6
10	30	24,58	24,76	0,18	12	0,6
11	40	32,78	33,01	0,23	12	0,6
12	60	49,16	49,52	0,36	13	0,6
13	70	57,36	57,77	0,41	13	0,6
14	80	65,55	66,03	0,48	13	0,6
15	90	73,75	74,28	0,53	13	0,6
16	100	81,94	82,54	0,6	14	0,6
17	110	90,13	90,79	0,66	14	0,6
18	120	98,33	99,04	0,71	14	0,6
19	130	106,52	107,30	0,78	14	0,6
20	140	114,72	115,55	0,83	14	0,6
21	150	122,91	123,80	0,89	14	0,6

Як можна побачити з таблиці 4.2, точність розмірів зменшується зі збільшенням лінійного розміру. Слід зазначити, що типовий процент відхилення, зазначений в літературі, складає 0,3–0,5%.

Основним методом зменшення впливу коливання усадки матеріалу між партіями є корегування параметрів спікання, а саме: максимальної температури спікання, часу витримки та швидкості нагріву. Для кожної нової партії матеріалу параметри спікання підбираються таким чином, щоб найбільший лінійний розмір тестового зразка після спікання залишався однаковим. При цьому важливо, щоб параметри лиття деталей для кожної нової партії залишалися сталими. Слід пам'ятати, що параметри спікання взаємопов'язані та їх вплив на усадку матеріалу є комплексним. Так, на рисунку 4.17 показані криві залежності густини деталі від часу витримки при різних температурах.

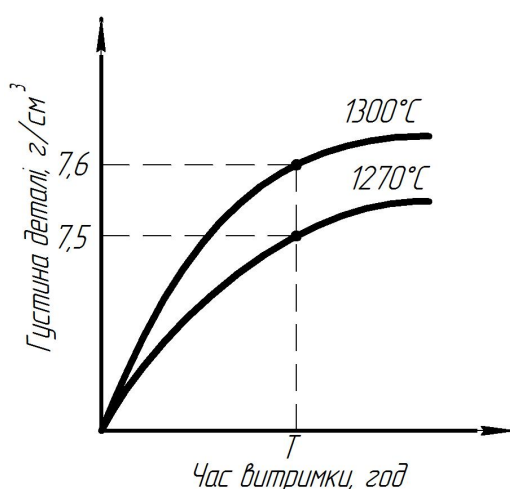


Рисунок 4.17 – Криві залежності густини деталі від часу витримки

Як можна помітити з графіків, при сталому проміжку часу T густина деталі, а отже і лінійні розміри будуть відрізнятись для різних температур спікання.

Коефіцієнт усадки матеріалу (X) після спікання пов'язаний з густиною відливка ($\rho_{л}$) та густиною спеченої деталі ($\rho_{сп}$) залежністю

$$X = \frac{\sqrt[3]{\rho_{сп}}}{\sqrt[3]{\rho_{л}}}$$

Дана формула розкриває важливий факт: при фіксованій густині спеченої деталі, варіювання густини відливка спричиняє зміну розмірів деталі після спікання. У свою чергу, на густину відливка впливають такі параметри лиття, як температура (інжекційного циліндра та прес-форми); тиск (впорскування; підпитування), швидкість впорскування та ін.

Оскільки об'єм порожнини прес-форми є сталим, для зменшення варіювання розмірів деталі після спікання необхідно контролювати вагу

«зеленого» відливка всередині кожної партії матеріалу. Проте, у зв'язку з тим, що між різними партіями матеріалу є розбіжність між коефіцієнтами усадки, густина відливка між різними партіями буде різною. Тому важливо встановлювати контрольну масу деталі для кожної партії матеріалу окремо.

Залежність між розмірами деталі після спікання та вагою відливка визначається згідно з формулою

$$\frac{dL_s}{L_s} = \frac{1}{3} * \frac{dM_s}{M_s},$$

де dL_s – варіювання лінійного розміру після спікання;

L_s – лінійний розмір після спікання;

dM_s – варіювання ваги відливка;

M_s – вага відливка.

Допустиме відхилення ваги деталі визначається за формулою

$$dM_s = \frac{dL_s * M_s * 3}{L_s}.$$

Наприклад, вага деталі 25 г; контрольний розмір 30 мм; допуск на даний розмір 0,08 мм.

Розрахунковий допуск ваги деталі буде складати

$$dM_s = \frac{0,08 * 25 * 3}{30} = 0,2 \text{ г.}$$

Для кожного розміру та допуску у промисловості встановлюється максимально допустиме відхилення ваги зеленого відливка. Встановлений допуск ваги має бути меншим за розрахунковий, що дозволяє іншим факторам впливати на варіювання розмірів.

Вплив нестабільної роботи термопласт-автомата на коливання розмірної точності деталі після спікання

Важливим показником стабільної роботи термопласт-автомата є «подушка матеріалу». Це залишок матеріалу у інжекційному циліндрі після закінчення процесу підживлення матеріалом. Як правило, вона встановлюється в діапазоні від 4 до 6 мм. Чим точніший даний показник під час лиття, тим точніша вага кожного відливка. Варіювання цього значення можуть спричинити такі чинники, як збої у гідравлічній системі машини, витік матеріалу з-під запірного кільця під час циклу впорскування, нестабільне дозування матеріалу.

У випадку зношування запірного кільця шнека матеріал під час процесу впорскування та підживлення тече у зворотному напрямку, до циліндра. Це призводить до нестабільного об'єму впорскування та

коливання у вазі відливка. При виявленні даного недоліку необхідно замінити шнек інжекційного циліндра.

Проблеми у дозуванні можуть виникати при нерівномірних розмірах гранул суміші. Особливо часто це зустрічається у перероблених вторинно матеріалах. Частково дану проблему можна вирішити за рахунок підвищення величини протитиску під час дозування матеріалу.

Вплив параметрів лиття на негомогенність відливка

У ідеальному випадку, відливок має мати рівномірне розподілення металевого порошку у зв'язувальній речовині. Проте реальний потік сировини у прес-формі зазнає впливу значної кількості параметрів. Як правило, типова деталь ІПП має складну геометричну форму і поперечний переріз потоку може значно змінюватись повздовж відливка. Контроль швидкості потоку, шляхом зміни швидкості впорскування, зазвичай неможливий з причини інерційності гідравлічної системи машини. Залежно від поперечного перерізу потік прискорюється у тонких каналах та зменшує швидкість у широких. Сировина зазнає значне прискорення. У випадку з деталями складної конфігурації потік матеріалу різко змінює напрямок, що може призводити до відділення металевого порошку від зв'язувальної речовини.

Матеріал для ІПП, порівняно зі звичайним полімером, має високу теплопровідність та низьку теплоємність. Прес-форми зазвичай виготовляються з інструментальної сталі, яка має відносно велику теплопровідність. Оскільки сировина під час впорскування має тісний контакт з поверхнею порожнини прес-форми, коефіцієнт теплопровідності між матеріалом та прес-формою досить значний. За таких умов температура матеріалу суттєво залежить від температури прес-форми. Впорскування сировини при кімнатній температурі зазвичай неможливе з причини швидкого застигання суміші. Для покращення процесу інжекційного лиття температура прес-форми контролюється охолоджувальною рідиною. У ідеальному випадку температура прес-форми має бути однакою, проте, зазвичай, це не так. Точне розподілення температури у прес-формі залежить від розташування каналів охолодження, форми та розмірів прес-форми. Тому матеріал зазнає градієнта температури вздовж потоку та охолоджується нерівномірно. З іншого боку, сировина має здатність підвищувати власну температуру завдяки внутрішньому тертю. Під час лиття потік у вузьких каналах можна умовно розподілити на декілька шарів. Шар, що контактує зі стінками прес-форми, має низьку швидкість та високу в'язкість порівняно з центром потоку. Тертя між такими шарами матеріалу під час лиття спричиняє підвищення температури. Завдяки високій швидкості лиття та градієнту швидкості у поперечному перерізі потоку швидкість зсуву також досить значна та нерівномірна. Тому локальний внутрішній нагрів матеріалу під час заповнення формувальної порожнини також неоднаковий. Разом з

нерівномірно розподіленою температурою прес-форми внутрішній нагрів призводить до градієнта температур у відливку.

Високі прискорення потоку матеріалу разом з різкою зміною напрямку можуть призводити до розділення порошку та полімеру. Результатом такої сегрегації є градієнт густини відливка та, як наслідок, нерівномірна усадка під час спікання. Сегрегація матеріалу також може зустрічатися у місцях високої швидкості зсуву. Для кожного виду зв'язувальної речовини властива своя критична швидкість зсуву. Перевищуючи даний ліміт, матеріал зазнає деструкції, що може призводити до утворення конгломератів частинок порошку. Дане явище спричиняє структурні дефекти після спікання.

Оскільки швидкість потоку варіюється у значному діапазоні, у деяких випадках швидкість може знижуватись майже до нуля. Дане явище негативно впливає на структуру майбутньої деталі, тому що призводить до передчасного затвердіння матеріалу та створення явних спаїв потоків.

Нерівномірний розподіл температури та тиску у відливку під час лиття може викликати внутрішні напруження, які, у свою чергу, призводять до деформації та виникнення тріщин під час дебайдингу, коли міцність матеріалу зменшується.

Більшості проблем, пов'язаних з литтям, можна уникнути, використовуючи оптимальні технологічні параметри та належно розроблені прес-форми. Важливими параметрами прес-форми є: розташування точки впорскування, форма та довжина ливникових і охолоджувальних каналів.

Якість відливка суттєво залежить від температури інжекційного циліндра, швидкості впорскування, тиску, температури прес-форми.

Деформування деталі під час вилучення відливка з порожнини форми

Суміш для ІЛП містить велику кількість металевого порошку (близько 60% по об'єму). Тому, на відміну від звичайних полімерів, зелений відливок ІЛП має значно меншу критично допустиму пластичну деформацію та низьку усадку після лиття. На рисунку 1.8 показані коефіцієнти усадки матеріалу в гарячому (+0,2%) та холодному (-0,5%) станах. Для прикладу коефіцієнт усадки поліаміду ПА-6 після лиття складає 1,2–1,7%. Даний факт ускладнює вилучення відливка з порожнини, потребує збільшення кутів нахилу формувальної порожнини, а також збільшення кількості штовхачів на одиницю поверхні деталі.

Також під час вилучення деталі з порожнини можуть виникати приховані дефекти. Їх не можна виявити на відливку, однак, як правило, вони проявляться після операцій дебайдингу та спікання.

Під час пластичної деформації нагрітий полімер розтягується без слідів розриву. Це призводить до того, що в місці розтягу кількість полімеру за об'ємом збільшується, а кількість порошку не змінюється. Під час дебайдингу полімер видаляється з деталі, а на місці розтягу з'являється

тріщина. Такі дефекти є незворотним браком, який важко виявити на ранньому етапі виникнення. Тому правильне вилучення деталі з прес-форми без розтягів та деформації є вкрай важливим для отримання спечених деталей без дефектів.

Відхилення розміру прес-форми від середини допуску лінійного розміру

При виготовленні формувальної порожнини прес-форми слід мати на увазі, що усадка деталей під час спікання з різних причин не завжди ізотропна. Це ускладнює процес отримання розмірів з точними допусками. Часто прес-форма потребує остаточного корегування розмірів на основі результатів спікання. Тому бажано для розмірів з точними допусками залишати припуск на поверхнях формувальної порожнини з метою її подальшого корегування після спікання деталей.

Під час проектування прес-форми необхідно враховувати, що розміри формувальної порожнини мають прийматися з урахуванням варіювання розмірів під час технологічних процесів лиття, дебайдингу та спікання. Якщо розмір формувальної поверхні виготовлений на границі допуску, то існує велика вірогідність того, що деталі на кінцевих операціях будуть мати відхилення від конструкторського розміру. На рисунку 4.18 показана гаусова крива нормального розподілу для кінцевого розміру деталі 25 мм з допуском $\pm 0,1$. У випадку, якщо розмір формувальної прес-форми складає 24,95 мм (з урахуванням коефіцієнта усадки), то під час виробництва цілком вірогідна поява певної кількості бракованих деталей n з відхиленням розміру за межі допустимого.

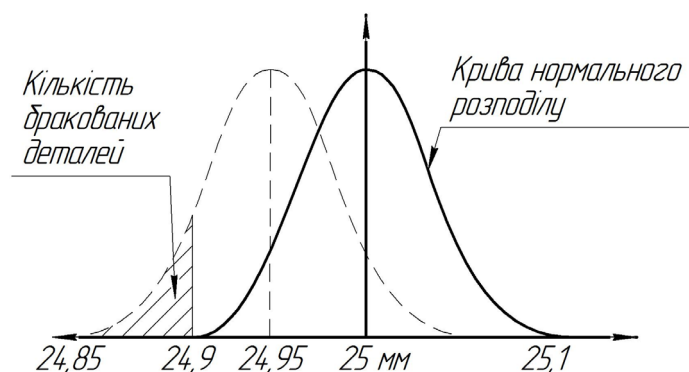


Рисунок 4.18 – Крива нормального розподілу розмірів деталей після спікання

Також слід враховувати розташування розмірів у прес-формі. Умовно розміри формувальних поверхонь розділяються на два класи, залежно від їх розташування у прес-формі. Допуск лінійного розміру деталі для кожного класу має бути різним. Таке розділення пов'язане з відомою різницею у точності формування відповідних розмірів елементів виробу. Розміри типу А2 більш грубіші порівняно з типом А1 з причини впливу додаткових (окрім коливання усадки) джерел відхилень: наприклад, зазори

між рухомими частинами прес-форми, рух термопласт-автомата, налипання на поверхні прес-форми. На рисунку 4.19 показано схематичне зображення типів розмірів литих деталей.

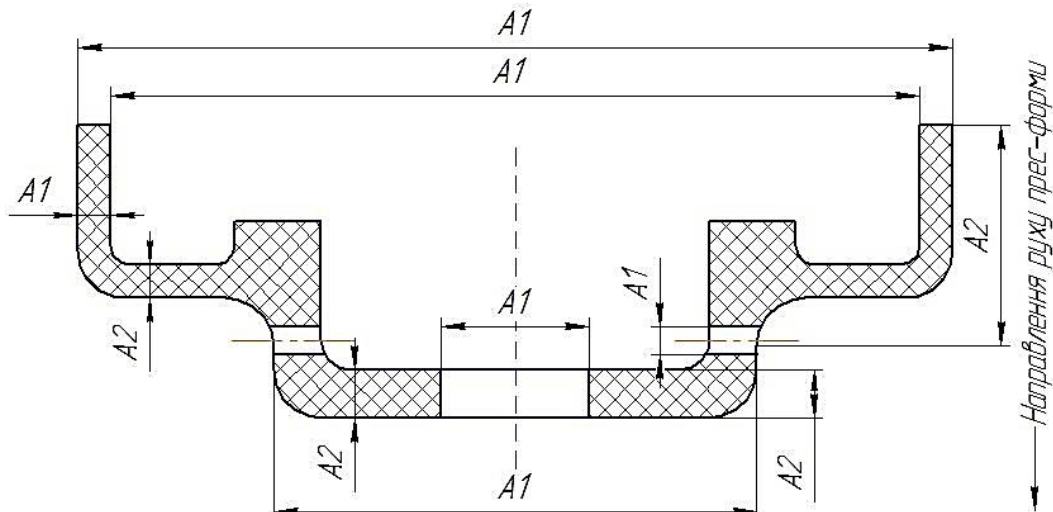


Рисунок 4.19 – Типи розмірів литих деталей

Загалом, виходячи з практичного досвіду виробництва деталей ІЛП, можна виділити ряд ключових правил, які допоможуть зберегти час, знизити затрати та покращити якість виробів.

1. Не слід завищувати допуски розмірів там, де це не є конструктивно необхідним.

В процесі конструювання деталей існує бажання задати занадто точні допуски на буквально всі розміри. Адже чому ні? Процес ІЛП позиціонується як технологія точного виготовлення складних деталей. Проте, як правило, це призводить до ускладнення виготовлення прес-форм, що збільшує затрати на виробництво. Також підвищується вірогідність наявності відхилень в деталях відносно конструкторської документації. Це, в свою чергу, може призвести до виникнення небажаних проблем між виробником та замовником деталей ІЛП.

2. При розробці нової деталі переконайтесь, що 3D-модель відображає номінальні розміри готової деталі.

Ключовою проблемою в даному випадку є те, що розміри деталей ІЛП завжди будуть мати відхилення у більшу чи меншу сторону від розрахованого значення. Проте на креслені конструктор, виходячи з конструктивних міркувань, може вказати незбалансований допуск. Для прикладу, припустимо, деталь має розмір 50 мм. Конструктор абсолютно не бажає, щоб даний розмір був перевищений в готовій деталі. Тому на креслені даний розмір заданий як $50_{-0,5}$ мм. В даному випадку номінальним розміром є 49,75 мм ($50 - 0,5/2$). Отже, якщо формувальна поверхня прес-форми буде зроблена за розміром кресленіка 50 мм, без

врахування допуску, можна очікувати, що деяка кількість деталей буде мати даний розмір більший 50 мм і буде забракована.

3. Пам'ятайте, що не завжди усадження деталей під час спікання є ізотропним.

Загальновідомо, що під час спікання коефіцієнт усадження деталі може бути неоднаковим повздовж різних осей деталі. Таку різницю дуже важко передбачити наперед і, як правило, оптимізація всіх розмірів деталі потребує доробки формувальних поверхонь прес-форми після контрольних вимірювань спеченої деталі. Особливо це стосується циліндричних поверхонь, де різниця усадження деталей призводить до овальності.

Однак позитивним моментом є те, що, як правило, розміри деталей мають гарну повторюваність, тому стабільність процесу виготовлення не є проблемою.

4. Для важливих, точних розмірів необхідно мати технологічний припуск на формувальних поверхнях для подальшого доопрацювання прес-форми.

З причини неізотропного усадження деталей ІЛП, розміри деталей не зосереджені біля їх номіналів. Часто доробка формувальних поверхонь є єдиною альтернативою для отримання точних розмірів. Доробка потребує додавання чи віднімання матеріалу на формувальній поверхні. Додавання матеріалу відбувається шляхом наплавлення або гальванічного покриття. Враховуючи, що деталі ІЛП мають невеликі габарити, доцільно використовувати мікро-TIG зварювання або наплавлення за допомогою лазера. Після того, як матеріал був наплавлений, формувальна поверхня потребує механічної обробки. Проте така доробка проводиться лише у крайньому випадку, тому що наплавлення металу може пошкодити матрицю прес-форми, також має низький ресурс роботи.

Завжди набагато легше зняти матеріал з поверхні, ніж додати його. Тому під час проектування прес-форми конструктор має проаналізувати критичні розміри формувальних поверхонь. Наприклад, такі внутрішні елементи відливка, як діаметри та пази мають бути виготовлені на верхній межі допуску. В той же час такі зовнішні розміри, як довжина деталі та зовнішні діаметри виконуються на нижньому допуску.

5. В процесі проектування деталі для технології ІЛП необхідно наперед продумати методи контролю розмірів готових деталей.

Не існує ніяких сумнівів, що технологія 3D CAD моделювання, набагато полегшила конструювання складних деталей. У поєднанні з технологією ІЛП це створило можливість легкого виготовлення деталей зі складними поверхнями без підвищення ціни деталей. Однак якщо для інжекційного лиття складні поверхні не створюють труднощів, то якісно контролювати такі деталі набагато складніше. Тому під час проектування слід розглянути нижчевказані питання:

- Які методи контролю будуть використані під час виробництва? Чи мають ці методи контролю достатню точність, щоб забезпечити якісний статистичний аналіз?

- Чи погоджені способи контролю між виробником деталей та замовником?

- Чи визначені контрольні точки для базування та вимірювання під час інспекції?

- Який час виділяється для контролю кожної деталі? Який процент вибірки з партії? Чи можна контролювати деталі більш продуктивно та економічно?

Важливо обговорити ці питання перед початком проектування. Багато конструкторів не усвідомлюють, що їхні деталі містять елементи, які створюють труднощі для контролю. Часто такі елементи не є критичними для функціонування деталі і після погодження можуть бути вилучені з контрольної карти.

6. Не потрібно ігнорувати необхідність на деталях лінії розмикання, штовхачів та точки впорскування.

Всі інженери-конструктори, які мали досвід з технологіями лиття, усвідомлюють, щоб сформувати деталь у прес-формі необхідно:

- заповнити матеріалом порожнину прес-форми крізь точку впорскування;
- відкрити прес-форму, що створює лінії рознімання, де різні секції прес-форми контактують одна з одною;
- виштовхнути деталь з порожнини прес-форми за допомогою штовхачів.

Точка впорскування, штовхачі та лінія розмикання можуть суттєво впливати на зовнішній вигляд деталі та її розміри. Тому перед початком проектування необхідно, щоб:

- конструктор деталі вказав, які поверхні деталі є важливими;
- конструктор прес-форми визначив як сформувати відповідні поверхні;
- виробник деталей ІЛП погодив, що готова прес-форма буде надійною у виробництві при максимальній продуктивності та повторюваності.

7. Необхідно пам'ятати, що усадження деталей завжди є потенційним джерелом проблем.

В технології ІЛП існує три етапи, на яких відбувається усадження деталі.

1. Усадження відливка під час лиття

Після ежекції з прес-форми відливок остигає і разом з тим зменшується в об'ємі. Загалом, коефіцієнт усадження відносно малий та складає близько 0,3%–0,5%. Варіювання коефіцієнта на даному етапі може впливати на кінцеві розміри деталей. Проте, як правило, такий вплив є незначним.

2. Усадження під час дебайдингу

Як і у випадку з процесом лиття усадження деталей під час дебайдингу є незначним і не впливає на остаточні розміри. Залежно від виду зв'язувальної речовини деталі на даному етапі можуть як зменшуватись так і збільшуватись у розмірах. Особливо це стосується водорозчинних систем зв'язувальної речовини.

3. Усадження під час спікання

Домінуючим фактором усадження деталей ІЛП від відливка до готової деталі є процес спікання. Як правило, густина відливка складає $4,2\text{--}5\text{ г/см}^3$, після спікання густина деталі з низьколегованих сталей складе $7,4\text{--}7,7\text{ г/см}^3$. Це призводить до лінійного усадження між 15% та 20% , що набагато більше ніж в інших технологіях лиття.

Вплив коефіцієнта усадження на варіацію у розмірах деталей збільшується з габаритними розмірами деталей. Типово, що чим більші розміри, тим більший вплив таких чинників, як тертя між керамічним піддоном та деталлю, деформація, ефект гравітації.

8. *Вибирайте такі матеріали які піддаються рихтуванню.*

Доцільно припустити, що складні деталі під час процесу ІЛП схильні до деформації. Тому під час виробництва деталей ІЛП досить поширені операції рихтування або калібрування у штампах. Так, на рисунку 4.20 зображена деталь накладки замка, яка виготовляється компанією ARCMIM. Для того, щоб скорегувати U-подібний профіль деталі, який зазнав деформації під час спікання, проводиться операція калібрування профілю у штампі.



Рисунок 4.20 – Деталь накладки замка компанії ARCMIM

Під час калібрування в штампі важливо, щоб сила деформації перевищувала межу текучості даного матеріалу. У іншому випадку деталь буде пружинити, намагаючись прийняти форму, яку отримала під час спікання. Одним із варіантів вирішення даної проблеми є вибір матеріалу, який після спікання має найнижчу межу текучості і, разом з тим, задовольняє конструктивні вимоги.

4.6.1 Проектування прес-форми

Проектування прес-форми є складним процесом, для якого потрібні точні знання про властивості сировини Catamold® під час переробки, призначення виробу й про різні технічні та технологічні фактори. Наприклад, дані про форму, розміри і кількість виробів, які необхідно виготовити, технічні характеристики термопластавтомата і кількість гнізд у прес-формі. У формі можна виділити дві частини – пуансон і матрицю, які мають канали для охолодження чи підігріву. Потім визначається можливе розташування точки впорскування, лінії розмикання і розміщення штовхачів, виходячи з функції виробу. Після цього необхідно дослідити заповнення прес-форми при різних варіантах розташування точок упорскування й визначити найкращий. Цей процес показує, чи досить однієї поверхні розмикання, або ж необхідно проектувати більш складну прес-форму з двома поверхнями розмикання. Після того як основний проект прес-форми готовий, можна починати його детальне опрацювання.

Розробка прес-форм для виготовлення виробів із сировини Catamold® здійснюється відповідно до рекомендацій з виготовлення прес-форм для полімерних матеріалів, які наведено нижче.

- Уникайте непотрібних й особливо різких перепадів товщини стінок.
- Використовуйте ребра жорсткості замість товстих стінок.
- Зменшуйте товщину ділянок.
- Уникайте гострих кутів. Використовуйте радіус щонайменше 0,3 мм.
- Тиск лиття для відносно довгих деталей повинен бути однаковим.

При проектуванні прес-форми для сировини Catamold® необхідно звернути особливу увагу на вищевказані моменти.

- В зв'язку з тим, що існує суттєва тенденція до утворення пригару, необхідно відхиляти потік при вході в прес-форму.
- Контакт потоків, віддалених від точки впорскування внаслідок тепловтрати, може утворити слабе місце (лінію спаю), особливо це стосується великих виробів. Якщо від точки впорскування відходить більше одного потоку і коли збільшується опір потоку, то звичайно один з них зупиняється й охолоджується. Ділянки порожнини за цим фронтом заповнюються тільки тоді, коли вся інша порожнина вже заповнилася. Таким чином відбувається утворення потенційно слабких місць виробу.

4.6.2 Порожнина

Серцем форми є збільшена порожнина, яка передбачає усадження компонента під час спікання. Навколо порожнини розташовані деталі форми, необхідні для відкриття та закриття, ежекції компонента, вирівнювання ділянок форми, пересування вставок, охолодження компонента та розміщення ливника, воронки і клапана.

Першим питанням при розробці форми є усадження компонента. Зміна розмірів викликана усадженням при спіканні Y , яка розраховується за

допомогою розміру порції сировини φ та спеченої часткової щільності ρ/ρ_T

$$Y = 1 - [\varphi / (\rho / \rho_T)]^{1/3},$$

де ρ – це остаточна щільність та ρ_T – це теоретична щільність спеченого матеріалу (ρ_T більше ніж ρ).

Усадження – це зміна розмірів, поділена на оригінальний розмір. Оскільки метою є кінцеві розміри компонента, кожний габарит порожнини форми має збільшений розмір для забезпечення цієї усадки. Якщо кінцевий бажаний розмір дорівнює L_f , то початкові габарити форми подані як фактор розширення порожнини форми Z ,

$$Z = 1 / (1 - Y).$$

У підсумку, габарит форми L_0 розраховується з кінцевого або особливого габариту компонента L_f , помноженого на коефіцієнт розширення:

$$L_0 = L_f Z.$$

Як приклад, якщо усадження Y дорівнює 0,15 (15%), то коефіцієнт розширення форми Z складе 1,1764. Тому, щоб досягти кінцевого розміру 12 мм, необхідний розмір форми 14,11 мм (12 разів по 1,1764). Усадження під час спікання проходить від 14,11 до 12 мм, тому зміна в 2,11 мм, поділена на 14,11 мм, дасть нам усадження 0,15 або 15%.

Не дивлячись на те, що габарити прес-форми збільшуються з метою забезпечення усадження при спіканні, всі кути зберігаються. На практиці набір зовнішніх габаритів більшості прес-форм відповідає нижній границі допусків компонента, в той час як внутрішні габарити відповідають вищій границі допусків. Це дозволяє змінювати кінцеві розміри форми після спікання перших пробних зразків. Як тільки будуть відомі всі фактори спікання для кожного габариту, остаточні розміри порожнини форми досягаються шляхом машинної обробки або полірування.

При типовому наборі оснащення потік сировини надходить із сопла машини для лиття в ливник, після чого через напрямну та канал сировина потрапляє до порожнини. На рисунку 4.21 показаний литий компонент з приєднаним до нього ливником; за допомогою цього можна уявити рух потоку сировини. Рух потоку оточений різноманітними затискними пластинами, штифтами вирівнювання, розташування та компонентами відбивача. Більшість з цих складових оснащення доступна у вигляді попередньо оброблених виробів, тому машинної обробки потребує лише порожнина форми.



Рисунок 4.21 – Відливок деталі пістолета з приєднаним до неї ливником

Прес-форма може мати від 1 до 40 порожнин (був зареєстрований випадок використання 320 порожнин в формі). Форма з однією порожниною зможе забезпечити невеликі обсяги виробництва. Як видно з рисунка 4.22, комп'ютерна оптимізація показує, що для компонентів з масою від 1 до 100 г найменша вартість проекту (вартість оснащення та виробу) пропонує:

- до 10^5 деталей на рік – 1 порожнина;
- $3 \cdot 10^5$ деталей на рік – 2 порожнини;
- 10^6 деталей на рік – 4 порожнини;
- $3 \cdot 10^6$ деталей на рік – 8 порожнин;
- 10^7 деталей на рік – 12 порожнин.

Поведінка графіка для більшої деталі призводить до обмеження зусилля затискання, яке не є важливим для невеликих деталей.

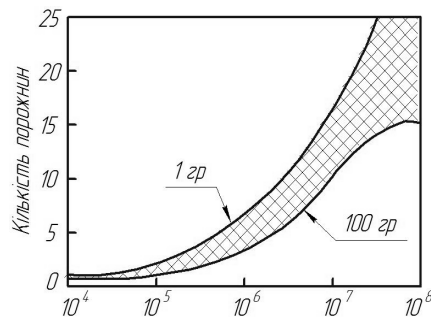


Рисунок 4.22 – Середня кількість порожнин форми для мінімізації вартості проекту відносно розміру виробничої партії для компонентів з масою від 1 до 100 г

Більша частина заощаджень від збільшення кількості порожнин полягає у збільшенні продуктивності лиття шляхом зниження кількості машин для лиття. Зі збільшенням кількості порожнин зростає вартість виробництва оснащення, але зменшується подальша вартість обладнання на кожний компонент. Однак оптимальна кількість порожнин форми зумовлена не лише вартісними показниками. Серед інших обмежень можна виділити зусилля затискання, об'єм упорскування або вартість обслуговування. Наприклад, компонент з масою 100 г може перевищити зусилля затискання при наявності декількох порожнин. Іншим фактором є

нерівномірне заповнення, зношування або різниця між порожнинами. Ці фактори можуть призвести до зміни розмірів, що приведе до зменшення продуктивності процесу.

4.6.3 Вентилювання

Повітря, що потрапило в порожнину прес-форми, обов'язково має бути видалене, інакше виникне недолив. Якщо повітря не може виходити через штовхачі, то необхідно передбачити спеціальні засоби для його відведення. Під час лиття це повітря піддається тиску та витісняється через вентиляційний отвір. Вентиляційний отвір, як правило, розташовують на протилежному від клапана кінці порожнини. Вентиляційні отвори, зазвичай мають глибину 0,015 мм та ширину до 12 мм у великих деталях, що показано на рисунку 4.23.

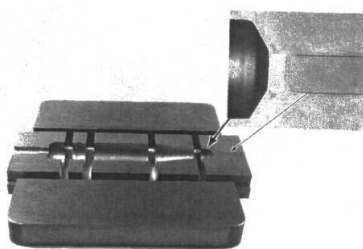


Рисунок 4.23 – Зображення отвору для видалення повітря на сегментованому наборі прес-форми

Вентиляційні отвори необхідно розташовувати на останній ділянці порожнини. В ідеальному випадку вентиляційний отвір не має залишати слідів на поверхні деталі. Вентиляція також необхідна для ежекції деталі з форми. Наприклад, форма закритого типу не може бути вилучена без створення вакууму; при відсутності вентиляційного отвору в формувальний інструмент необхідно вбудувати особливий штифт, який буде відповідати за вентиляцію форми.

Для вентиляції можна використовувати поршні системи штовхачів з вільною посадкою, які дозволяють вилучити повітря через кільцевий отвір навколо штифта. Іншим методом є використання процедури поступового закриття форми, при якому на стадії наповнення допускається лише невелике зусилля затискання, яке дозволяє видалити повітря вздовж шва форми. В кінці кроку форми механізм повністю затиснений.

Потрібно обов'язково зробити спеціальні пази для вентиляції (глибиною від 0,01 до 0,02 мм), розміщені в кінці шляху розплаву а також у тих місцях, де утворюються повітряні кишень. Для видалення повітря з повітряних кишень необхідно також зробити додаткові штовхачі.

У зв'язку з тим, що сировина для ІЛП має набагато більшу в'язкість та густину у розплавленому стані, аніж традиційні полімери, на практиці широко використовується спосіб вакуумування порожнини форми за допомогою вакуумного насоса. Для цього в прес-формі виготовляють спеціальний канал, до якого приєднується шланг від вакуумного насоса. Як правило, такий насос з'єднаний з автоматикою термопластавтомата і вмикається лише перед циклом інжекції на декілька секунд. Також навколо

формувальної порожнини прес-форми робиться гумова вставка, що забезпечує краще вакуумування закритої форми.

4.6.4 Канали контролю температури

Контроль температури у прес-формі є одним з найбільш важливих параметрів при роботі з сировиною Catamold®, тому необхідно постійно підтримувати сталу температуру формувальних поверхонь (± 2 °C). Із цієї причини рекомендується використовувати термічно ізольовану плиту між прес-формою й плитою термопластавтомата. Залежно від геометрії прес-форми, температура формоутворювальних поверхонь має доходити до 140°C. Якщо температура прес-форми виявиться занадто низкою, то в міру заповнення прес-форми матеріал, через свою високу теплопровідність, буде швидко охолоджуватися біля поверхні. Затвердіння матеріалу призведе до значного зменшення поперечного перерізу, що завадить однорідному заповненню тонких зон. Для стабілізації температури прес-форми рекомендується використовувати водяні або масляні термостати потужністю від трьох до шести кіловат.

Для забезпечення протікання потоку води або мастила з метою контролю над температурою форми в оснащенні розміщують канали. Для сполучних речовин, що вимагають підтримання дуже низької температури, можна використовувати холодоагенти для охолодження. Як альтернатива, канали контролю температури можна використовувати для попереднього нагрівання форми перед литтям, яке, зазвичай, необхідне для поліацеталових та воско-полімерних сполучних речовин. Згодом охолоджувальні канали видаляють температуру з компонента. Зауважте, що час охолодження зростатиме в квадратному відношенні щодо товщини ділянки компонента. Для типових умов лиття час охолодження знаходиться в діапазоні від 10 до 20 с. Одним із способів зменшення циклу лиття є узгоджене охолодження. В цьому випадку канали охолодження не є чіткими отворами, але вони мають конструкцію, що відповідає профілю компонента. Це дозволяє забезпечити охолодження внутрішніх ділянок, які зазвичай охолоджуються в останню чергу та сповільнюють ежекцію. Створення каналів узгодженого охолодження вимагає великих витрат. В альтернативі, використання якісних сплавів міді при створенні форми дозволить спростити процес управління температурою під час лиття, але це теж достатньо дорого і в деяких випадках може викликати проблеми при машинній обробці. Метод швидкого моделювання дослідних зразків, що застосовується до складних форм, дає змогу об'єднати криві та стратегічні канали охолодження.

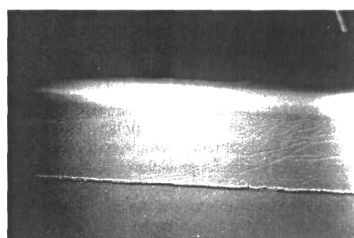
Загалом, рівномірний розподіл температур по всій поверхні формувальної порожнини при литті матеріалів ІЛП має таке ж важливе значення, як і для полімерів. Це особливо справедливо при високих температурах прес-форми.

