

## **ВІДГУК**

**офіційного опонента на дисертаційну роботу Максименка Андрія Леонідовича «Наукові засади прогнозування консолідації порошкових матеріалів на основі аналізу багаторівневої взаємодії елементів їх структури» що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.16.06- порошкова металургія та композиційні матеріали**

**Актуальність** роботи визначається зростаючою потребою в прогнозуванні та оптимізації технологій пов'язаних з використанням порошків в зв'язку з поширенням нових типів порошкових матеріалів таких як функціонально-градієнтні композити, наноструктурні матеріали. Для консолідації порошків використовується широка гамма різноманітних методів. Проблема зв'язку технологій консолідації з властивостями одержаних виробів є однією з найважливіших проблем порошкової металургії та керамічного виробництва. В роботі запропонований багатомасштабний підхід, який дозволяє відслідковувати зміни та взаємозв'язок різноманітних внутрішніх параметрів порошкового тіла в процесі консолідації і на цій основі передбачати властивості одержаного виробу. Тому можна зробити висновок, що в дисертаційній роботі вирішується актуальна і важлива наукова-практична задача удосконалення процесу консолідації порошків.

### **1. Оцінка структури та змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел. Матеріал представлений на 315 сторінках машинописного тексту. Дисертація містить 175 рисунків та список використаних джерел з 248 найменувань.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і

темами, відзначено особистий внесок здобувача, наведено інформацію про публікації та апробацію роботи.

**Перший розділ** присвячено огляду теоретичних та експериментальних результатів з літературних джерел відносно впливу різноманітних фізичних та структурних параметрів порошкового тіла на його поведінку в умовах пресування та спікання. Відзначено, що традиційне моделювання консолідації порошків використовує лише один структурний параметр, а саме пористість. В той же час, численні експериментальні дані різних авторів підтверджують за певних умов суттєвий вплив і інших параметрів. У випадку пресування - це форма і розташування пор, тип пакування і розподіл частинок за розмірами, деформаційне зміцнення частинок порошку, якість контактів між частинками та тертя на недосконалих контактах. При спіканні консолідація порошків залежить також від особливостей рекристалізації, розвитку внутрішніх напружень і їх впливу на масоперенесення при спіканні неоднорідних зразків, інтенсивності заліковування пошкоджень.

**Другий розділ** присвячений одержанню чисельних оцінок впливу внутрішніх параметрів порошкового тіла на зусилля пресування в умовах навантаження різних типів. Зусилля пресування оцінюється побудовою поверхні текучості порошкового тіла для тіл з різною структурою. Розглянуті аналітичні оцінки поверхонь текучості для початкової стадії пресування та пресування пористих тіл з еліптичними порами, чисельні оцінки впливу форми пор, тертя між частинками, агломерованості порошків доводять, що традиційні однопараметричні моделі можуть застосовуватись з достатньою точністю лише для малих значень пористості, або у випадку емпіричного підбору визначальних співвідношень для кожного випадку пресування.

У **третьому розділі** запропоновано новий підхід для моделювання пресування порошків з врахуванням багатопараметричності пористих тіл. Метод прямого багатомасштабного моделювання ґрунтується на одночасному

моделюванні на двох структурних рівнях: рівні частинок порошку та макроскопічному рівні порошкової заготовки в цілому. Внутрішня структура порошкового тіла при цьому визначається набором репрезентативних комірок пакування порошку, які відповідають різним частинам виробу, що моделюється. При такому підході відсутні макроскопічні реологічні співвідношення в аналітичній формі. Ці співвідношення знаходяться на кожному кроці моделювання осередненням поведінки репрезентативних комірок. В результаті, з'являється можливість враховувати вплив на пресування порошків різноманітних внутрішніх параметрів, кількість яких обмежується лише складністю обраних репрезентативних комірок. Достовірність нового методу моделювання в розділі перевірено порівнянням одержаних теоретичних результатів з результатами тестових задач Європейської асоціації порошкової металургії. Близькість результатів вказує на ефективність запропонованого підходу. В цьому ж розділі наведено результати експериментів та багатомасштабного моделювання іскро-плазмового спікання металевих порошків - нового ефективного методу консолідації.

**Четвертий** і наступний п'ятий розділи присвячені аналізу спікання як методу консолідації порошків. В четвертому розділі розглядається початкова стадія спікання характерною особливістю якої є можливість вирізняти на цій стадії окремі контакти між частинками. Методами моделювання дифузійного масоперенесення одержано нові співвідношення які пов'язують швидкості зростання радіусів контактів та зближення частинок порошку в умовах спікання із значеннями коефіцієнтів дифузії та зусиллями на контактах. Крім оцінок швидкості консолідації, такі співвідношення дозволили знайти умови руйнування контактів при спіканні з кінематичними обмеженнями і оцінити рівень накопиченої пошкодженості в спечених керамічних композитах. Багатомасштабне моделювання дозволило знайти розподіл пошкодженості в околі жорстких вкраплень композитів. В розділі проведено порівняння теоретичних результатів як, з літературними експериментальними даними, так і результатами експериментів самого автора.

В п'ятому розділі розглядається завершальна стадія спікання в якій пористість має вигляд окремих ізольованих пор. Автором запропоноване нове формулювання моделі масоперенесення при дифузійному спіканні частинок порошку, що враховує зростання розмірів зерен при спіканні. Цей підхід дозволив оцінити внесок в кінетику кінцевої стадії спікання таких структурних параметрів як відношення розмірів пор та частинок порошку, розподіл пор за розмірами, неоднорідність розподілу розмірів зерен в залежності від локальної пористості заготовки. Результати моделювання в цьому розділі було застосовано до моделювання спікання функціонально градієнтних керамічних та тврдосплавних виробів, які знайшли застосування на практиці.

**Наукова новизна** отриманих результатів найперше визначається тим, що запропоновано і обґрунтовано **новий метод** моделювання консолідації порошків – метод прямого багатомасштабного моделювання, який, на відміну від більшості відомих, дозволяє контролювати поточний стан порошкового матеріалу, як на макроскопічному рівні (масштаб порошкової заготовки вцілому), так і на мезоскопічному рівні (масштаб окремих частинок порошку). Цей метод застосовано до розв'язку нового типу задач, пов'язаних з консолідацією порошків: задач оцінки розподілу в об'ємі заготовки структурних параметрів матеріалу, відмінних від пористості.

Застосування цих підходів до задач пресування багатоходовими пресами дозволило одержати нові результати відносно передбачення зародження дефектів та появи розшарувальних тріщин заготовок ступеневих виробів. Встановлено зв'язок цього явища зі схемою пресування та обґрунтовано методику вибору діаграм деформування, які забезпечують запобігання руйнування;

У випадку спікання вперше сформульовано концепцію накопичення пошкоджень при спіканні композитів та спіканні з кінематичними обмеженнями. Визначено роль впливу зовнішнього тиску на запобігання формування макроскопічних дефектів;

Вперше багатомасштабне моделювання було використано для одержання систематичних оцінок основних фізичних та структурних характеристик порошкового матеріалу в закономірності пресування: зокрема, розглянуто деформаційне зміцнення порошків, форма пор, початкова і наведена анізотропія, наявність недосконалих контактів та тертя між частинками порошків у процесах їх холодного ущільнення;

Одержано нові оцінки швидкості **контактоутворення** при спіканні як функції радіусу контакту, зовнішнього навантаження, коефіцієнтів зернограничної та поверхневої дифузії для різних типів пакувань частинок.

Автором запропоновано нову **модель дифузійного спікання** з врахуванням росту зерен, що є узагальненням варіаційного принципу Нідлмана – Райса; отримані результати було покладено в основу пояснення ефекту Бордье, який полягає у наявності чутливості на пряму зміни форми пор до їх розмірів та у пояснення ефекту значного уповільнення спікання керамічних композитів з твердими інертними включеннями.

**Наукова та практична значимість** отриманих результатів полягає в тому, що нові підходи до моделювання процесів консолідації порошків дозволяють передбачити вплив технологічних параметрів на якість одержаних порошкових виробів і шляхом оптимізації технологічного процесу досягти покращення необхідних службових характеристик. Одержані нові практичні результати на основі розроблених моделей при спіканні **функціонально-градієнтних** композитів.

Результати досліджень автора включені в університетський курс лекцій з теорії спікання в Державному університеті Сан-Дієго (США).

