

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

**Завадюка Сергія Вікторовича**

на тему **«Керування процесами формування із порошків сплавів заліза деталей складної форми з підвищеними фізико-механічними властивостями»**,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 132 Матеріалознавство

### **Актуальність теми дисертації.**

Можливості порошкових виробів з точки зору досягнення підвищеного рівня механічних та спеціальних властивостей, точності розмірів та відтворення деталей складної конфігурації беззаперечні. В окремих випадках (отримання твердих сплавів для роботи в екстремальних умовах) вони є незамінними.

Поєднання порошкової та ливарної технології отримує все більше поширення у вигляді так званого інжекційного лиття порошків, в якому використовується, окрім основи сплаву, допоміжне рідке середовище для створення направленого руху під тиском, близького за реологічною природою до лиття рідини. Властивості виробів, отриманих у такий спосіб, навіть із відносно простих за складом низьколегованих сплавів, мало досліджені, тому проведена автором робота є актуальною.

В сучасних умовах будь-яка робота, спрямована на підвищення оборонного потенціалу промисловості України, характеризується не просто актуальністю, а й має стратегічне значення. Деталі, представлені автором дисертації, а це елементи вогнепальної зброї та спецзасобів, є частиною загального великого шляху нашого народу до Перемоги. Удосконалення технологій виготовлення цих деталей, підвищення їх міцності, твердості, ударної в'язкості і, як наслідок, терміну експлуатації, зумовило необхідність виконання цієї дисертації.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертації Завадюка С. В. визначена у наступних положеннях:

1. Вперше на сумішах порошків для інжекційного формування PolyPOM 8740 і Catamold 8740 доведено, що частинки порошку лігатур

крупністю  $\geq 40$  мкм активують процес локально неоднорідного ущільнення, який призводить до формування крупних пор та зниження ударної в'язкості спеченої порошкової сталі.

2. Вперше встановлено взаємозв'язок між ступенем та швидкістю об'ємного та локально неоднорідного ущільнення пресовки із порошків заліза з розміром частинок 5 мкм, 100 мкм та їх еквімолярних сумішей, величиною залишкових напружень та областей когерентного розсіювання. В рамках фізичного експерименту доведено, що в порошковій пресовці залишкові напруження тим більші, чим більша швидкість та ступінь об'ємного ущільнення пресовки і чим менше реалізується процес локально неоднорідного ущільнення в мікрооб'ємах, ступінь реалізації якого корелює з розміром областей когерентного розсіювання, що збільшуються по мірі збільшення полідисперсності порошків, що спікаються.

3. Вперше встановлено величину напружень, що виникають в пресовці, що спікається внаслідок фазового переходу альфа заліза в гамма залізо під час нагрівання і в зворотному напрямку під час охолодження. Доведено, що величина напружень розтягування та стиснення в матеріалі частинок порошку перевищує межу пластичності і спричиняє формування сходинок проковзування дислокацій, що виявляються растровою електронною мікроскопією.

4. Вперше доведено, що величина напружень в порошковій пресовці під час спікання тим більша, чим менший середній розмір порошку і міцніші зв'язки між частинками порошку. Іншими словами, напруження в пресовці тим більші, чим більша міцність міжчастинного контакту зусилля розтягування, що обумовлені локально неоднорідним ущільненням в макрооб'ємах.

5. Встановлено, що механічна міцність спечених сталей після 18 термообробки практично не залежить від величини щільності, яка значно змінює механічні характеристики міцності, пружності та граничного видовження сталей після спікання.

6. В роботі вперше встановлено можливість покращення ударної в'язкості низьколегованих порошкових сталей, отриманих інжекційним формуванням, за рахунок термоциклічного спікання в зоні температур фазового перетворення.

Новизна сформульованих пунктів достатньою мірою обґрунтована та не викликає сумніву. В експериментальних розділах дисертації представлено достатній обсяг рисунків, графіків, таблиць, фотографій мікроструктур та пояснень до них, які пояснюють отримані автором наукові результати.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії КПІ ім. Ігоря



Сікорського під керівництвом академіка НАН України, д. т. н. професора Лободи П. І., що підтверджує високий науковий статус цієї роботи та професійне керівництво нею. При цьому Завадюк С. В. виконав самостійно великий обсяг промислових експериментів і впроваджень щодо розроблених в дисертації технологій.

Поставлене наукове завдання, яке полягало у підвищенні фізико-механічних властивостей деталей складної форми, що виготовляються за технологією інжекційного лиття порошків із низьколегованих сталей, виконано повністю. Здобувач підтвердив, що він оволодів методологією наукової діяльності.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

Дисертація складається з анотації (двома мовами), вступу, 5 розділів, висновків (16 позицій), списку літератури (63 позиції), без додатків. Загальний обсяг дисертації 145 сторінок.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Завадюка С. В. повною мірою відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство, а також загальним вимогам до структури, змісту, обсягу і оформлення дисертаційних робіт рівня «Доктор філософії».

Наявність особистого внеску здобувача не викликає сумнівів, також як і повнота вирішення поставлених завдань.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Завадюка С. В. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Використано загальноприйняту термінологію. У випадку використання глибоко спеціалізованих термінів та скорочень в тексті обов'язково наведено їх розшифровку.