4.6.5 Гарячеканальні прес-форми

При використанні гарячих каналів ливник відсутній, тому зникає необхідність у його вторинній переробці. В зв'язку з тим, що прес-форма нагрівається до високої температури, ізоляція гарячого каналу не викликає ніяких труднощів. В такому випадку закриття сопла голчастим клапаном не має сенсу, тому що матеріал не схильний до розтягування під час виймання виробу з прес-форми й легко відокремлюється. Проте у зв'язку з високою вартістю гарячеканальних систем, а також високою абразивністю матеріалів ІЛП такі системи доцільно використовувати при масовому та великосерійному виробництві. Під час проектування прес-форм з гарячеканальними ливниками для ІЛП слід надавати перевагу масляному нагріву. Він забезпечує плавний нагрів фідстоку без ризику перегріву та деструкції.

4.6.6 Шов форми

Розміщення шва форми, розмір і розміщення напрямної та дизайн каналу такі ж важливі, як і дизайн порожнини форми. Як показано на рисунку 4.24, а, шов форми – це слід на поверхні компонента, що залишається після стиснення форми. Косметичні та функціональні вимоги можуть стати причиною розміщення шва форми в менш оптимальних позиціях. Частиною проблеми є те, що оснащення дещо змінює свою форму під час наповнення форми, не дивлячись на чітке вирівнювання та високу силу затискання. Зміна форми напряму залежить від тиску упорскування та розміру деталі. Вона призводить до незначного проникнення сировини між рухомими деталями оснащення, а це веде до виникнення облою. На рисунку 4.24, б показаний яскравий приклад облою. Процес усунення недоліків після лиття дуже затратний і, при можливості, його слід уникати. Так, наприклад, під час виготовлення циліндричних деталей стикування формувальних деталей прес-форми відбувається вздовж циліндра. Введення додаткових лисок на шві деталі дозволяє компенсувати невелике зміщення формувальних порожнин, а також мінімізувати вплив виникнення облою на готову деталь (рис. 4.25).



а



б

Рисунок 4.24 – Зображення шва від прес-форми на деталях ІЛП:

а) шов від прес-форми на керамічному компоненті;

б) облой на шві форми («зелений» відливок)

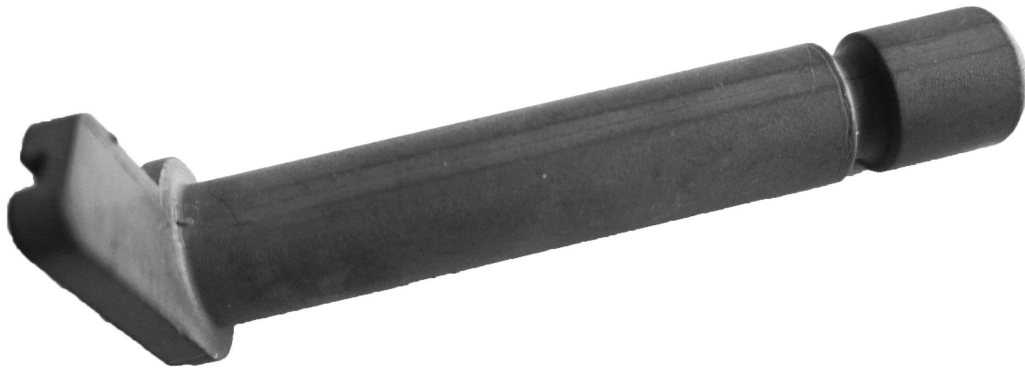


Рисунок 4.25 – Циліндричний компонент ІЛП з лискою в зоні стикування формувальних порожнин прес-форми

4.6.7 Точка упорскування

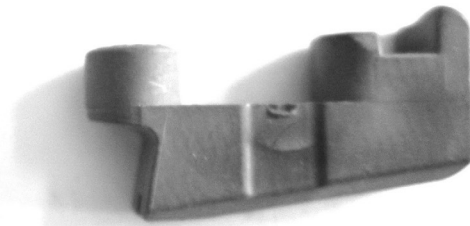
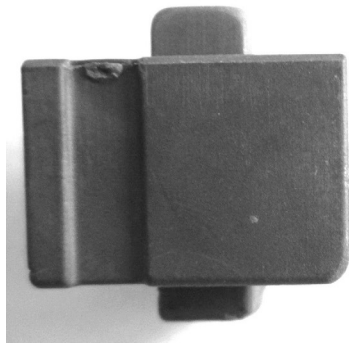
Точка упорскування у прес-форму має задовольняти певні критерії.

- Однорідне заповнення порожнини.
- Мінімальна наступна обробка – відділення ливника.
- Мати найбільш можливі розміри, щоб мінімізувати перепад тиску.
- Розташована в найтовщому місці деталі.
- Направляти струмінь розплаву уздовж стінок порожнини.

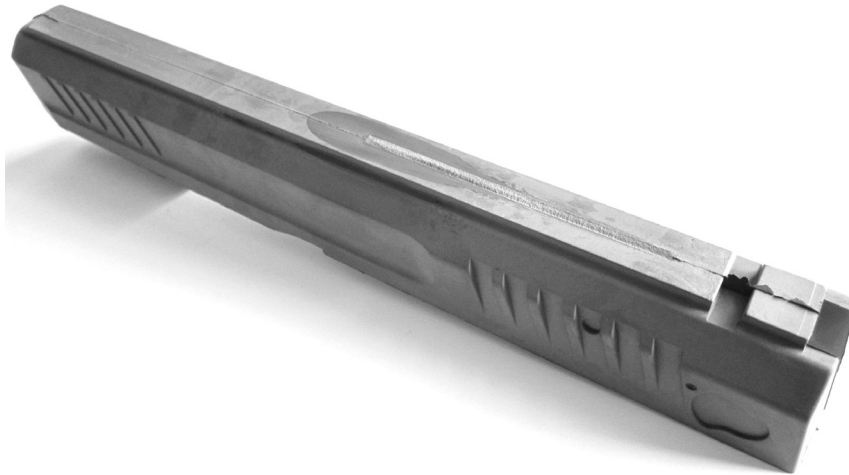
Використовуються всі відомі типи ливників, однак найчастіше використовується точковий ливник. Більшість виробів, які виготовлено за допомогою порошкового лиття під тиском, має відносно малі розміри, і діаметр точки впорскування становить 0,8–1,5 мм, а для більших деталей діаметр точки впорскування становить 2 мм.

Перевагою тунельних ливників є автоматичне їх відділення при вийманні відливка з прес-форми. Точка впорскування є найвужчим місцем ливникового каналу. Поперечний переріз і кількість точок впорскування потрібно вибирати таким чином, щоб не зашкодити відливковій при відділенні ливника.

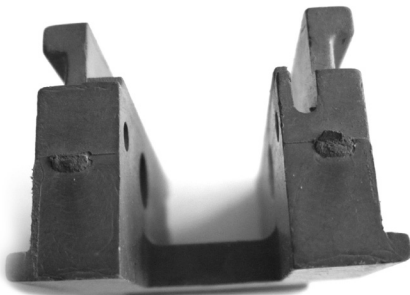
Бажано, щоб точка впорскування мала форму кола, оскільки при сегментній формі на поверхні буде видно сліди від лиття, а при спіканні – пригари, що вплине на шорсткість поверхні спеченої деталі. Оскільки видалення залишків ливника на металевих деталях після спікання потребує затратної додаткової механічної обробки, на практиці намагаються розташувати точку впорскування на неробочих поверхнях, що не потребують естетичного вигляду. А також вводять додаткову лиску глибиною до 0,5 мм (рис. 4.26, а), що дозволяє приховати остаток ливника і не обробляти його в подальшому.



а



б



в

- Рисунок 4.26 – Розміщення точки впорскування на деталі ІЛП:
- а) введення в конструкцію деталі спеціальної лиски для точки впорскування;
 - б) щілиноподібний ливник для покращення заповнення деталі;
 - в) деталь з двома точками впорскування.

В деяких випадках, для покращення пролиття великий деталей, може використовуватись щілиноподібна точка впорскування. Вона дозволяє зменшити градієнт тиску потоку матеріалу під час заповнення (рис. 4.26, б). Залежно від конструкції деталі, для прискорення заповнення симетричних деталей використовують подвоєні точки впорскування (рис. 4.26, в).

Розташування точки впорскування суттєво впливає на однорідність густини відливка. А це, в свою чергу, впливає на процес спікання деталей. Адже нерівномірність густини «зеленої» деталі призводить до деформації деталей під час спікання та нерівномірності усадки.

4.6.8 Ливник, жолоб та канал

Ливник з'єднує сопло машини для лиття з мережею жолобів, які подають розплавлену сировину в порожнину форми. Ливники мають форму конуса типового діаметра біля 6 мм та з конусністю 5°. Після того як форма відкривається для видалення деталі, ливник витягується з ливникової втулки. Для прискорення виробництва ливник можна підтримувати гарячим з метою запобігання повторного нагрівання, переробляючи його в сировину.

Ливник перетворюється на напрямну, що спрямовує розплавлений потік в порожнину форми через канал. Жолоби малого розміру уповільнюють наповнення, тому бажано використовувати великі жолоби з типовим діаметром від 3 до 6 мм. Зазвичай це означає відносне зменшення сили впорскування, направленої на деталь. Більш прийнятним є круговий дизайн жолоба, оскільки це допоможе зменшити тертя та втрату тепла під час заповнення, але інші форми можуть бути дешевшими. Також доступні гарячі жолоби, що дозволяють підтримувати температуру потоку в прес-формі. Гарячі жолоби мають важіль в каналі, який ізолює жолоб в перервах між впорскуваннями, і вони майже не використовуються при високих обсягах виробництва, де додаткові витрати зумовлені продуктивністю процесу.

Коли прес-форма складається з декількох порожнин, використовуються збалансовані конструкції з однаковою довжиною потоку до кожної порожнини, які допомагають досягти рівномірного заповнення порожнин. На практиці це означає, що кожна порожнина знаходиться на однаковій відстані від ливника. В системі жолобів можна застосувати важіль для ізоляції порожнин, які можуть зазнати пошкоджень під час виробництва.

В кінці жолоба знаходиться канал, який веде до порожнини форми. Канал залишає виїмки на поверхні деталі. Це невеликий отвір, який примерзає до деталі, жолоба або ливника. В ідеалі, твердий канал підтримує тиск в порожнині, який протидіє усадженню, пов'язаному з охолодженням сировини та стисканням сполучника. Занадто низький тиск, що виникає після замерзання каналу, призводить до виникнення пор або відмітин, в той час як надлишковий тиск призводить до злипання в формі. Бажано розташовувати канал на рівні найтовстішої ділянки компонента. Це допоможе знизити втрату температури та тиску, необхідних для заповнення форми.

Розмір каналу обумовлений швидкістю наповнення та товщиною ділянки. Для того, щоб канал примерз до деталі, необхідно, щоб розмір каналу був меншим за товщину стінки компонента. Якщо канал занадто

вузький, то підвищення швидкості потоку сировини призведе до зношування або відділення порошку від сполучної речовини. З іншого боку, якщо канал занадто широкий, то лиття буде уповільнене необхідністю використання гвинта для контролю за тиском сировини під час його охолодження. Якщо канал розташований в тонкій ділянці, то наповнення ускладниться через опір потоку та охолодження сировини. Більш того, слід від каналу впливає на прийняття рішення щодо розміщення. Розташування каналу найчастіше зумовлено косметичним виглядом деталі.

На додаток, розташування каналу має приводити до мінімізації ліній сплавлення. Лінії сплавлення формуються при відділенні та повторному з'єднанні сировини під час наповнення порожнини. Немає ніяких сумнівів в тому, що дефекти лінії сплавлення перетворюються в тріщини під час спікання. Тому канали розміщують там, де ймовірність виникнення дефекту від недоликів поверхні та лінії сплавлення найменша.

Отже, в зв'язку з тим, що в'язкість сировини Catamold® вища, ніж більшості термопластичних матеріалів, перепад тиску в ливниковій системі має бути якнайменшим. Це досягається такими конструктивними рішеннями.

- Ливникові канали мають бути якомога коротшими.
- Поперечний переріз ливникового каналу має бути якомога найбільшим.
- Поперечний переріз ливникового каналу має бути круглим.
- Необхідно уникати гострих кутів.
- Гарячі канали допомагають зменшити втрату тиску й час циклу.

4.6.9 Система штовхачів

Як тільки деталь пройшла охолодження в формі, її слід вилучити. Сила ежекції залежить від контактної зони між оснащенням і компонентом обробки поверхні прес-форми; коефіцієнта тертя та термічного усадження в порожнині. Також зв'язувальні фази сполучника, які призводять до зволоження, можуть стати причиною прилипання. Невелика конусність форми значно допоможе зменшити силу ежекції і часто становить $0,5^\circ$. Кути порожнини, як правило, мають заокруглену форму для легшої ежекції; радіуса в 0,2 мм буде достатньо, але він може становити і 0,05 мм.

Для завершення ежекції штифти в корпусі форми рухаються вперед разом з пластиною штовхача і виштовхують компонент з порожнини. Для спрощення процесу ежекції слід відмовитись від використання вставок, внутрішніх отворів або різьби.

Штовхачі залишають сліди на поверхні компонента, оскільки вони направляють силу виштовхування на м'який матеріал, тому для зменшення зусилля варто використовувати штовхачі більшого поперечного перерізу.

На рисунку 4.27 показані типові сліди від поршнів. Розміщення та кількість поршнів залежать від розміру компонента, міцності з'єднувальної

речовини та складності прес-форми. Зазвичай, поршні розміщують напроти некритичних ділянок та складають не більше 10% площі поверхні проєктованої деталі.



Рисунок 4.27 – Сліди від штовхачів системи ежекції

4.6.10 Шибери та стрижні

Деталі, орієнтовані перпендикулярно до шва форми, як правило, розташовуються на пластині форми, але деталі, орієнтовані вздовж шва форми, потребують використання шиберів та стрижнів. Ці частини оснащення занурюються та вилучаються з порожнини при кожному запиранні та відпиранні форми. На рисунку 4.28 наведено зображення набору оснащення з шиберами, що спричиняють рух вздовж шва форми при запиранні та відпиранні. Шибери та стрижні використовуються для утворення зрізів, сходинок та отворів. В деяких випадках при кожній інжекції в форму вставляють цільний предмет, який вручну *видаляється* з деталі після *видалення*. Це значно знижує вартість оснащення, але підвищує частоту виникнення дефектів та трудомісткість лиття, тому, зазвичай, цей метод не використовується при низьких обсягах виробництва.

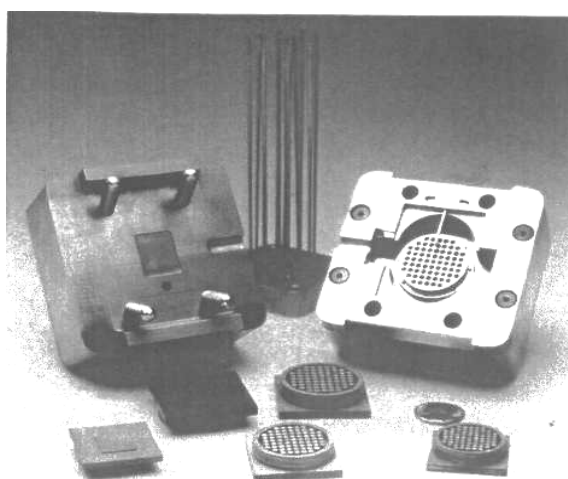


Рисунок 4.28 – Невелика вставка з жолобками для створення зрізу вздовж шва форми

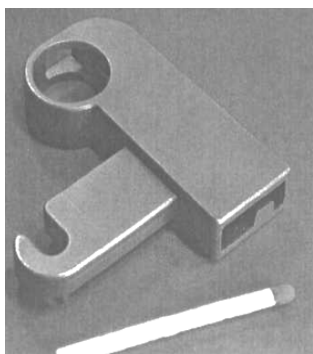


Рисунок 4.29 – Приклад медичного приладу з отвором, що знаходиться на лінії зі швом форми

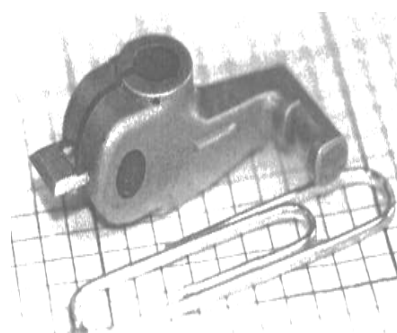


Рисунок 4.30 – Невеликий важіль ІЛП з отвором на шві форми

На рисунках 4.29 та 4.30 наведено два приклади параметрів, спричинених рухом поверхонь. Виступаючі штифти в половинях форми призводять до руху в площині рознімання під час запирання форми. Це дає змогу належним чином розмістити шибер в порожнині під час запирання. Виробництво шиберів, стрижнів і компонентів для відгвинчування (наприклад ті, що необхідні для створення внутрішньої різьби) є затратним аспектом виробництва оснащення. Тому зусилля щодо зміни структури компонента з метою ухилення від цих особливостей приведуть до зниження вартості оснащення.

4.7 Технічне обслуговування прес-форми

Регулярне розбирання й чищення прес-форми дозволить підтримувати високий рівень якості при великому обсязі виробництва. Частота проведення чищення залежить від якості й стану прес-форми (зношування), а також від умов експлуатації. При дуже несприятливих умовах експлуатації чищення проводиться після кожних десяти тисяч виливків, а при звичайних – після кожних двохсот тисяч виливків. Високий тиск і висока температура вимагають більш частого обслуговування прес-форми, щоб запобігти високого ступеня її зношування. Бажано вчасно робити заміну швидкозношуваних частин прес-форми.

Відповідне високотемпературне мастило необхідно наносити на рухомі частини тонким шаром. Жир або масло можуть просочуватися з-під штовхачів і викликати появу лінії спаю. Зношування прес-форми значно прискорюється з появою облою, і це може вплинути на умови експлуатації і якість виробів. При демонтажі прес-форми необхідно регулярно перевіряти ливникову втулку на предмет зношування. Багатомісні прес-форми можуть мати різні ступені зношування. Необхідно проводити регулярну технічну перевірку неповним упоркуванням для своєчасного виявлення незбалансованих гнізд.

4.8 Комп'ютерне моделювання процесу інжекційного лиття порошку

На сьогоднішній день моделювання інжекційного лиття – це важливий процес проектування оснащення. Він дозволяє знизити кількість доопрацювань прес-форми, що значно заощаджує час та економить ресурси виробництва. Незважаючи на те, що комп'ютерні програми для моделювання процесів лиття пластмас значно поширені, моделювання полімеру в суміші з металевим порошком знаходиться на ранньому етапі свого розвитку. Це пов'язано з відсутністю достатніх даних реології суміші а також відсутністю необхідних стандартів для вимірювання реологічних характеристик. Присутність металевого порошку в полімері сильно впливає на характеристики реології суміші при литті. Так, наприклад, на рисунку 4.31 подані дані теплопровідності та теплоємності для суміші ІЛП.

З даних графіків видно: теплопровідність суміші ІЛП майже на порядок вища від теплопровідності полімеру ($0,2 \text{ W/mK}$), а теплоємність, в свою чергу, в три рази менша, ніж у пластмас ($1,8 \text{ J/gK}$). Це означає, що потік суміші ІЛП несе в собі дуже малу частину тепла й також швидко втрачає енергію, потрапляючи у порожнину прес-форми. Процес лиття стає дуже чутливим до температури, порівняно з литтям пластмас. А тому правила конструювання оснащення для ІЛП мають відрізнятись.

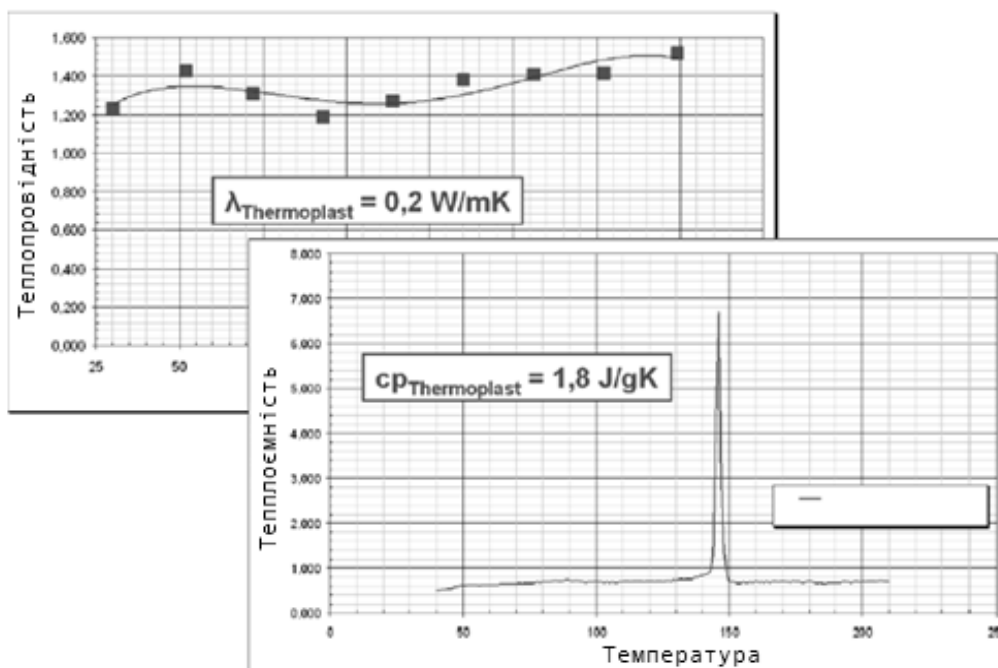


Рисунок 4.31 – Типові для суміші ІЛП графіки залежності теплопровідності та теплоємності від температури

Суміш ІЛП має свої особливості, а тому потребує власної математичної моделі потоку, відмінної від тієї, що використовується в програмах для

моделювання інжекційного лиття пластмас. На рисунку 4.32 яскраво проілюстровано відмінності між моделю «Cross WLF» (зверху), що зазвичай використовується для моделювання термопластичних сумішей, та моделю «Cross WLF», доповненою рівнянням Hershel-Bulkley.

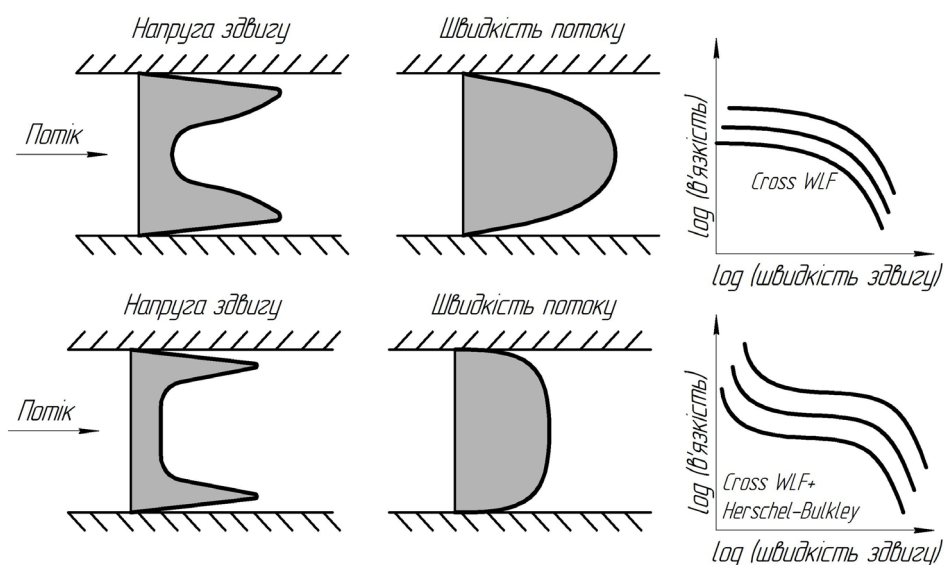


Рисунок 4.32 – Різниця профілів потоку суміші ІЛП для моделей «Cross WLF» та «Cross WLF» +Hershel-Bulkley

У зв'язку з лімітом напруги зсуву в'язкість всередині потоку значно підвищується. Результатом є плоский профіль швидкості потоку, його ще називають корковий потік. Тому все навантаження зсуву зосереджується на невеликому проміжку близько до стінок прес-форми, і суміш ІЛП буквально проковзує по стінках, викликаючи ефект фонтану. На рисунку 4.33 показано експеримент для порівняння процесу моделювання потоку та лиття на термопластавтоматі.

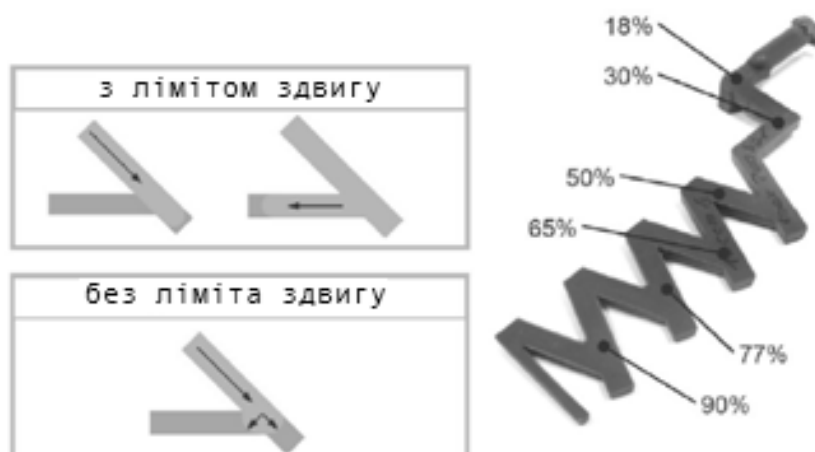


Рисунок 4.33 – Вимірювання в'язкості потоку

Форма відливка у вигляді «зигзагу» була використана для ілюстрації важливості ефекту лімітованої напруги зсуву для стадії наповнення та

застигання суміші. Як видно з рисунка 4.33, чим більша відстань від точки упорскування, тим більша в'язкість суміші.

Математичне моделювання потоку для сумішей ІЛП є складнішим, ніж для традиційних полімерів. Суміші ІЛП більше схожі на пасту, особливо при низьких швидкостях потоку, ніж на рідину, навіть порівняно з термопластичними полімерами (рисунок 4.34).

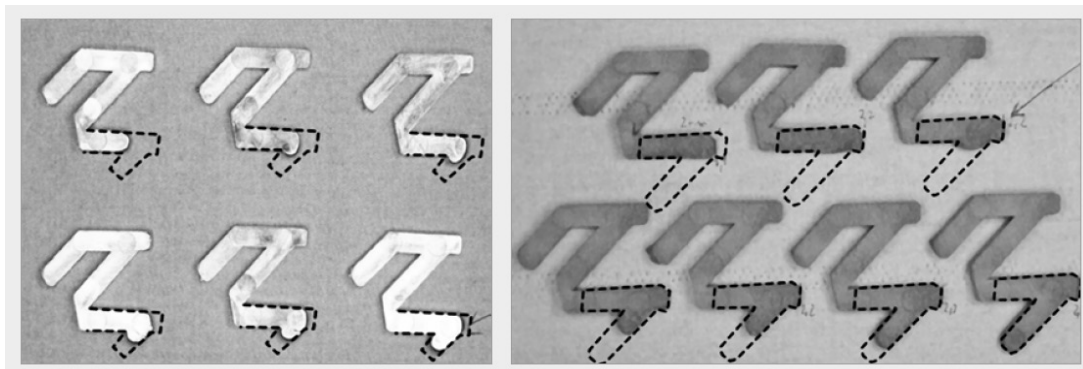


Рисунок 4.34 – Порівняння потоків для термопластів (зліва) та для сумішей ІЛП (справа) показує наявність ефекту вільного потоку навіть при низьких швидкостях, що пов'язано з високою в'язкістю

Крім того, металеві частинки схильні до відокремлення від зв'язувальної речовини внаслідок ефектів зіткнення та градієнтів зсуву під час проходження потоку (рис. 4.35).

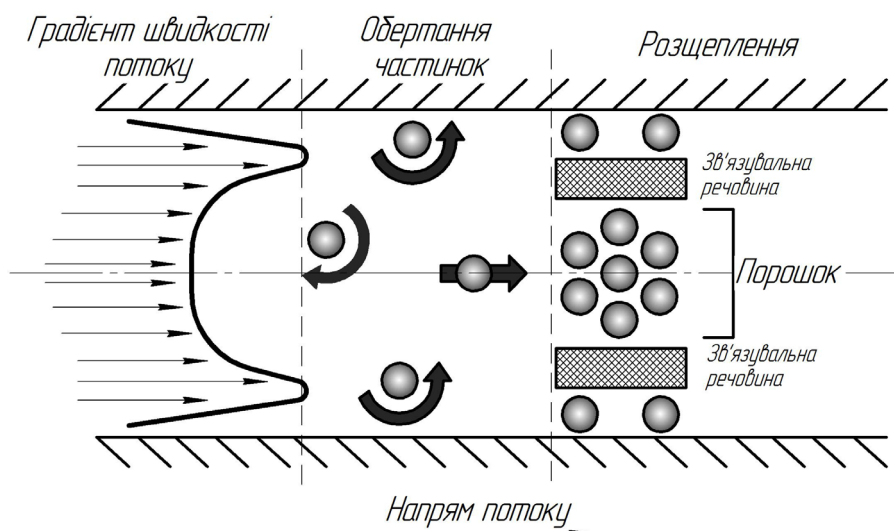


Рисунок 4.35 – Ефект відокремлення часток порошку від зв'язувальної речовини

В результаті такого розщеплення утворюється нерівномірна концентрація порошку у відливку, що негативно впливає на процеси дебайдингу, спікання та якість вихідної деталі. Також, відокремлення металевих часток від полімеру суттєво впливає на в'язкість суміші.

Оскільки в'язкість є функцією від концентрації порошку, розщеплення призводить до великої різниці в локальній в'язкості та деформації потоку, як показано на рисунку 4.36.

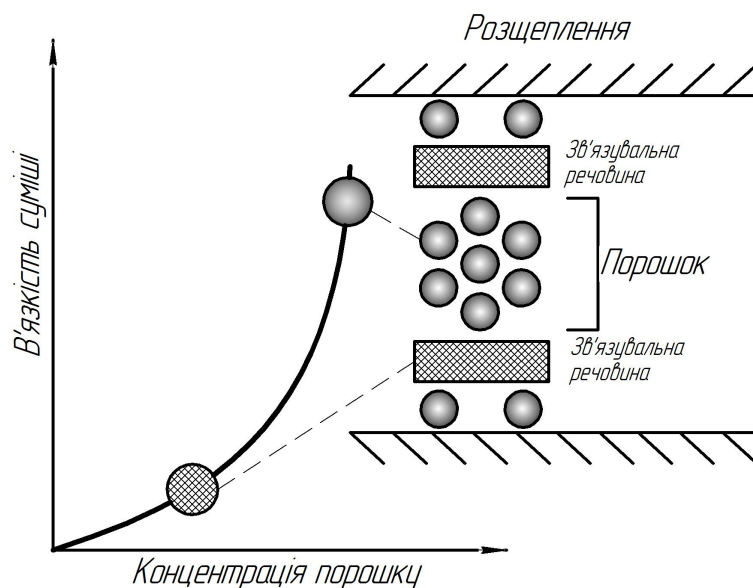


Рисунок 4.36 – Відокремлення порошку від зв'язувальної речовини призводить до різниці у локальній в'язкості

Для багатьох матеріалів в'язкість зв'язувальної речовини набагато менша, ніж в'язкість суміші. Це сприяє утворенню змащувальної плівки, по якій суміш проковзує під час проходження потоку без значного деформування.

Використання капілярних реометрів для вимірювання в'язкості суміші ІЛП не дає чітких результатів, оскільки дуже малі швидкості зсуву виникають повсюди в порожнині прес-форми а також в ливникових каналах. А це значно впливає на прогнозування траєкторії потоку суміші, втрати тиску, тиску витримки та застигання суміші. А тому для суміші ІЛП потрібна комбінація вимірювання великих і малих величин напруги зсуву.

5 ВТОРИННІ ОПЕРАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ІЛП

Перша причина використання інжекційного лиття порошку пов'язана з прибутковістю. В багатьох випадках це зумовлено використанням ІЛП як формувальної технології, в якій остаточні властивості досягаються за допомогою вторинних операцій. Не дивлячись на те, що шліфування та машинна обробка є досить затратними, іноді остаточній машинній обробці набагато легше піддавати заготовку ІЛП. Ведення якісного контролю за процесом ІЛП в цьому випадку вимагає додаткових витрат, в той час як утворення нових властивостей за допомогою вторинних операцій є більш простим методом вирішення проблеми.

Біля 60% продуктів ІЛП проходять, як мінімум, одну операцію після спікання для отримання бажаних властивостей та точності. Вторинні операції необхідні в таких випадках:

- термічна обробка для досягнення твердості або міцності;
- усунення таких недоліків виробництва, як сліди штовхачів, точка впорскування та ін.;
- вирівнювання компонента;
- шліфування критичних поверхонь з метою отримання необхідних допусків;
- карбонізація зовнішньої поверхні з метою підвищення твердості;
- додавання точних отворів;
- нанесення матеріалу гальванічним способом або фарбування;
- складання деталей з метою отримання цільного компонента;
- полірування зовнішньої поверхні;
- видалення пор з використанням різноманітних методів шліфування та ущільнення.

На додаток, необхідно проводити остаточну перевірку продукту з метою впевненості в його відповідності технічним вимогам. Тому виробництво компонентів методом ІЛП зазвичай не закінчується на вилученні деталі з печі для спікання. Успішне виконання цих остаточних кроків забезпечує відповідність продукту вимогам сфери використання. Зазвичай, вторинні операції ІЛП схожі на операції інших методів виробництва, тому ці кроки виконують згідно з традиційними вимогами виробництва.

5.1 Вторинна переробка

Виробництво деталей за технологією ІЛП характеризується максимально економним використанням матеріалу. За умови, що сировина Catamold® оброблялася належним чином, її відходи можна використовувати вдруге. Стандартною практикою є змішування первинної та вторинної сировини в пропорції 30/70% (де 30% – це перероблений

матеріал). Кількість можливих вторинних переробок Catamold® залежить від виробу, що відливається, сукупного часу знаходження в циліндрі та від імовірної деструкції матеріалу при проходженні через ливникову систему. Під час випробувань в екстремальних умовах зі стовідсотковим рециклом було виявлено, що сировина може бути використана від трьох до п'яти разів, починаючи, якщо можливо, з первинної сировини, без істотних втрат пластичності і якості. Вторинне дроблення варто проводити при низьких швидкостях. Високошвидкісні апарати краще не використовувати. Також слід зауважити, що, при використанні стовідсотково переробленого матеріалу, перед засипанням в бункер термопластавтомата матеріал слід гранулювати на екструдері. Це забезпечить рівномірне дозування матеріалу в циліндрі машини, і тому маса відливків буде більш стабільною.

5.2 Деформування заготовки

5.2.1 Холодна деформація

Металеві компоненти, які зазнають невеликих змін після спікання, можуть бути вирівняні або зміцнені за допомогою холодної деформації. Вузьке розширення габаритів можливе завдяки куванню. Етап кування зазвичай пов'язаний з невеликою деформацією, яка часто помічається на поверхні або впливає на властивості (наприклад діаметр). В умовах масового виробництва кування (або точне штампування) виконується за допомогою автоматизованого обладнання.

5.2.2 Гаряча деформація

Метод гарячої деформації та гарячого ущільнення допомагає збільшити кінцеву щільність та покращити властивості, що веде до отримання повної щільності. Цей етап необхідний для таких галузей з високою надійністю, як електроніка, медицина, аерокосмічна галузь та буріння нафтових свердловин.

Одним із методів досягнення повної щільності є герметизація компонента після циклу спікання. Перший етап циклу спікання проходить у вакуумі, після чого піч заповнюється газом під високим тиском до охолодження. Цей метод часто застосовують до цементованих карбідів. Технологія вимагає для спікання наявності вакуумної печі з товстими стінками, оскільки тиск дуже високий і може досягати 100 МПа. Результати просто вражаючі; наприклад, показники сталі ІЛП зі спеченою міцністю 500 МПа та п'ятивідсотковим розтягненням до злому були покращені до 720 МПа та 23-відсоткового розтягнення після гарячого ущільнення.

Другий підхід – це використання гарячого ущільнення у вигляді окремої операції після спікання з використанням гарячого ізостатичного пресування. Таблиця 5.1 містить дані декількох циклів гарячого ізостатичного пресування, використаних для обробки компонентів ІЛП. Цикл містить одночасне нагрівання та герметизацію. В гарячих

ізостатичних пресах можна досягти тиску до 200 МПа (2000 атмосфер) та температури до 2200 °С. Не дивлячись на покращення механічних властивостей, обладнання та додаткова обробка є дуже затратними. Відповідно, цикли повного спікання використовуються лише для високотехнологічних та високонадійних сфер використання в тих випадках, коли велике значення має високий опір до втоми.

Таблиця 5.1 – Умови з'єднання під дією тиску для матеріалів ІЛП

Матеріал	Температура, °С	Тиск, МПа	Тривалість, годин
окис алюмінію (Al_2O_3)	1650	100	1
цементований карбід (WC-10Co)	1300	200	1,5
гідроксиапатит ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$)	1100	200	2
залізо-нікель (Fe-50Ni)	1100	175	1
карбід кремнію (SiC-1B)	2000	200	0,8
сталь (Fe-C)	805	200	1
суперсплав Інконель 718	1240	200	4
інструментальна сталь M2	900	150	1
двоокис цирконію ($ZrO_3-3Y_2O_3$)	1400	200	2

5.3 Механічна обробка

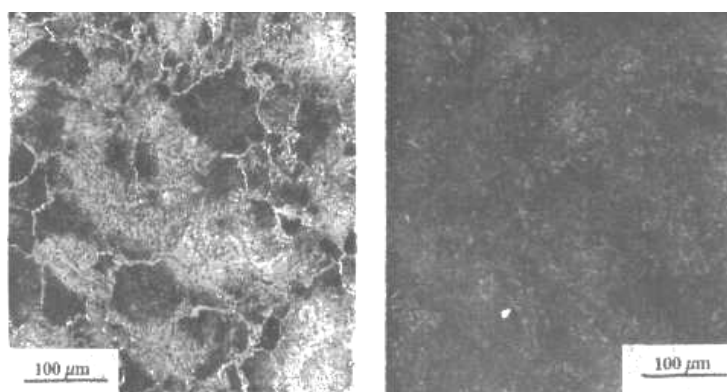
Машинна обробка пов'язана з усуненням ваги спеченого компонента, що значно відрізняється від процесу деформації, який змінює форму без зміни ваги. Всі стандартні операції машинної обробки можуть бути застосовані до компонентів ІЛП. На практиці машинна обробка найчастіше застосовується для додавання різьби, зрізів, отворів та особливих властивостей, які неможливо внести до прес-форми ІЛП. Полірування – це ще одна стандартна операція, яку можна застосовувати до компонентів ІЛП. В деяких випадках хімічний склад порошку або мікроструктури можна змінити з метою полегшення цих кроків. Наприклад, нержавіюча сталь ІЛП часто має невеликий вміст керамічного порошку, який додається з метою полегшення полірування. Сталі ІЛП також можуть містити сульфід марганцю для подовження строку використання оснащення.

Щодо матеріалів ІЛП, то використання машинної обробки зведене до мінімуму та застосовується лише для зміни габаритів і властивостей. Декілька компаній на сьогоднішній день використовують ІЛП для створення формованої заготовки з навмисним наміром машинної обробки після спікання для отримання кінцевих габаритів. Це схоже на лиття з наступною обробкою. В таких випадках твердість матеріалів впливає на строк роботи ріжучих інструментів, тому, за можливості, машинна обробка проводиться перед будь-якою термічною обробкою, але, оскільки деякі матеріали змінюють габарити під час термічної обробки, необхідно відкласти машинну обробку або шліфування аж до кінцевого етапу.

5.4 Термічна обробка

Термічна обробка може використовуватись для зменшення неоднорідності хімічного складу, мікроструктури, розподілу легувальних елементів після спікання (гомогенізувальний відпал, відпал першого роду, відпал другого роду) або для поліпшення таких конструктивних властивостей матеріалу, як твердість, міцність, відносне видовження та ін. (гартування, відпуск, нормалізація). Термічна обробка матеріалів ІЛП проходить за тим же принципом, що й для кованих і литих матеріалів. Це не той випадок для пористої сталі порошкової металургії, коли пори впливають на характеристики. В окремих випадках термічні обробки можна об'єднати в один цикл спікання, який має назву зміцнення-спікання. Приблизно 60% залізних продуктів ІЛП піддається термічній обробці після спікання. Наприклад, при термічній обробці інструментальних сталей ІЛП необхідно створити мікроструктуру з високою твердістю для отримання міцності та опору до зносу. Для деяких видів металокераміки, композитів і матеріалів з управлінням теплом термічна обробка після спікання необхідна для послаблення диференційованих навантажень, що виникають внаслідок невідповідності теплового розширення

В залізо-вуглецевих сталях термічні обробки використовуються для контролю над твердістю. Для сфер з високим рівнем зношуваності бажаний високий вміст мартенситу. Однак висока твердість призводить до ламкості сталі, тому для послаблення твердого мартенситу використовується відпуск. Загартування проводиться при температурах від 830 до 1000 °С.



а)

б)

Рисунок 5.1 – Порівняння можливостей мікроструктури ІЛП сталі Fe-2Ni-0,8C: а) спікання, що дає м'які умови з твердістю 79 HR_B; б) термічна обробка до твердості 45 HR_C

Рисунок 5.1 показує можливу зміну мікроструктури та властивостей для сталі ІЛП Fe-2Ni-0,8C шляхом термічної обробки після спікання. Для цих мікроструктур термічні обробки охоплюють повільне охолодження від

температури спікання та загартовування після спікання (300 °С за годину). Отримані рівні твердості дорівнювали 79HR_B та 45HR_C відповідно.

При виробництві методом ІЛП іноді виникає проблема контролю за вуглецем, що, зазвичай, зумовлено забрудненням сполучної речовини. Оскільки реакція на термічну обробку залежить від рівня вуглецю, дуже важливо мінімізувати забруднення з метою забезпечення належної реакції на термічну обробку. В таблиці 5.2 наведено ряд прикладів механічних властивостей, отриманих за допомогою термічної обробки та ущільнення після спікання матеріалів ІЛП.

Таблиця 5.2 – Приклади механічних властивостей термічно оброблених сталей ІЛП (σ_y – границя текучості при розтягуванні; σ_u – границя міцності на розрив; ϵ_F – границя текучості)

Сплав та хімічний склад	Термічна обробка	Твердість HRC	Властивості
нержавіюча сталь 17-4 PH (Fe-17Cr-4Ni-4Cu)	насичення 900 °С, 1 год	34	$\sigma_y = 750 \text{ МПа}$ $\sigma_u = 900 \text{ МПа}$ $\epsilon_F = 10\%$
нержавіюча сталь 17-4 PH (Fe-17Cr-4Ni-4Cu)	насичення 1000 °С, 1 год, водне загартовування, старіння 480 °С, 1 год	41	$\sigma_y = 1170 \text{ МПа}$ $\sigma_u = 1310 \text{ МПа}$ $\epsilon_F = 6\%$
сталь 4607 (Fe-2Ni-0,4Mo-0,7C)	насичення 900 °С, 1 год, водне загартовування, загартовування з наступним відпуском 550 °С	27	$\sigma_u = 1000 \text{ МПа}$ $\epsilon_F = 4\%$
сталь (Fe-2Ni-0,4C)	насичення 850 °С, 1 год, водне загартовування, загартовування з наступним відпуском 340 °С	31	$\sigma_y = 980 \text{ МПа}$ $\sigma_u = 1125 \text{ МПа}$ $\epsilon_F = 6\%$
сталь (Fe-2Ni-0,5C)	насичення 850 °С, 1 год, мас- ляне загартовування, загарто- вування з наступним відпуском 205 °С, 1 год	45	$\sigma_y = 1338 \text{ МПа}$ $\sigma_u = 1722 \text{ МПа}$ $\epsilon_F = 9\%$
сталь (Fe-2Ni-0,8C)	насичення 900 °С, 1 год, водне загартовування, загартовування з наступним відпуском 400 °С, 1° год	35	$\sigma_u = 1115 \text{ МПа}$ $\epsilon_F = 3\%$
інструментальна сталь (Fe-18Cr-3V-1Mo-1Si-1,3C)	насичення 1050 °С, 30 хв, масляне загартовування, за- гартовування з наступним від- пуском 400 °С, 2 год, повтор – 2 рази	61	$\sigma_y = 2300 \text{ МПа}$ $\sigma_u = 3000 \text{ МПа}$
інструментальна сталь M2 (Fe-6W-5Mo-4Cr-2V-1C)	окалина 1000 °С, загартовування, 560 °С загартовування з наступним відпуском 90 хв, повтор 2 рази	65	сила згину = 3630 МПа

Проблема термічної обробки після спікання полягає в зміні габаритів, оскільки кожна металева фаза має невелику різницю в щільності. Тому контроль над циклом термічної обробки необхідний для зменшення усадки та зміни габаритів. Гартування є поширеним видом термічної обробки,

адже дана операція дозволяє значно підвищувати твердість та міцність вуглецевих сталей ІЛП після спікання.

5.5 Процеси гарячого ізостатичного пресування

Гаряче ізостатичне пресування (Hot Isostatic Pressing) – це технологія, завдяки якій залишкова пористість в деталях може бути усунена. Для інженера завжди бажано поліпшення механічних властивостей. Вплив залишкової пористості на механічні властивості матеріалів, виготовлених шляхом порошкової металургії, добре відомий більше 60 років. У роботах Alexander Squire (1947 р.) вивчено вплив залишкової пористості заліза. На рисунку 5.2 показано вплив пористості на такі параметри, як напруження текучості, пластичність і ударна в'язкість. Залишкова щільність на графіку розраховується як відносна щільність:

$$\text{Відносна щільність} = 1 - \text{Відсоток пористості.}$$

Наприклад, при пористості 2% відносна щільність дорівнює 0,98 (1 - 2 / 100). Матеріал без пор має відносну щільність 1. На рисунку 5.2 показано три графіки, нахил ліній яких вказує чутливість кожного параметра залежно від відносної густини. Чим крутіше сходження кривої при наближенні до одиниці, тим сильніше вплив пористості. На графіках зазначено також вплив 2% пористості на границю текучості, пластичність та ударну в'язкість, а також вказані можливі поліпшення, які можна очікувати при застосуванні процесу ГП. Виходячи з даних графіків видно, що при усуненні залишкової пористості 2% границя текучості збільшиться на 4%, пластичність матеріалу зросте на 10%, ударна в'язкість зросте на 40%. Також пористість суттєво впливає на міцність від втоми матеріалу при великій кількості циклів.

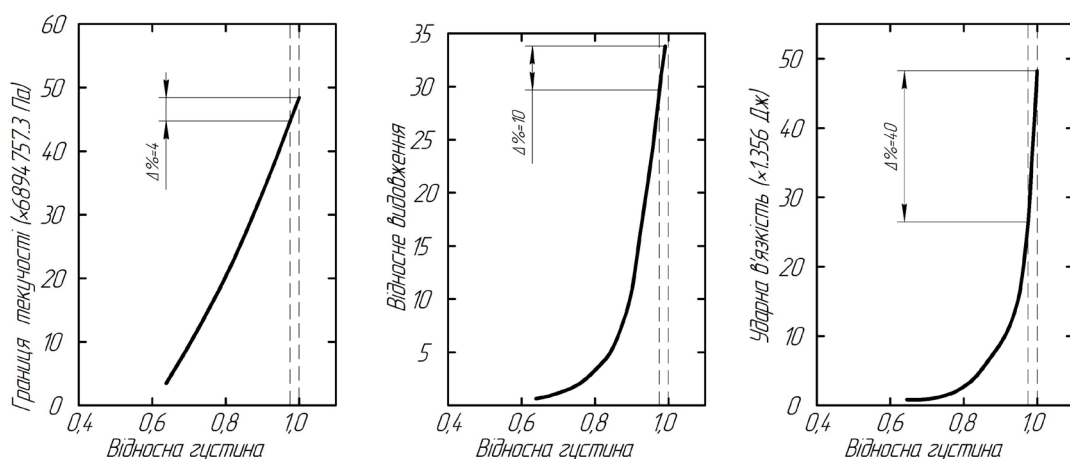


Рисунок 5.2 – Вплив пористості на механічні параметри матеріалу (границю текучості, відносне видовження, ударну в'язкість)

Також слід зазначити, що залишкова пористість це тільки один з типів дефектів мікроструктури, властивих деталям МІМ. Включення в формі

оксидів, сульфідів, з'єднань кремнію та ін. мають такий же негативний вплив, як і пористість. Високий вміст цих компонентів може обмежити або зменшити будь-які поліпшення, отримані ізостатичним пресуванням. Також слід зазначити, що зміни в процесах спікання, ГП, або термічної обробки можуть впливати один на одного. Наприклад, можна зменшити пористість ізостатичним пресуванням і потенційно поліпшити пластичність, але при цьому збільшиться розмір зерна, а це негативно позначається на пластичності.

У разі, якщо ГП потрібно задіяти в технологічному процесі виробництва, необхідно розглянути всі завади, які можуть виникнути при ущільненні деталей для отримання максимальних механічних властивостей матеріалу. Взаємозв'язок між пористістю і механічними властивостями досить відомий, це змушує виробників збільшувати температуру спікання для отримання максимальної пористості. Хоча даний підхід може дати позитивний результат для досягнення максимальної щільності, але також він має негативний ефект у випадку застосування ГП-процесів. Причиною цього є зростання розміру зерна і його вплив на дифузійне ущільнення.

Остання стадія ущільнення при ізостатичному пресуванні заснована на дифузії, особливо на перенесенні атомів до пористої поверхні і переміщення вакансій атомів до поверхні деталі. Протягом першого етапу ущільнення, коли частинки матеріалу ущільнюються пластично, найближчі поверхні частинок зварюються разом і стають межами зерен, поєднуючи пори одна з одною а також з поверхнею деталі. Цей процес можна візуально побачити на рисунку 5.3.

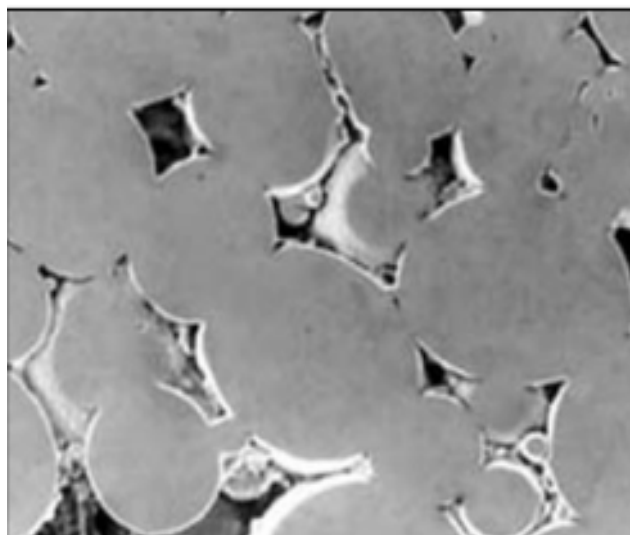


Рисунок 5.3 – Зображення частково ущільненого сферичного порошку

Разом з новоствореною межею зерен, де атомна решітка одного зерна не збігається з атомною решіткою іншого зерна, відносна відкритість

атомної структури, служить як швидкісна траса для переміщення атомів і вакансій, збільшуючи швидкість ущільнення матеріалу.

Для технології ІЛП використовують порошки набагато меншого розміру, ніж для порошкової металургії. Збільшенню зерна сприяє природне бажання зменшити загальну енергію системи шляхом зменшення поверхні, в даному випадку поверхні межі зерен. Оскільки для ІЛП-процесу використовується порошки набагато меншого розміру, ніж для порошкової металургії, матеріали ІЛП більш схильні до зростання зерна. Та сила, що прискорює спікання та дозволяє ІЛП-компонентам досягти максимальної щільності, в даному випадку працює проти виробників.

Процес гарячого ізостатичного пресування може бути описаний як високотемпературна обробка тиском. Коли обробляються деталі ПЛ, основним завданням є усунення залишкової пористості з металевого продукту. Для виконання даного завдання деталь нагрівається до температури, коли значно знижується напруга текучості сплаву і активується процес дифузії. Ізостатичний тиск ущільнює деталі на першій стадії шляхом пластичної течії і на більш пізній стадії – шляхом механізму дифузійної повзучості. Промислове обладнання для ГП процесу, як правило, працює при температурі до 1300 °С і тиску 210 °МПа, в той час як спеціалізовані установки досягають температур в 2200 °С і тиску в 700°МПа. Для передачі тиску використовують інертний газ (аргон).

Перед проведенням ізостатичного пресування деталі мають бути спечені до точки, коли пористість ізольована від поверхні. Також передбачається, що ніякі включення в ізольованих порах не будуть перешкоджати деформації (гази з низькою дифузією, такі як аргон). Таке припущення не завжди є істиною. Не будь-яка пористість може бути усунена шляхом ГП-процесу. Пору або система пор, що з'єднана з поверхнею, не може бути усунена шляхом ізостатичного пресування.

Існує безліч причин, чому виробники мають розглянути використання ГП-процесів для видалення пористості в деталях, виготовлених методом порошкового інжекційного лиття (ПЛ). З одного боку, поліпшення механічних характеристик, особливо ударної в'язкості та втомної міцності, а з іншого – поліпшення зовнішнього вигляду й безпеки медичних інструментів. Не дивлячись на всі переваги застосування ГП, після спікання необхідно розглядати всі фактори, які впливають на ущільнення деталі після ГП, а також на вихідні механічні властивості деталі. Звичайний підхід, при якому просто застосовується найбільш дешевий процес ГП, відповідний для всіх сплавів, може не реалізувати весь потенціал використання ГП для ПЛ-деталей. Висока концентрація неметалевих включень або нездатність процесу ГП усунути залишкову пористість, ізольовану всередині зерна внаслідок зростання розміру зерна, може відігравати негативну роль при освоєнні процесу ГП. З іншого боку, коли процеси ізостатичного пресування і спікання відрегульовані для

отримання безпористого виробу, можна отримати високі властивості матеріалу.

5.6 З'єднання заготовок

Після виробництва компоненти ІЛП складаються разом. Складання може застосовуватись для різних матеріалів, що не можуть бути сполучені при спіканні. Для всіх матеріалів ІЛП використовуються всі стандартні процеси з'єднання. Це стосується як посадки механічних з'єднань, так і потужних лазерів або електронно-променевого зварювання. Зазвичай, ступінчасті з'єднання внапусток або плавні конусні з'єднання є найбільш вдалими. Одним з варіантів є сполучення компонентів в стані заготовки та з'єднання під час спікання – цей процес називається «з'єднання при спіканні». При цьому можливі такі унікальні з'єднання, як розміщення одного компонента всередині іншого, окремо вилитого, компонента. Як демонстрація можливостей виступає кулькове шарнірне з'єднання, вироблене з окремих заготовок. При правильному виборі матеріалу та циклів спікання можна чітко побачити зв'язок, приклад якого показано на рисунку 5.4. Це мікроскопічне зображення з'єднання після спікання низьколегованої сталі з інструментальною.

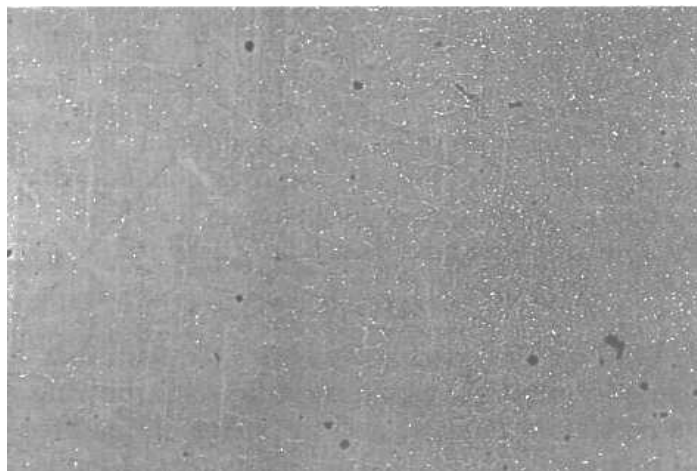


Рисунок 5.4 – Мікроструктура з'єднання двох компонентів ІЛП, отриманого методом лазерного зварювання

Як правило, спечені матеріали ІЛП не мають серйозних проблем при з'єднанні. Як показано на рисунку 5.5, зв'язки мають високу якість і виглядають так само, як вони б виглядали при з'єднанні кованих матеріалів.

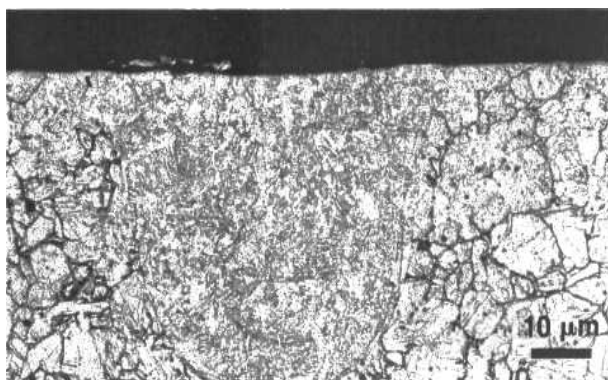


Рисунок 5.5 – З'єднання при спіканні нержавіючої сталі зі сталлю, утворене з двох заготовок, що були спечені після складання

5.7 Обробка поверхонь

Обробка поверхонь зазвичай використовується в ІЛП для покращення функціональності та естетики компонентів. Для цього використовують всі звичайні покриття, також плакування, розпилення, фарбування, полірування, чищення, анодування, гальванізацію, герметизацію та лазерне полірування. Сталеві компоненти ІЛП піддаються термічній обробці з метою зміцнення поверхні для отримання твердої серцевини та жорсткого покриття.

До компонентів ІЛП застосовують різноманітні методи покриття, від фарбування до наплавлення шарів, але більш поширеним є нанесення гальванічного покриття. Гальванізація використовується як для покращення зовнішнього вигляду, так і для підвищення опору до корозії. Більшість гальванічних покриттів складається зі сплавів заліза з використанням хрому, нікелю, міді, золота, цинку, срібла та кадмію. Нікелеве гальванічне покриття широко застосовується в інструментальному виробництві, у виробництві зброї або магнітних компонентів. Раніше кадмій дуже широко застосовували в багатьох електричних компонентах, але його використання було припинене через проблеми з довкіллям.

На відміну від традиційної порошкової металургії, яка має проблему пор на поверхні, спечені структури ІЛП майже не містять пор; тому процедури гальванічного покриття такі самі, як і для інших матеріалів.

5.8 Стандарти для матеріалів, виготовлених за технологією інжекційного лиття порошків

Міжнародні стандарти для технології інжекційного лиття порошку поділяються на три крім напрямки: термінологія, матеріали та тестування. В таблиці 5.3 подано загальний огляд існуючих міжнародних стандартів для ІЛП.

Таблиця 5.3 – Огляд стандартів ІЛП

Призначення	Назва організації	Номер стандарту	Назва стандарту	
Термінологія	MPIF	Standard 64	Терміни, що використовуються в технології ІЛП	
Матеріали ІЛП	Загальне	MPIF	Standard 35	Стандарт на матеріали, що виготовляються за технологією ІЛП
		ISO	22068	Матеріали, що підлягають спіканню за технологією ІЛП
		ASTM	B883-15	Стандарт на матеріали, що виготовляються за технологією ІЛП
	Ti	ASTM	F2989-13	Стандарт на компоненти із нелегованого титану для хірургічних імплантів.
	Ti-6Al-4V	ASTM	F2885-11	Стандарт на компоненти для хірургічних імплантів із сплаву титану з легувальними домішками алюмінію та ванадію.
	Co-28Cr-6Mo	ASTM	F2886-10	Стандарт на компоненти для хірургічних імплантів із сплаву кобальту з легувальними домішками хрому та молібдену.
	Ni	SAE	AMS 5917	Сплави на основі нікелю (Alloy718), гаряче ізостатичне пресування, термічна обробка.
Процедури проведення випробувань	ISO	2740	Стандарт на тестові зразки для випробування на розтяг (за винятком твердих сплавів).	
	MPIF	Standard 50	Підготовка та оцінювання тестових зразків для випробування на розтяг (спікання та термообробка)	
	MPIF	Standard 59	Метод для визначення ударної в'язкості (Шарпі) для ненадрізаних зразків ІЛП	
	MPIF	Standard 62	Визначення корозійної стійкості для нержавіючих сталей, виготовлених за технологією ІЛП	
	MPIF	Standard 63	Визначення густини деталей ІЛП (газовий пікнометр)	

Перша активна спроба стандартизації технології ІЛП була здійснена у США федерацією порошкової металургії MPIF (Metal Powder Industries Federation) на початку 1990-х років. Таким чином з'явився перший випуск стандарту MPIF Standard 35, виданий у 1993 році, який був націлений на матеріали ІЛП. У наступні роки федерація MPIF випустила декілька

стандартів, присвячених ІЛП відносно термінології та процедури тестування матеріалів.

Американська асоціація тестування та матеріалів ASTM (American Society for Testing and Materials) опублікувала чотири стандарти ІЛП, починаючи з 1997 року. Дані стандарти регламентували властивості таких матеріалів, як різноманітні сталі, титан та його сплави, сплави кобальту і хрому.

У Європі перша активність стосовно стандартизації технології ІЛП також почалась 25 років тому, загалом завдяки європейській асоціації порошкової металургії EPMA. У 1996 році Міжнародна Асоціація зі Стандартизації (ISO), Технічний комітет 119 з порошкової металургії заснував робочу групу WG5, що була призначена цілком технології ІЛП. В результаті було опубліковано стандарти ISO22068 стосовно матеріалів та доповнений стандарт ISO22068 для визначення напруження на розтяг. Також матеріали ІЛП доступні у міжнародній базі даних порошкової металургії Global Powder Metallurgy Database (www.pmdatabase.com).

5.8.1 Термінологія

Існування точної термінології важливо для успішних взаємовідносин між виробником деталей ІЛП та замовником. Це спрощує комунікацію та допомагає запобігти розбіжностей у розумінні. Існування окремого стандарту термінології для технології ІЛП важливе, оскільки в ньому присутні деякі процеси та поняття, які відсутні в таких традиційних технологіях, як лиття, механічна обробка, штампування та ін. Також дана термінологія відрізняється від існуючих для процесів порошкової металургії (MPIFStandart 9; ASTM B243) та інжекційного лиття пластмас (ASTM D883).

Міжнародний стандарт «MPIFStandart 64» містить в себе такі поняття: характеристика частинок порошку (наприклад, сферичність, особливості поверхні частинок, розподіл розмірів порошку у партії, насипна густина, набивна густина); терміни для кожної операції в технологічному ланцюгу (змішування, лиття, дебайдинг, перший етап спікання та ін.), терміни для важливих параметрів (вміст порошку у суміші, температура плавлення, тиск витримки, коефіцієнт усадки); назва деталей на кожному етапі виробництва («зелена», «коричнева», спечена деталь); а також визначення типових проблем для ІЛП (вільна течія полімеру, облой, лінії спаю, пористості, розщеплення матеріалу та ін.); характеристики спеченого матеріалу (густина, закрита пористість, відкрита пористість).

5.8.2 Матеріали ІЛП

Стандартизація матеріалів, отриманих за технологією ІЛП, важлива для отримання надійних деталей. Як правило, при визначенні властивостей матеріалу можуть використовуватись дві концепції: мінімальні значення та типові значення.

Концепція мінімальних значень

В стандартах для таких матеріалів, як MPIFStandard 35; ISO 2206 подані мінімальні значення можуть містити типові значення фізичних та механічних властивостей. Такі стандарти властивостей. Такі дані надаються визначають значення властивостей окремими виробниками деталей ІЛП матеріалів, які отримуються при та залежать від сфери використання комерційному виробництві. деякі з них можуть бути покращені властивості можуть бути важливі в окремих випадках, отриманні при оптимізації процесу. залежно від сфери використання. Мінімальні значення можуть Такі значення можуть полегшити використовуватись при виборі вибір матеріалу. Типові значення матеріалу, що найбільше підходить ніколи не можуть бути прийнятті як для конкретного призначення. мінімальні.

Концепція типових значень

MPIFStandard 35

Даний стандарт покриває декілька аспектів традиційної порошкової металургії, охоплюючи виготовлення структурних деталей пресуванням та спіканням, підшипники та втулки, а також деталі ІЛП. Стандарт для ІЛП ділиться на три розділи: пояснення термінів і таблиці з величинами в розмірності дюйм-фунт та в розмірності SI. В даному стандарті подані значення фізичних властивостей для матеріалів, що знайшли найбільше комерційне застосування: низьколеговані сталі (MIM-2200, MIM-2700, MIM-4140, MIM-4605), нержавіючі сталі (MIM-316L, MIM-420, MIM-430L, MIM-440, MIM-17-4PH), магнітні сплави (MIM-2200, MIM-Fe50Ni, MIM-Fe3Si, MIM-Fe50Co, MIM-430L), сплави з контрольованим коефіцієнтом розширення (MIM-F15) та мідь (MIM-Cu). Для кожного матеріалу ІЛП подані значення хімічного складу, густини, механічних властивостей як до, так і після термічної обробки.

ASTMB883-15

Даний стандарт був створений на основі MPIFStandard 35, використовуючи однотипну систему номенклатури, проте з меншою кількістю матеріалів, охоплюючи тільки низьколеговані сталі, нержавіючі сталі та мідь.

ISO 22068

Цей стандарт присвячений тільки технології ІЛП. В ньому присутні означення термінів а також специфікації матеріалів для хімічного складу, густини, твердості, механічних, магнітних і корозійних властивостей. В стандарті ISO 22068 подані значення до та після термічної обробки для таких матеріалів, як низьколеговані сталі (MIM-Fe2Ni, MIMFe2NiC, MIMFe8Ni, MIM-Fe8NiC, MIM-4140, MIM-4340, MIM-4605, MIM-52100), нержавіючі сталі (MIM-316L, MIM-430, MIM-17-4PH), магнітні сплави

(MIM-Fe₂Ni, MIMFe₃Si, MIM-Fe₅₀Ni, MIM-Fe₅₀Co, MIM-430), титан та його сплав Ti-6Al-4V.

ASTMF2989-13 (титан)

В даному стандарті наведені вимоги до хімічному складу, механічних та металургійних властивостей для нелегованого титану. Даний матеріал призначений для виготовлення хірургічних імплантів шляхом інжекційного лиття порошку. В стандарті подано два типи чистого титану: перший тип – це титан, що підлягає операції пресування після спікання. Такий процес підвищує густину спеченого матеріалу, що, в свою чергу, покращує механічні властивості. Другий тип – це спечений матеріал без додаткової обробки. Хімічний склад регламентує максимальну кількість кисню, азоту, вуглецю, водню та заліза, що може містити титан після спікання. Також наведені значення механічних властивостей для обох типів матеріалу (після спікання та після обробки тиском).

ASTMF2885-11(сплав титану)

Даний стандарт містить вимоги до хімічного складу, механічних та металургійних властивостей сплаву титану (Ti-6Al-4V). Даний сплав використовується для виготовлення хірургічних імплантів. Як і стандарт для чистого титану, він містить значення для спеченого матеріалу та для матеріалу, що проходить обробку тиском. Окрім механічних властивостей тут наведено інформацію щодо мікроструктури, густини та методів неруйнівного контролю.

ASTMF2886-10(Сплави кобальту та хрому)

В даному стандарті наведено вимоги до хімічного складу та механічних властивостей сплаву Co-28Cr-6Mo, що використовується для хірургічних імплантів. Стандарт містить інформацію про хімічний склад, механічні властивості, густину для двох типів сплаву Co-28Cr-6Mo, які відрізняються вмістом вуглецю.

SAEAMS 5917(Сплави на основі нікелю)

Стандарт AMS 5917 був виданий для аерокосмічної галузі (Aerospace Material Specification) та призначений для корозійностійкого та жаростійкого сплаву 718 на основі нікелю, що виготовляється за технологією ІЛП. Як правило, сплав 718 знайшов використання в деталях, що несуть високі навантаження при температурах до 650 °С. В даному стандарті наведено вимоги відносно хімічного складу, вибору порошку, ізостатичного гарячого пресування, термообробки. Також наведено інформацію про такі властивості, як густина спеченого матеріалу, розмір зерна, мікроструктура, міцність на розтяг при кімнатній температурі та при температурі 649 °С, міцність на розрив.

5.8.3 Процедури проведення випробувань

MPIFStandard 50

Даний стандарт описує процес підготовки та дослідження тестових деталей для визначення властивостей розтягу матеріалів, виготовлених за

технологією ІЛП, в спеченому вигляді та після термообробки. На рис. 5.6 показано тестову деталь згідно зі стандартом МРІФ. На обох кінцях деталі зроблені отвори для кріплення деталі на розривній машині. Згідно з даним стандартом існують дві модифікації тестової деталі з різними розмірами, залежно від матеріалу та потужності обладнання.

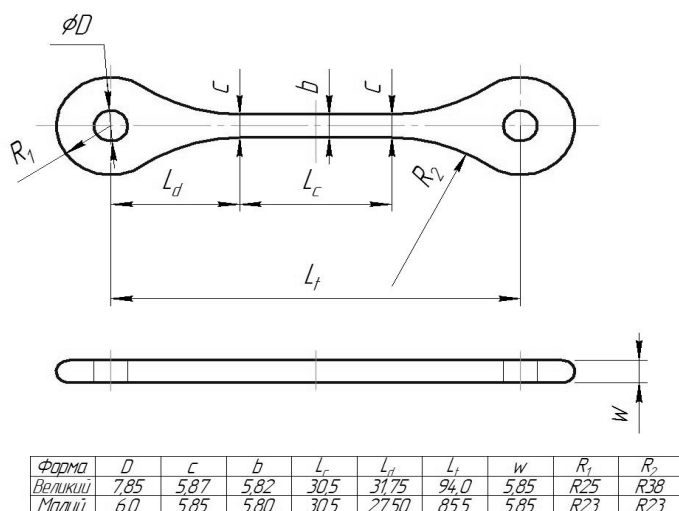


Рисунок 5.6 – Тестовий зразок із «зеленої» деталі для дослідження властивостей на розтяг матеріалів ІЛП (стандарт МРІФ)

ISO 2740

Стандарт ISO 2740 може використовуватись для всіх спечених металів та сплавів, окрім твердих сплавів. Він визначає розміри формувальної прес-форми для виготовлення тестових деталей, які пресуються та спікаються, обробляються з порошкових заготовок, та матеріалів ІЛП. Тестові деталі для технології ІЛП відрізняються від тих, що використовуються в порошковій металургії. На рисунку 5.7 показано розміри тестової деталі згідно зі стандартом ISO 2740.

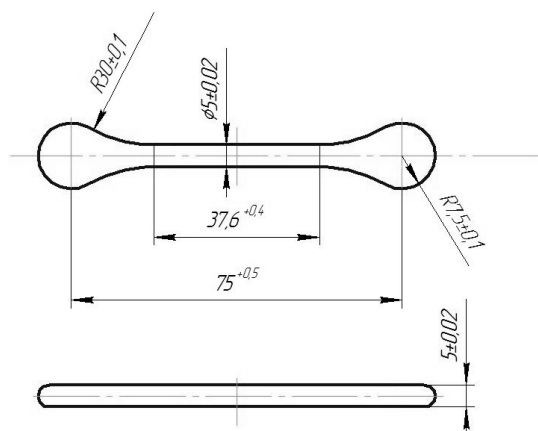


Рисунок 5.7 – Тестовий зразок із «зеленої» деталі для дослідження властивостей матеріалів ІЛП на розтяг (стандарт ISO).

Як видно з рисунка 5.7, на деталі відсутні гострі кромки та покращено перехід між різними секціями деталі, що створює однорідне заповнення деталі під час впорскування матеріалу. Лінія рознімання прес-форми проходить через середину деталі. Порівняно зі стандартом MPIF, на даній деталі відсутні отвори для закріплення у розривній машині.

