

Писаренко В.Г.,**Завадюк С.В.**

Казенне науково-виробниче об'єднання "Форп"

Вінниця, Україна

E-mail: zavasergey777@gmail.com

**ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ
МАТЕРІАЛУ ОТРИМАНОГО ЗА
ТЕХНОЛОГІЄЮ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ
ПОРОШКУ**

УДК 621

DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-42-46

Розглянуто вплив параметрів спікання, термічної обробки та хімічного складу матеріалу на ударну в'язкість спеченої сталі. Показано шляхи підвищення ударної в'язкості сталі отриманої методом інжекційного лиття порошку без застосування допоміжних операцій, таких як гаряче ізостатичне пресування. Визначено, що хімічний склад (підвищений вміст таких елементів як Cr, Mn, Si) позитивно впливає на здатність матеріалу протидіяти ударному навантаженню. Також важливе значення має зменшення пористості матеріалу та розміру зернистості сталі під час термічної обробки.

Ключові слова: спікання, інжекційне лиття порошку, ударна в'язкість, низьколегована сталь.

Вступ

Технологія інжекційного лиття порошкових сумішей (ІЛП) дуже ефективна для виробництва малих та складних металевих деталей у великих кількостях. Дана технологія дозволяє отримати чудові механічні властивості матеріалу поєднуючи це з високою геометричною точністю деталей, та за ціною набагато нижчою за традиційну механічну обробку. Технологія ІЛП охоплює чотири головні операції: приготування суміші, інжекційне лиття, дебайдинг, спікання. Готова до виробництва суміш являє собою поєднання дрібного металевого порошку (близько 20 мкм у діаметрі) та полімеру. Полімер загалом складається з двох основних компонентів пластифікатору та структурної зв'язувальної речовини. Формування геометрії деталі відбувається на стадії інжекційного лиття у прес - формі. Розміри формувальної порожнини прес-форми збільшені відповідно до коефіцієнта усадки деталі після спікання. Процес інжекційного лиття проводиться на стандартних термопластавтоматах з модифікованим інжекційним циліндром.

Головним завданням операції дебайдингу є вилучення полімеру з деталі без зміни геометрії виробу. На даний час використовується двоступеневий дебайдинг. На першому етапі вилучається пластифікатор. В залежності від типу пластифікатору розрізняють такі види дебайдингу: каталітичний з використанням парів азотної кислоти, з використанням рідкого розчинника, та з використанням дистильованої води. Структурна зв'язувальна речовина видаляється термічним шляхом, як правило, в печі спікання. Її основне завдання: зберегти цілісність геометрії деталі, до тих пір, поки між частинками порошку не почнуть утворюватися міцні перешийки на ранньому етапі спікання [1].

Спікання це остаточний етап, при якому під дією високої температури порошкове тіло перетворюється у метал з низькою залишковою пористістю. Основною рушійною силою процесу спікання є поверхнева енергія металевого порошку. Під час зменшення середнього розміру частинок порошку, збільшується сумарна площа поверхні, що у свою чергу сприяє зменшенню остаточної пористості спеченого тіла до 2 %. Проте, використання дуже дрібних частинок (менше 5 мкм) може погіршувати формування деталі на стадії інжекційного лиття. А також збільшує кошторис виробництва готової суміші. В залежності від хімічного складу металевого порошку процес спікання може проходити в захисній атмосфері (Ar, N₂, H₂) або у вакуумі [1].

На практиці, при твердо фазному спіканні неможливо отримати повністю безпористе металеве тіло. В залежності від типу порошку та температури спікання остаточна пористість може становити від 2 до 5 %. Дана пористість по різному впливає на механічні властивості матеріалу після спікання. Найменший вплив зазнають статичні характеристики матеріалу такі як напруження на розрив, проте найбільшою проблемою порошкових сталей є динамічні властивості такі як ударна в'язкість та втомна міцність [6]. В спечених сталях утворення тріщин відбувається по різному. Тріщина може починатися на порах в середині зерна або на границі зерен, а потім легко поширюватись до наступної пори або повздовж границь зерен. Даний ефект призводить до зниження ліміту втомної міцності та ударної в'язкості для спечених зразків. З метою зниження або остаточного видалення залишкової пористості, на практиці використовують операцію гарячого ізостатичного пресування (ГІП). Технологія ГІП полягає в тому, що металеві деталі після спікання зазнають додаткового ізостатичного пресування в спеціальних печах ГІП. Температура в таких печах може досягати 1400 °С, а тиск пресування до 1000 бар. У якості робочого тіла для пресування в печах ГІП використовують газ аргон. Дана операція дозволяє отримати безпористе металеве тіло без деформування геометрії деталі [5]. Проте головним недоліком такої операції є великі витрати на обладнання. Тому дану операцію застосовують лише для відповідальних деталей, які зазнають ударні навантаження та є чутливими до втомної міцності.

Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є вивчення впливу залишкової пористості, хімічного складу металевого порошку та параметрів термічної обробки на ударну в'язкість матеріалу після спікання.

Однією з важливих задач дослідження технології ІЛП є підвищення динамічних властивостей матеріалу без використання допоміжних операцій.

Виклад матеріалів досліджень

В даній роботі для виготовлення тестових зразків було використано такі готові суміші: Catamold 8740, виробництво компанії BASF, Німеччина; PolyPOM 8740 B321 та PolyPOM 30HGSA B322 виробництво компанії PolyMIM, Німеччина. Хімічний склад даних матеріалів та середня густина деталей після спікання подано в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад матеріалів

№	Назва матеріалу	Хімічний склад, %										Густина г/см ³
		C	Cr	Mn	Mo	Si	Ni	S	P	Cu	Fe	
1	Catamold 8740, BASF	0,45-0,55	0,4-0,6	-	0,25-0,4	-	0,5-0,8	до 0,01		-	зал.	7,5
2	PolyPOM 8740 B321, PolyMIM	0,45-0,55	0,4-0,6	до 0,1	0,25-0,4	0,3-0,55	0,5-0,8	до 0,01		-	зал.	7,65
3	PolyPOM 30HGSA B322, PolyMIM	0,28-0,34	0,8-1,1	0,8-1,1	-	0,9-1,2	до 0,3	до 0,025	до 0,025	до 0,3	зал.	7,35

Тестові зразки були відлиті на термопластавтоматі з модифікованим вузлом впорскування. Розміри тестових зразків після спікання становлять: 55 мм x 5 мм x 8 мм. Після спікання на всіх зразках механічним шляхом було виготовлено V-подібний концентратор напруження згідно ГОСТ 9454-78 Випробування на ударний згин по методу Шарпі. Дослідження ударної в'язкості проводилося на копрі з вагою маятника 2 кг.

Для першого етапу дебайдингу, використано каталітичне видалення зв'язувальної речовини з використанням парів азотної кислоти. Розщеплення полімеру відбувалось при температурі 120 °С, у якості захисної атмосфери використано газ азот.

Процес спікання проводився у декілька етапів з використанням різної кінцевої температури спікання 1270 °С та 1330 °С з метою визначення впливу даного параметру на ударну в'язкість матеріалу. Швидкість нагріву становила 2 °С/хв, витримка при максимальній температурі 90 хв. Спікання проводилося в атмосфері азоту та парціальному тиску 400 мбар. Спікання проводилося для тестових зразків з матеріалів: Catamold 8740, та PolyPOM 8740 B321. Також після спікання на тестових зразках було проведено операцію гартування з твердістю після відпуску 35 HRC. На рис. 1 приведена порівняльна гістограма отриманої ударної в'язкості з різною температурою спікання.

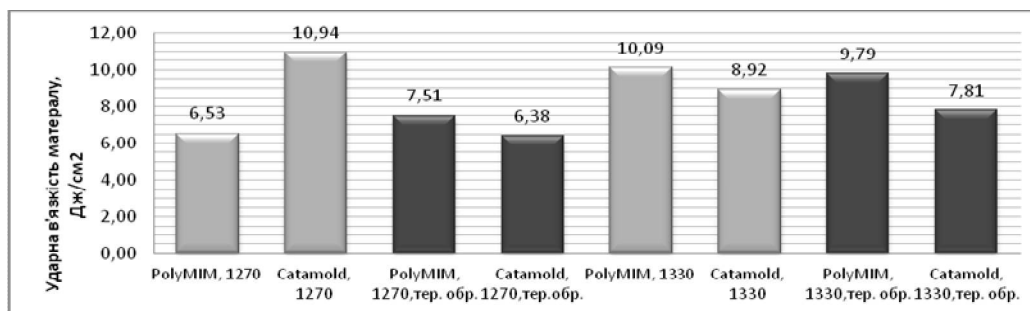


Рис. 1 – Залежність ударної в'язкості порошкової сталі 8740 від температури спікання та термічної обробки

Як можна побачити на рис. 1 для обох матеріалів помітне незначне підвищення ударної в'язкості після термічної обробки при вищій температурі спікання (1330 °С). Це пов'язано з інтенсифікацією процесу спікання при даній температурі та появі рідкої фази на границях зерен, що у свою чергу збільшує кінцеву густину спеченого тіла. Позитивний вплив високої температури спікання, а також часу витримки також описується у статті [2].

