

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Лаптева Анатолія Васильовича** «Особливості консолідації, формування структури та властивостей порошкових матеріалів під дією ударного навантаження в широкому діапазоні температур» поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам

Дисертаційна робота Лаптева А.В. складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Викладена на **485** сторінках, включає **39** таблиць, **296** рисунків, додатки, список використаних джерел із **369** найменувань.

У **вступі** належним чином обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено відомості щодо апробації роботи та публікації за темою дисертації.

В **першому** розділі наведено ґрунтовний аналіз літературних даних щодо технологій створення порошкових матеріалів з високим рівнем фізико-механічних та функціональних властивостей. Проведено огляд основних світових технологій пресування та спікання порошкових матеріалів, що забезпечують формування нерівноважної структури. Проаналізовано основні підходи і принципи, що дозволяють отримати високу щільність порошкових заготовок, приділено увагу механізму захоплення та холодного зварювання дисперсних частинок. Окремо висвітлено питання прискореної дифузії в металах за високої швидкості їх пластичної деформації. Звернено увагу на реалізацію явища прискореної дифузії при імпульсному чи ударному деформуванні металів.

За результатами критичного аналізу літературних даних сформульовано мету та визначено основні завдання досліджень.

У **другому** розділі проведено аналіз основних теоретичних положень, що описують процеси деформації пористого тіла, як залежність щільності від тиску пресування та запропоновано рівняння, що описує процес ущільнення порошків у жорсткій матриці. Розглянуті особливості роботи обладнання для ущільнення порошків при статичному та динамічному способах застосування навантаження. Проведено оцінку витрат на пружну деформацію експериментальної установки. Показано можливість теоретичного опису пружної деформації установки ударного типу та оцінки величини пружної деформації та втрат енергії на пружну деформацію в залежності від максимального навантаження при ударному ущільненні порошку.

У **третьому** розділі обґрунтовано вибір порошків та порошкових сумішей для проведення досліджень по їх ущільненню, описано схему та режими ударного ущільнення порошків у вакуумі. Описано методики визначення різних фізичних і механічних властивостей зразків, а також методика

дослідження та визначення кількісних характеристик структури двофазних матеріалів, зокрема, твердих сплавів WC-Co. Обґрунтовано вибір порошків з різним співвідношенням твердої і пластичної складових.

Четвертий розділ складається з п'яти підрозділів, в яких представлені результати експериментальних досліджень з ударного ущільнення різних порошкових груп. В першому підрозділі розглянуто однофазні порошки, що мають різний рівень пластичності. Другий розділ присвячено процесу ударного ущільнення мало пластичних порошків. У третьому підрозділі представлено результати дослідження ударного ущільнення суміші порошків, що складаються з двох металів, які суттєво відрізняються за температурою плавлення. В четвертому підрозділі наведено результати дослідження ударного ущільнення двофазних композитів, що складаються з металевої та карбідної фаз, з різним співвідношенням карбідної та металевої фаз. У п'ятому підрозділі представлено результати досліджень ударного ущільнення порошкових композитів на основі карбіду вольфраму з різними зв'язками.

У **п'ятому розділі** проведено обговорення результатів експериментальних досліджень щодо ударного ущільнення в широкому діапазоні температур порошків та порошкових сумішей, розглянутих у попередньому розділі. Наведено механізми формування міцних міжчастинкових та міжфазних границь за короткий час ущільнення. Зазначено необхідні умови для забезпечення термічної та механічної активації процесів ущільнення при яких відбуваються прискорені дифузійні процеси. Розглянуто механізм міцності на вигин композитів, що містять карбід вольфраму і різні зв'язки, та умови отримання композиту з найвищою міцністю.

У **шостому розділі** описані різні напрямки перспективного застосування результатів досліджень з ударного ущільнення різних за природою та властивостями порошків. Наведено приклади отримання методом ударного ущільнення у вакуумі заготовок з твердого сплаву BK20 для виготовлення конкретних виробів інструментального призначення.

У **загальних висновках** дисертації викладено найбільш важливі наукові та практичні результати, що були отримані в процесі дисертаційного дослідження і які сприяли розв'язанню сформульованої науково-прикладної проблеми.

Список джерел, який був використаний в аналітичному огляді проблеми, достатньо повно охоплює зазначену галузь знань та відображає основні напрями розвитку досліджень, винаходів та технологій пресування і спікання, що дозволяють отримати високощільні порошкові матеріали.

Структура та зміст дисертаційної роботи та автореферату співпадають. Матеріали дисертації викладені послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо докторських дисертацій.

Актуальність теми дисертації та відповідність роботи спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали

Розвиток промисловості супроводжується зростанням вимог до порошкових матеріалів конструкційного та функціонального призначення, які мають забезпечувати високі експлуатаційні характеристики і можливості працювати в екстремальних умовах при високих навантаженнях, що є необхідним для вирішення завдань швидкого повоєнного відновлення економіки України.