MPIFStandard 59

У даному стандарті наведено інформацію про обладнання, процедуру та розміри тестової деталі, що використовуються для визначення ударної в'язкості матеріалів ІЛП. Тестові зразки можуть бути не тільки спечені, але пройти й інші операції обробки (гартування, ізостатичне пресування та ін.), що типові для матеріалів ІЛП. В даному стандарті використовується тест Шарпі для визначення ударної в'язкості, задана геометрія деталі та розташування точки впорскування. За обладнання використовується машина маятникового типу з ударною потужністю не менше 325 Дж. Що ж стосовно процедури проведення випробувань, то даний стандарт направляє до стандарту ASTM E23.

MPIFStandard 62

Стандарт визначає процедуру, обладнання та тестові зразки для визначення корозійної стійкості нержавіючої сталі, виготовленої за технологією ІЛП. Тестові зразки можуть бути як спечені, так і загартовані. Згідно з даним стандарту зразки занурюються у двопрцентний розчин сірчаної кислоти (H_2SO_4). В стандарті *MPIFStandard 62* визначено обладнання, процедура проведення дослідів, вказуючи: контейнери, кількість розчину, середню температуру, кількість зразків, і процедура сушіння зразків до та після дії кислоти. Візуально на деталях контролюється зміна кольору поверхні. Корозійна стійкість матеріалу визначається як зменшення маси зразків з плином часу, що виражається як $гр/дм^2$ за один день відносно маси деталі з нормальною поверхнею.

MPIFStandard 63

Стандарт регламентує прилади, тестові зразки та процедури для вимірювання густини зелених, коричневих та спечених деталей, виготовлених за технологією ІЛП з використанням газового пікнометра. Оскільки даний прилад вимірює об'єм деталі за допомогою газу, усувається вплив відкритої пористості на похибку виміру. Деталі можуть бути як спечені, так і термооброблені. Також можливе вимірювання густини зборки деталей з декількох компонентів. Стандарт вказує допустиму похибку замірів, чистоту робочого газу, мінімальну кількість тестових зразків та ін.

5.9 Контроль параметрів деталі

Перевірка якості інтегрована у виробничий процес ІЛП. Остаточна обробка або вторинні операції дозволяють отримати кінцевий продукт, що відповідає вимогам сфери використання.

На кожному етапі виробництва деталей ІЛП існують багато факторів, що можуть впливати на кінцеву якість деталі. Найбільш важливі фактори згруповані в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 – Фактори, які впливають на якість спеченої деталі

Матеріал		Процес			
Порошок	Зв'язувальна речовина	Змішування	Лиття	Дебайдинг	Спікання
Розмір частинок їх форма та розподіл	В'язкість	Кількість порошку у суміші	Характеристики потоку	Кількість видаленої зв'язувальної речовини без деформації деталі	Температурний профіль
Хімічний склад	Температура плавлення	Однорідність суміші	Однорідність заповнення формувальної порожнини		Розподіл температури в печі
Густина порошку	Активні домішки	Форма гранул суміші	Усадка «зеленої» деталі		Керамічні форми для спікання
			Вага «зеленої» деталі	Конструкція деталі, що підходить для спікання	
			Конструкція форми, зношування поверхні	Атмосфера спікання	

На жаль, не достатньо лише розуміти вплив окремих факторів на кожному етапі процесу, потрібно також брати до уваги їх взаємодію між собою. А тому лише глибоке розуміння всього технологічного ланцюга процесу допомагає знизити кількість бракованих деталей.

Забезпечення якості деталей в процесі ІЛП починається з перевірки якості партії матеріалу. Відхилення у параметрах на цьому етапі впливає на весь виробничий ланцюг та не може бути скореговано на наступних етапах. Кількість порошку у суміші, його розмір, геометрична форма, хімічний склад та спосіб виготовлення, як і властивості самої зв'язувальної речовини, мають вирішальний вплив на коефіцієнт усадки, густину спеченої деталі та механічні властивості матеріалу. Так, на рис. 5.8 показано вплив розміру порошку та температури спікання на шорсткість спеченої деталі для нержавіючої сталі 316L.

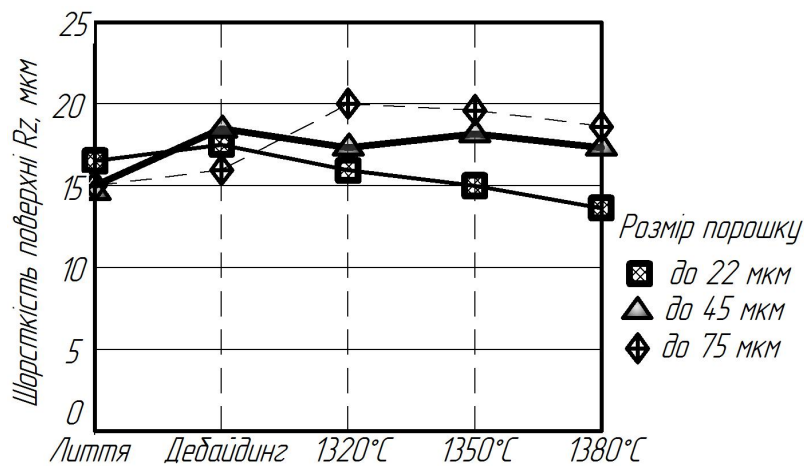


Рисунок 5.8 – Шорсткість поверхні залежно від розміру частинок порошку та температури спікання для сталі 316L

Реологічні характеристики матеріалу можуть бути дуже корисні при розробці параметрів лиття. Вимірювання в'язкості проводиться в капілярному реометрі. Швидкість зсуву може досягати 10000 1/с, це дещо схоже з умовами лиття на інжекційній машині. На рис. 5.9 показана в'язкість суміші для різних партій матеріалу. На практиці кожна нова партія матеріалу має бути протестована на інжекційній машині перед початком виробництва. Здатність матеріалу формувати конфігурацію деталі визначається параметром MFI (Melt Flow Index). Показник MFI показує наскільки легко матеріал здатен заповнити формувальну порожнину прес-форми. Він визначається як маса сировини (в грамах), що протікає через капіляр певного діаметра та довжини під заданим тиском за 10 хвилин, тому розмірність цієї величини г/10 хв. Даний показник дозволяє порівнювати різні партії матеріалу за їх в'язкістю. Чим більший параметр MFI, тим краще матеріал буде заповнювати відливочку. Даний метод описаний в стандартах ASTM D1238 та ISO 1133.

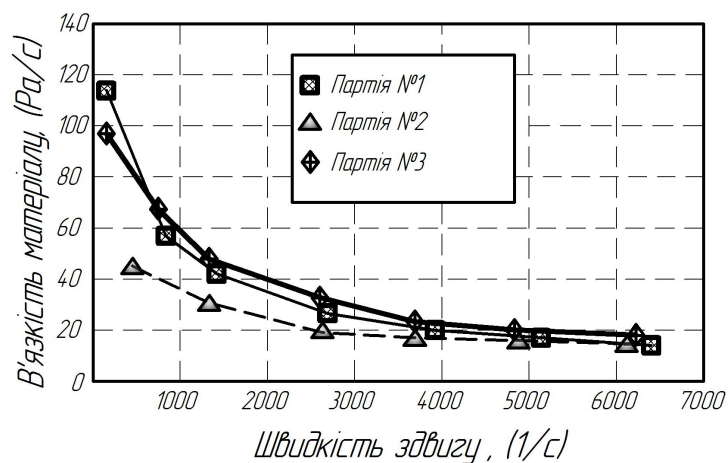


Рисунок 5.9 – В'язкість зсуву для різних партій матеріалу при температурі 100 °C

5.9.1 Перевірка якості виробу ІЛП

Кінцева фаза виробництва ІЛП полягає в перевірці якості, яка проводиться для того, щоб упевнитись у відповідності деталі технічному завданню. Багато операцій ІЛП мають власні зареєстровані системи перевірки якості, а саме: ISO 9001 для виробництва продукції для власних потреб та ISO 9002 для виробництва на замовлення.

При перевірці основна концепція полягає у виявленні помилок у міру їх виникнення. Тестування може проводитися як на місці виробництва, так і на місці використання; і при залученні відповідних систем якості користувач отримує партію продуктів без дефектів. Траплялись випадки в галузі виробництва приводів для дисків, коли мільйони компонентів ІЛП постачались без перевірки (та проблем) завдяки системі контролю якості виробника ІЛП. Стандарти галузі ІЛП перевищують 50 мільйонів деталей, поставлених без жодного дефекту. Досягнення такого рівня якості можливе при тісному співробітництві, яке допомагає впевнитися в тому, що виробник усвідомлює всі функціональні атрибути та виробляє лише якісні компоненти.

Детальні перевірки якості пов'язані з виготовленням першого виробу а також з отриманням даних, що відображають такі виміряні та отримані властивості, як габарити, твердість, мікроструктура, хімічний склад та інші. Перед початком серійного виробництва необхідно встановити критерій перевірки для визначення декількох факторів, а саме: що потрібно вимірювати, як вимірювати, на якому етапі виробництва вимірювати, як часто вимірювати, скільки зразків використовувати кожен раз, як відбирати контрольні зразки, розмір партії, пов'язаний з вимірюваннями, та допустимі діапазони. Кожна галузь, як правило, має стандарти, що допомагають проводити ці тести.

Важливим фактором є контроль над статистичним процесом (КСП). Він використовується на проміжних стадіях виробництва з метою оцінювання відхилення від стандартних умов. Метою є отримання продукту в межах допустимих відхилень під час протікання процесу ІЛП. В будь-якій операції можуть трапитись зміни, але КСП постійно оцінює відхилення, які можуть вивести процес за допустимі рамки.

В ІЛП є багато джерел виникнення дефектів. Таблиця В.1 додатка В допомагає отримати уявлення про найбільш поширені дефекти. Більшість проблем виникає під час лиття та термічної обробки. В добре організованому процесі кількість непередбачених дефектів може бути зменшена, оскільки відомі джерела їх виникнення та методи їх усунення. Такі наявні в компонентах ІЛП проблеми, як шви форми та відмітки поршня виштовхувача, можуть бути вирішені на етапі розробки. Їх можна помістити в некритичних місцях форми.

5.9.2 Кількісні методи контролю якості виробів ІЛП

В основі концепції статистичного контролю якості лежить припущення про нормальний розподіл вимірюваного параметра. Середнє значення визначається як середнє арифметичне всіх значень цієї вибірки

$$U_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i.$$

Наприклад, середнім значенням набору чисел 7, 8, 11, 21 та 23 буде $70/5$ або 14.

Стандартне відхилення σ розраховується як середнє квадратичне відхилення значень вибірки U_i від середнього значення U_A

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_i - U_A)^2}{(N - 1)}}.$$

Якість виробу залежить від величини розсіювання кожного параметра відносно його середнього значення. Деякі характеристики компонентів ІЛП мають нормальний закон розподілу і стандартне відхилення $\pm 3\sigma$. Це означає, що майже всі компоненти (99,97%) мають потрапити в заданий діапазон значень від $U_A - 3\sigma$ до $U_A + 3\sigma$. Наприклад, якщо $U_A = 10$ мм та $\sigma = 0,1$ мм, тоді практично всі вироби будуть мати параметри в діапазоні від 9,7 до 10,3 мм.

Можливість процесу C_p – це міра здатності операції ІЛП витримувати задані обмеження. Вона показує пропорцію відхилення процесу в умовах трьох стандартних відхилень та порівнює це відхилення з допустимим діапазоном допусків

$$C_p = \frac{U_M - U_A}{3\sigma},$$

де U_M – максимальна (або мінімальна) межа контролю, визначена розробником. З цього відношення випливають два значення, що базуються на верхній і нижній межах для U_M .

Якщо середнє значення параметра під час виробництва знаходиться посередині між нижньою і верхньою межею, то процес матиме ширший діапазон відхилень. Проте якщо U_A наближається до однієї з меж, тоді діапазон відхилень буде меншим, оскільки різниця $U_M - U_A$ буде меншою. Відстань від середнього значення дійсного параметра до найближчої межі характеристик відносно розсіювання процесу називається можливістю процесу C_{pk} . Значення C_{pk} не може перевищувати C_p . Високі значення C_{pk} є бажаними і значення 1,33 або більше зазвичай є рекомендованими.

5.9.3 Неруйнівний метод контролю якості

Неруйнівні методи контролю мають важливе значення при виготовленні деталей за технологією ІЛП, оскільки процеси лиття, спікання та дебайдингу можуть призвести до виникнення в деталях таких небажаних дефектів, як тріщини, глибокі спайки потоків, внутрішні пустоти, велика пористість та ін. Такі дефекти є невиправними, а тому мають бути відокремлені на ранніх стадіях виробництва. Далеко не всі дефекти можуть бути виявлені візуально, а тому при виробництві бажано використовувати сучасні методи неруйнівного контролю. Найбільш бажаним є відокремлення бракованих деталей вже на стадії лиття. Проте це є дуже складною технологічною проблемою, оскільки такі дефекти, як внутрішні тріщини та пустоти неможливо виявити візуально, а лише за допомогою рентгенівського випромінювання. На даний момент складність таких установок не сприяє їхньому впровадженню у масове виробництво.

Для металевих спечених деталей можуть застосовуватись різноманітні види неруйнівного контролю: магнітно-порошковий, метод вихрових токів, ультразвуковий та ін. Проте правильний вибір неруйнівного методу в багато в чому буде залежати від геометричної складності самої деталі. Так, наприклад, магнітно-порошковий метод широко застосовується у порошковій металургії, але деталі, виготовлені за технологією ІЛП, як правило, мають більш складну геометрію порівняно з деталями порошкового пресування. Велика кількість пазів, отворів та ін. на деталях призводить до неоднорідного магнітного поля по поверхні деталі. Це звужує коло застосування магнітно-порошкового методу. Найбільш поширеним є метод капілярної дефектоскопії. Даний метод полягає в нанесенні на поверхню деталі спеціальної фарби (пенетрату), яка, завдяки силам капілярної взаємодії, всмоктується у тріщини та пустоти. Далі пенетрат змивається з поверхні і на деталь наноситься проявник (подрібнений порошок каолінової глини). Порошок має здатність висмоктувати залишки пенетрату зі щілин на поверхні, що значно полегшує візуальний огляд деталі. Існує 4 класи пенетратів, які дозволяють виявляти тріщини з шириною розкриття менше 1 мкм. Однак такий метод дозволяє знаходити тільки ті дефекти, що виходять на поверхню деталі, і непридатний для контролю внутрішніх тріщин.

Найбільш перспективним на сьогоднішній день є акустично-резонансний метод контролю (рис. 5.10). Завдяки своїй простоті такий метод дозволяє повністю автоматизувати процес сортування деталей. На сьогоднішній день існують конвеєри, що дозволяють забезпечити стовідсотковий контроль зі швидкістю 60 деталей за хвилину або приблизно 30000 деталей за 8-годинну зміну.

Система акустичного резонансу працює таким чином: молоточок з електричним приводом вдарає по деталях, що рухаються на конвеєрі, з відомою та постійною силою. Високочутливий мікрофон записує

акустичний резонанс деталі. Далі цифровий контролер звіряє отриманий запис з еталонною деталлю згідно з заданими допусками. Якщо відхилення перевищує задане, пневматичний штовхач відокремлює браковану деталь. Отже, дана система працює у повністю автоматизованому режимі.



Рисунок 5.10 – Система неруйнівного контролю методом акустичного резонансу виробництва фірми «The MODAL SHOPINC» модель NDT-AUTO

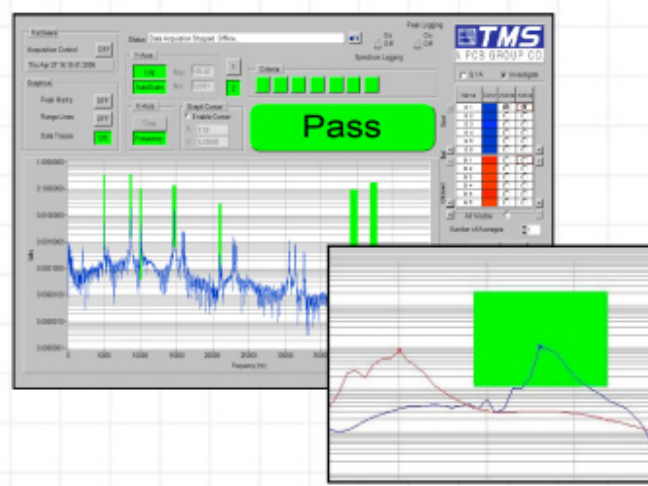


Рисунок 5.11 – Зсув частоти резонансу (з 23062 Hz до 22812 Hz) внаслідок наявності тріщини в деталі

Метод акустичного резонансу здатен виявляти розбіжності у геометрії деталі, її вазі, густині а також показувати наявність різноманітних тріщин та інших відхилень від еталонної деталі (рис. 5.11).

Принцип роботи методу акустичного резонансу дуже простий: кожна деталь має унікальний резонанс який пов'язаний з її структурною цільністю. Відхилення у формі резонансної кривої відповідає відхиленню у структурі деталі. Так, наприклад, дзвін, який має тріщину, не має чистого звуку та не здатен тримати тон.

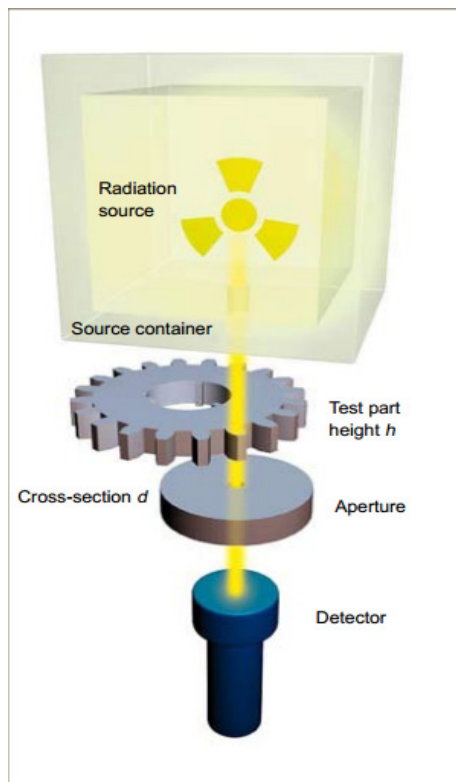


Рисунок 5.12 – Принцип радіографічного вимірювання щільності

Локальна густина деталі може бути виміряна в невеликому об'ємі заготовки без руйнування за допомогою гамма-променевого густиноміра. Це процес вимірювання інтенсивності гамма випромінювання, що проходить крізь деталь. Принцип радіографічного вимірювання щільності показаний на рисунку 5.12. Джерело радіації в екранованому контейнері випромінює промені гамма радіації з точно визначеною енергією і постійною інтенсивністю. Радіація проходить через контрольовану деталь і отвір. Потім вимірюється поглинання радіації в деталі. Вимірювання щільності охоплює вимірювання товщини матеріалу в контрольованій точці. Об'єм, в якому визначається щільність, вимірюється за допомогою поперечного розрізу апертури і товщини матеріалу на даній ділянці. У кращому випадку розмір апертури менше 1 мм в діаметрі, але тест вимагає, щоб деталь покривалася всією апертурою і товщина деталі була постійною. Це найбільші обмеження даного методу. Площі поверхні з сильними відхиленнями чи коливаннями поверхні не підходять для даного виміру. На рисунку 5.13 показаний густиномір для порошкової металургії.



Рисунок 5.13 – Густинемір, що використовується для спечених деталей

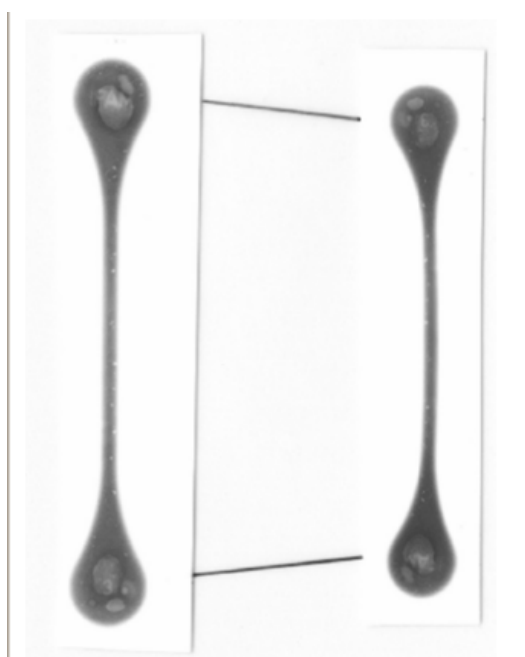


Рисунок 5.14 – Рентгенівська фотографія тестового зразка для розтягування; «зелений» (зліва), спечений (праворуч)

Рентгенівський апарат створює фотографію контрольованої деталі, на якій можна швидко візуально виявити внутрішній дефект. На рис. 5.14 показано тестовий зразок для розтягування в «зеленому» і спеченому стані. Зелений зразок містить невеликі бульбашки в середній частині, що призводить до викривлення протягом спікання. Важливо знати коливання щільності в «зеленому» литві, тому що величина усадки залежить від локальної щільності. Усадка протягом спікання призводить до ущільнення матеріалу. Пори від повітряних порожнин або розщеплення зв'язувальної речовини зникають, і величина усадки тим більша, чим більша кількість пор.

5.9.4 Перевірка густини деталей

Пікнометри – прилади для визначення дійсної щільності порошків, спінених матеріалів і твердих зразків. Назва цих приладів є похідною від грецького «Ρυσπος» – щільність. Дія пікнометрів заснована на принципі Архімеда – на вимірюванні об'єму твердих речовин шляхом витіснення рідини; замість рідини в газових пікнометрах використовується газ (гелій або азот, вони здатні проникати в пори розмірами до одного ангстрема). Аналіз складається з таких етапів: спочатку газ в каліброваній камері стискається до певного тиску, значення тиску зберігається в пам'яті. Потім поворотом вентиля газ впускається в осередок із зразком, і записується

друге значення тиску. За цими двома значеннями і розраховується дійсний об'єм зразка. Дійсна щільність розраховується шляхом ділення на масу. Такі операції, як калібрування, підготовка зразка, зняття вимірювань і розрахунки можуть проводитися як вручну, так і автоматично. Попереднє очищення зразка від різних домішок, масел і пари води можливе в режимах постійного або імпульсного продування газовим потоком. Гелієвий пікнометр використовують для підтримки якості протягом усього процесу лиття порошків під тиском. Виробник сировини використовує його для перевірки вхідних матеріалів для виготовлення сировини та їх кінцевих продуктів. Виробник деталей може використовувати його для перевірки правильності формування «зелених» деталей, дізнатися, скільки помелів він може використовувати, чи правильно була здійснена операція первинного випалювання і чи досягнуто бажаного результату щільності спечених деталей. Пікнометр може бути використаний для контролю якості на кожному з етапів процесу. Кожен етап в МІМ має багато змінних параметрів, які впливають на якість процесу і виробу. Отже, дотримуючись цього принципу, можна вчасно забракувати деталь з тим, щоб вона не перейшла на наступну стадію.

Використання пікнометра на кожному з етапів відображено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Контроль параметрів за допомогою пікнометра

Стан виробу або етап виробництва	Параметр, що контролюється
Порошок	щільність порошку і зв'язувальної речовини
Змішування	щільність готової сировини
«Зелений» відливок	щільність відливої деталі (щільність перевіряється після перемелювання деталі)
«Коричнева» заготовка	щільність «коричневої» деталі
Спечена заготовка	щільність спеченої деталі

Щільність сформованої «зеленої» деталі, якщо формування пройшло належним чином, має точно збігатися зі щільністю початкової сировини. Після первинного випалювання щільність «коричневої» деталі має відповідати теоретичній щільності сировини мінус видалене зв'язувальне, даний результат може бути легко обчислений і має поставлятися виробником сировини. Контролюється також і кінцева щільність деталі відносно фактичної щільності порошку. Всі ці величини легко вимірюються за допомогою гелієвого пікнометра, що робить його безцінним інструментом для контролю якості на кожному етапі процесу.

5.9.5 Щільність сировини

При підготовці сировини важливо заміряти реальну щільність кожної партії як для металевих порошків, так і зв'язувальної речовини. Це надзвичайно важливо, особливо для металевих порошків, тому що ваговий вміст хімічних складових в кожній партії відрізняється від номінального хімічного складу. Наприклад, 316L складається з таких декількох елементів, як Fe, Cr, Ni, Cu, Мо-пермалой, P, Si, S і C. Кожен з цих елементів має відповідати мініимальному і максимальному необхідним відсоткам ваги, як це передбачено у відповідних специфікаціях. Отже, зміни хімічного складу у виробі приводять до істотної зміни щільності в межах допустимого діапазону. Випробування показали, що щільність таких порошків може змінюватися на декілька г/см³.

Дуже важливо використовувати точну щільність порошку для розрахунку об'єму зв'язувальної речовини, завантаження порошку і для визначення теоретичної щільності сировини з метою отримання правильної бажаної усадки. Ця інформація також важлива для визначення правильного методу змішування, необхідного для отримання однорідної суміші.

Гелієвий пікнометр використовується для вимірювання щільності та для перевірки вхідних металевих порошків і зв'язувальних речовин від постачальників. Потім він використовується для вимірювання щільності отриманої сировини, щоб визначити чи забезпечена однорідність суміші. Якщо виробник сировини не слідує даній процедурі, це може позначитися не тільки на литві, але й, що важливіше, на усадці готового продукту. Якщо сировина купується у виробника, дана інформація має бути доведена до кінцевого споживача. Без даної інформації не існує простого способу визначення чи досягнута якість кінцевої деталі. Більшість виробників сировини дійсно забезпечують контроль щільності їх продукту, але споживачу потрібно мати засіб для контролю щільності отримуваної сировини.

5.9.6 Щільність литва

Під час процесу лиття матеріал подається у порожнину форми до тих пір, поки деталь не сформована. Тільки те, що деталь виглядає добре, ще не означає, що процес лиття був оптимальним.

Такі чинники, як система ливника і розмір точки упорскування, її розміщення, вентиляція форми і параметри, встановлені на машині, впливають на заготовку. Гелієвий пікнометр може допомогти у визначенні об'єму порожнин всередині деталей. За допомогою перемелювання вимірюваної «зеленої» деталі назад в порошок можна підтвердити об'єм повітря (або порожнин) в порах відлитої деталі. Для цього слід зміряти щільність сформованих деталей і порівняти заміри з теоретичною щільністю сировини. Потім узяти деякі відлиті деталі і подрібнити їх до стану порошку. Помістивши розмелений порошок назад в пікнометр, слід знову зміряти щільність. Якщо в цьому порошок щільність більша 100%

від первинної сировини, значить якусь кількість зв'язувальної речовини було втрачено під час литва. Такий процес слід відкоригувати, тому що використання таких параметрів при литві з неправильною сировиною приведе до великої усадки і у результаті деталі вийдуть менші за розміром, ніж розраховані. На рисунку 5.15 показана гранульована сировина, відлита деталь як зразок для випробування на розтягування і вторинний порошок.

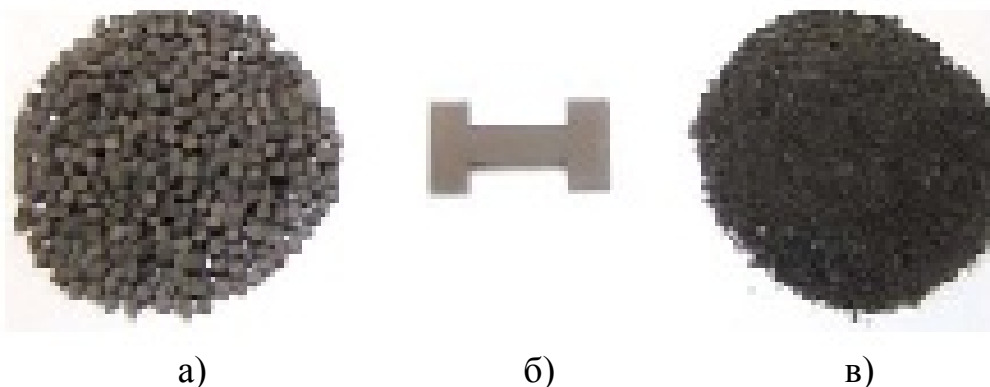


Рисунок 5.15 – Гранульована сировина (компаунд) (а), відлита деталь для випробування на розтяг (б) і вторинний порошок (в)

У таблиці 5.6 вказаний типовий приклад порівняння щільності сировини і деталі, вилитої з цієї сировини. Відлита деталь показала щільність 96,72% від теоретичної. Потім деталь була роздроблена, і щільність склала 99,70% від теоретичної. Це означає, що близько 3% в об'ємі деталі складає повітря, що знаходиться всередині цього розтягнутого стрижня і, отже, параметри литва можуть бути покращені.

Таблиця 5.6– Зміна щільності сировини і виливка

Стан	Вимірювана щільність, г/см ³	Теоретична щільність, г/см ³	Процент від теоретичної щільності	Примітки
Сировина	5,0896	5,1044	99,71	Типова сировина
Відлитий зразок	4,9368	5,1044	96,72	Відлита деталь
Вторинне подрібнення	5,0893	5,1044	99,7	Подрібнений зразок

Багато компаній використовує масу «зеленої» деталі як орієнтир для правильного литва. Це припущення, що деталь відлита правильно і має той же об'єм, який був заповнений оптимально кожного разу. В більшості випадків кожного разу точка ливника розривається в різних місцях, що приводить до зміни ваги. Хоча це краще, ніж відсутність перевірки, але це не дає точної інформації.

Дуже важливо формувати частини правильно, без порожнин, без деградації сировини з тим, щоб домогтися максимально можливої

щільності з правильними розмірами деталей після спікання. Треба бути впевненим, що відлита деталь повністю заповнена до етапів дебайдингу і спікання. Гелієвий пікнометр дає таку гарантію.

Вплив неоднорідності ваги відливка на геометричну стабільність спечених деталей

Виробник деталей ІЛП має перед собою дві задачі:

1. Передбачення фінального розміру спеченої деталі ближче до центра креслярського розміру;
2. Контроль стабільності коливань всередині допуску.

За умови, що деталь не зазнала значних деформацій після спікання, одною із основних причин відхилення розмірів деталі від розрахункових є коливання ваги «зеленої» деталі. Як правило, коливання ваги відливка можуть викликати такі параметри, як:

1. Нестабільне дозування матеріалу шнеком циліндра внаслідок нерівномірності гранул матеріалу. Як правило, це трапляється при роботі з матеріалом, що пройшов вторинну переробку. Тому для деталей, які мають точні допуски, бажано, щоб перероблений матеріал був повторно гранульований на однакові за розміром гранули.

2. Нерівномірність роботи гідравлічної системи термопластавтомата, значне коливання теплових режимів, перерви в роботі машини. Про стабільність циклів упорскування свідчить стабільність значення «подушка матеріалу». Це кількість матеріалу, що залишилася в інжекційному циліндрі після впорскування. Сучасні термопластавтомати, які оснащені програмним керуванням, дозволяють вести записи всіх важливих технологічних параметрів кожного циклу та зупиняти цикл роботи у випадку відхилення контрольних параметрів від заданих.

Процеси формування порошку добре повторюють розміри формувальної прес-форми. Розміри «зеленої» деталі часто мають невелике відхилення, в діапазоні декількох мікрон, але після спікання деталі показують набагато більші коливання розмірів. Для аналізу даної проблеми були використані параметри, де індекс G являє «зелений» стан а індекс S спечений стан деталі: L – середній розмір, ΔL – різниця в розмірах «зеленої» і спеченої деталей, $\Delta L/L_G$ – усадка, зміна розмірів, поділена на розмір «зеленої» деталі, M – маса, V – об'єм, ρ – часткова щільність, σ – середнє квадратичне відхилення, C_v – коефіцієнт варіації (середнє квадратичне відхилення, поділене на середнє значення).

Маса зв'язувальної речовини вилучена з розрахунку щільності «зеленої» деталі, оскільки вона згорає при спіканні. Припустимо, що усадка ізотропна для спрощення математичної моделі без значних змін ключових концепцій. Залежність між усадкою при спіканні $\Delta L/L_G$, щільністю «зеленої» деталі ρ_G , і щільністю спікання ρ_S – це:

$$\rho_s = \frac{\rho_G}{\left[1 - \frac{\Delta L}{L_G}\right]^3} \quad (1)$$

Рівняння (1) описує усадку як функцію щільності «зеленої» деталі, поділену на щільність спеченої деталі,

$$\frac{\Delta L}{L_G} = 1 - \left(\frac{\rho_G}{\rho_s}\right)^{1/3} \quad (2)$$

У випадку, коли щільність після спікання приблизно однакова:

$$\frac{\Delta L}{L_G} \sim \rho_G^{1/3} \quad (3)$$

Оскільки ΔL це $L_G - L_S$ з рівняння (3) можна визначити розмір деталі після спікання L_S

$$L_S = L_G \left(\frac{\rho_G}{\rho_s}\right)^{1/3} \quad (4)$$

Зазвичай, інструмент і стадія формування дають точний контроль розміру «зеленої» деталі, але розмір спеченої деталі має більший діапазон відхилень. Для визначення факторів контролю взята часткова похідна від рівняння (4).

$$\partial L_S = \partial L_G \left(\frac{\rho_G}{\rho_s}\right)^{1/3} + \partial \rho_G \frac{L_G}{3 \rho_s^{1/3} \rho_G^{2/3}} - \partial \rho_s \frac{L_G}{3} \left(\frac{\rho_G}{\rho_s^4}\right)^{1/3} \quad (5)$$

Коливання розміру спеченої деталі має три прямих джерела: коливання «зеленого» «розміру» dL_G , коливання щільності «зеленої» деталі $d\rho_G$, коливання щільності спеченої деталі $d\rho_s$. Для матеріалів, що добре спікаються, $d\rho_s$ можна не враховувати, оскільки зростання зерна або інші мікроструктурні фактори обмежує межа спікання. Якщо формування відбувається в прес-формі з однією порожниною, то зміни в розмірі «зеленої» деталі мінімальні. Отже, ми фокусуємося на коливаннях щільності «зеленої» деталі. Щільність є маса, поділена на об'єм, і об'єм «зеленої» деталі контролюється.

$$\rho_G = \frac{M_G}{\rho_0 V_G}, \quad \partial \rho_G = \frac{\partial M_G}{\rho_0 V_G} \quad (6)$$

де M_G – маса «зеленої» деталі, V_G – об’єм «зеленої» деталі (прийнятий постійним), і ρ_G – теоретична маса матеріалу. Рівняння (5) і (6) пов’язують коливання маси «зеленої» відливки і відхилення розміру спеченого тіла.

Залежність розміру після спікання dL_s , від густини «зеленої» деталі спрощується, якщо припустити, що об’єм відливка контролюється формувальною прес-формою і є сталим, в той час як маса «зеленої» деталі коливається.

$$\partial L_s = \partial \rho_G \frac{L_G}{3(\rho_G^2 \rho_s)^{1/3}} = \partial M_G \frac{L_G}{3(\rho_0 V_G)^{1/3} M_G^{2/3} \rho_s^{1/3}} \quad (7)$$

Параметр dL_s пов’язує відхилення розмірів після спікання з коливанням маси відливка. В тому випадку, коли теоретична густина постійна, маса «зеленої» деталі та спеченої приблизно однакові, тоді

$$\partial L_s = \frac{L_G}{3} \left(\frac{V_s}{V_G} \right)^{1/3} \frac{\partial M_G}{M_G} \quad (8)$$

Оскільки ми припустили, що маса «зеленої» та спеченої деталей однакові, то відношення густини «зеленої» та спеченої деталей у рівнянні (4) можна замінити відношенням об’ємів в рівнянні (8).

$$\frac{\partial L_s}{L_s} = \frac{1}{3} \frac{\partial M_G}{M_G} \quad (9)$$

Рівняння (9) говорить про те, що стандартне коливання розмірів після спікання пропорційне стандартному коливанню маси «зеленої» деталі. Відповідно, поліпшення допусків можна досягти контролем «зеленої» маси. Коливання «зеленої» маси і розмірів після спікання

Відхилення «зеленої» маси / маса «зеленої» деталі = 3 допуск / розмір.*

Так, наприклад, при масі «зеленої» деталі 20 г, розміру 15 мм та допуску на даний розмір 0,05 мм відхилення у масі відливка не може перевищувати 0,2 г.