Результати комп'ютерного моделювання і встановлені закономірності формозміни заготовок керамічних протезів суглобів стегна в процесі спікання використовувались при розробці технології керамічних ендопротезів з градієнтною внутрішньою структурою в Католицькому університеті м. Льовен (Бельгія). Результати моделювання міграції рідкої фази при рідкофазному спіканні виробів з твердих сплавів градієнтної та однорідної структури

використовувались при розробці технологій одержання функціонально-градієнтного тврдосплавного інструменту в Католицькому університеті м. Льовен (Бельгія).

**Достовірність** отриманих результатів визначається коректністю постановки задач і використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання. Вона підтверджується також відповідністю моделювання фізичній сутності досліджуваних процесів, співставленням одержаних результатів з відомими аналітичними та експериментальними даними.

За темою дисертації опубліковано 50 статей у фахових виданнях. Публікації достатньо повно відображають зміст роботи та відповідають встановленим вимогам. Матеріали роботи розглядались та обговорювались на багатьох міжнародних конференціях на протязі тривалого часу.

**Зауваження** по тексту дисертації.

1. При моделюванні пресування порошків використовувались спрощені репрезентативні комірки порошкового матеріалу, що містять одну або кілька частинок. Разом з тим, комп'ютерне моделювання структури пакування порошків доводить існування широкого набору типів пакування, що в свою чергу, повинно впливати на зусилля та кінетику пресування.
2. В роботі не використовувались результати вітчизняних експериментальних досліджень пресування порошків стосовно властивостей та побудови поверхонь текучості пористих тіл.
3. В роботі не проведено порівняння результатів моделювання новим багатомасштабним підходом з результатами одержаними на основі використання існуючих моделей поведінки порошкових тіл при пресуванні та спіканні.
4. Із представлених матеріалів незрозуміло чи враховувалася хімічна взаємодія компонентів при спіканні.
5. Незрозуміло, чому поверхня текучості безкогезійного порошку для різних значень параметру Надаї-Лоде коливається з певними відхиленнями.

6. Із викладеного матеріалу незрозуміло яким мінімальним і максимальним числом задається вибір комірок, і яким чином передається це на порошкові матеріали.
7. Потребує пояснення речення: «Потік матеріалу вздовж поверхні пори породжується градієнтом хімічного потенціалу» ( стор. 67).
8. Зауваження по оформленню роботи:
  - 8.1. - допущені стилістичні помилки при форматуванні тексту роботи (стор.20, 25, 35, 48, 83 ..);
  - 8.2. - зустрічається некоректна побудова речень. Наприклад, «Основою порошкової металургії є консолідація готових виробів з порошків». На наш погляд, автор мав наступне: «Основою порошкової металургії є консолідація порошків у готових виробах»;
  - 8.3. - помилки у оформленні нумерацій окремих підрозділів. Наприклад, підрозділ 1.6 (стор. 37), розділ 2.4 (стор. 54), підрозділ 2.6.2 (стор. 71) наведено тільки назву підрозділу а сам текст починається з наступної сторінки;
  - 8.4. – Зустрічається повтор посилань. Наприклад, посилання [14] та [75] Качанов Л.М. Основы теории ..

Наведені зауваження не знижують високого науково-технічного рівня дисертації і не впливають на її загальну позитивну оцінку. Вони можуть розглядатися як побажання для поліпшення цікавого нового підходу запропонованого А.Л. Максименком.

Автореферат в повній мірі відповідає змісту дисертації.

### **Загальний висновок по дисертації.**

В цілому, дисертаційна робота **Максименка Андрія Леонідовича** «Наукові засади прогнозування консолідації порошкових матеріалів на основі аналізу багаторівневої взаємодії елементів їх структури» вирішує актуальну науково-практичну задачу, має суттєві наукові та прикладні результати і є

ру

завершеною науковою працею. Опубліковані наукові праці та автореферат повністю відповідають змісту дисертації. Дисертаційна робота представлена у вигляді рукопису і повністю відповідає всім вимогам постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року «Про затвердження порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника». Зміст дисертації відповідає формулі та напряму досліджень паспорта спеціальності 05.16.06- порошкова металургія та композиційні матеріали. Тому автор дисертації Максименко Андрій Леонідович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06- порошкова металургія та композиційні матеріали.

Офіційний оппонент,  
завідувач кафедри комп'ютерного проектування  
верстатів та технологій машинобудування  
доктор технічних наук, професор

Підпис Рудя В.Д. засвідчую  
Вчений секретар Луцького ІТУ



В.Д. Рудь

А.М. Земко