Розділ 1 роботи являє собою сучасний критичний аналітичний огляд наукових джерел за тематикою дослідження. Наведено порівняльні характеристики процесу інжекційного лиття порошків з іншими способами формування деталей, зокрема ливарними та порошковими технологіями,

поєднанням яких є цей процес. Проведено аналіз хімічного складу та фізико-механічних властивостей найбільш поширених матеріалів.

Розділ 2 являє собою ґрунтовний опис методик проведення експериментів, серед яких такі прогресивні методи як сканувальна електронна мікроскопія, енергодисперсійний, спектральний та рентгенофазовий аналізи. Визначено механічні властивості отриманих матеріалів: міцність на розтяг, ударну в'язкість. У вибраному колі методик нічого зайвого немає, незважаючи на велику кількість різних процесів та використаного устаткування. Таке поєднання різних експериментів забезпечує високу достовірність отриманих наукових та практичних результатів.

Третій розділ дисертації присвячено аналізу гранулометричного та хімічного складу вихідних матеріалів, а це були порошки Catamold 8740 та PolyPOM 8740, які в цілому являють собою залізні порошки із незначним вмістом (до 3%) легувальних елементів, але, як стверджує автор, суттєво відрізняються за гранулометричним складом та середнім розміром частинок порошку. У цьому ж розділі проведено аналіз мікроструктур спечених заготовок, їх фазового та хімічного складу, наявності, природи та механізму утворення мікродефектів. Такі дослідження для подібних спечених матеріалів, попередньо отриманих інжекційним литтям, виконано безперечно вперше. Як висновок, автор дисертації встановив закономірності впливу структури та її дефектів на механічні властивості матеріалів, а також дослідив температурно-часові умови їх спікання та визначив оптимальні варіанти по обох порошкових композиціях.

Четвертий розділ присвячено дослідженням впливу параметрів спікання та гранулометричного складу порошків на пористість готових деталей. До дослідження тривалості і температури спікання, проведеного в попередньому розділі на двох відомих комерційних матеріалах, додано фізичний експеримент із штучно отриманими сумішами порошків заліза з широким діапазоном розмірів розміром частинок (5 і 100 мкм). Отримано новий науковий результат щодо встановлення умов локально-неоднорідного ущільнення і відповідно динаміки усадки та формування мікроструктури по об'єму пресовки залежно від розмірів частинок.

У п'ятому розділі дисертації встановлено, що матеріал PolyPOM 8740 відрізняється більшою ударною в'язкістю як після спікання, так і після термічної обробки порівняно з Catamold 8740, що автор пояснює більшою дисперсністю частинок вихідного порошку та їх більшою хімічною однорідністю. Також наведено результати експериментів щодо підвищення щільності спечених матеріалів методом гарячого ізостатичного пресування.



Встановлено, що окреме застосування цього методу значно менш ефективне, ніж його поєднання з подальшим термічним обробленням, яке дає змогу оптимізувати мікроструктуру та підвищити ударну в'язкість більш ніж у 1,5 рази.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Наукові результати дисертації висвітлено в 9 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» та 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, віднесених до квартилю Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях з публікацією тез.

Науковий рівень публікацій здобувача та їх кількість є достатніми для представлення дисертації до захисту. Наукові результати, подані в дисертаційній роботі, повністю висвітлено в наукових публікаціях здобувача, про що свідчать відповідні посилання на власні публікації в експериментальних розділах дисертації та представлення усіх цих публікацій в заключному переліку посилань.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Сумнівним виглядає необхідність представлення такої великої кількості висновків (16 позицій), тоді як завдань у роботі, згідно Вступу, поставлено лише 3, а згідно п. 1.6 розділу 1 – 4 завдання.

2. Неодноразово стверджується, що різниця за властивостями спечених матеріалів Catamold 8740 і PolyPOM 8740 пов'язана з відмінностями у гранулометричному та хімічному складі. Але, як показано в табл. 2.1, хімічний склад у них ідентичний. Як показано на рис. 3.2 та у табл. 3.1, гранулометричний склад також майже не відрізняється.

3. На с. 76 автор стверджує, що «для другої сталі спостерігається протилежна залежність», посилаючись на рис. 3.16 і рис. 3.17. Однак із цих рисунків видно, що для обох сталей підвищення температури та тривалості спікання однаково сприяє укрупненню зерна.

4. Подання формул на с. 74 і 89 в експериментальних розділах слід вважати некоректним, адже ці формули не отримав сам автор, при цьому посилань на літературу немає.

5. Представлену на рис. 2.1 схему ізостатичного пресування порошків вважаю не оптимальною: вертикальний циліндричний канал слід було розташувати зліва від пари заготовок, що знизило би втрати і покращило заповнення порожнин форми.

6. В тексті зустрічаються незначні неточності: щільність у табл. 1.7 у г/см<sup>3</sup> замість %, використання термінів «відливки» замість «виливки», «легуючий» замість «легувальний».

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії **Завадюка Сергія Вікторовича** на тему «Керування процесами формування із порошків сплавів заліза деталей складної форми з підвищеними фізико-механічними властивостями» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, яке має істотне значення для матеріалознавства та до обороноздатності України.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повною мірою відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач **Завадюк Сергій Вікторович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

### **Рецензент:**

доцент кафедри  
ливарного виробництва  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Д. Т. Н., доцент

Ростислав ЛЮТИЙ

26 квітня 2024р.