Для будь-якого середнього розміру і допуску у виробництві автоматично встановлюється максимально допустиме відхилення у масі «зеленої» деталі. Реальне допустиме коливання «зеленої» маси має бути менше розрахункового, дозволяючи іншим факторам впливати на коливання розмірів.

5.9.7 Щільність заготовки після первинного дебайдингу

Надзвичайно важливо ретельно видалити зв’язувальну речовину, щоб скласти правильний профіль спікання. Первинна зв’язувальна має бути

повністю видалена, перш ніж почне видалятися вторинна зв'язувальна, оскільки вона має пройти через пори, створені при виході первинної зв'язувальної. Технологія первинного дебайдингу залежить від типу сировини, з якої відливають деталі. Проте постачальник сировини (внутрішній або зовнішній) знає кількість первинної зв'язувальної, яка була дана і має бути видалена, перш ніж перейти до наступного кроку процесу. Постачальник сировини має надати інформацію про величину мінімальної щільності «коричневої» відливки, і це має бути досягнуто, перш ніж деталі перейдуть до остаточного процесу дебайдингу і спікання. Ця мінімальна щільність «коричневої» деталі має враховувати невеликий залишок зв'язувальної речовини, яка має бути присутня в деталі і може бути видалена впродовж вторинного дебайдингу та спікання. Рекомендовано, щоб мінімум 92% первинної зв'язувальної має бути видалено, перш ніж розпочнеться операція спікання.

Більшість виробників сировини забезпечує лише інформацією про відсоток втрати ваги, яка має бути отримана для визначення процесу дебайдингу. Це не кращий варіант, оскільки в деяких процесах випалювання також можна втратити частину порошку в процесі обробки «коричневої» деталі і втратити ваги більше, ніж фактично необхідно.

Для визначення щільності «коричневих» деталей перед заміром гелієвим пікнометром вони мають бути ретельно висушені, щоб залишки розчинника, використаного під час дебайдингу, не вплинули на значення вимірювань. Після чого можна перевірити відсоток випаленої зв'язувальної речовини, якщо виробник сировини дає вам теоретичну щільність «коричневої» деталі. В таблиці 5.7 наведена щільність зразків із твердого сплаву ТСК після первинного дебайдингу.

Таблиця 5.7 – Щільність «коричневих» деталей після дебайдингу для різних типів сировини

Сировина	Вимірювання щільності «коричневої» деталі, г/см ³	Теоретична щільність «коричневої» деталі, г/см ³	Відсоток від теоретичної щільності
ТСК Н-11	6.1810	6.2576	98.78
ТСК Н-13	6.2015	6.2679	98.94

5.9.8 Вторинний дебайдинг і спікання

Сьогодні більшість процесів ІПП містить в собі вторинний дебайдинг і спікання в одній операції. Щільність спечених деталей також можна виміряти щодо теоретичної щільності і так визначати точний відсоток досягнутої щільності.

Тільки декілька виробників сировини дають таку інформацію в сертифікаті на свою продукцію. Важливо пам'ятати, що кожна партія

металевих порошків і їх зв'язувальна речовина мають різну щільність через різний хімічний склад.

5.9.9 Переробка вторинної сировини

Після кожного процесу лиття деталей залишаються ливники і браковані деталі. Оскільки виробники сировини дають фактичні і теоретичні величини щільності їх сировини, то можна легко заміряти щільність відходів лиття і порівняти результати зі значеннями початкових даних. Якщо після подрібнення щільність вища, ніж потрібно для підтримки розмірів деталей, то більше не слід використовувати помели повторно. Часто виробник сировини стверджуватиме, що ви можете повторно використовувати їх початкову сировину певну кількість разів, або ж вони можуть сказати, що вам потрібно додати певний відсоток чистої сировини до повторно перемеленої для підтримки потоку та усадки. Використання гелієвого пікнометра допоможе перевірити ці твердження.

На рис. 5.16 показано вплив кількості повторної переробки суміші на розміри деталі та стандартне квадратичне відхилення

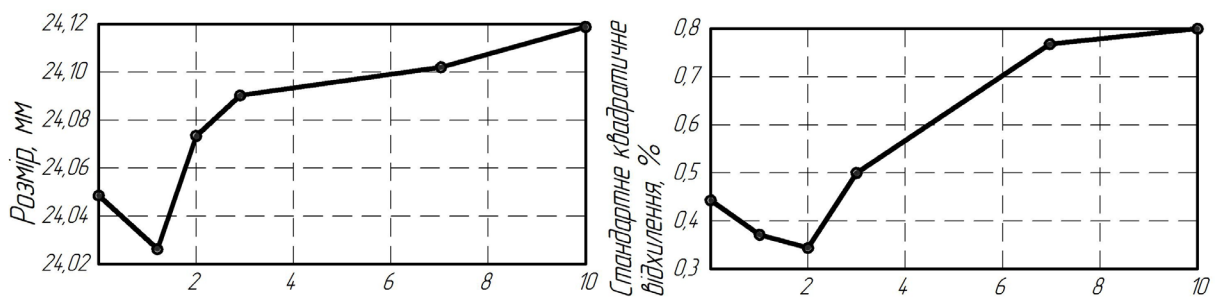


Рисунок 5.16 – Залежність розміру деталі та стандартного квадратичного відхилення від кількості повторної переробки матеріалу

6 СПЕЦИФІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ІЛП

6.1 Новітні процеси

Останнім часом з'явилося декілька сфер використання ІЛП, які базуються на концепціях ефективного використання структури порошків з метою створення нових розробок та поєднань матеріалів. Одним з прикладів є з'єднання декількох деталей в один компонент. Така операція зі з'єднання індивідуальних литих деталей перед спіканням вперше була проведена з використанням компонентів, вилитих з однакового матеріалу. Новіші варіанти дозволили розширити спектр таких з'єднань, використовуючи сполучення різних матеріалів шляхом застосування технології одночасного лиття двох матеріалів. Схожі концепції передбачають формування антикорозійних бар'єрів або бар'єрів, стійких до зношування, та формування композитів з орієнтованим шаром з використанням ідей вставно-витяжного лиття, яке було розроблене для рідких кристалічних полімерів. В цьому розділі презентовано декілька таких нових ідей.

6.1.1 Машинна обробка та складання деталей з сирцю

Сирцем називають заготовку, отриману в результаті лиття, яка ще не пройшла розщеплення та спікання. В литому стані заготовка ІЛП має значну відпускну міцність, але її значення далеке від міцності після спікання. Машинна обробка використовується під час обрізання каналу або шва форми з метою зменшення ваги компонента, чого також можна досягти після свердління отвору. Не зважаючи на повільність машинної обробки, рівень зношування оснащення дуже низький, оскільки сирець має м'яку структуру. Більш того, під час машинної обробки дуже легко пошкодити слабкий матеріал, тому для отримання точних габаритів необхідно використовувати високу швидкість різання та низьку робочу подачу.

Традиційний метод з'єднання полягає в сполученні структур після спікання. З іншого боку, є можливість поєднання компонентів після лиття (перед спіканням) з метою отримання готової деталі. Це складання деталей з сирцю може виконуватись трьома методами:

- лиття першого компонента та використання його як закладної для лиття другого компонента (процес нагадує лиття пластику з металевою закладною);
- послідовне лиття двох заготовок в порожнину форми, яка розширюється в проміжку між надходженням першої і другої заготовки;
- складання двох окремо вилитих компонентів в стані сирцю – після лиття, але до розщеплення та спікання.

Метод безпосереднього складання заготовок передбачає інжекційне лиття двох компонентів з однакового матеріалу. Після лиття компоненти

склеюють разом (зазвичай для цього використовують невелику кількість сполучної речовини або розчинника) і піддають розщепленню та спіканню. Спільне усадження при спіканні забезпечить надійне з'єднання, якщо обидва компоненти виготовлені з однакової сировини. В іншому випадку, з метою уникнення тріщин та деформації, слід уважно вибирати сировину та цикл спікання. Використання двох матеріалів дозволяє знизити собівартість шляхом використання дорогого матеріалу лише в декількох місцях. Один із прикладів – це виготовлення різального інструменту (різців, фрез, свердл).

Більш продуктивним способом сирцевого з'єднання двох деталей з різним хімічним складом є складання в машині для лиття. Цей метод швидший за відокремлене лиття та сирцеве складання. Ця технологія схожа на технологію лиття пластику, відому як двокольорове лиття. Машина для лиття складається з двох стволів, кожен з яких містить різні матеріали (або колір у випадку лиття пластику).

Не зважаючи на структуру сировини, матеріали ущільнюються та з'єднуються протягом циклу спікання без дефектів та деформації. Вперше ця технологія була продемонстрована для комбінування типу кераміка-метал (алюміній-молібден) з метою приєднання електропровідних магістралей до діелектрика. Інші приклади застосування охоплюють магнітні та немагнітні структури і сфери, в яких зміна функцій відбувається залежно від розташування в структурі.

Цільовою сферою використання компонентів ІЛП, виготовлених з двох матеріалів, є паливні системи, де існує велика потреба в компонентах з високим опором до зношування та втоми, що вимагає використання твердих матеріалів (нержавіюча сталь дисперсійного твердіння), але робота з паливом також передбачає опір до сульфідизації та впливу навколишнього середовища. Матеріалом з такими показниками є FeAl (алюмінід заліза). На відміну від нержавіючої сталі, яка піддається механічній обробці, алюмінід заліза дуже важко обробляється, тому виробники із FeAl зазвичай виготовляють методом спікання. Поєднання серцевини, виготовленої з нержавіючої сталі, з соплом, виготовленим з паливо-сумісного, стійкого до зношування матеріалу, є яскравим прикладом зміни функцій за допомогою ІЛП.

ІЛП з використанням двох матеріалів дозволяє досягти економії при виробництві продуктів з особливою функціональністю. З метою підтримки технології було створено математичний протокол, який дозволяє досягти бездоганного металургійного з'єднання під час спікання.

На рисунку 6.1 зображений поперечний розріз місця з'єднання спеченої нержавіючої сталі (справа) та інструментальної сталі M2 (зліва). Лінія з'єднання проходить з нижнього лівого до верхнього правого кута. Виробництво компонентів з двох матеріалів допомагає позбутись зварювання, що веде до зниження собівартості, прискорення процесу та швидшого виробництва. Це дуже велика перевага, оскільки зварювання

неспоріднених матеріалів характеризується великою кількістю дефектів, особливо якщо мова йде про невеликі компоненти. Більш того, користувачі мають змогу зменшити номенклатуру інструментів, і всі випробування свідчать про те, що матеріали, з'єднані під час спікання, мають дуже високу міцність порівняно зі звареними.

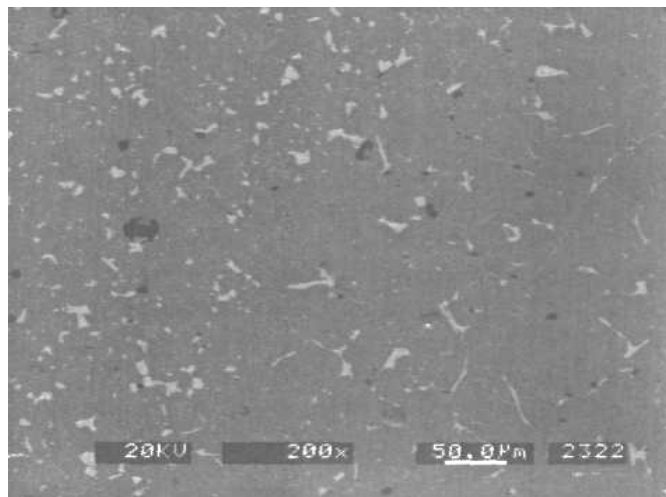


Рисунок 6.1 – Поперечний розріз місця з'єднання двох матеріалів

6.1.2 Лиття з використанням газу та води

Нещодавно з'явилися дві нові технології виробництва компонентів, для яких найбільше значення має контур поверхні. Тепла сировина ІЛП нагадує жувальну гумку та має схожі властивості – еластичність і текучість. Під дією тиску рідини або газу сировина утворює пухир, який може заповнити форму зсередини. Газова інжекція відбувається під тиском повітря 30 МПа, а водна інжекція залежить від гарячої води. Остання має нижчий рівень стиснення, тому тут краще звернути увагу на управління потоком та товщину стінки.

Таке лиття з використанням рідини в даний час знаходиться на демонстраційному рівні, але вже можна виявити деякі цікаві можливості для великих легких структур з тонкими стінками. Особливі сполучні речовини допомагають створити «суперпластичну» конструкцію заготовки – можливість значної зміни форми без тріщин, яка дозволяє досягти розширення без ушкодження пухиря заготовки. Покриття поверхні має велике значення в сфері виробництва ювелірних прикрас, але й невелика маса, отримана з використанням порожнистої структури, також є бажаною. Іншим застосуванням можуть стати декоративні фігурки та дверні ручки. Головною перевагою порожнистої структури є прискорення етапу розщеплення та зменшення ваги.

6.1.3 Пневматична ізостатична поковка

З металургійної точки зору спікання являє собою процес оплавлення, і, відповідно, сплавам ІЛП дуже важко конкурувати з кованими сплавами.

Кування – це деформаційний процес, в ході якого створюється дислокована структура, яка підвищує міцність. Щоб конкурувати з поковкою, до продуктів ІЛП застосовують новий метод пневматичної ізостатичної поковки. Метою є підвищення міцності, причому менша увага приділяється зменшенню кінцевої пористості. Дві головні переваги полягають у прискоренні циклу та відсутності оснащення для виконання поковки. Це зумовлено тим, що спечені компоненти ІЛП нагріваються та розміщуються в автоклаві, заповненому рідким аргоном або рідким азотом. Після того як рідина зустрічається з гарячим компонентом, вона закипає, утворюється газ, який герметизує автоклав. Високий тиск тисне на всю поверхню деталі, що веде до утворення кованої підструктури. Відповідно, заготовка ІЛП матиме покращені механічні властивості. Цикл протікає за одну хвилину. Цей метод повністю розкриває свій потенціал при формуванні компонентів з високою надійністю та високими властивостями (біомедична, нафтова, електронна або аерокосмічна галузі).

6.1.4 Великі структури

Усім видам виробничої діяльності притаманний зв'язок між розміром, вартістю та обсягом виробництва. Зазвичай, чим більший продукт, тим менший обсяг виробництва, в той час як щодня виробляються трильйони мілких об'єктів. Обернена залежність між виробничими обсягами та розміром компонента/вартістю є основною перепорою ІЛП при виробництві більших компонентів. Природно, що амортизація оснащення спонукає до виробництва компонентів у великих обсягах.

При зменшенні виробничих обсягів, зі збільшенням розміру машини для лиття, оснащення та печі для спікання стають більшими, повільнішими та більш дорогими. Більш того, ці збільшені витрати мають бути амортизовані на менші обсяги, що призводить до підвищення вартості одиниці продукції. Загальний результат збільшення розміру полягає в збільшенні виробничої собівартості, що веде до зосередження ІЛП на виробництві невеликих компонентів. Проте існує значна потреба у виробництві обмеженої кількості різних особливих матеріалів і форм, що виготовляються методом ІЛП. З появою нових концепцій швидкого моделювання можливості створення шаблонів значно зросли, проте дороге оснащення з великою твердістю є великою проблемою для галузі. Тому нові концепції привели до запровадження в ІЛП методів швидкого моделювання.

Створення кожного продукту починається з розробки, яка перетворюється в фізичну модель. При виробництві великих компонентів методом ІЛП модель заливається м'якою силіконовою резиною. Після затвердіння резини вона вилучається з форми. В результаті маємо недорогу порожнину форми з великою комплексністю. Гаряча сировина ІЛП

заливається силіконову форму з використанням низького тиску, після чого відбувається вивільнення тепла, яке приводить до затвердіння сполучної речовини. Після ежекції компонента з форми відбувається розщеплення та спікання. При належному контролі за температурою управління габаритами в цьому процесі знаходиться в діапазоні $\pm 0,2\%$. Існує декілька видів сполучних речовин, серед яких можна виділити сполучні речовини з термічною усадкою. Контроль габаритів становить $\pm 0,5\%$ при високому рівні збереження деталі. Найбільш важливо те, що більшість продуктів має такі форми, яких дуже важко досягти за допомогою існуючих технологій спікання. Так, комерційного використання набули інструментальні сталі, бронза та нержавіючі сталі. Після спікання механічні властивості залишаються незмінними порівняно зі стандартними показниками ІЛП. Вартість оснащення низька, і термін її виготовлення становить 5–10 днів.

6.1.5 Мікро інжекційне лиття порошку (мікроІЛП)

Мікросистеми вважаються на сьогоднішній день одним із найбільш перспективних напрямків розвитку технологій. Інноваційні мікросистеми використовуються у хімічній та енергетичній промисловостях, інформаційних технологіях, медицині, виготовленні споживчих товарів та ін. Технологія мікроІЛП – це економічний спосіб виготовлення мініатюрних деталей із широкого спектра матеріалів як металів, так і кераміки. Розміри деталей, які виготовляються за технологією мікроІЛП, можуть сягати декількох мікрон і навіть менше. Тому виготовлення прес-форм для таких деталей має певні труднощі, загалом для створення формувальних поверхонь використовують різноманітні методи, серед них літографія, лазерна абляція, ерозія, прецизійна механічна обробка та ін. В деяких випадках використовують поєднання літографії та електро-формувальних методів для виготовлення складних форм з високою якістю поверхні. При виборі матеріалів для виготовлення формувальних поверхонь особливу увагу необхідно приділяти зносостійкості. Адже при мікролитті зношування поверхні має велике значення.

Технологія мікроІЛП вимагає ретельного вибору компонентів зв'язувальної речовини та методів змішування. Класично для ІЛП можуть використовуватись порошки з розмірами від 0,5 до 20 мкм. Проте для мікроІЛП необхідно використовувати порошки субмікронного розміру для забезпечення вимог шорсткості деталей, конструкції та механічних властивостей після спікання. Слід зазначити, що для мікродеталей шорсткість набуває набагато більшого значення ніж для класичних деталей. Необхідно використовувати порошки якомога меншого розміру, щоб забезпечити мінімальний розмір зерен металу після спікання.

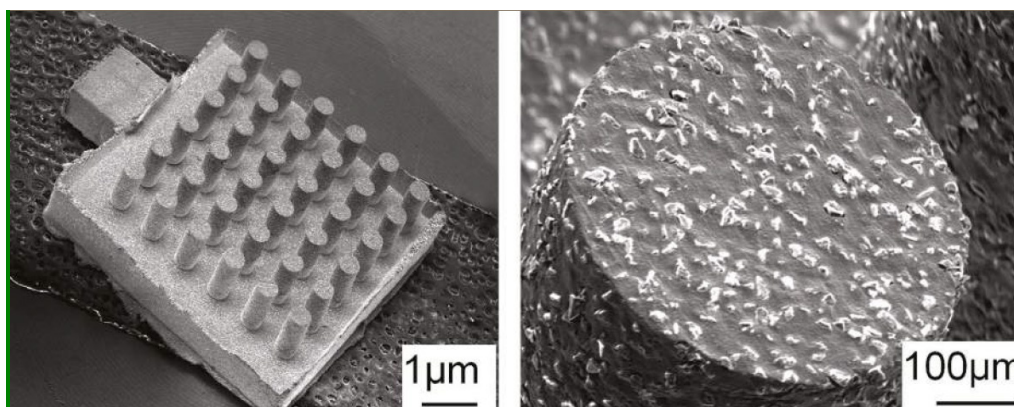


Рисунок 6.2 – Тепловий радіатор для мікроелектроніки. Матеріал: композит із міді та частинок діаманту

Широке розповсюдження мікроелектроніки потребує виробництва мікродеталей у великій кількості. Так, на рисунку 6.2 зображено тепловий радіатор із композиту, який складається з мідної матриці з вкрапленими частинками діаманта. Такий композит забезпечує високу теплопровідність та низький, подібний до кремнію, коефіцієнт теплового розширення.

Зв'язувальна речовина має мати низьку в'язкість для швидкого заповнення формувальної порожнини та запобігання передчасному застиганню матеріалу. Також міцність зеленого відливка має бути достатньо високою для забезпечення вилучення мікродеталі з прес-форми без пошкоджень. Для покращення реологічних властивостей сумішей використовуються різноманітні низькомолекулярні домішки та дисперсанти.

Таблиця 6.1 – Перелік матеріалів для мікроІЛП, типові розміри частинок

Матеріал	Середній розмір частинок, d_{50} (мкм)	Мінімальні габаритні розміри деталей мікроІЛП, (мкм)
Нержавіюча сталь 316L	1,5–5 (до 12)	50
Нержавіюча сталь 17-4PH	3–5	50
Карбонільне залізо	1,5–5	До 10
Мідь	0,5–2	До 10
Тверді сплави (WC-xCo)	0,5–4	50 (до 20)
Діоксид алюмінію	0,4–1,5	≤ 30
Діоксид цирконію	0,1–0,8	≤ 10

При виборі порошку слід дотримуватись емпіричного правила: розмір частинки порошку має бути як мінімум в десять разів менше за розмір найменшого елемента мікродеталі. Загалом, середній розмір частинок металевих порошоків складає від 1,5 до 4,5 мкм. У випадку керамічних

матеріалів розмір частинок може становити 500–800 нм для оксиду алюмінію та 300–500 нм для оксиду цирконію. В таблиці 6.1 наведено перелік найбільш розповсюджених матеріалів для мікроІЛП, середні розміри частинок порошку та мінімально допустимі габаритні розміри відливків. Найкраще використовувати газорозпилений порошок зі сферичними частинками для забезпечення низької в'язкості суміші та задовільних реологічних характеристик.

Для лиття мікроІЛП деталей використовують спеціальне обладнання. Слід зазначити, що термін «мікродеталь» охоплює великий спектр конструкційних форм. Це можуть бути мініатюрні деталі вагою декілька міліграм або відносно великі деталі з мікроструктурними елементами на поверхні. Як наслідок, для лиття можуть використовуватись різні інжекційні машини з силою змикання від 15 до 50 тонн. Щоб досягти найкращої точності, слід використовувати машини з електричними приводами. Для отримання найменшого об'єму впорскування замість шнекової системи використовують один або два плунжери. Оскільки діаметр плунжера може бути набагато менший шнека, в таких системах досягається прецизійний об'єм впорскування навіть для найменших деталей. Інжекційні машини для мікродеталей спочатку розроблялись для лиття полімерів, тому для роботи за технологією мікроІЛП вони потребують модифікації інжекційного вузла для більшої зносостійкості та оптимізації гвинта екструдера для покращення гомогенності розплаву. На рисунку 6.3 показані спеціально розроблені для мікроІЛП технології інжекційно-ливарні машини.



Рисунок 6.3 – Три приклади інжекційних машин для мікроІЛП з плунжерною системою: машина MicroPower15, виробник Witmann Battenfeld (зліва); 2C Mictosystem 50, Karlsruhe Institute of Technology (центр); FormicsPlast, DESMA (справа)

Під час лиття доречно використовувати вакуумування формувальної порожнини для покращення потоку розплаву. Також використовують динамічний нагрів формувальної прес-форми для покращення заповнення порожнини. Під час впорскування температура прес-форми близька до

температури розплаву, що поліпшує проліття деталей. На стадії охолодження температура формувальної поверхні знижується, це дозволяє вилучити відливок з високою міцністю зв'язувальної речовини. Проте слід зазначити: динамічний нагрів прес-форми значно збільшує час лиття деталі, що не завжди є прийнятним. Зниження циклу може бути досягнуто за допомогою новітніх методів нагріву, наприклад, індуктивний нагрів формувальних поверхонь.

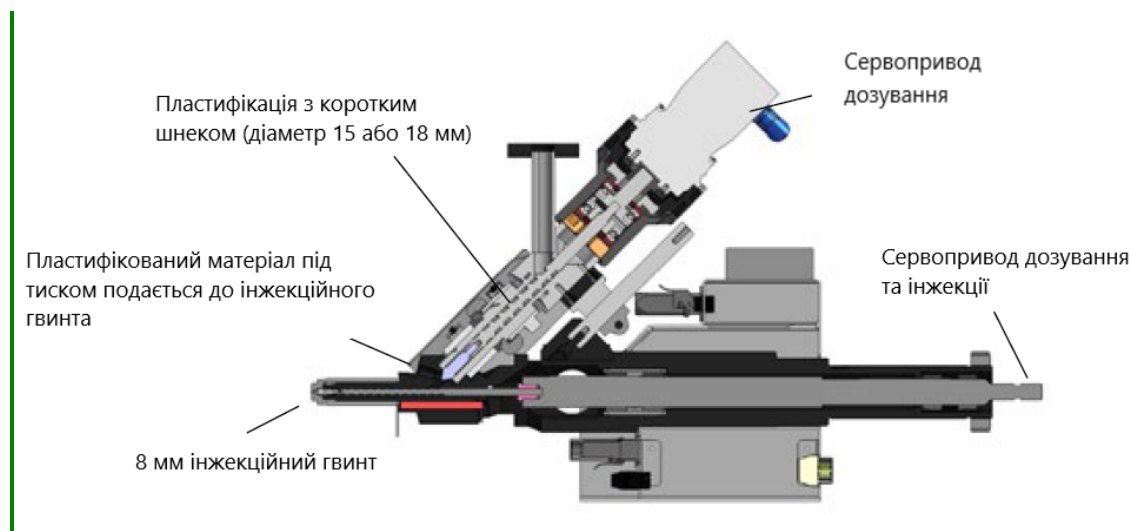


Рисунок 6.4 – Модуль для мікролиття з системою пластифікації та інжекційним гвинтом 8 мм.

Розробка компанії ARBURG GmbH+Co KG, Німеччина

Слід зазначити, що мікроЛП потребує прецизійних рухів інструментів прес-форми та інжекційного модуля обладнання, адже мікродеталі дуже чутливі до деформації. Деякі виробники випускають спеціальне програмне забезпечення термопластів, які працюють з мікроЛП для прецизійного налагодження рухів машини.

Під час лиття деталей наднизької ваги основною проблемою є довгий час перебування матеріалу у циліндрі та короткий хід шнека. Для вирішення даної проблеми компанія ARBURG GmbH, Німеччина розробила модуль для мікроЛП (рис. 6.4). Він являє собою комбінацію восьмиміліметрового інжекційного шнека з іншим шнеком для розплавлення суміші. Даний шнек з додатковим сервоприводом, установлений під кутом 45° до горизонтального шнека, забезпечує гомогенну підготовку розплаву. Під час процесу лиття розплавлений матеріал подається до інжекційного шнека під тиском. Інжекційний шнек має діаметр 8 мм і служить для впорскування матеріалу. Він виконує тільки зворотно-поступальні рухи і завдяки малому діаметру (8 мм), забезпечує необхідну точність впорскування малого об'єму матеріалу. Завдяки взаємодії між двома шнеками розплав безперервно подається до інжекційного шнека і не затримується в інжекційному циліндрі.

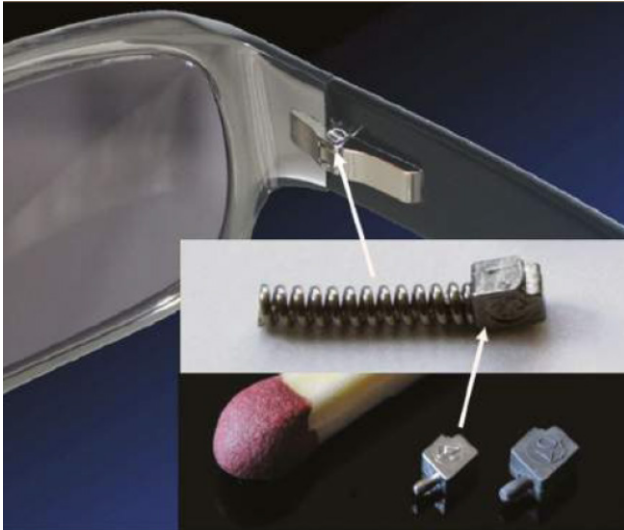


Рисунок 6.5 – Компонент шарніру окулярів із нержавіючої сталі 316L

речовини в печі спікання. Оскільки сировина для мікроІЛП містить підвищену кількість зв'язувальної речовини, лінійний коефіцієнт усадження деталей під час спікання коливається в межах 16–22%.

На точність мікродеталей після спікання впливає стан частинок порошку та гомогенність суміші. Залежно від розмірів частинок і швидкості заповнення порожнини під час лиття точність деталей після спікання складає: від $\pm 0,3$ до $\pm 0,5\%$ для металів; $\pm 0,5\%$ для легованих порошків та від $\pm 0,2$ до $\pm 0,5$ для кераміки. Як приклад масового виробництва деталей мікроІЛП на рисунку 6.5 зображено деталь шарніра для окулярів, матеріал нержавіюча сталь 316L. Знизу рисунка зображено зелений відливок та спечену деталь з пружиною всередині. Вага деталі складає 0,028 г, кількість формувальних порожнин у прес-формі близько 32 шт., річна програма випуску – 10 мільйонів штук, виробник – компанія OVE GmbH, Німеччина.

6.1.6 Концепції швидкого створення оснащення

Для створення прототипу оснащення використовується технологія ІЛП з застосуванням низького тиску. В США на створення оснащення щорічно витрачається 20 мільярдів доларів, тому використання твердих порошків в процесі лиття під низьким тиском є дуже привабливою новою концепцією.

Створення форми починається зі створення стереолітографічного шаблону. В процесі виробництва використовують типові порошки та цикли спікання ІЛП. Тому механічні властивості, отримані після спікання, такі, як і у затверджених продуктів ІЛП. Перші демонстрації стосуються пористого оснащення, використаного для паперової промисловості, та твердого оснащення, що використовується в інжекційному литті пластику. Більшість із них мали вагу від 1 до 15 кг. За умови належного вибору порошків та умов обробки оснащення ІЛП вироблялось із допуском $\pm 0,2\%$.

6.2 Новітні матеріали

Починаючи з 90-х років ХХ ст., об'єм продажів сировини для ІЛП показує стабільне зростання на рівні 12% річних. Постійний розвиток потребує від даної технології освоєння нових ринків виготовлення деталей та розроблення новітніх матеріалів, що забезпечують сучасні потреби. Далі окреслимо деякі перспективні напрямки для розвитку ІЛП.

Рідкоземельні магнітні матеріали

З розвитком електроніки спостерігається збільшення попиту на рідкоземельні магніти складної конфігурації на основі сплаву NdFeB (неодим-залізо-бор). Даний матеріал знаходить використання у широкому спектрі таких виробів, як електродвигуни, сенсори, вимикачі, мобільні телефони, комп'ютери, навушники та ін. Основною проблемою отримання достатньої коерцитивної сили таких магнітів є висока чутливість порошку NdFeB до кисню та вуглецю під час процесу ІЛП. Проте останні дослідження показують доцільність виготовлення NdFeB магнітів зі стовідсотково переробленої сировини за умови ретельного підбору зв'язувальної речовини, дебайдингу, захисної атмосфери та параметрів спікання.

Магнітом'які матеріали

Магнітом'які матеріали використовуються для таких електромагнітних виробів, як двигуни, трансформатори, сенсори та ін. завдяки їх високій магнітній індуктивності та одночасно малому магнітному полю. Можна виділити три найбільш поширені сплави.

Сплав Fe-6.5Si має чудові магнітом'які властивості. Проте він відомий своєю крихкістю і тому погано витримує деформацію.

Сплав Fe-9.5Si-5.5Al має високу магнітну проникність та високу щільність магнітного потоку а також високу стійкість до зношування. Проте використання даного сплаву обмежено з причини його поганої оброблюваності.

Сплав Fe-50Ni використовується, коли необхідна висока магнітна проникність. Проте основною проблемою спікання даного сплаву є погіршення магнітних властивостей матеріалу при наявності пористості в деталях. Висока відносна густина деталей може бути отримана при використанні попередньо легovanого порошку (prealloyed powder), тому що у даному випадку спікання відбувається у області феритної фази. Також мікроструктура після спікання більш гомогенна, ніж при використанні змішаної суміші легувальних компонентів.

Біосумісні матеріали

Матеріали, які контактують з тілом людини, поділяють на три типи залежно від довготривалості контакту. Більшість компонентів які виготовляються за допомогою ІЛП, відносять до 1-го класу, наприклад

зубні скоби. Відомо лише про декілька компонентів, які виготовляються шляхом ІЛП та належать до 2-го класу, це такі, як імпланти для фіксації кісток. Найбільшою проблемою для ІЛП вважаються компоненти 3-го класу, адже вони мають контактувати з тілом упродовж тривалого терміну, тому їм потребують найдетальніших досліджень та апробацій. Однак, незважаючи на це, кількість «запасних частин», що виготовляються за технологією ІЛП, постійно зростає. Наприклад, деталі для системи кохлеарного імпланта, такі системи дозволяють глухим людям знову чути завдяки високій точності виготовлення та низькій собівартості деталей ІЛП.

Найбільш поширеними матеріалами для хірургічних інструментів і стоматології є такі нержавіючі сталі, як 17-4РН, 420, 316L, в яких

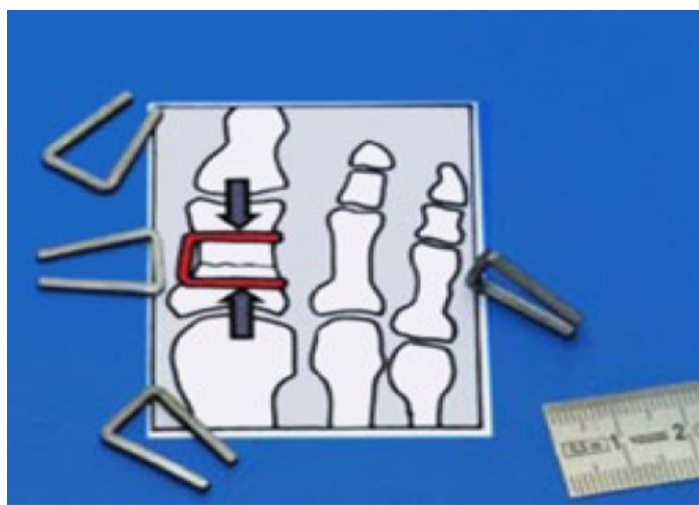


Рисунок 6.6 – Фіксатор кістки пальців ноги, виготовлений зі сплаву NiTi (© Forschungs-zentrum Jülich, Німеччина)

поєднується гарна корозійна стійкість з механічними властивостями. Також досить цікавими є спеціальні безнікелеві нержавіючі сталі, які знаходяться у безпосередньому контакті зі шкірою людини. Адже нікель може викликати алергічні реакції у людини. Наприклад, компанія BASF, Німеччина, виготовляє готові суміші Catamold P.A.N.A.C.E.A. – нержавіючу сталь з вмістом нікелю менше 0,1%.

Два найбільш поширених керамічні матеріали (оксид алюмінію та оксид цирконію) також знайшли застосування в зубних протезах та зубних брекет-системах. Основною перевагою керамічних матеріалів виготовлених за ІЛП, є білий колір та прозорі властивості. Так звані метали з ефектом пам'яті, які здатні змінювати свою форму при певній температурі (наприклад, при температурі тіла), також можуть виготовлятися за ІЛП-технологією. На рисунку 6.6 показано фіксатор кістки для пальців ноги. Він виготовлений зі сплаву з ефектом пам'яті NiTi. Фазова трансформація цього сплаву проходить при температурі 37 °С, деталь виготовлена за технологією мікроІЛП. Під час хірургічної операції деталь охолоджують нижче 37 °С і її форма може бути повністю іншою. Даний фіксатор дозволяє стабілізувати місце перелому пальця, утворюючи механічне навантаження у необхідному напрямку, використовуючи ефект пам'яті металу.

Одним із найбільш важливих матеріалів в медицині є сплав CoCr. На сьогоднішній день дрібний газорозпилений порошок CoCr є доступним для ІЛП-технології та адитивного виробництва за допомогою селективного лазерного спікання.

Титан та його сплави також досить цікаві для багатьох медичних застосувань завдяки своїй легкій вазі, високим механічним властивостям та корозійній стійкості. Проте зростання виробництва титанових деталей ІЛП стримує висока ціна титанового порошку та складність процесу. Адже титан дуже чутливий до вмісту кисню, азоту та вуглецю, і навіть незначний вміст цих домішок різко погіршує механічні властивості. Не зважаючи на це кількість успішних медичних компонентів з титану продовжує зростати. Так, наприклад, за допомогою технології ІЛП на даний час успішно виготовляють кільця клапанів для штучного людського серця.

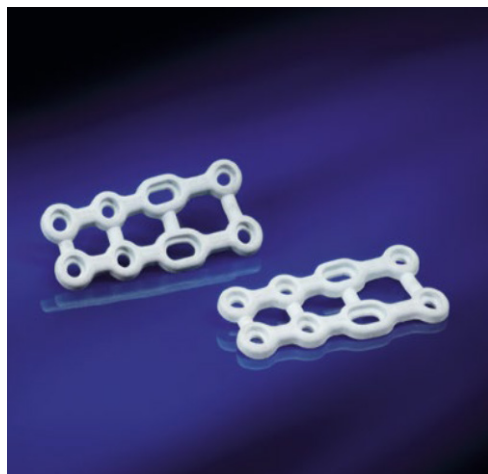


Рисунок 6.7 – Травматичні пластини, виготовлені з PLA-композиту

Іншим цікавим напрямком для ІЛП є медичні імплантати, виготовлені з біорозкладаного полімеру. Так, на рисунку 6.7 показані травматичні пластини, виготовлені за допомогою ІЛП. Спеціальний композитний матеріал складається з гідроксиапатиту (70%) та біорозкладаного полімеру (полімолочної кислоти, 30%). Даний композит змішується з водорозчинною зв'язувальною речовиною на основі поліетиленгліколю. Компоненти з такої суміші можуть бути виготовлені на звичайному термопласт-автоматі. Наприклад, це означає, що хірургічні

гвинти для кісток можуть виготовлятися із біорозкладаного композиту за технологією ІЛП. Після хірургічної операції, гвинти візьмуть на себе все навантаження, а потім будуть біорозкладатися з тією ж самою швидкістю як і процес відновлення зламаної кістки.

Високоміцні сталі Fe-Ni

Під час виготовлення сталей Fe-Ni за технологією ІЛП можна створити мікрогетерогенну структуру спеченого матеріалу. Така структура складається з фази з великим вмістом нікелю, яка оточена матрицею відпущеного мартенситу. Дослідження показують, що така гетерогенна структурах у сталях ІЛП може значно підвищувати механічні властивості сталей, з гарним балансуванням міцності та пластичності матеріалу. В таблиці 6.2 подано порівняння таких характеристик, як границя міцності та гранична втомна міцність для різних типів сталей Fe-Ni.

Таблиця 6.2 – Порівняльна характеристика властивостей сталей Fe-Ni

Хімічний склад	Залишкова пористість, %	Границя міцності, МПа	Границя втомної міцності, МПа
Fe-4Ni-0.4C	95% (ЛП)	1900	520
Fe-6Ni-0.4C		2040	650
Fe-8Ni-0.4C		1660	611
		1900	575
Fe-1.8Ni-0.5Mo-0.2Mn	100% (кована порошкова сталь)	2120	650
	91% (пресована сталь)	1920	390

Як можна помітити, серед сталей ЛП сталь Fe-6Ni-0.4C має найбільші значення границі міцності та втомної міцності. Це свідчить про те, що гетерогенна мікроструктура є ключем для підвищення механічних властивостей сталей. Однак для отримання оптимальних характеристик необхідно корегувати вміст нікелю для утворення необхідного рівня гетерогенності структури.

Мартенситно-старіючі сталі

Мартенситно-старіючі сталі з'явилися у 1950-х роках як новий клас сталей з високою міцності та в'язкістю. В основі даних сталей лежить низьковуглецевий сплав Fe-Ni, до якого додаються Co, Mo, Ti, Al. Границя міцності таких сталей може сягати 2400 МПа при вмісті титану 1,8%. В таблиці 6.3 подана порівняльна характеристика таких сталей для поковки, вибіркового лазерного спікання (ВЛС) та сталей ЛП.

Таблиця 6.3 – Порівняльна характеристика властивостей мартенситно-старіючих сталей

Сплав та процес виготовлення	Границя міцності, МПа	Границя текучості, МПа	Відносне видовження, %	Залишкова пористість, %	Твердість, HRC
Поковка 18Ni1400(0.2Ti)	1340–1590	1310–1550	6–12	100	44–48
Поковка 18Ni1700(0.4Ti)	1690–1860	1650–1830	6–10	100	48–50
Поковка 18Ni1700(0.6Ti)	1830–2100	1790–2070	5–10	100	51–55
Поковка 18Ni2400(1.8Ti)	2460	2390	8	100	58–59
ВЛС18Ni300	1290	1214	13,3	99,4	39,1
ВЛС18Ni300 (тер. обр.)	2217	1998	1,6	99,4	58
ЛП 18Ni300(0.5Ti)	1640	–	1	96	46,5
ЛП 18Ni300(1Ti)	2730	–	–	97	–

Висока тріщиностійкість та міцність робить такі сталі привабливими для виготовлення таких відповідальних деталей, як деталі шасі літака та корпуси ракет. Окрім цього, вони використовуються у виготовленні

штампів та прес-форм. Проте, основною проблемою для виготовлення таких сталей по технології ІЛП є наявність в них таких елементів як Ті та АІ. Такі елементи схильні утворювати міцні оксиди, які не руйнуються під дією високої температури.

В таблиці 6.4 вказані потенційні сфери використання технології ІЛП.

Таблиця 6.4 – Потенційні сфери використання ІЛП

Сфера використання	Ключові властивості матеріалу	Приклади
аерокосмічні компоненти	втома, міцність, довготривала міцність, текучість	суперсплав на основі нікелю
біомедичні імплантати	біосумісність	гідроксиапатит-титан
з'єднані абразиви алмазів	твердість, міцність	алмаз-кобальт
обладнання хімічної обробки	опір до корозії, в'язкість	титан, нікель, двоокис цирконію, окис алюмінію
ріжучі інструменти	твердість, в'язкість	двоокис цирконію, інструментальні сталі з карбонітриду
теплообмінники	опір до окислення, міцність при високих температурах	мідь, сплави міді
обладнання термічної обробки	міцність при високих температурах, теплова стабільність	силіциди, вольфрам, окис алюмінію
промислові та машинні інструменти	твердість, міцність, в'язкість	термічно-оброблювані сталі з високою міцністю
медичні інструменти	біосумісність, міцність, твердість	сплави титану
мікроелектронні схеми	теплопровідність, теплове розширення	нітрид алюмінію, вольфрам-мідь
двигуни та сенсори	магнітна реакція	залізо-неодим-бор
з'єднувачі оптичних систем	оптична прозорість	шпінель, окис алюмінію
радіологічні контейнери	поглинання радіації, міцність	важкі сплави вольфраму
спортивне обладнання	міцність, еластичність	нержавіюча сталь, сталь, титан
звукові передавачі	високочастотна п'єзоелектрична реакція	свинець-двоокис цирконію-титанат
відеокамери	магнітна реакція	Ферит

6.3 Адитивне виробництво та інжекційне лиття порошків

Одним із найбільш широко обговорюваних бар'єрів для швидкого розвитку технології ІЛП є складність прес-форм, які використовуються для формування відливка. Ціна такого оснащення може складати десятки тисяч доларів, що служить основною причиною того, що об'єм виробництва деталей ІЛП стартує від 50000 одиниць на рік. Також виготовлення прес-форми для складних деталей – це довгий та затратний процес, а враховуючи неізотропність усадження деталей під час спікання, це ще й часто потребує багаторазової доробки. Все викладене створює певну невизначеність і може відстрочити процес виготовлення деталей до кількох тижнів.

Поєднання технології адитивного виробництва та інжекційного лиття порошків створює нові можливості для серійного виготовлення деталей складної геометрії з високими механічними властивостями без використання дорогого обладнання.

Адитивне виробництво (АВ) було вперше презентовано у 80-х роках ХХ ст. для створення тривимірної цільної деталі з використанням 3D CAD файлів. Через майже 40 років АВ показує безпрецедентний рівень конструкторської свободи без використання додаткового оснащення. Більш того, АВ-технологія дуже ефективна, адже потребує мінімум матеріалу для деталей та підтримувальних структур. Інша суттєва перевага – це можливість оптимізувати геометрію деталі та її внутрішню структуру за допомогою комп'ютерної симуляції.

За стандартом ASTM F42 Additive Manufacturing Technologies технології адитивного виробництва поділяються на декілька типів:

- Material Extrusion (granulate extrusion, wire extrusion);
- Vat Polymerisation;
- Binder Jetting;
- Material Jetting;
- Powder Bed Fusion;
- Sheet Lamination;
- Direct Energy Deposition.

Можна виділити дві технології адитивного виробництва, які базуються на процесі спікання, FDM та Binder Jetting. Обидві технології знайшли широке застосування завдяки високим кінцевим механічним властивостям деталей та ізотропній структурі, схожій до матеріалів ІЛП.

Технологія FDM (екструзія волокнини)

В даній технології використовується волокнина (filament) із сировини, яка, зазвичай, застосовується для ІЛП. Сировина являє собою суміш полімерної зв'язувальної речовини та порошку. Основні засади конструкції принтерів для даної технології схожі за конструкцією на принтери для друку простих полімерів, проте основна різниця полягає у головці

екструдера, яка пристосована до роботи з полімером, наповненим порошком. Після того, як деталь була надрукована, вона проходить звичайні стадії видалення зв'язувальної речовини та спікання. Це дозволяє використовувати існуюче обладнання для технології ІЛП. На рисунку 6.8 наведено схематичне зображення друку деталей за технологією FDM.

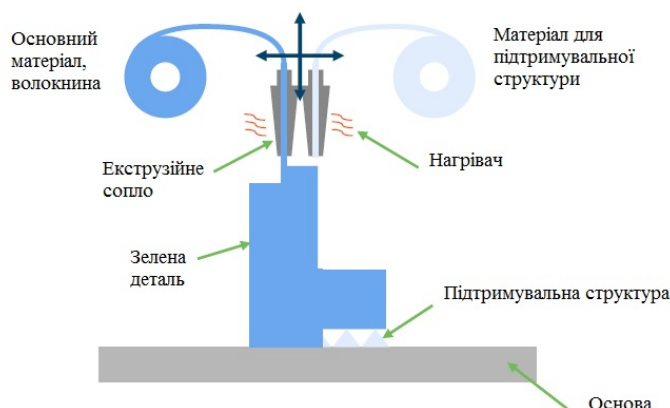


Рисунок 6.8 – Принципова схема друку деталей за технологією FDM

Технологія Binder Jetting (впорскування зв'язувальної речовини)

Принцип роботи даного виду тривимірного друку базується на вибіркому нанесенні зв'язувальної речовини на основу з дрібного порошку. Рідка речовина застигає і зв'язує частинки порошку під дією інфрачервоного випромінювання. Принципова схема 3D-друку показана на рисунку 6.9.

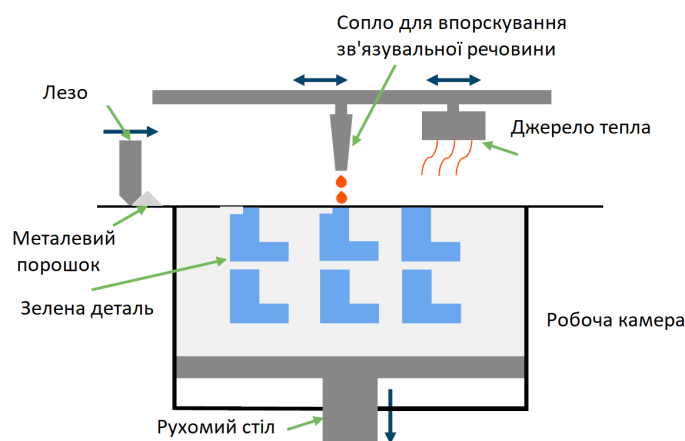


Рисунок 6.9 – Принципова схема друку деталей за технологією Binder Jetting

На даний час найбільш перспективним, з точки зору швидкості друку та отриманих механічних властивостей, є технологія *Binder Jetting*. Також слід зазначити, що в даному випадку використовується дуже мала кількість зв'язувальної речовини, що в деяких випадках робить непотрібним процес

первинного дебайдингу. Серед відомих виробників обладнання для даної технології слід зазначити: Hewlett-Packard, Desktop Metal, ExOne, DigitalMetal.

На рисунку 6.10 (зліва) показано обладнання HP Metal Jet для серійного виробництва деталей за технологією Binder Jetting, що встановлено в компанії GKN Powder Metallurgy, та зелені деталі (справа) підготовлені до операції спікання.



Рисунок 6.10 – Обладнання для 3D-друку Binder Jetting (зліва) та надруковані деталі (справа)

Компанія GKN Powder Metallurgy використовує дане обладнання для виготовлення функціональних деталей для автомобільної промисловості та таких промислових споживачів, як Volkswagen Group та Wilo SE (всесвітньо відомий виробник насосних систем). Компанія Wilo виготовляє такі деталі гідравлічних систем, як крильчатки, дифузори, корпуси насосів



Рисунок 6.11 – Крильчатка насоса після спікання, виготовлена на обладнанні HP Metal Jet

з широким діапазоном розмірів, що мають витримувати значні перепади тиску та температури. На рисунку 6.11 показана фотографія крильчатки (в розрізі), яка була виготовлена за допомогою технології Binder Jetting.

Технологія ІЛП завжди мала недоліки з конкуруванням у виготовленні деталей у малих кількостях. І це та область, де адитивні технології мають значний потенціал. Завдяки

поєднанню обох передових технологій народжуються унікальні можливості у виготовленні прототипів деталей, формувальних поверхонь прес-форм, інструментів або невеликих партій деталей.

7 ДЕФЕКТИ І ПРОБЛЕМИ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В ПРОЦЕСІ ІЛП

7.1 Загальні приклади проблем, які виникають при виготовленні деталей ІЛП

Як і для будь-якої технології виробництва, у випадку ІЛП важливо знати не тільки позитивні сторони, але й усвідомлювати ряд проблем, з якими може зіткнутися виробник деталей ІЛП. Таке знання вкрай необхідне для успішного виготовлення придатних деталей.

Американський професор Рандалл Джерман проаналізував причини декількох дефектів, з якими він стикався упродовж більше 20 років роботи в ІЛП, а також розглянув вирішення цих проблем: дефекти, небажаний аспект ІЛП, не досить добре документовані як їх причини, так і рішення. Якщо ми можемо сприяти випуску компонентів високої якості, значить стає можливим уникнення небажаних економічних втрат.

Випадок № 1. Тріщини в керамічних деталях

Один важкий випадок виник, коли велика мультинаціональна компанія вибрала постачальника для збільшення виробництва керамічних деталей до 100 мільйонів штук в рік. На жаль, після спікання компоненти складної структури виявилися з тріщиною. Провели безліч експериментів, змінювали конструкцію прес-форми, параметри литва і спікання, але тріщини так і продовжували проявлятися. Коли «зелені» деталі були вивчені за допомогою світлового мікроскопа, тріщин там не виявилось. Однак після розчинювального промивання для видалення поверхневої зв'язувальної речовини і проникнення флуоресцентного пенетрату отримали картинку, показану на рис. 7.1. В результаті було підтверджено розщеплення зв'язувальної речовини уздовж ліній спаю. До цього моменту параметри складу зв'язувальної речовини не змінювалися під час експериментів. Зрештою з'ясувалося, що зв'язувальна речовина, що має у своєму складі домішки олії, іноді не застигала, дефект залишався непоміченим внаслідок простих форм деталей.



Рисунок 7.1 – Тріщини після спікання внаслідок відділення олії від зв'язувальної речовини

Випадок № 2. *Коливання розмірів*

Пов'язані з порошковим інжекційним литвом операції формування металевих прицілів для зброї мають велику кількість браку внаслідок коливання розмірів після спікання. Підприємство проводило експерименти зі спікання для отримання великого числа придатних деталей. В результаті вони були здатні встановити центр критичних допусків залежно від ступеня спікання, але концентрація розмірів виробів була низькою, іноді досягаючи 60% в діапазоні. Під час виміру відлитих деталей в «зеленому» вигляді було встановлено, що вони суттєво коливаються в масі. При вивченні статистики було визначено, що коливання розмірів після спікання відбувається, в основному, внаслідок коливання відливої маси деталі. Деталі з великою масою усаджувались менше і були занадто великими, тоді як деталі з малою масою усаджувались більше і були занадто малими. Використання датчика внутрішнього тиску в прес-формі зробило можливим зменшення коливання маси, і це привело до значно менших допусків розмірів після спікання. У даному випадку проблема була не в спіканні, а у втраті контролю литва.

Випадок № 3. *Корозія деталей*

Спечені деталі з нержавіючої сталі виявилися за межами розмірів і, що найбільше розчарувало, – піддавались корозії при доставці. Виробник звинувачував у всьому прес-форму. Винуватцем був неправильний цикл спікання. Виробник деталей ІЛП мав обмежені можливості устаткування. Якщо встановити правильний час, атмосферу і температуру, можна уникнути корозії і поганого спікання.

Випадок № 4. *Конструкція прес-форми*

Вивчення корпусу насоса виявило тріщини після спікання. Під мікроскопом були виявлені тріщини в «зелених» деталях, але тріщини були занадто малі і їх було важко помітити. Спікання відкривало тріщини, але не викликало їх; спікання тільки робило їх видимими. Перевірка кутів нахилу стінок у прес-формі визначила: деталь засідає при виїмці і ламається, але напруга, отримана при зніманні, відпускається і запечатує тріщину, тим самим приховуючи її. Доопрацювання прес-форми розв'язало проблему.

Випадок № 7. *Заміна зв'язувальної речовини*

У процесі розробки зв'язувальної речовини на основі води стандартні деталі оксиду алюмінію були змінені для переходу з віско-полімерних на агар-водяні зв'язувальні. Технологи запустили стандартний цикл тільки для того, щоб побачити, як система штовхачів в прес-формі виштовхує деталь, оскільки зв'язувальна речовина дуже м'яка після застигання. Отже, нова формула зв'язувальної речовини вимагала внесення кальцієвої солі як прискорювача твердіння деталі, так вдалося не змінювати час циклу.

Випадок № 8. Зневуглецювання

Під час виготовлення стрілецького прицілу проблема поверхневого зневуглецювання ставала видимою під час затемнення поверхні, як показано на рис. 7.2. Звичайно, спочатку звинуватили процес покриття, але при вивченні розрізу зразків стало очевидним, що поверхня піддалася зневуглецюванню в процесі спікання. Були внесені зміни в процес спікання в плані заміни атмосфери та підтримувальних лотків.

Чорні металеві компоненти зброї покриваються поверхневою світлою плівкою через тиждень після виготовлення. Усі експерименти були спрямовані на підбір необхідних розмірів деталі згідно зі специфікацією, але спечена щільність була низькою, близько 6% пористості. У результаті пори, які виходять на поверхню, утримують гідроксид солі, який використовують у воронінні. З часом сіль, що утримується в порах, окислюється, що збільшує поверхню, це, у свою чергу, призводить до знебарвлення.

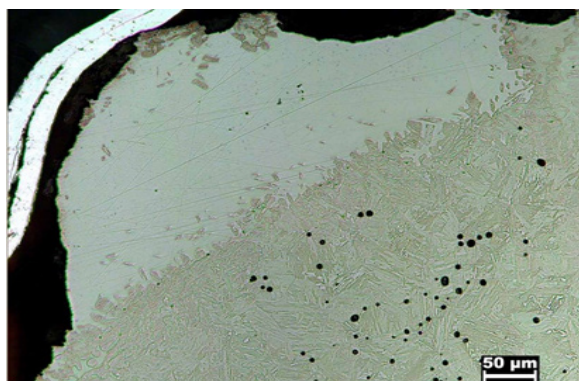


Рисунок 7.2 – Поверхнєве зневуглецювання на стрілецькому прицілі біля зовнішньої кромки

Випадок № 9. Контроль властивостей

Деталь з нержавіючої сталі, яка використовується в механізмі автомобільного сидіння, активує ввімкнений і вимкнений стани, але коли її навантажили – ця деталь зламалася. Тести матеріалу показали, що щільність і хімічний склад були в нормі, але кристалічна фаза була неправильна. Залізні сплави можуть спікатися в діапазоні температур, де вони можуть набувати форму об'ємно-центрованого фериту, гранецентрованого аустеніту, або, при високих температурах, об'ємно-центрованого дельтафериту і, звичайно, залежно від швидкості охолодження сплави можуть формувати об'ємно-центрований тетрагональний мартенсит.

Випробування на ударну в'язкість було проведене згідно зі стандартом ASTM. Тести на ударну в'язкість за методом Шарпі визначили, що матеріал схожий на скло, з буквально відсутньою ударною в'язкістю. Таким чином, після навантаження дефлектор негайно зламався. Метою

стало модифікувати цикл спікання для нижчої пікової температури.

Нижченаведений огляд дає класифікацію деяких поширених проблем технології ІЛП, видимих симптомів, джерел проблем і дій, що їх коригують. Причини дефектів пов'язані з сумішшю (порошок і зв'язувальна речовина), литвом (параметри і інструмент), дебайдингом і спіканням.

7.2 Суміш (feedstock)

На початку розвитку інжекційного порошкового лиття були запропоновані нові порошкові сплави. Вони були розрекламовані як нові варіанти тих, що поставлялися, але насправді погано спікались. Точне дослідження порошку електронним мікроскопом не показувало проблем. Однак в розрізі ці порошки мали пори, як показано на рисунку 7.3.

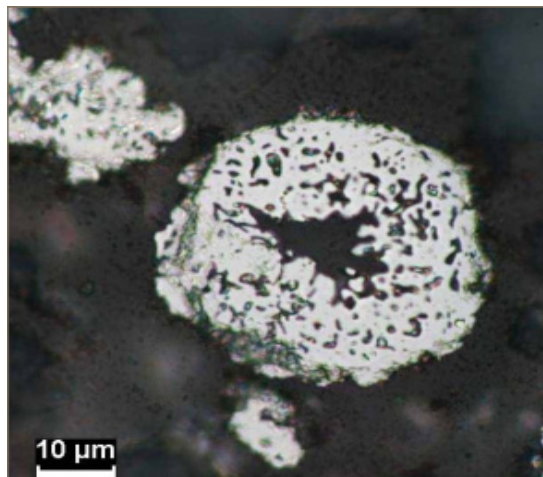


Рисунок 7.3 – Приклад полірованого розрізу частки залізного порошку з внутрішньою порою

Такі пори вловлювали в пастку газ, який важко видалити при спіканні. Метою стало точне визначення щільності часток і відсутність внутрішніх пор. У період розвитку технології інжекційного литва окислу алюмінію на основі стандартного порошку і зв'язувальної речовини були використані різні співвідношення порошку і зв'язувальної речовини для регулювання остаточних параметрів. Проте дефекти були помічені на стадії литва. Це той випадок, коли інструмент був розроблений на початку розвитку промислового процесу. Простий графік залежності частоти дефектів і завантаження порошку в зв'язувальній речовині дає хороше уявлення про правильне співвідношення порошку. Тільки після визначення кількості порошку можна приступати до розробки прес-форми. Високий вміст порошку в зв'язувальній речовині викликає такі дефекти, як недоливи, тріщини та ін. З іншого боку, недостатня кількість металевого порошку також призводить до розділення порошку і зв'язувальної речовини. Це,

звичайно, видно біля невеликих точок упорскування, як показано на рисунку 7.4.

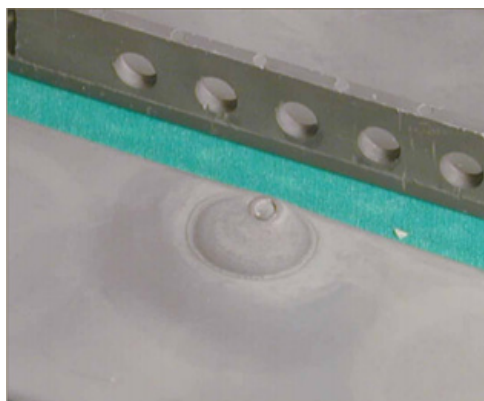


Рисунок 7.4 – Слід від розщеплювання зв'язувальної речовини біля точки упорскування

7.3 Дефекти які виникають при литті заготовок ІЛП

При литті пластмас існують такі розпізнавані дефекти, як недоливи, спаї, пригари біля точок упорскування, лінії стику, повітряні пастки. Ці дефекти розглянуті в класичних підручниках. Зазвичай лінії зімкнення прес-форми невеликі, але в деяких випадках при погано вирівняних половинах прес-форми цей дефект досить суттєвий, як показано на рисунку 7.5. На цьому рисунку видно слід від точки упорскування зі зміщеними матрицями, що свідчить про погане центрування, отже, утворюється пригар навколо точки упорскування через розділення порошку і зв'язувальної речовини. Більш прихована проблема виникає при відмінностях в деталях, які відливаються в одній прес-формі.

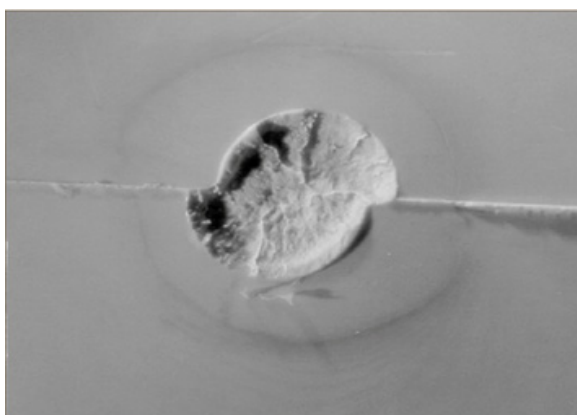


Рисунок 7.5 – Слід від погано вирівняних півформ і розділення порошку та зв'язувальної речовини біля точки упорскування

Зазвичай використовується балансування системи ливника для однакового заповнення деталей, але, що дивує, іноді не приділяється така ж увага балансуванню системи охолодження. Необхідно потурбуватися, щоб кожна порожнина в прес-формі мало однакову температуру. Тріщини розшарування іноді видно після литва. Одна з причин цього дефекту – прилипання матеріалу до стінок прес-форми, ймовірно, через надмірний тиск підживлення. Рекомендується збільшувати кут знімання. З іншого боку, низький модуль еластичності сировини призводить до розтягування при зніманні, що, у свою чергу, утворює внутрішні тріщини. На рисунку 7.6 показана мікрофотографія внутрішніх тріщин, сформованих після знімання деталі, які стало видно після спікання. Інша причина – це наявність (чи відсутність) поверхнево активних речовин у зв'язувальній речовині.

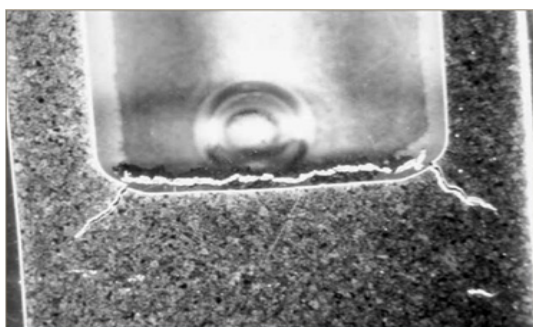


Рисунок 7.6 – Внутрішні тріщини на спеченому зразку внаслідок неправильно зібраної прес-форми

Домішки, які служать пластифікаторами, також можуть розщеплювати зв'язувальну речовину. Ефективним вирішенням є додавання поверхнево активної речовини у формулу зв'язувальної речовини, наприклад, стеаринової кислоти. Тріщини при литві зазвичай є проблемними і, як правило, пов'язані з занадто швидким заповненням і надмірним тиском. Сировина (feedstock), яка піддалася надвисокому тиску, тріскається при зніманні з прес-форми або має високу залишкову напругу. Один з виробників деталей ІЛП витримує литі деталі два дні, перш ніж починає процес дебайдингу для зниження ризику появи тріщин. Це тому, що довгі молекули, які служать основою зв'язувальної речовини, вимагають деякого часу релаксації і, як тільки закінчується фаза наповнення в зв'язувальній речовині, м'яка деталь реагує на залишкову напругу прихованою тріщиною. Щоб уникнути операції витримки деталей, потрібний інший склад зв'язувальної речовини з меншою вагою молекул. У полімерах ця властивість виражається як константа часу релаксації напруги, яка дорівнює в'язкості, поділеній на модуль еластичності. Якщо час циклу охолодження менший константи часу релаксації напруги, то деталь має залишкове напруження, що може стати причиною тріщин, як показано на рисунку 7.7.



Рисунок 7.7 – Тріщини у вольфрамовому вібраторі для зубної щітки, які виникли через залишкові напруження внаслідок швидкого охолодження і високої молекулярної ваги зв'язувальної речовини

Потемніння часто можна виявити біля маленьких точок упорскування. Це наслідок розщеплювання порошку та зв'язувальної речовини, пов'язано воно з невеликою точкою упорскування і високою швидкістю зрушення при литві. Це ускладнюється переобтяженою сировиною (feedstock), де порошок і зв'язувальна речовина рухаються по різних траєкторіях внаслідок різної щільності. У деяких випадках ситуацію можна виправити іншою конструкцією точки упорскування.

Дефект, вказаний на рисунку 7.8, є отриманням грубої шорсткої поверхні після литва. Цей дефект проявляється внаслідок холодних стінок прес-форми, зв'язувальна речовина замерзає, не обтікаючи стінки прес-форми. Потік, що завмер, замість нормальної течії частково ковзає, через тиск, уздовж стінок. Схожа проблема виникає в ситуації, коли холодний матеріал із попереднього впорскування вловлюється фронтом потоку і вноситься в деталь, створюючи дефект, вказаний на рисунку 7.9.

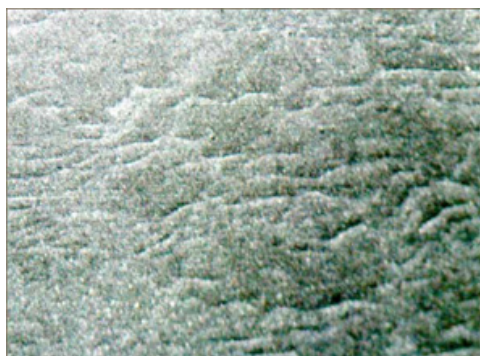


Рисунок 7.8 – Груба поверхня, сформована після литва через низьку температуру стінок прес-форми

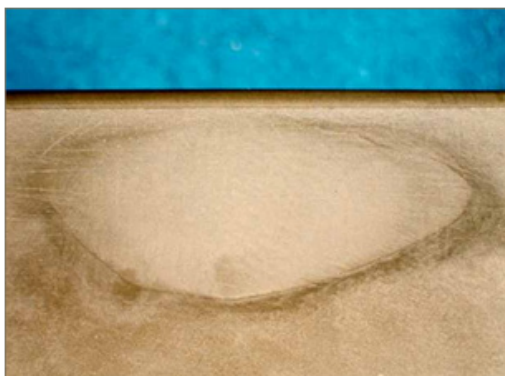


Рисунок 7.9 – Відлита деталь з ливником, який передчасно застиг і сформував дефект

Декілька інших дефектів, що зустрічаються при литві, зібрані в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Дефекти при литті, причини та заходи з їх усунення

Проблема	Опис	Причина	Заходи
Засідання деталі в прес-формі	Труднощі при виштовхуванні	Занадто великий тиск підживлення	Зниження тиску підживлення для нижчого залишкового тиску
		Температура виїмки занадто висока	Збільшити тривалість циклу охолодження
Недолив	Перш ніж порожнина заповниться, деталь застигає	Низька швидкість упорскування	Швидке заповнення, використання великих ливників
		Виливання занадто холодне	Забезпечити нагрів прес-форми або покращити контроль температури
		Низька температура сировини	Збільшити температуру сопла
Повітряні кишені або порожнечі	«Зелена» деталь має великі пори	Струменеві течії при литві	Занадто швидке заповнення, і сировина блокує вентиляцію
		Неправильне стискування при литті	Тип шнека неправильний, недостатній тиск підпору
		Точка впорскування занадто мала	Зменшення швидкості заповнення при невідповідному діаметрі точки впорскування
		Розміри гранул або їх форма ведуть до утворення стопора у бункері подання матеріалу	Великі пори в матеріалі призводять до повітряних кишень, використовуйте однакові і округлі гранули
Утяжини	Відливання не заповнюються до потрібного розміру	Малий тиск підживлення	Сировина стискається при охолодженні в прес-формі, потрібен більш високий тиск
Внутрішні тріщини	Часто видно біля центра стержнів або пуансонів	Перевірте кути нахилу інструменту і його центрування	Рух інструменту не вирівняно або похилі виштовхувачі, або штифти руйнують відливок при виштовхуванні

7.4 Дефекти дебайдингу

З розширенням асортименту зв'язувальної речовини з'явилися і різноманітні види дебайдингу. Одним з основних видів залишається піроліз. При термічному дебайдингу трапляється виникнення здуття, як показано на рисунку 7.10. Здуття виникає після швидкого циклу нагріву, особливо в товстих секціях. Існує два основні корені проблеми. Перший – через простий занадто швидкий нагрів товстих секцій. Для кожного компонента є карта критичних або максимальних швидкостей нагрівання, порівняно з температурою, при якій зв'язувальна речовина руйнується занадто швидко. Зв'язувальна речовина розробляється з урахуванням термогравіметричного аналізу (ТГА). Зміна маси записується протягом нагрівання в ТГА-пристрої, і такий аналіз дозволяє скласти карту температур, де визначається повільне нагрівання. Найбільш повільний нагрів має відбуватися в тій ділянці температур, де спостерігається найшвидша втрата маси. При збільшенні товщини секцій прогрівання деталей всередині запізнюється, отже, потрібно зниження швидкості нагрівання.

Такий дефект дебайдингу, як міграція зв'язувальної речовини, важко виявити. При температурі вищій температури плавлення речовини, але нижчій температури випаровування, вона знаходиться в рідкій фазі і протікає всередину пористого тіла. Це дає можливість при міграції зв'язувальної речовини запечатувати раніше відкриті пори, таким чином закривається вихід парам речовини, які розширюються всередині деталі. Це призводить до здуття. Зазвичай повільне нагрівання усуває здуття, але у разі міграції зв'язувальної речовини прийнятніше використати стадію розчинювального дебайдингу або змінити співвідношення інгредієнтів зв'язувальної речовини з метою створення більшої кількості пор на ранній стадії дебайдингу.

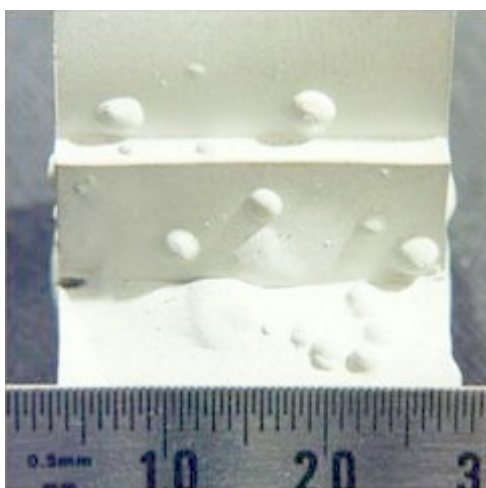


Рисунок 7.10 – Здуття на керамічній деталі з оксиду алюмінію після термічного дебайдингу

Часто потрібна швидкість нагрівання $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ або нижча при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таку низьку швидкість нагрівання важко контролювати при низькій температурі, особливо у вакуумі, отже, рекомендується використати атмосферу для передачі тепла деталям.