Залежність ударної в'язкості спеченої сталі Catamold 8740 від твердості після термічної обробки показано на рис. 2.

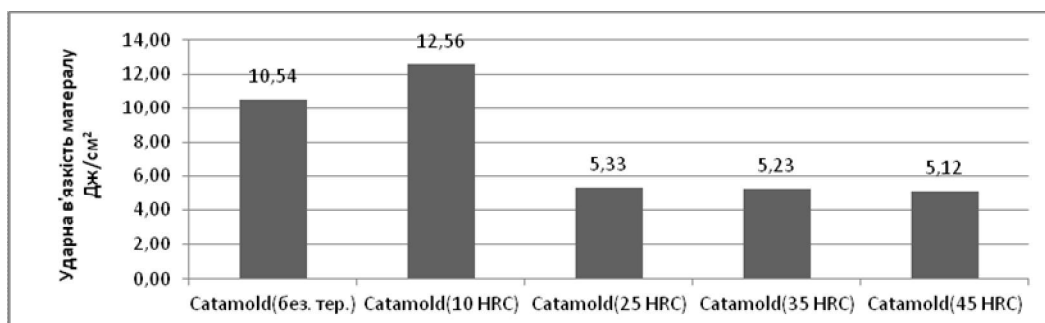


Рис. 2 – Вплив термічної обробки на ударну в'язкість спеченої сталі Catamold 8740, BASF

Як можна помітити з графіку найбільше значення ударної в'язкості (12,56 Дж/см²) сталь 8740 набуває після термічної операції покращення (гартування з високим відпуском). Дане явище пов'язано з утворенням дрібнозернистої структури сталі та підвищення пластичності матеріалу.

Для дослідження впливу хімічного складу сталі на ударну в'язкість було використано матеріал PolyPOM 30HGSA B322. Параметри процесу спікання: максимальна температура 1300 °С, швидкістю нагріву 2°С/хв.; час витримки при кінцевій температурі спікання 90 хв.; захисний газ – азот при парціальному тиску 400мбар.

Твердість деталей після спікання складала 229 НВ. На зразках було проведено операцію гартування з двома діапазонами кінцевої твердості: 35 - 43 HRC та 43 - 50 HRC (температура гартування 840 °С, температура відпуску 500 °С та 350 °С відповідно). Ударна в'язкість тестових зразків після термічної обробки подана в табл. 2. Вимірювання проводилися на тестових зразках з надрізом згідно з методом Шарпі ГОСТ 9454-78 (вага маятника копри 2 кг).

Таблиця 2

Ударна в'язкість спеченої сталі PolyPOM 30HGSA після термічної обробки

№	Матеріал	Твердість	Ударна в'язкість, Дж/см²	№	Матеріал	Твердість	Ударна в'язкість, Дж/см²
1	PolyPOM 30HGSA	35 - 43 HRC	14,25	8	PolyPOM 30HGSA	43 - 50HRC	12,56
2			14,83	9			12,56
3			14,25	10			12,01
4			13,11	11			12,56
5			12,56	12			12,01
6			12,56	13			12,01
7			12,01	14			12,01

Для порівняння ударна в'язкість тестових зразків з матеріалу Catamold 8740 складає: 10 - 12 Дж/см² при твердості 10HRC та 5 - 6 Дж/см² при твердості 35 - 40HRC.

Середня густина деталей з матеріалу PolyPOM 30HGSA після спікання складала 7,354 г/см³, що нижче рекомендованого значення (7,421 г/см³). Відповідно для отримання заданої густини деталей та коефіцієнту усадки (1,218) необхідно збільшити час витримки спікання при температурі 1300 С під час наступних дослідів.

Для визначення ударної в'язкості спеченої сталі згідно зі стандартом MPlF Standard 59, США [3] було виготовлено тестові зразки з матеріалів PolyPOM 30HGSA та Catamold 8740 з розмірами: 55 мм × 3 мм × 10 мм. Згідно з даним стандартом ударна в'язкість для спечених сталей вимірюється по методу Шарпі без надрізу. На тестових зразках було проведено термічну обробку з твердістю після відпуску 43 - 46 HRC. Результати експерименту подані в табл. 3.

Ударна в'язкість спеченої сталі після термічної обробки виміряна по методу Шарпі без надрізу

№	Матеріал	Твердість	Ударна в'язкість, Дж/см ²	№	Матеріал	Твердість	Ударна в'язкість, Дж/см ²
1	Catamold 8740	43 - 46 HRC	162,85	8	PolyPOM 30HGSA	43 - 46 HRC	150,20
2			171,76	9			38,75
3			18,73	10			49,66
4			171,76	11			152,17
5			27,54	12			149,18

Як можна помітити з таблиці 3 існує велика розбіжність результатів замірів ударної в'язкості для тестових зразків без надрізу. Це пояснюється тим що, на відміну від кованих сталей порошкова спечена сталь дуже чутлива до незначних концентраторів напружень. Такими концентраторами можуть виступати залишкові напруження після термічної обробки, неомогенність мікроструктури, відкрита поверхнева пористість та ін. Для порівняння ударна в'язкість сталі MIM-4140 після термообробки яка за своїм хімічним складом подібна до сталі 8740 згідно зі стандартом MPIF STANDART 35 Materials Standards for Metal Injection Molded parts становить 75 Дж. Проте слід зазначити, що згідно з даним стандартом тестові зразки виготовляються без надрізу.

Висновки

Ударна в'язкість матеріалу PolyPOM 30HGSA після спікання у середньому складала 13 Дж/см², що у два рази перевищує показник для матеріалу Catamold 8740 (5 - 7 Дж/см²) після термообробки. Проте місце злому на тестових зразках після спікання рівне без помітної пластичної деформації. Вимірювання ударної в'язкості на тестових зразках без надрізу для обох видів сталі показує велику розбіжність результатів, що пов'язано з впливом залишкової пористості.

Слід зазначити про можливість підвищення ударної в'язкості сталі PolyPOM 30HGSA шляхом зменшення залишкової пористості матеріалу за допомогою корегування параметрів спікання (максимальної температури спікання та часу витримки).

Література

1. Donald F.Heaney, Handbook of metal injection molding// Woodhead Publishing Limited, 2012.
2. Praveen Pachauri, Mohammed Hamiuddin, Effect of Sintering Process Parameters in Metal Injection Molding (MIM) Process on Impact Toughness of Sintered Parts//International Journal of Advanced Materials and Metallurgical Engineering 2016, Volume 2, Issue 1, pp. 23-33, Article ID Tech-583.
3. MPIF 2002: Method for Determination of Charpy Impact Energy of Unnotched Metal Injection Molded Test Specimens. Standard 59, Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products.
4. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
5. Anders Eklund, Hot Isostatic Pressing (HIP) of PIM parts: Material properties and increased productivity // Powder Injection Moulding International, Vol.6 #1, March 2012.
6. Dr Stephen J Mashl, An introduction to the Hot Isostatic Pressing (HIP) of MIM components// Powder Injection Moulding International, Vol.8 #1, March 2014.

Надійшла в редакцію 01.10.2018

Pisarenko V.G., Zavadiuk S.V. Study of impact energy of the material manufactured by metal injection molding.

This paper covers the effect of sintering conditions, heat treatment and chemical composition on the impact energy of the sintering steel. It was shown the ways to improve impact energy of the sintered low alloy steel that was manufactured by metal injection molding without extra operations like Hot Isostatic Pressing. It was found that the chemical composition (specially such elements like Cr, Mn, Si) has the positive influence on the dynamic properties like impact energy. Also, it is important to decrease the porosity by increasing the sintering conditions such as temperature and holding time. There was investigated the influence of the heat treatment (hardness) on the impact energy of the sintered low alloy steel Catamold 8740, BASF. In order to improve impact energy, it is possible to apply hardening and high tempering for sintered steel.

The impact energy, in this study, was measured according to Charpy test for notched and un-notched specimens. It has to be noticed a great variability of the results for un-notched specimens. Such effect can be explained by sensitivity of the porosity steel to the small defects, like non-homogeneity of the microstructure, open surface porosity, or residual thermal stresses. Furthermore, it was observed that the cracking surface for all test specimens after impact was flat without any plastic deformation.

Key words: sintering, powder injection molding, impact energy, low alloy steel.

References:

1. Donald F.Heaney, Handbook of metal injection molding. Woodhead Publishing Limited, 2012.
2. Praveen Pachauri, Mohammed Hamiuddin, Effect of Sintering Process Parameters in Metal Injection Molding (MIM) Process on Impact Toughness of Sintered Parts. International Journal of Advanced Materials and Metallurgical Engineering 2016, Volume 2, Issue 1, pp. 23-33, Article ID Tech-583.
3. MPIF 2002: Method for Determination of Charpy Impact Energy of Unnotched Metal Injection Molded Test Specimens. Standard 59, Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products.
4. GOST 9454-78 Metals. The test method for impact bending at low, ambient and elevated temperatures.
5. Anders Eklund, Hot Isostatic Pressing (HIP) of PIM parts: Material properties and increased productivity. Powder Injection Moulding International, Vol.6 #1, March 2012.
6. Dr Stephen J Mashl, An introduction to the Hot Isostatic Pressing (HIP) of MIM components. Powder Injection Moulding International, Vol.8 #1, March 2014.