Дисертаційна робота містить науково обґрунтовані та раніше не захищені наукові положення, якісні експериментальний матеріал і достовірні, чітко сформульовані висновки, що в сукупності може бути охарактеризовано як успішне вирішення наукової проблеми. Підвищення щільності і, відповідно, міцності порошкових виробів, яка визначає їх експлуатаційні властивості, залишається як і раніше актуальною проблемою. При цьому, вплив високих тисків на механізм формування міцних границь між частинками різної природи досі залишається не розкритим. В роботі розкрито механізми ущільнення порошкових матеріалів з використанням методу ударного ущільнення у вакуумі, що забезпечує прискорення дифузійних процесів за низьких температур.

Актуальність роботи підтверджується також і тим, що дана дисертація є узагальненням наукових результатів, отриманих за участю автора при виконанні науково-дослідних тем в рамках тем відомчого замовлення в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

З погляду вищезазначеного, надана до розгляду дисертаційна робота є актуальною, а представлений матеріал наукових досліджень змістовно відповідає спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, їх достовірність

Аналіз дисертації та автореферату Лаптева А.В. встановив, що наукова достовірність результатів досліджень, висновків та положень, які висвітлено у дисертаційній роботі, не викликає сумнівів. Вона забезпечена:

- коректною постановкою завдань, великим об'ємом експериментальних досліджень, системністю вивчення та логікою аналізу досліджуваних процесів, відсутністю протиріч щодо сутності фізико-хімічних явищ які досліджуються в роботі;
- застосуванням сучасних методів визначення фізико-механічних властивостей матеріалів і кількісної металографії;
- системним аналізом існуючих сучасних літературних джерел за досліджуваними процесами
- достатньою кількістю публікацій у виданнях, що входять до переліку фахових видань з технічних наук в Україні, публікацій в міжнародних виданнях, що входять до наукометричних баз даних SCOPUS та Web of

Science, апробацією отриманих результатів на міжнародних конференціях;

- наукова новизна отриманих результатів визначається одержаними експериментальними даними та встановленими закономірностями.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів.

У дисертаційній роботі одержано ряд нових теоретичних та експериментальних результатів. До найбільш вагомих наукових положень, отриманих в результаті виконання роботи, на мій погляд відносяться наступні:

1. Запропоновано нове рівняння ущільнення металевих порошків у жорсткій матриці, яке містить чотири постійні параметри і дозволяє описати процес ущільнення порошку від початкової до будь-якої кінцевої щільності, а також апроксимувати експериментальні дані щодо ущільнення різних порошків з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9900 - 0,9999$.

2. Вперше показано, що при ударному ущільненні металевих порошків у вакуумі ($\leq 0,0133$ Па) з високим рівнем загальної енергії (≥ 1000 Дж/см³), а також завдяки підвищеному на 15-30% ступеню деформації пористих брикетів та високої швидкості деформації ($50-100$ с⁻¹) можна знизити температуру формування міцного зв'язку поміж металевими частинками за тисячні частки секунди до рівня 0,5-0,55 Тпл.

3. Встановлено явище швидкої рекристалізації структури порошкових металевих зразків за час їх охолодження після ударного ущільнення при температурах вище 0,5-0,6 Тпл.

4. Встановлено факт прискореної дифузії елементів, зокрема атомів вольфраму в сталеву частинку при ударному ущільненні порошків нержавіючої сталі Х17Н2 зі ступенем деформації ~ 50 % та швидкістю деформації ~ 100 с⁻¹. Коефіцієнт дифузії при температурі 1100 °С збільшується приблизно на 4 порядки зі значення $3,96 \times 10^{-11}$ см²/с при ізотермічному відпалі до значення $2,91 \times 10^{-7}$ см²/с при ударному ущільненні.

5. Показано можливість і визначено умови отримання в твердій фазі високощільних і більш міцних біметалевих композитів з нерозчинних або слабо розчинних один в одному металів. Це досягнуто на композитах Ag-Ni, Cu-W, Cu-Cr за рахунок реалізації деформації пластичної фази при високоенергетичному ударному ущільненні.

6. Вперше показано, що ударне ущільнення у вакуумі метало-карбідних композитів Co-WC, Ni-WC, Cu-WC дозволяє сформувати за тисячні частки секунди міцні міжфазні границі у твердій фазі за певної температури. Для кобальтової та нікелевої матриць це температура 1150-1200 °С, для мідної матриці -1050 °С

7. Встановлено, що в основі процесу низькотемпературного (твердофазного) схоплювання між частинками пластичного металу та практично непластичного карбиду вольфраму лежить не стільки ступінь та швидкість пластичної деформації кобальту або нікелю, скільки висока хімічна активність компонентів при певній температурі, яка здатна утворити

фактично миттєво міцний зв'язок між металом та карбідом вольфраму при їх стисканні.