Також трапляються тріщини у тому випадку, коли зв'язувальна речовина потрапляє в пастку всередині деталі при температурі близько 250°C . Часто це трапляється в результаті поганої передачі теплоти. Можна використати водень як атмосферу, яка добре передає тепло, навіть в тому випадку, коли немає низької температури; таким чином виграє термодинаміка. Тріщини при дебайдингу утворюються також при плоских гранях порошку. Коли зв'язувальна речовина розплавляється, плоскі грані стягуються разом і у створеному контакті виникає напруга, яка розщеплює ядро. Якщо при дебайдингу розм'якшується зв'язувальна речовина, яка служить скелетом, тоді частки можуть рухатися і створюють тріщини, як показано на рисунку 7.11 для недовантаженої системи.

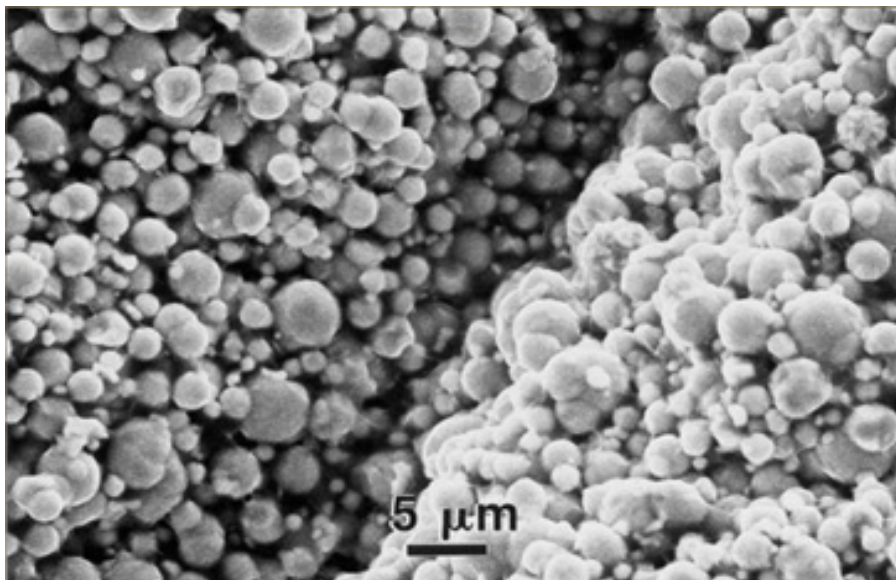


Рисунок 7.11 – Погано сполучені лінії спаю, які утворять тріщину після спікання

Особлива ситуація виникає в компонентах, що мають товсті і тонкі ділянки. Напруга виникає на їх з'єднанні: на тонких ділянках зв'язувальна речовина вже відділилася, тоді як товсті секції ще містять її. Звичайно напруга невелика, поки компонент залишається ослабленим і чутливим до градієнта напруги. Більше інформації про дефекти дебайдингу, їх причини і методи усунення наведено в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Дефекти деталей при дебайдингу і спіканні та методи їх усунення

Проблеми	Опис	Причина	Методи усунення
Великі пори	Мікро-структура показує великі порожнини	Запізніла реакція між домішками	Реакція генерує C, CO ₂ і H ₂ O, так через повільне нагрівання необхідно видаляти кисень
		Тиск підживлення	Низький тиск підживлення або вприскування погано сприяє видаленню повітря з прес-форми; відрегулювати тиск литва
		Температура лиття	Охолодження матеріалу викликає утяжини або внутрішні порожнини, вибрати нижчу температуру сопла
		Змішування сировини (feedstock)	Частки полімеру мають бути ретельно розплавлені при перемішуванні, інакше формуються великі пори
Викривлення	Деталь спотворюється	Гرادієнт температур	Деталь прагне зігнутися у бік більш гарячого джерела
		Градієнт щільності	Литво створює градієнт щільності по тілу деталі, що призводить до різного усадження з напругою, що виникає, – змінити умови лиття.
		Товсті – тонкі секції	Напруги виникають, оскільки тонка стінка ущільнюється швидше – зменшити швидкість нагрівання
		Дизайн підкладок	Конструювання відповідних підкладок для підтримки розмірів під час нагрівання і усадки
Руйнування	Вигин тонких кромок	Основна зв'язувальна речовина має залишкову напругу	Повільне охолодження при литті або перехід до зв'язувальної речовини з нижчою масою молекул
		Вибір порошку	Низьке тертя між частками порошку вимагає додавання часток неправильної форми
Тріщини	Поверхне-ведшарування	Тиск пари внутрішньо формує верхню оболонку	Поверхневі пори мають бути пробиті, можливо, з використанням першого розчинювального дебай-дингу і меншої кількості основного зв'язувального.
	Тріщини біля формувальних прес-форм	Слабкі лінії спаю, руйнування через знімання	Тріщини робить прес-форма, але це важко виявити, спікання відкриває тріщини, роблячи їх видимими
Пористість	Низька щільність після спікання	Недостатня максимальна температура	Для збільшення ущільнення потрібно більш високу температуру
Проблеми з вуглецем	Високий або низький вміст вуглецю	Поверхня науглецьовується або знеуглецьовується	Хімічний потенціал вуглецю слід контролювати, вуглець потрапляє в піч з графітової фурнітури або вуглець втрачається при окисленні під час термоциклу, може, через атмосферу або підкладки
		Забруднення зв'язувальною речовиною	Частини зв'язувальної речовини, що видаляються, такі як целюлоза, агар, полістирол можуть переходити в графіт при спалюванні.
Шорсткість поверхні	Груба поверхня	Розмір часток	Шорсткість поверхні після спікання пропорційна розміру часток, використовуйте дрібніші частки для гладких поверхонь.
Розплавлення деталей	Втрачається форма деталей, утворення рідкої фази	Вимір температури	Використайте індикатори температури для перевірки температури в різних ділянках печі.
		Реакція підкладками	Формується фаза низької температури плавлення, металеві деталі на графітових полицях можуть розплавлятися під час спікання.

7.5 Дефекти спікання

Спікання в технології ІЛП має безліч проблем, але багато пов'язано з тим фактом, що спікання збільшує дефекти, отримані раніше при змішуванні порошків, литті або дебайдингу. Зміна циклу спікання не приводить до результатів стосовно усунення джерел цих проблем. Наприклад, на рис. 7.12 зображено просте розкриття тріщини під час спікання внаслідок різних товщин стінок деталі. При низьких температурах спікання, до того як частинки порошку утворили міцний зв'язок між собою, порошкова заготовка має низьку міцність. Коефіцієнт тріщиностійкості на даному етапі досить малий та складає близько $0,02^{\circ}\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$. Тріщини можуть з'являтися внаслідок сил тяжіння, перепаду температур, видалення полімеру або вібрації. Часто причиною тріщин при спіканні є розділення порошку і зв'язувальної речовини на лініях спаю. Уважне вивчення «зеленої» деталі покаже, чи полягає проблема в литті. Інші джерела тріщин, перераховані в таблиці 7.2, містять комбінації: від проблем з'єднання товстих і тонких секцій – до поліпшення дизайну підкладок. Проблему необхідно розпізнати до спікання, тому що на стадії спікання, як правило, її неможливо буде виправити. Неправильний вибір атмосфери спікання для нержавіючих сталей може призвести до втрати хрому або змішування оксидів, карбідів чи нітриду. Видалення хрому призведе до зниження корозійної стійкості.

Для нержавіючої сталі безпечною атмосферою є водень. Часто при спіканні використовують вакуум, але при вакуумі видаляється поверхневий шар хрому, оскільки хром має вищий тиск пари порівняно з нікелем або залізом. У деяких випадках при спіканні у вакуумі можна спостерігати корозію матеріалу, як показано на рисунку 7.13.



Рисунок 7.12 – Тріщина, яка сформувалась під час спікання хірургічного інструмента із діоксиду алюмінію (Al_2O_3). Велика довжина тріщини свідчить, що вона сформувалась до того, як заготовка набула міцності.

Азот при спіканні призводить до осадження нітриду хрому під час охолодження, і це знижує роль хрому в пасивації деталей. Вуглець, що міститься в зв'язувальній речовині, нагрівальних елементах, або підкладках при спіканні призводить до утворення карбідів хрому, що погіршує матеріал. Нержавіюча сталь не містить кисень, але він дає схожий ефект на корозійну стійкість і має триматися якнайнижчим. Таким чином, кращим вибором для нержавіючої сталі високої якості є водень.

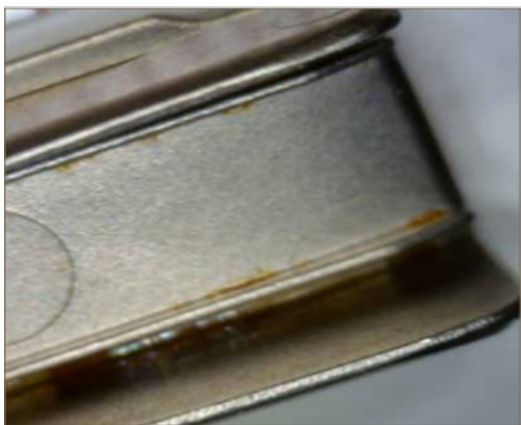


Рисунок 7.13 – Іржа на деталі (для медичного призначення) з нержавіючої сталі МІМ вказує на погано підібрані режими спікання у вакуумі

Викривлення також поширене в спіканні при з'єднанні в деталі товстих і тонких секцій. Завантаження порошку в тонкій секції нижче, ніж в товстій, таким чином під час спікання напруження виникають, коли тонка стінка усаджується більше, ніж товста секція. Опір усадженню викликає викривлення або навіть тріщини.

Більшість систем зв'язувальних речовин сконструйовано так, щоб при нагріві до температур спікання не залишалися залишки. Але деякі міцні полімери схильні до формування графіту, і цього слід уникати. Для прикладу, на ранніх стадіях розвитку технології ІЛП існували досить вражаючі зв'язувальні речовини на основі полістиролу, крохмалю, або целюлози як скелета, але вони були неприйнятні з точки зору залишків вуглецю.

Як і все інше, підкладки для спікання також вимагають уваги. Кераміка низької вартості містить в собі кремнезем. Кремнезем має високий тиск пари, що призводить до забруднення матеріалу, який спікається, і поверхні печі, в результаті помітна зміна кольору поверхні. Незважаючи на те, що діоксид алюмінію і діоксид цирконію набагато дорожчі, все ж це кращий вибір, щоб уникнути забруднення.

Статистичні експерименти зазвичай показують відмінності в розмірах деталей залежно від розміщення в печі. Потрібні спеціальні зусилля для забезпечення рівномірної передачі тепла; деталі розміщені по боках камери печі мають значно інші параметри спікання, ніж деталі в середині печі. Це особливо очевидно у великій вакуумній печі, де передача теплоти не досить однорідна, доки нагрівальні елементи не досягнуть температури 600 °С і виділятимуть значне термічне випромінювання. Деталі, які

знаходяться в затінених ділянках, можуть недопектися. У безперервній печі газ, що входить, може створювати локальні холодні плями.

Утворення сажі спостерігається, коли нагрівання занадто швидке. Зв'язувальна речовина розкладається до форми вуглецю, який осідає на деталях. Це призводить до різного кольору поверхні деталей. Вирішенням цієї проблеми може стати зменшення швидкості нагріву і збільшення потоку газу або зменшення молекулярної ваги домішок зв'язувальної речовини. Іншою причиною зміни кольору деталей може бути склад зв'язувальної речовини. Для прикладу, частки міді забарвлюють сталь. Забруднення нержавіючої сталі легко визначити зануренням деталей в хлористий відбілювач. Спечена мікроструктура може розповісти маршрут спікання. Зростання зерен і пор супроводжує процес ущільнення при спіканні, тому часто можна спостерігати великі зерна і навіть великі сферичні пори в мікроструктурі. При занадто великій швидкості нагрівання є небезпека у викривленні і збільшенні зростання зерна. Як тільки межі зерен відділяються від пор, ущільнення припиняється; збільшення нагріву не сприяє збільшенню щільності, і матеріал починає деградувати. Вирішенням проблеми є повільне нагрівання при високих температурах. Якщо і у такому разі необхідна щільність не досягнута, проблемою може бути наявність газу в замкнутих порах. Спікання в таких інертних газах, як аргон або гелій приводить до неповного усадження через їх абсорбцію матеріалом і опір остаточному зникненню пор. Реакція між вкрапленнями під час спікання створює сферичні пори в мікроструктурі, часто відокремлені від меж зерен.

Утворення оксидних включень під час спікання може призводити до погіршення механічних властивостей матеріалу. Джерелом надлишкового кисню у спеченому матеріалі можуть бути: погане очищення робочих газів, оксидні плівки, що утворилися під час виготовлення порошку, низька герметичність робочої камери. На рисунку 7.14 показано наявність оксидних включень у матриці матеріалу після спікання.

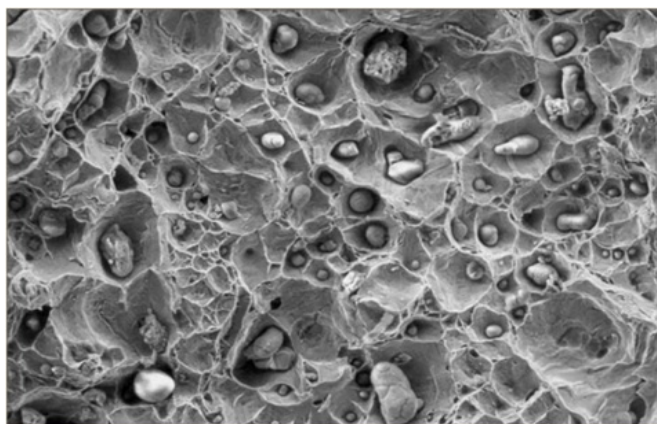


Рисунок 7.14 – Оксиди, які утворились внаслідок реакції між кремнієм, хромом і киснем в процесі спікання

Для сплавів, сформованих механічним змішенням порошків, неоднорідність сплавів призводить до плямистої мікроструктури. Однорідний розподіл сплавів при спіканні прагне бути повільнішим, ніж ущільнення, таким чином прийнятна щільність після спікання проявлятиме себе неоднорідною. Існують три способи вирішення цієї проблеми: використання домішок з меншими частками порошку для скорочення відстані дифузії, збільшення температури для прискорення дифузії (можливо, з великим зростанням зерен) або збільшення часу витримки при максимальній температурі.

У випадку з властивостями спікання вимагають уваги три чинники: щільність, зростання зерен і вкраплення. Для забезпечення хорошого технологічного процесу без забруднень необхідно об'єднати низькі властивості спікання з комбінацією час–температура. Довгий час спікання дає високу щільність, але викликає велике зростання зерна. Поки пори зникають під час спікання, зростання зерна залишається швидким, але для властивостей матеріалу важливі як щільність, так і розмір зерен.

Занадто короткий час спікання або занадто низька температура спікання призводить до неповної щільності. Для прикладу в таблиці 7.3 наведені дані про спікання 95% сплаву вольфраму при різних витримках при температурі 1500 °С. Зверніть увагу, як спадає міцність і пластичність після піку часу витримки в 90 хвилин.

Таблиця 7.3 – Міцність і пластичність для сталі 95W-3.5Ni-1.5Fe, яка спікається при 1500°С

Час спікання, хв	Межа міцності на розрив, МПа	Подовження, %
15	920	16,5
30	930	18,2
90	940	22,0
120	845	15,6

Різні комбінації температури і часу визначають ті ділянки, в яких можливі оптимізації властивостей. У випадках, де щільність і міцність задовільні, але пластичність низька, необхідно приділити увагу домішкам. Інша ситуація виникає при невідповідній мікроструктурі. Більшість робіт була проведена з нержавіючою сталлю 17-4 PH. У одному випадку низька пластичність була через такі керамічні вкраплення, як оксиди кремнію-хрому. Вони виникали під час обробки часток порошку. При високій температурі вкраплення кремнію входили в реакцію з хромом і утворювали вкраплення оксидів, що призводило до передчасних тріщин. Вирішенням проблеми є пошук порошку з низьким вмістом кремнію.

Зрештою, якщо під час спікання щільність і властивості знижуються при високій температурі і часі витримки, отже, щось заважає зникненню пори при спіканні. Найвірогіднішою причиною є газ (наприклад, аргон), що потрапив в пастку в порі. Ущільнення критично залежить від зникнення пор із використанням меж між зернами. Таким чином, все, що протистоїть зменшенню пори (тиск газу) або збільшує відстань дифузії (пора відділяється від межі під час зростання зерна), погіршує спікання. Рішенням є уповільнення нагрівання і використання такого складу атмосфери спікання, що здатна розчинятися в матеріалі.

Невизначеності

Навіть тоді, коли здається, що процес РІМ управляється досить добре, залишаються деякі можливості для так званих туманних скарг. Можливо, найбільш поширеною є скарга на вартість: деталі занадто дорогі. Це несправжній дефект, але він стає проблемою, коли починаються остаточні переговори. Якщо ціна деталі занадто висока, тоді виробник може просити зниження допусків, зміни властивостей для збільшення продуктивності, зміни конструкції деталі для зниження маси або заміни матеріалу. Також важлива кількість деталей, що купуються. Ціна деталі зменшується при збільшенні кількості деталей, що випускаються, з 1000 до 100000 одиниць на рік. Декілька чинників домінують в ціні РІМ-деталей. Це кількість випуску, матеріал, допуск і комбінація властивостей – усі чинники мають бути задіяні для регулювання ціни.

Іншими причинами недоліків можуть стати низькі механічні властивості – низька міцність або ударна в'язкість. У таких поліморфних матеріалах, як титан або залізо, розподіл фаз у деталі, що спікається, впливає на механічні властивості. Якщо слабка фаза безперервна, це дає шлях легкому зламу. Для відповідного впливу на властивості матеріалу через мікроструктуру призначається аналіз мікроструктури, робиться вимір мікротвердості крізь фази і регулюються цикли нагріву та охолодження.

Труднощі полягають у розмірних допусках. Вивчаючи 62 різні статті, коефіцієнт варіації склав приблизно 0,2% (це стандартне відхилення розміру поділене на середній розмір). Декілька чинників впливають на розмірні допуски, і коливання розмірів зменшується при кращому змішуванні сировини і литті деталей. Контроль при литті є контролем коливань маси. Небажане коливання розмірів після спікання є 1/3 (одним третім) від варіації маси «зеленої» деталі (у відсотках).

Датчики температури і тиску матеріалу у формі покращують стабільність відлитих деталей. Однорідність сировини також важливий чинник у поліпшенні розмірів (вимірюється з використанням капілярного реометра).

Зазвичай процес виробництва не є проблемою, якщо компонент був одного разу стабілізований. Вихід деталей складає зазвичай 95–98%. При низьких кількостях продукції, що випускається, введення вимірів і елементів контролю окупається; пам'ятаєте «ви отримуєте те, що вимірюєте», таким чином, додаткові тести у виробництві допомагають простіше стабілізувати продукт, тому що робітники повідомлять про проблему. Деякі найбільш поширені способи поліпшити виготовлену продукцію: вимір в'язкості (показник плинності або капілярний реометр) після змішування, використання таких датчиків при литті, як датчики температури і тиску у прес-формі, перевірка розмірів і маси після лиття і дебайдингу та використання зразків свідків й індикаторів температури при спіканні, щоб переконатися, що всі деталі в печі спікаються при однакових параметрах.

Література

1. Donald F. Heaney, «Handbook of metal injection molding» WOODHEAD PUBLISHING, (2012).
2. Randall M. German, «Injection Molding of Metals and Ceramics», Metal Powder Industry (June 1, 1997).
3. Randall M. German, «Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles», Butterworth-Heinemann; 1 edition (2014).
4. Randall M. German, «Powder injection molding», Metal Powder Industries Federation (1990).
5. Randall M. German, «Sintering Theory and Practice 1st Edition», Wiley-Interscience; 1 edition (April 21, 2008).
6. «Metal powder injection molding (MIM): Key trends and markets» Randall M. German, San Diego State University.
7. «Binder Systems for Powder Injection Molding» David Bleyan, Doctoral Thesis University in Zlin Faculty of Technology, 2015.
8. «Debinding processes physical and chemical conclusions and their practical realizations», Friedherz H. Becker, Riedhammer GmbH.
9. «Gas atmosphere analyses during debinding and sintering of powder injection molding components» Diploma Thesis from Renan Muller Schroeder, Federal University of Santa Catarina Bremen, Germany, 2009.
10. «Injection molding simulation: New developments offer rewards for the PIM industry» PIM-international, Vol. 6, # 1, MARCH 2012, Dr.-Ing. Marco Thornagel SIGMA Engineering GmbH, Aachen, Germany.
11. «An introduction to the Hot Isostatic Pressing (HIP) of MIM components» PIM-International, Vol. 8, № 1, March 2014, Dr Stephen J Mashl. Michigan Technological University Materials Science and Engineering.
12. «Standards for Metal Injection Moulding: Progress to-date and future challenges» PIM-International, Vol.11, # 1, March 2017; Prof. Dr.-Ing. Frank Petzoldt Deputy Director; Dr.-Ing. Marco Mulser Project Manager; Fraunhofer IFAM, Bremen, Germany.
13. «Green Body Homogeneity Effects on Sintered Tolerances» Randall M. German, Brush Chair Professor in Materials Director, Center for Innovative Sintered Products, 147 Research West, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802-6809 USA.

ДОДАТКИ

Додаток А
Матеріали для виготовлення оснащення та їх властивості

Таблиця А.1 – Розробка матеріалів для оснащення ІЛП

Матеріал	Приблизний склад	Твердість, HRC	Цільові сфери використання
нержавіюча сталь 420	Fe-14Cr-1Si-1Mn-0,3C	50	порожнини з високим опором до зношування, основи, вставки
нержавіюча сталь 440C	Fe-18Cr-1Si-1Mn-1C-0,75 Mo	57	опір до зношування, невеликі вставки, порожнини, основи
сталь 4130	Fe-1Cr-0,25Si-0,3Mn-0,2Mo-0,3C	35	звичайні плити форми
сталь P20	Fe-1,7Cr-0,8Mn-0,5Mo-0,4V-0,35C	30	загальний вжиток, гаряча направляюча, великі порожнини
інструментальна сталь A2	Fe-5Cr-1,2Mo-0,6Mn-0,3V-1C-0,3Si-0,2W	58	невеликі вставки, висока зношувальність
інстр. сталь CPM 10V	Fe-8,75V-5,25Cr-2,45C-1,3Mo-0,3W	63	висока жорсткість, високе зношування, висока міцність
інстр. сталь D2	Fe-12Cr-1V-0,9Mo-0,5Si-1,5C-0,3Mn	57	високе тертя, невеликі інструменти
інстр. сталь Elmax	Fe-18Cr-3V-1Mo-1Si-1,7C	58	високе зношування, висока корозія
інстр. сталь H13	Fe-5Cr-1,5Mo-1Si-1V-0,4Mn-0,4C	50	великі, складні порожнини з високою жорсткістю на високим опором до зношування
інстр. сталь M2	Fe-6W-5Mo-4Cr-2V-0,3Mn-0,8C-0,2Si	61	основи та штовхачі
інстр. сталь O1	Fe-1,2Mn-0,5Cr-0,5W-0,9C-0,3Si-0,2V	60	Напрямні та пластини компенсації зношування

Таблиця А.2 – Властивості деяких звичайних матеріалів оснащення

Матеріал	Щільність, г/см ³	Твердість, HRC	Модуль пружності, ГПа	Міцність на розрив, МПа	Відносне видовження, %	Сила удару, Дж/см ²	Теплопровідність, Вт/м/°С	Температурне розширення, дмм/°С
Сталь Р-20	7,8	30	200	965	20	32	29	13
Нержавіюча сталь 420	7,8	50	200	1760	10	16	25	11
Нержавіюча сталь 440С	7,8	57	200	1965	2	7	24	10
Інструмен- тальна сталь Elmax	7,8	58	240	2300	-	-	20	10
Інструмен- тальна сталь H13	8,0	50	210	1440	15	18	26	13
Інструмен- тальна сталь M2	8,2	61	210	1600	10	10	21	10

Таблиця А.3 – Обробка та робочі характеристики деяких матеріалів оснащення

Матеріал	Загартовуваність	Жолоблення	Тріщиностійкість	Оброблюваність	Жорсткість	Корозійна стійкість	опір до пом'якшення	Зносо-стійкість
Сталь 4130	Дуже добра	Помірне	Добра	Середня	Задовільна	Низька	Низький	Дуже низька
Сталь P20	Середня	Низьке	Висока	Середня	Висока	Повна	Низький	Низька
Нержавіюча сталь 420	Добра	Помірне	Середня	Середня	Задовільна	Добра	Високий	Середня
Нержавіюча сталь 440с	Добра	Помірне	Середня	Середня	Низька	Добра	Помірний	Висока
Інструментальна сталь А2	Дуже добра	Низьке	Висока	Середня	Середня	Повна	Високий	Висока
Інструментальна сталь D2	Дуже добра	Низьке	Висока	Низька	Низька	Повна	Високий	Висока
Інструментальна сталь Е1max	Добра	Низьке	Низький	Середня	Низька	Добра	Хороший	Висока
Інструментальна сталь Н13	Дуже добра	Дуже низьке	Висока	Середня	Висока	Повна	Високий	Середня
Інструментальна сталь М2	Дуже добра	Помірне	Середня	Середня	Низька	Повна	Дуже високий	Дуже висока
Інструментальна сталь 01	Середня	Дуже низьке	Висока	Висока	Середня	Низька	Низький	Середня

Додаток Б
Виробництво та характеристики порошку,
основні виробники порошку та заготовок

Таблиця Б.1 – Порівняння технологій виробництва часток ІЛП

Технологія	Розмір, µм	Форма	Матеріал	Вартість
Газоподрібнення	5–40	Сферична	Метали, сплави	Висока
Водоподрібнення	6–40	Кругла	Метали, сплави	Середня
Подрібнення у центрифугі	25–60	Сферична	Метали, сплави	Середня або висока
Плазмове подрібнення	2–40	Сферична	Метали, сплави, кераміка	Висока
Оксидне подрібнення	1–10	Полігональна	Метали	Низька
Карбонільний розпад	0,2–10	Кругла	Метали	Середня
Розпад під дією хімічних парів	0,1–2	Рівновісна	Кераміка	Висока
Осаджування	0,1–3	Полігональна	Метали, сполуки	Низька або середня
Розмелювання	1–40	Кутова, неправильна	Ламка кераміка	Середня
Мілке подрібнення	0,1-2	Неправильна	Кераміка	Середня
Реакція	0,2–40	Кругла або сферична	Суміші	Висока
Парова конденсація	Нижче 1	Агломерати	Кераміка, метали	Дуже висока
Сейсмічне подрібнення	Нижче 1	Агломерати	Метали, сплави	Дуже висока

Таблиця Б.2 – Характеристика деяких звичайних порошків ІЛП

Матеріал	Склад, %	Виробник	Позначення	Технологія виготовлення	Серединний розмір, $\mu\text{м}$	Георетична щільність Г/мл
Окис алюмінію	99,7 Al_2O_3	Alcoa	A-16SG	Кальцинація, подрібнення	0,5	1,08
Нітрид алюмінію	94 AlN -6 Y_2O_3	Dow	XUS35548	Реакція, подрібнення	1,5	0,52
Цементований карбід	WC-10Co	Teledyne	H-17	Подрібнення	1,1	3,4
Мідь	99,5 Cu	Acupowder	635	Водоподрібнення	14	3,3
Залізо	98,3 Fe	ISP	1470R	Карбоніл	4,1	2,58
Залізо-карбон	Fe-0,9C	BASF	0 M	Карбоніл	4,7	2,65
Залізо-кремній	Fe-3Si	Osprey	Mpfe3si	Газоподрібнення	7,6	3,96
Молибден	Mo	H.C.Starck	12293	Подрібнення	2,5	2,1
Нікель	99,8 Ni	Novamet	4SP	Карбоніл	7,6	3,6
Алюмінід нікелю	Ni_3Al	Xform	XNAB04	Реакція	14	3,11
Карбід кремнію	98 sic	Superior	HSC059	Реакція	0,6	1,32
Нітрид кремнію	Si_3N_4	H.C.Starck	M11	Реакція, подрібнення	0,51	0,46
Нержавіюча сталь	Fe-r-Ni-Mo	Ultrafine	316L	Газоподрібнення	11	3,9
Нержавіюча сталь	Fe-r-Ni-Cu	Mitsubishi	17-4PH	Водоподрібнення	20,7	3,3
Нержавіюча сталь	Fe-r-Ni-Cu	Anval	17-4PH	Газоподрібнення	15	4,14
Титан	Ti-6Al-4V	Crucible	Ti-6-4	Газоподрібнення	32	2,1
Інструментальна сталь	Fe-12Cr-1,5C	Osprey	MPD2	Газоподрібнення	11,2	-
Вольфрам	99,5 W	Osram	M 37	Подрібнення	3,04	2,96
Двоокис цирконію	ZrO_2 -3mgO	Z-Tech	Тип C	Плазма	2,1	-

Таблиця Б.3 – Матеріали Catamold® компанії BASF для PIM-технології

Марка	Можливі газові сполуки для спікання	Склад після спікання, вага %
Низьколеговані сталі		
Catamold® FN02	H ₂ , вакуум	C 0.1; Ni 1.9-2.2; Fe баланс
Catamold® FN0205	N ₂	C 0.4-0.6; Ni 1.9-2.2; Fe баланс
Catamold® FN08	H ₂ , N ₃ , вакуум	C 0.1-0.6; Ni 7.5-8.5; Fe баланс
Catamold® 8620	N ₂ , вакуум	C 0.12-0.23; Cr 0.4-0.6; Mo 0.15-0.25; Ni 0.4-0.7; Fe баланс
Catamold® 42CrMo4	N ₂ , вакуум	C 0.32-0.42; Cr 0.9-1.2; Mo 0.15-0.30; Fe баланс
Catamold® 100Cr 6	N ₂ , вакуум	C 0.80-1.05; Cr 1.35-1.65; Fe баланс
Нержавіючі сталі		
Catamold® 3 16L	H ₂ , вакуум	C <0.03; Cr 16-18; Ni 10-14; Mn <2; Mo 2-3; Si <1; Fe баланс
Catamold® PANACEA	N ₂ /H ₂ , N ₂	C <0.2; N 0.75-0.90; Cr 16.5-17.5; Ni <0.1; Mn 10-12; Mo 3.0-3.5; Si <1; Fe баланс
Catamold® 430	H ₂ , вакуум	C <0.08; Cr 15.5-17.5; Mn <1; Si <1; Fe баланс
Catamold® S7-FH4	H ₂ , вакуум	C <0.07; Cr 15.0-17.5; Ni 3-5; Cu 3-5; Nb 0.15-0.45; Mn <1; Si <1; Fe баланс
Catamold® 420	N ₂	C 0.18-0.30; Cr 12-14; Mn <1; Si <1; Fe баланс
Catamold® 310	N ₂ , Ar	C 0.2-0.5; Cr 24-26; Ni 19-22; Nb 1.2-1.5; Mn <1.5; Si 0.75-1.75; Fe баланс
Catamold® 440B	N ₂	C 0.18-0.30; Cr 12-14; Mn <1; Si <1; Fe баланс
Інструментальні сталі		
Catamold® M2	N ₂ , вакуум	C 0.95-1.05; W 5.50-6.75; Mo 4.5-5.5; V 1.75-2.20; Cr 3.8-4.5; Mn <1; Si <1; Fe баланс
Магнітом'які сплави		
Catamold® FeSi3	H ₂	C <0.1; Si 2.5-3.0; Fe баланс
Catamold® FN50	H ₂	C <0.1; Ni 49.5-50.5; Fe баланс
Спеціальні сплави		
Catamold® Ti	Ar, вакуум	C <0.2; Mn <0.1; O <0.4; Ti баланс
Catamold® W	H ₂ , Вакуум	W >94.0; Ni, Co, Cu баланс
Catamold® F15	H ₂	Ni 28.5-29.5; Co 16.5-17.5; Fe баланс
Catamold® HX	H ₂	C 0.05-0.15; Cr 20.5-23.0; Fe 17-20; Mo 8-10; Co -0.5-2.1; W <1; Mn <1; Si <1; Ni баланс
Catamold® N90	Ar	C 0.13; Cr 18-21; Fe 1.5; Co 15-21; Al 1-2; Ti 3-4; Mn <1; Si <1; Ni баланс
Catamold® GHS-4	N ₂	C 2.2; Si 1.6; Mn 1; Cr 12; Ni 39; Mo 6; V 0.9; W 0.5; Fe баланс
Оксидна кераміка		
Catamold® AO-F		Al ₂ O ₃ 99.8; MgO 0.06-0.12; CaO <0.03; Na ₂ O <0.1; SiO ₂ <0.07
Catamold® AO-H	Повітря	Al ₂ O ₃ 96; MgO 0.5-0.7; BaO 0.2-0.4; CaO 1.2-1.5; SiO ₂ 1.8-2.1; Na ₂ O <0.1
Catamold® ZTA-FB	Повітря	Al ₂ O ₃ 79-81; ZrO ₂ 18.7-18.9; Y ₂ O ₃ 0.9-1.1
Catamold® TZP A	Повітря	ZrO ₂ >94.4; Y ₂ O ₃ 5.0-5.3; Al ₂ O ₃ 0.2-0.3
Catamold® TZP -C	Повітря	ZrO ₂ 4.2; Y ₂ O ₃ 5.0-5.4; Al ₂ O ₃ 0.2-0.3
Catamold® TZP-F	Повітря	Аналог Catamold® TZP -C з кольоровим пігментом

Таблиця Б.4 – Механічні властивості типових сплавів для інжекційного формування

Матеріал	Хімічний склад, мас. %	Щільність, %	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне видовження при розриві, %	Твердість
aluminum	Al-1Sn	95	100	150	25	—
aluminum	Al-1Cu	93	—	200	10	—
cobalt-chromium or F75	Co-28Cr-4W-3Ni-1C	99	550	880	4	25HRC
cobalt-chromium or F75 (HIP)	Co-28Cr-4W-3Ni-1C	100	520	1 000	40	25HRC
Hastelloy X (HT)	Ni-22Cr-1 8.5Fe- 9Mo-1 .5Co-0.6W	98	303	675	74	30HRC
HB alloy	Ni-28Mo-5Fe	97	1 230	1 230	0	32HRC
Inconel 718 (HIP,HT)	Ni-1 9Cr-1 8Fe-5Nb- 3Mo-1 Ti-0.4Al	100	1 130	1 330	14	40HRC
Invar	Fe-36Ni	98	240	425	40	65HRB
Invar, modified	Fe-32Ni-5Co	96	285	440	40	65HRB
Iron	Fe	96	100	230	40	—
iron aluminide	Fe-12Al	96	385	580	2	—
iron-cobalt	Fe-49Co-2.5V-1Si	97	140	205	1	80HRB
iron-molybdenum	Fe-5Mo	98	210	410	34	66HRB
iron-nickel	Fe-2Ni	96	190	345	30	55HRB
iron-nickel	Fe-8Ni	95	310	430	21	80HRB
iron-nickel	Fe-42Ni	99	250	490	43	59HRB
iron-nickel	Fe-50Ni	96	170	420	20	50HRB
iron-phosphorus	Fe-0.6 P	99	260	280	2	80HRB
iron-silicon	Fe-3Si	99	390	530	24	80HRB
iron-silicon	Fe-6.5Si	99	—	375	0	37HRC
Kovar or F15	Fe-29Ni-17Co	98	280	480	42	60HRB
maraging steel (HT)	Fe-18Ni-9Co-5Mo- 0.5Ti-0.1Si	96	1 600	1 640	2	47HRC
nickel-iron	Ni-20Fe	91	—	470	31	53HRB
niobium superalloy	Nb-10W-10Ta	98	315	440	25	20HRC
spinodal	Cu-5Ni-8Sn	98	310	470	6	—
stainless 17-4 PH	Fe-16Cr-4Ni-4Cu- 0.3Nb-0.8Si	96	750	900	10	25HRC
stainless 17-4 PH (HT)	Fe-16Cr-4Ni-4Cu- 0.3Nb-0.8Si	96	1 090	1 185	6	35HRC
stainless 17-4 PH (HIP)	Fe-16Cr-4Ni-4Cu- 0.3Nb-0.8Si	100	1 103	1 137	13	38HRC
stainless 304L	Fe-18Cr-8Ni	97	240	480	35	85HRB
stainless 316L	Fe-17Cr-12Ni- 2Mo-2Mn	96	220	510	45	75HRB
stainless 316L duplex	Fe-21Cr-9Ni-3Mo- 2Mn	95	230	540	43	80HRB
stainless 318	Fe-22Cr-6Ni-2Mn- 1Si	97	230	590	29	89HRB
stainless 410 (HT)	Fe-11Cr-0.5C	95	1 240	1 520	5	40HRC
stainless 410L (HT)	Fe-11Cr-0.1C	95	410	650	5	20HRC
stainless 414L	Fe-13Cr-3Ni	97	980	1 360	5	40HRC
stainless 420 (HT)	Fe-13Cr-1Mn-1Si	92	690	1 440	6	47HRC
stainless 430L	Fe-17Cr-1Mn-1Si-1Ni	93	230	390	25	68HRB
stainless 440C	Fe-17Cr-1Ni-1Mn-1C	96	410	620	2	43HRC
stainless 440C (HT)	Fe-17Cr-1Mn-1C	98	1 560	1 600	<1	58HRC

Продовження таблиці Б.4

Матеріал	Хімічний склад, мас. %	Щільність, %	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне видовження при розриві, %	Твердість
stainless PANACEA	Fe-17Cr-10Mn-3Mo- 1N	99	670	960	35	25HRC
steel 1010	Fe-0.1C	97	175	400	19	30HRB
steel 1020	Fe-0.2C	96	185	380	23	67HRB
steel 1060	Fe-0.6C	97	260	580	25	80HRB
steel 2200	Fe-2Ni-<0.5Mo- <0.1C	96	125	290	45	45HRB
steel 2700	Fe-7Ni-<0.5Mo- <0.1C	95	205	415	26	69HRB
steel 4140	Fe-1Cr-0.4C	97	390	580	15	18HRC
steel 4140 (HT)	Fe-1Cr-0.4C	93	1 240	1 380	2	40HRC
steel 4340	Fe-2Cr-1Ni-1Mn- 0.4C	96	480	620	6	20HRC
steel 4340 (HT)	Fe-2Cr-1Ni-1Mn- 0.4C	96	1 400	1 600	2	48HRC
steel 4605	Fe-2Ni-0.4Mo-0.5C	96	205	440	15	62HRB
steel 4605 (HT)	Fe-2Ni-0.4Mo-0.5C	96	1 480	1 655	2	48HRC
steel 4640 (HT)	Fe-2Ni-1Mo-0.4C	97	1 400	2 000	3	30HRC
steel iron-chromium	Fe-1Cr-0.5C	94	—	600	10	90HRB
steel iron-copper	Fe-2Cu-0.8C	95	—	700	10	92HRB
steel iron-nickel (HT)	Fe-2Ni-0.5C	94	1 230	1 230	1	45HRC
steel iron-nickel (HT)	Fe-2Ni-0.5Mo-0.6C	96	1 000	1 200	2	55HRC
steel iron-nickel	Fe-2Ni-0.9C	96	450	650	9	90HRB
steel iron-nickel (HT)	Fe-7Ni-0.5C	95	1 420	1 460	1	46HRC
steel iron-nickel	Fe-8Ni-0.5C	97	260	410	25	75HRB
steel iron-nickel (HT)	Fe-8Ni-0.6C	97	1 100	1 300	2	50HRC
tungsten-copper	W-10Cu	98	530	540	1	—
tungsten heavy alloy	W-8Mo-8Ni-2Fe	100	—	1 115	20	—

HT = heat treated (термічна обробка)

HIP = hot isostatically pressed (горяче ізостатичне пресування)

Таблиця Б.5 – Хімічний склад МІМ матеріалів (% мас.)

Низьколеговані сталі (Low-alloy steels for heat treatment)												
Марка	Типові позначення	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Co	V	Nb+Ta	Інші
Fe2Ni	MPIF FN0200	≤ 0,10	-	1,50–2,50	≤ 0,50	-	-	-	-	-	-	≤ 2,00
FN02	-	≤ 0,10	-	1,90–2,20	-	-	-	-	-	-	-	-
2200		≤ 0,10		1,5–2,5	≤ 0,5		≤ 1,0					≤ 1,0
4620		0,17–0,22	-	1,65–2,0	0,2–0,3	0,45–0,7	-	-	-	-	-	≤ 1,00
8620	DIN 1.6523 21NiCrMo2 AISI/SAE 8620 UNS 86200	0,17–0,23	0,35–0,70	0,40–0,70	0,15–0,25	-	< 0,40	-	-	-	-	-
Леговані сталі (Alloy steels for heat treatment)												
FN0205	-	0,40–0,60	-	1,90–2,20	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe2Ni-0.6C	MPIF FN0206	0,40–0,70	-	1,50–2,50	≤ 0,50	-	-	-	-	-	-	≤ 2,00
Fe2Cu-0.8C		0,6–0,9	-	-	-	-	-	1,5–2,5	-	-	-	≤ 1,00
100Cr6	DIN 1.3505 100Cr6 AISI E 52100 UNS G52986	0,80–1,05	1,35–1,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Продовження таблиці Б.5

Марка	Типові позначення	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Co	V	Nb+Ta	Інші
4140	DIN 1.7225 42CrMo4 AISI/SAE 4140 UNS G 41400	0,35–0,50	0,90–1,20	-	0,15–0,30	≤ 0,90	≤ 0,40	-	-	-	-	≤ 1,00
4340	40NiCrMo6	0,35–0,50	0,70–1,40	1,40–2,00	0,20–0,30	≤ 0,80	≤ 0,35	-	-	-	-	≤ 1,00
4605		0,40–0,60	-	1,50–2,50	0,20–0,50	-	≤ 1,00	-	-	-	-	≤ 1,00
52100	DIN 1.3505 100Cr6 AISI E52100 UNS G52986	0,90–1,05	1,35–1,65	-	-	-	-	-	-	-	-	
6150		0,48–0,53	0,8–1,1	-	-	0,7–0,9	0,15–0,35	-	-	0,15	-	S≤0,04 P≤0,035
FN08	-	0,10–0,60	-	7,50–8,50	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe8Ni	MPIF FN0800	≤ 1,00	-	6,50–8,50	≤ 0,50	-	-	-	-	-	-	≤ 2,00
Fe8Ni0.6C	MPIF FN0806	0,40–0,70	-	6,50–8,50	≤ 0,50	-	-	-	-	-	-	≤ 2,00
2700		≤ 0,10		6,50–8,50	≤ 0,50		≤ 1,00					≤ 1,00
Нержавіючі сталі (Stainless and heat resistance steels)												
316L	DIN 1.4404 X2CrNiMo 17 13 2 AISI 316L SAE J 405 (30316L) UNS S31603	≤ 0,03	16,0–18,5	10,0–14,0	2,0–3,0	≤ 2,00	≤ 1,00	-	-	-	-	≤ 1,00

Продовження таблиці Б.5

Марка	Типові позначення	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Co	V	Nb+Ta	Інші
17-4PH	DIN 1.4542 X5CrNiCuNb17.4 AISI/UNS 17400 SAE J 467, (17-4PH)	≤ 0,07	15,0–17,5	3,0–5,0	-	≤ 1,00	≤ 1,00	3,0–5,0	-	-	0,15–0,45	≤ 1,00
PANACEA	X15CrMnMoN 17 13 2	≤ 0,20	16,5–17,5	≤ 0,10	3,0–3,50	1,0–1,2	≤ 1,00	-	-	-	-	≤ 1,00
304L		≤ 0,03	18,0–20,0	8,0–12,0	-	≤ 2,00	≤ 1,00	-	-	-	-	P ≤ 0,045 S ≤ 0,03
310	DIN 1.4841 X15CrNiSi25 20 AISI 310 UNS S3100	0,20–0,50	24,0–26,0	19,0–22,0	-	≤ 1,50	0,75–1,75	-	-	-	1,20–1,50	-
410		≤ 0,15	11,5–13,0	-	-	≤ 1,00	≤ 1,00	-	-	-	-	≤ 0,1
420	DIN 1.4021/ 1.4028 X20Cr13/ X30Cr13 AISI/SAE 420	0,16–0,25	12,0–14,0	-	-	≤ 1,00	≤ 1,00	-	-	-	-	
430L	DIN 1.4016 X6Cr17 AISI/SAE J 405 (51430) UNS S4300	≤ 0,08	16,0–18,0	-	-	≤ 1,00	≤ 1,00	-	-	-	-	

Продовження таблиці Б.5

Марка	Типові позначення	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Co	V	Nb+Ta	Інші
440B	DIN 1.4112 X90CrMoV18 AISI/SAE 440B UNS S 4400B	0,85–0,95	15,5–17,0	-	0,9–1,3	≤ 1,00	≤ 1,00	-	-	0,07–0,12	-	
440C		1,0–1,2	16,0–18,0	-	0,75	1,0	1,0	-	-	-	-	S≤0,03 P≤0,04
M2	DIN SC 6- 5,1.3342 X6Cr17 AISI M2 (high C) UNS T11302	0,95–1,05	3,80–4,50	-	4,50–5,50	≤ 1,00	≤ 1,00	-	-	1,75–2,20	-	W 5,50- 6,75
Магнітом'які сплави (Soft magnetic alloys)												
Fe-3Si	DIN 1.0884	≤ 0,10	-	-	-	-	2,50–3,0	-	-	-	-	≤ 0,02
FN50	DIN 1.3926 UNS K95000	≤ 0,10	-	49,5–50,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Спеціальні сплави (Special Alloys)												
Ti	DIN 3.7065 ASTM grade 4 UNS R50700	≤ 0,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	N≤0,1 O≤0,4 Ti bal.
W		-	-	bal.	-	-	-	bal.	bal.	-	-	W≥94,0
Kovar (F15)	ASTM F15 UNS K94610	-	≤ 0,2	28,5–29,5	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,2	16,5– 17,5	-	-	≤ 0,2
HX	DIN 2.4665 ASTM B 366 UNS K06002	0,05–0,15	20,5–23,0	bal.	8,0–10,0	≤ 1,00	≤ 1,00	-	0,5–2,1	-	-	Fe 17,0– 20,0 W ≤ 1,0

Продовження таблиці Б.5

Марка	Позначення	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Co	V	Nb+Ta	Інші
N90		≤ 0,13	18,0–21,0	bal.	-	≤ 1,00	≤ 1,00	-	15,0–21,0	-	-	Fe ≤ 1,5 Al 1-2 Ti 3-4
GHS-4		≤ 2,20	≤ 12,0	≥ 39,0	≤ 6,00	≤ 1,00	≤ 1,60	-	-	≤ 0,90	-	W ≤ 0,5
Fe50Co		≤ 0,05	-	-	-	-	≤ 1,00	-	48,0–50,0	≤ 2,5	-	≤ 1,00
Ceramic Injection Molding (CIM)												
Оксидна кераміка (Oxide ceramic)												
Марка	Стандартне позначення	Al ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	ZrO ₂	Na ₂ O	MgO	CaO	BaO	SiO ₂			
AO-F		99,8	-	-	≤ 0,01	0,06–0,12	≤ 0,03	-	≤ 0,07			
AO-H		96,0	-	-	≤ 0,10	0,50–0,70	1,20–1,50	0,20–0,40	1,80–2,10			
ZTA-FB		79,0–81,0	0,90–1,10	18,7–18,9	-	-	-	-	-			
TZP A		0,2–0,3	5,0–5,3	≥ 94,4	-	-	-	-	-			
TZP C		0,2–0,3	5,0–5,4	≥ 94,2	-	-	-	-	-			
TZP-F		Аналог TZP C с кольоровим пігментом										

Таблиця Б.6 – Виробники порошків та номінальних структур ІЛП

<i>ACuPowder</i> (мідь та багато інших)	<i>Affinity International</i> (титан)	<i>Advanced Ceramics</i> (нітрид бору, диборид титану)	<i>Alcan Chemicals</i> (алюміній, окис алюмінію)
<i>Alcoa</i> (окис алюмінію та алюміній)	<i>American Chemet</i> (мідь)	<i>Ametek</i> (нержавіючі сталі, інтерметали)	<i>Anval</i> газорозпилені нержавіючі сталі)
<i>ART</i> (нітрид алюмінію, бориди, карбіди)	<i>Atmix</i> (нержавіюча сталь)	<i>Avocet Tungsten</i> (вольфрам)	<i>BASF</i> (залізо, сталь)
<i>Bell Group</i> (хром, реактиви)	<i>Bongen Titanium</i> (титан, нікель)	<i>Cabot</i> (титанати, тантал)	<i>Carborundum</i> (нітрид бору)
<i>Carpenter Technologies</i> (сталь)	<i>Coldstream</i> (нержавіючі сталі)	<i>Cometals</i> (оксиди, ферити, фосфати)	<i>Crucible Materials</i> (інструментальна сталь, титан)
<i>CSM</i> (молібден, вольфрам)	<i>Deloro Stellite</i> (сплави кобальту)	<i>Diado Stell</i> (особливі сплави)	<i>Dow</i> (нітрид кремнію, нітрид алюмінію)
<i>Dynamet</i> (титан, суперсплави)	<i>Eckart</i> (алюміній, мідь)	<i>Electrodchmelzwerk Kempten</i> (бориди, карбіди)	<i>Exolon-ESK</i> (нітрид кремнію)
<i>Ferro</i> (оксидна кераміка)	<i>Globe Metallurgical</i> (залізні сполуки, сплави)	<i>Goofellow</i> (особливі сполуки)	<i>HJE</i> (золото, коштовні метали)
<i>Hoeganaes</i> (сталь, нержавіюча сталь)	<i>Homogeneous Metals</i> (сплави нікелю, суперсплави, інтерметали)	<i>Idaho Titanium</i> (титан)	<i>International Speciality Products</i> (залізо)
<i>International Titanium Powders</i> (титан)	<i>Johnson Matthey</i> (рідкі оксиди)	<i>Katz Metal Group</i> (титан)	<i>Kawasaki</i> (залізо, сталь, нержавіюча сталь)
<i>Kennametal</i> (кобальт, карбід вольфраму)	<i>Magnequench</i> (аморфний залізо-неодим-бор)	<i>Vaterials and Electrochemical Research</i> (реактивні метали)	<i>Metamorphic Materials</i> (титан)
<i>Micron Metals</i> (титан)	<i>Mitsubishi</i> (нержавіюча сталь)	<i>Nanodyne</i> (цементований карбід)	<i>Nanophase Technologies</i> (кераміка, оксиди)
<i>Nanopowder Enterprises</i> (різноманітні наносполуки)	<i>Nanoval</i> (особливі сплави, сплави, що зберігають форму)	<i>NBK</i> (титан)	<i>North American Hogans</i> (ферити, сталь, залізо)
<i>Novamet</i> (нікель)	<i>OMG</i> (карбід вольфраму, кобальт, нікель жість, мідь, залізо)	<i>Osram</i> (вольфрам, молібден, вольфрам-мідь)	<i>Osprey</i> (нержавіюча сталь, інструментальна сталь, сплави кобальту)
<i>Powdermet</i> (покриті порошки, карбід вольфраму, нітрид титану)	<i>Powderex</i> (інструментальна сталь)	<i>Paraxair</i> (подрібнені, сплави нікелю, кобальту та фериту)	<i>PSI</i> (особливий алюміній)
<i>PuroGenesis</i> (титан, суперсплави)	<i>Rhenium Alloys</i> (реній)	<i>Shieldalloy</i> (високо температурні суперсплави)	<i>Shin-Etsu</i> (нітрид кремнію)
<i>Special Metals</i> (суперсплави)	<i>H. C. Starck</i> (кераміка, оксиди, бориди, карбіди, нітриди, залізні сплави, нержавіюча сталь, особливі сплави)	<i>Starmet</i> (титан, залізо)	<i>Sumitomo SITIX</i> (титан)
<i>Superior Graphite</i> (карбід кремнію)	<i>TAM</i> (титанати барію)	<i>Teledyne Advanced Materials</i> (вольфрам, карбід вольфраму)	<i>Teledyne Wah Chang</i> (титан, ніобій)
<i>Treibacher Schleifmittel</i> (окис алюмінію, карбід кремнію)	<i>Ultrafine Powder Technologies</i> (нержавіюча сталь, особливі сплави)	<i>Umicore</i> (кобальт, мідь)	<i>US Bronze Powders</i> (мідь, бронза, латунь, алюміній)
<i>Wah Chang</i> (титан)	<i>Wideflow</i> (особливі метали)	<i>F. W. Winter</i> (суміші, феррослави)	<i>Wil-Met</i> (залізо, хром)
<i>Valimet</i> (алюміній, реактиви)	<i>Xform</i> (інтерметали)	<i>Zinc Corp. America</i> (мідь, цинк, латунь)	<i>Zirconia Sales</i> (двоокис цирконію)

Таблиця Б.7 – Виробники сполучників та змішаних заготовок

Виробник	Місце розташування	Продукція
Advanced Metalworking Practices	Кармел, IN, США	термопластичні сполучники віск-полімер для термального та розчинникового розщеплення для сталей та нержавіючих сталей (advancedmetalworking.com)
Advanced Powder Products	Філіпсбург, PA, США	виробництво термопластичних заготовок з особливим складом на замовлення для ІЛП та споріднених технологій
Apex Advanced Technology	Клівленд, OH, США	термопластичні системи сполучників на основі стеаратів для термічного розщеплення, нові пропозиції на стадії визначення
BASF	Людвігшафен, Німеччина	термопластичні сполучники на базі поліацетилену для каталітичного розщеплення, широкий вибір матеріалів, також сплавів, сталі, нержавіючої сталі, кераміки та інших матеріалів (basf.de/catamold)
Bayer	Леверкузен, Німеччина	системи для порцелянової та силікатної кераміки
Clariant	Шарлотта, NC, США	виготовлення полімеру віск-поліетилен гліколь для заготовок зі сталі, кераміки та порцеляну (mike.harris@na.clariant.com)
Imeta	Дрезден, Німеччина	нові пропозиції для видалення сполучника у розчиннику (imeta-dresden.de)
Inmatec	Рейнбах, Німеччина	невелика компанія, що використовує сполучник Clariant для водного розщеплення таких звичайних сполук, як нержавіюча сталь та окис алюмінію (inmatec-GmbH.com)
Latitude Manufacturing	Хакетстаун, Нью Джерсі, США	водні системи для висушувального та окисативного розщеплення (latitudemanufacturing.com)
Mathson Industries	Троя, Мічиган, США	Має ліцензію на виготовлення заготовок кераміки та сполучників на основі води та агару
Praxis	Гленс Фалс, Нью Йорк, США	виробник змішаних сполучників та невеликих партій заготовок коштовних металів на основі водорозчинного сполучника
RTP	Вайнона, США	змішує заготовки з металевих порошків на основі сполучника з води, агару та борату кальцію для лиття нержавіючої сталі під низьким тиском
Ryer Industries	Темекула, США	термопластичний сполучник на основі полівініл алкоголю для водного розщеплення, пропонує більшість звичайних матеріалів
Witec Japan	Токіо, Японія	одна з найперших систем сполучників на основі воску, поліпропілену та стеаринової кислоти. Ліцензія та право продажу лише на території Японії належать фірмі Kobe Steel
Zschimmer and Schwarz	Ланштайн, Німеччина	система сполучників для водорозщеплення для сталі та нержавіючої сталі (zschimmer-schwarz.de)

Додаток В

Таблиця В.1 – Дефекти ІЛП, їх причини та можливі методи уникнення

Дефект	Причина	Спосіб виправлення
пухир або бульбашка	лиття	підвищення тиску або зменшення частоти наповнення
пухир або бульбашка	лиття	перевірка температури плавлення та руху гвинта
пухир або бульбашка	оснащення	вент. отвір не випускає все повітря, переміщення отвору або додавання нових вент. отворів
пухир або бульбашка	розщеплення	підвищення температури або часу з метою уникнення міграції сполучника та закривання пор
високий вміст вуглецю	сполучник	сполучник розкладається і формує графіт; перехід до нижчої молекулярної маси
високий вміст вуглецю	сполучник	при викор. ароматичного полімеру замініть його на поліетилен
високий вміст вуглецю	розщеплення	сполучник вступає в реакцію з порошком, знизити температуру
високий вміст вуглецю	спікання	не кладіть в піч графітних елементів або діелектриків
низький вміст вуглецю	сполучник	горіння сполучника і порошку потребує вуглецю, додайте графіт
низький вміст вуглецю	спікання	недостатньо вуглецю, застосуйте нейтральне середовище
забруднення	оснащення	підвищення твердості поверхні інструментів (шків та канал)
забруднення	лиття	підвищення твердості або заміна матеріалу гвинта та ствола
забруднення	змішування	підвищення твердості зношуваних компонентів змішувача
забруднення	спікання	перевірка допоміжних піддонів, зміна доп. матеріалів
тріщини	лиття	звуження основ та вставок або нагрівання форми
тріщини	ежекція	збільшення кількості штовхачів
тріщини	розщеплення	полімер розширюється, низька температура, більший вміст основного полімеру
тріщини	спікання	рух порошку, додавання опор, повільніше нагрівання при нижчих температурах
зміна габаритів	лиття	підвищення частоти заповнення форми або тиску стискання
зміна габаритів	лиття	підвищення однорідності пікового тиску
зміна габаритів	розщеплення	полімер розширюється, зниження температури
зміна габаритів	спікання	більша однорідність нагрівання та підтримки
канал у вигляді полумісяця	лиття	швидкість зсуву при вході в форму надто висока

канал у вигляді полумісяця	оснащення	збільшення каналу або зниження швидкості зсуву
відпечаток виштовхувача	лиття	низька швидкість відкриття форми, подовження часу охолодження, зниження температури лиття
облой	лиття	зниження тиску ущільнення або зниження температури лиття
шарування	лиття	підвищення температури лиття щоб уникнути передчасного замороження
відділення порошка та сполучника	лиття або змішування	додавання пар до суміші або зниження швидкості заповнення форми з метою уникнення відокремлення
раковини	лиття	підвищення тиску ущільнення або затримка заморожування каналу більшого діаметра
прилипання в формі	лиття	зниження тиску ущільнення або температури лиття
прилипання в формі	оснащення	перевірка наявності зрізів або пошкоджень оснастки
хвилі на поверхні	лиття	зниження швидкості наповнення, підвищення температури сировини або форми
пустоти	змішування	використання гранул для лиття однакового розміру
пустоти	оснащення	упевніться в правильному розташуванні вент. отворів
пустоти	лиття	перевірка циклу ущільнення та ізоляції каналу
деформація	лиття	швидкість відкривання або температура форми занадто висока
деформація	лиття	низька швидкість охолодження під час лиття
деформація	спікання	повільне нагрівання з метою досягнення однорідності нагріву
зміна ваги	лиття	підвищення тиску лиття та контролю за температурою
зміна ваги	лиття	підвищення однорідності сировини
лінія зварювання	лиття	низька швидкість інжекції з метою уникнення відділення порошку та сполучника
лінія зварювання	лиття	лиття при вищих температурах
Складки	лиття	часткове заморожування потоку перед заповненням, підвищення температури сировини
Складки	лиття	підвищення температури форми з метою запобігання прилипання сировини до форми

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Переводення міцності на розрив (Н/мм²) в твердість за Віккерсом, Брінеллем та Роквеллом

N/mm ²	HV10	HB	HRC		N/mm ²	HV10	HB	HRC
240	75	71			920	287	273	28
255	80	76			940	293	278	29
270	85	81			970	302	287	30
285	90	86			995	310	295	31
305	95	90			1020	317	301	32
320	100	95			1050	327	311	33
335	105	100			1080	336	319	34
350	110	105			1110	345	328	35
370	115	109			1140	355	337	36
385	120	114			1170	364	346	37
400	125	119			1200	373	354	38
415	130	124			1230	382	363	39
430	135	128			1260	392	372	40
450	140	133			1280	403	383	41
465	145	138			1330	413	393	42
480	150	143			1360	423	402	43
495	155	147			1400	434	413	44
510	160	152			1440	446	424	45
530	165	157			1480	458	434	46
545	170	162			1530	473	449	47
560	175	166			1570	484	460	48
575	180	171			1620	497	472	49
595	185	175			1680	514	488	50
610	190	181			1730	527	501	51
625	195	185			1790	544	517	52
640	200	190			1845	560	532	53
660	205	195			1910	578	549	54
675	210	199			1980	596	567	55
690	215	204			2050	615	584	56
705	220	209			2140	639	607	57
720	225	214				655	622	58
740	230	219				675		59
755	235	223				698		60
770	240	228				720		61
785	245	233				745		62
800	250	238	22			773		63
820	255	242	23			800		64
835	260	247	24			829		65
860	268	255	25			864		66
870	272	258	26			900		67
900	280	266	27			940		68

Додаток Д
Аналоги сталей

Таблиця Д.1 – Міжнародні аналоги корозійностійких і жароміцних сталей

Корозійностійкі сталі				
Європа (EN)	Німеччина (DIN)	США (AISI)	Японія (JIS)	СНД (ГОСТ)
1.4003	X2CrNi12			
1.4512	X2CrTi12	409	SUH 409	
1.4000	X6Cr13	410S	SUS 410 S	08X13
1.4002	X6CrAl13	405	SUS 405	
1.4006	X12CrN13	410	SUS 410	12X13
1.4024	X15Cr13	(410)	SUS 410 J1	
1.4021	X20Cr13	(420)	SUS 420 J1	20X13
1.4028	X30Cr13	(420)	SUS 420 J2	30X13
1.4031	X39Cr13		SUS 420 J2	40X13
1.4034	X46Cr13	(420)		40X13
1.4016	X6Cr17	430	SUS 430	12X17
1.4520	X2CrTi17			
1.4510	X3CrTi17	439	SUS 430 LX	08X17T
1.4113	X6CrMo17-1	434	SUS 434	
1.4509	X2CrTiNb18	441		
1.4521	X2CrMoTi18-2	444	SUS 444	
1.4589	X5CrNiMoTi15-2			
1.4310	X10CrNi18-8	(301)	SUS 301	
1.4318	X2CrNi18-7	301 LN	SUS 301 LN	
1.4301	X5CrNi18-10	304	SUS 304	08X18H10
1.4303	X4CrNi18-12	(305)	SUS 305	12X18H12
1.4306	X2CrNi19-11	304 L	SUS 304 L	03X18H11
1.4541	X6CrNiTi18-10	321	SUS 321	08X18H10T
1.4550	X6CrNiNb18-10	347	SUS 347	
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	316	SUS 316	08X17H13M2
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316 L	SUS 316 L	03X17H14M2
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316 Ti	SUS 316 Ti	10X17H13M2T
1.4561	X1CrNiMoTi18-13-2			

Продовження таблиці Д.1

Європа (EN)	Німеччина (DIN)	США (AISI)	Японія (JIS)	СНД (ГОСТ)
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	316 L	SUS 316 L	03X17H14M2
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	S 31726	SUS 317	
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5	N 08904		
1.4565	X3CrNiMnMoNbN 23-17-5-3	S 34565		
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	S 31803	SUS 329 J3L	
Жароміцні сталі				
1.4713	X10CrAl7			10X17CЮ
1.4724	X10CrAl13	405		10X13CЮ
1.4742	X10CrAl18	442		
1.4762	X10CrAl24	446		
1.4878	X12CrNiTi18-9	321 H		12X18H10T
1.4828	X15CrNiSi20-12	309		20X20H14C2
1.4845	X12CrNi25-21	310 S		20X23H18

Таблиця Д.2 – Міжнародні аналоги сталей

Європа (EN)	Німеччина (DIN)	США (AISI)	СНД (ГОСТ)
Швидкорізальні сталі			
-	-	A11	P0 M2 Cф10-МП
1.3348	S2-9-2	M7	P2 M9-МП
1.3247	S2-10-1-8	M42	P2 M10 K8-МП
1.3343	S6-5-2	M2	P6 M5-МП
1.3243	S6-5-2-5	-	P6 M5 K5-МП
1.3344	S6-5-3	M3	P6 M5 Ф3-МП
-	-	M4	P6 M5 Ф4-МП
-	-	M36	P6 M5 Ф3 K8-МП
1.3207	S10-4-3-10	-	P10 M4 Ф3 K10-МП
-	-	M48	P6 M5 Ф3 K9-МП
-	-	M61	P12 M6 Ф5-МП
1.3202	S12-1-4-5	-	P12 Ф4 K5-МП
-	-	T15	P12 Ф5 K5-МП
-	-	T1	P18-МП
Конструкційні сталі			
1.1121	C10E	1010	10
1.5805	10 ХгН1	-	10ХГН1
1.6657	14 NiCrMo1-3-4	9310	14 ХН3 М
1.1141	C15 E	1015	15
1.1148	C16 E	1016	15 Г

Продовження таблиці Д.2

Європа (EN)	Німеччина (DIN)	США (AISI)	СНД (ГОСТ)
1.7131	16 Mncr5	5115	16 ХГ
1.7160	16Mn CrB5	-	16ХГР
1.5714	16NiCr4	-	16 ХГН
1.0117	S235J2G4	-	17 Г1 3
1.5752	15NiCr13	E3310	17 ХН3
1.7243	18CrMo4	4120	18 ХГМ
1.6587	18CrNiMo7-6	-	18 X2 H2 M
1.1151	C22E	1020	20
1.7320	20MoCr3	4118	20 ГМ
1.6523	20MoCr2-2	8617	20 ХГНМ
1.1158	C25E	1025	25
1.7218	25CrMo4	4130	25 ГМ
1.1170	28Mn6	1330	28 Г
1.1178	C30E	1030	30
1.7033	34Cr4	5130	34 X
1.6582	34CrNiMo6	4340	34 X2 H2 M
1.1181	C35E	1035	35
1.6511	36CrNiMo4	9840	36 ХНМ
1.6773	36NiCrMo16	-	36 X2 H4 MA
1.1186	C40E	1040	40
1.7225	42CrMo4	4140	42 ГМ
1.1191	C45E	1045	45
1.7006	46Cr2	5045	46 X
1.1206	C50E	1050	50
1.8159	50CrV4	6150	50 ХГФ
Нержавіючі сталі			
1.4404	X2 CrNiMo 17-12-2	316 L	03 X17 H13 M2
1.4435	X2 CrNiMo 18-4-3	-	03 X17 H14 M3
1.4306	X2 CrNi 19-11	304 L	03 X18 H11
1.4541-MOD	-	-	03 X18 H10 T-Y
1.4503	X3 NiCrCuMoTi 27-23	-	06 ХН28 МДТ
1.4303	X4 CrNi 18-11	305 L	06 X18 H11
1.4512	X6 CrTi 12	409	08 X12 T1
1.4000	X6 Cr 13	410S	08 X13
1.4436	X5CrNiMo 17-13-3	316	08 X17 H13 M2
1.4571	X6 CrNiMoTi 17-12-2	316Ti	08 X17 H13 M2 T
1.4510	X6 CrTi 17	430Ti	08 X17 T
1.4301	X5 CrNi 18-10	304	08 X18 H10
1.4541	X6 CrNiTi 18-10	321	08 X18 H12 T
1.4842	X12 CrNi 25-20	310S	10 X23 H18

Продовження таблиці Д.2

Європа (EN)	Німеччина (DIN)	США (AISI)	СНД (ГОСТ)
1.4006	X10 Cr13	410	10X13
1.4878	X12 CrNiTi 18-9	-	12 X18 H10 T
-	-	302	12 X18 H9
1.7362	X12 Crmo 5	501	15 X5 M
1.4746	X8 CrTi 25	-	15 X25 T
1.4021	X20 Cr 13	420	20X13
1.4057	X20 CrNi 17-2	431	20 X17 H2
1.4833	X7 CrNi 23-14	309	20 X23 H13
1.4843	X16 CrNi 25-20	310	20 X23 H18
1.4841	X56 CrNiSi 25-20	314	20 X25 H20 C2
1.4311	X2 CrNiN 18-10	304LN	03 X18 AH11
1.4438	X2 18-5-4	317L	03 X19 H13 M3
1.4362	X2 CrNiN 23-4	-	03 X23 H6
1.4521	X2 CrMoTi 18-2	444	02 X18 M2 БТ
1.4563	X1 NiCrMoCu 31-27-4	-	02 X28 H30 МДБ
1.4429	X2 CrNiMoN 17-13-3	316LN	03 X17 H13 Ам3
1.4462	X2 CrNiMoN 22-5-3	-	03 X22 H5 Ам2
1.4332	X2 CrNi 24-12	309L	03 X24 H13 Г2 3
1.4580	X1 CrNiMoNb 17-12-2	316 Cd	08 X16 H13 M2 Б
1.4550	X6 CrNiNb 18-10	347	08 X18 H12 Б
1.4583	X10 CrNiMoNb 18-12	318	08 X18 H14 M2 Б
-	-	304N	08X19AH9
1.4449	X5 CrNiMo 17-13	317	08X19H13M3
1.4331	X2 CrNi 21-10	308	08X20H11
1.4847	X8 CrNiTi 20-20	334	08X20H20TЮ
1.4460	X3 CrNiMoNb 27-5-2	329	08X25H4M2
-	-	309S	08X23H13
1.4568	X7 CrNiAl 17-7	631	09X17H7 Ю
1.4580	X6 CrNiMoNb 17-12-2	316Cd	1X16H13M2 Б
1.4724	X10 CrAlSi 13	405	10X13 СЮ
1.4001	X7 Cr 14	429	12X15
1.4016	X6 Cr17	430	12X17
1.4113	X6 CrMo 17-1	434	12X17M
1.4522	X2 CrMoNb	436	12X17МБ
1.3955	GX12 CrNi 18-11	305	12X18H12
1.4373	X12 CrMnNiN 18-9-5	202	12X17 Г9 AH4
1.7386	X12 CrMo 9-1	504	15X9M
-	-	403	15X12
-	-	414	15X13H2
1.4310	X12 CrNi 17-7	301	15X17H7

Продовження таблиці Д.2

Європа (EN)	Німеччина (DIN)	США (AISI)	СНД (ГОСТ)
Підшипникові сталі			
1.3501	100Cr2	50100	ШХ4
1.3505	100Cr6	52100	ШХ15
1.3520	100CrMn6	A 485 (2)	ШХ15 СГ
1.3537	100CrMo7	A 485 (3)	ШХ20 М
Ресорно-пружинні сталі			
1.5023	38Si7	-	38 С2 А
1.8159	50CrV4	6150	50 ХГФА
1.7701	51CrMoV4	-	52 ХГМФА
1.7102	54SiCr6	-	55 Хс2 А
1.7176	55Cr3	5147	55 ХГА
1.7108	60SiCR7	9262	60 С2 ХГА
Теплостійкі сталі			
1.7380	10CrMo9-10	F22	10 Х2 М
1.7335	13CrMo4-4	F12	13 ГМ
1.7715	14MoV6-3	-	14 ХМФ
1.5415	15Mo3	F1	15 М
1.0481	17Mn4	-	17 Г
1.0460	C22.8	-	20
1.1133	20Mn5	-	20 Г
1.4922	X20CrMoV12-1	-	20 Х11 МНФ

Навчальне видання

**Писаренко Віктор Григорович
Савуляк Віктор Валерійович
Боковий Євгеній Федорович
Завадюк Сергій Вікторович**

**Сучасні технології в машинобудуванні.
Інжекційне лиття порошку**
Навчальний посібник

Рукопис оформив *В. Савуляк*

Редактор *В. Дружиніна*

Оригінал-макет виготовив *О. Ткачук*

Підписано до друку 18.03.2019.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 14,52.
Наклад 50 (1-й запуск 1–21) пр. Зам. № 2019-041.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.