8. Встановлено граничне значення міцності на вигин твердих сплавів WC-Co з об'ємним вмістом кобальту від 25 до 55 %. Граничне значення міцності відповідає рівню 3200-3500 МПа, і воно обумовлено міцністю тонких прошарків металевої зв'язки, яка коригує з міцністю ниткоподібних кристалів даного металу.

Практичне значення результатів роботи

Практичне значення роботи полягає у тому, що застосування ударного ущільнення дає можливість отримати зносостійкі електричні контакти, електродів для точкового зварювання та електродів для електроерозійної обробки твердих матеріалів при використанні біметалевих композитів типу Ag-Ni, Cu-Cr, Cu-W, які мають підвищені значення щільності, міцності та твердості.

Показано можливість підвищення експлуатаційної стійкості біметалевих і метало-керамічних композитів у разі виготовлення ударним ущільненням градієнтних по структурі виробів або виробів, що складаються з різних по складу порошкових матеріалів.

Також важливе значення для студентів і фахівців може мати запропоноване в роботі нове рівняння, що відображає залежність тиску ущільнення від відносної щільності порошкових брикетів і дозволяє описувати увесь процес ущільнення порошків в жорсткій матриці з високою точністю. Корисною є і нова методика визначення міцності та пластичності зразків при стисканні, що враховує дію максимальних сил тертя між опорними плитами та торцями зразків.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення та результати досліджень дисертації Лаптева А.В. викладено в 50 наукових роботах, в числі яких:

1 патент України;

30 статей у наукових спеціалізованих виданнях України та інших країн, що входять до міжнародних наукометричних баз даних (SCOPUS, EBSCO, Thomson Reuters, Google Scholar, Research Gate та ін.);

18 матеріалів міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій.

Зміст автореферату повністю ідентичний основним положенням дисертації і відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем.

Зауваження по дисертаційній роботі.

Попри загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, у ній присутній ряд недоліків, по яких можуть бути сформульовані наступні зауваження:

1. Який саме механізм забезпечує найбільш міцний зв'язок між карбідною складовою і металом після ударного пресування: пластична деформація чи хімічна активність компонентів, наскільки це залежить від кількості пластичної складової?

2. Не зрозуміло з якою метою автор провів дослідження по ударному пресуванню твердих сплавів з низьким вмістом металевої зв'язки в температурному діапазоні нижче температур рідкофазного спікання (950 – 1150 °С), адже формування міцних міжфазних границь в таких умовах досить ускладнено.

3. На рисунку 4.4.11 в дисертації наведено залежність коерцитивної сили від температури ущільнення, де зазначено, що збільшення коерцитивної сили обумовлено зменшенням розміру карбідних зерен і товщини кобальтового прошарку, проте не враховується зміна напруженого стану матеріалу після ударного пресування, що також може впливати на значення коерцитивної сили.

4. На деяких рисунках дисертації (рис. 4.4.1., 4.4.10, 4.4.19) наведено абсолютна щільність для двокомпонентних систем, при цьому адитивна щільність наведено не у всіх випадках, що ускладнює розуміння ступеню ущільнення матеріалів, для багатоконпонентних систем необхідно наводити відносну щільність.

5. В тексті автореферату та дисертації мають місце деякі неточності, зокрема:

- в авторефераті відсутні номери рисунків 7 та 13;
- на підпису рисунку 11 автореферату відсутнє позначення міцності на розтяг - (г);
- на рисунку 27 автореферату наведено залежності від температури і часу ізотермічної витримки лише за трьома точками, що не може визначати характер наведених залежностей.

Загальний висновок по дисертації.

Дисертація Лаптева Анатолія Васильовича є завершеною кваліфікаційною науковою роботою, що характеризується системністю викладених положень, базується на фундаментальних законах сучасної науки і містить нові науково обгрунтовані результати, які не викликають сумніву.

Отримані в дисертаційній роботі результати у сукупності розв'язують актуальну науково-технічну проблему, яка полягає в розробці наукових і технологічних основ процесу ударного ущільнення порошкових матеріалів.

Зроблені зауваження та побажання не мають принципового характеру до суті дисертації і не знижують її загальної позитивної оцінки.

Наукові положення дисертації, висновки та рекомендації є достовірними та відповідають об'єктивній дійсності.

Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.

Дисертаційна робота відповідає всім вимогам пунктів 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою КМУ №1197 від 17.11.2021 року, є закінченою кваліфікаційною науковою роботою, а її автор Лаптів Анатолій Васильович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – Порошкова металургія та композиційні матеріали.

Офіційний опонент:

професор кафедри високотемпературних
матеріалів та порошкової металургії,
навчально-наукового інституту
матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона,
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
доктор технічних наук, професор



Анатолій МІНІЦЬКИЙ

Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО