

ВІДГУК

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

Предметом досліджень дисертанта є особливості консолідації металічних порошків та кераміки на різних масштабних рівнях і їх взаємозв'язок в процесах гарячого та холодного пресування і спікання.

Метою дослідження є розробка нових підходів досягнення високих службових характеристик порошкових та керамічних виробів на підставі результатів багатомасштабного моделювання. Для досягнення цієї мети були сформульовані нові моделі пресування та спікання порошків, що дозволяють враховувати особливості структури порошкових заготовок.

Актуальність теми дисертації

Комп'ютерне моделювання широко використовують для дослідження пресування та спікання порошків. Комп'ютерні програми, що дозволяють оцінювати зміни та розподіл пористості в заготовках в умовах холодного чи гарячого пресування, є складовою частиною багатьох комерційних пакетів. Разом з тим, при використанні цих програм на практиці виникають дві серйозні перешкоди. По-перше, вибір параметрів моделей потребує детальної експериментальної інформації про деформаційну поведінку порошків під час консолідації для різних схем навантаження та рівнів пористості, яка, як правило, відсутня, а по-друге, численні експериментальні дані свідчать про те, що швидкість пресування та спікання порошків залежить не тільки від пористості, але й від інших структурних та фізичних параметрів пористих заготовок, таких як: розподіл пор та частинок за розмірами, накопичена чи початкова анізотропія пористих заготовок, деформаційне зміцнення частинок порошку, концентрація недосконалих контактів, тертя між частинками на цих контактах та багато інших. Новий підхід, що запропоновано в роботі, вирішує обидві проблеми шляхом одночасного моделювання процесів консолідації порошків як на макроскопічному рівні заготовок в цілому, так і на мезоскопічному рівні частинок порошку. Такий підхід не потребує явного формулювання в аналітичній формі макроскопічних реологічних рівнянь незворотного ущільнення порошків, а кількість внутрішніх параметрів, що розглядаються в моделі, може бути довільною в залежності від складності репрезентативних комірок, що моделюють структуру матеріалу. Як результат, збільшується не тільки достовірність моделювання консолідації порошків, але й

вперше з'являється можливість відслідковувати еволюцію не тільки пористості, але й довільної кількості інших параметрів.

Практична цінність роботи

Багатомасштабне моделювання дозволяє одержати інформацію про властивості консолидованих порошкових заготовок, оскільки ці властивості залежать від значень та розподілу внутрішніх параметрів. В дисертації розглянуто накопичення пошкодженості при пресуванні ступеневих виробів, яка може призводити до появи розшарувальних тріщин, досліджено еволюцію анізотропії механічних властивостей при пресуванні порошків, запропоновано алгоритм для врахування деформаційного зміцнення частинок порошку, що дозволяє оцінити мікротвердість виробу після пресування. В роботі наведені приклади оптимізації процесів консолидації, що дозволяє уникнути пошкоджень.

Детальне врахування особливостей внутрішньої структури має особливе значення для функціонально-градієнтних композитів. Для цих композитів результати моделювання використовували при виготовленні керамічних ендопротезів та функціонально-градієнтних твердосплавних свердел в Католицькому університеті м. Льовен (Бельгія).

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

Достовірність результатів дослідження забезпечується 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.

Структура та обсяг роботи

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

Характеристика розділів дисертації

Перший розділ присвячено огляду проблем, що виникають при моделюванні консолидації порошків. Відзначено, що моделювання пресування та спікання порошків починалось з досліджень взаємодії окремих частинок порошку під час ущільнення. Відсутність на той час ефективних чисельних

підходів не дозволило широко застосовувати ці методи моделювання на практиці. Найбільшого поширення набули феноменологічні макроскопічні моделі пресування та спікання. Оскільки такі моделі потребують додаткових експериментів для визначення значень та еволюції внутрішніх параметрів під час консолідації, кількість таких параметрів обмежена: в більшості випадків використовують лише один параметр – пористість. В розділі наведені експериментальні дані різних авторів, які підтверджують важливість для моделювання пресування враховувати такі параметри пористого тіла як початкова пористість, форма пор, тип пакування частинок, параметри анізотропії пористого тіла, недосконалі контакти. У випадку спікання важливими параметрами є розподіл пор та частинок порошку за розмірами, розміри зерен, з яких складаються частинки, накопичена пошкодженість при спіканні композитів. Аналіз взаємовпливу цих параметрів стає можливим, якщо моделювання базується на аналізі консолідації репрезентативних комірок, тобто типових структурних елементів, характерних для порошкових заготовок. Макроскопічний опис консолідації порошків при цьому базується на осередненні процесів ущільнення на рівні комірок.

Другий розділ присвячено чисельним оцінкам впливу різних мезоскопічних параметрів на кінетику пресування порошків і побудові репрезентативних комірок, які б дозволяли враховувати ці параметри при моделюванні. В розділі одержано оцінки впливу форми пор, недосконалих контактів, агломерованості порошків на зусилля пресування пористого тіла. Запропоновано аналітичні вирази поверхонь текучості пористих тіл з врахуванням нерівноосності форми пор, руйнування контактів та тертя між частинками. У випадку агломерованих порошків проаналізовано різноманітні температурно-силові режими пресування, які б усували значну мікронеоднорідність заготовок з таких порошків. Зокрема показано, що холодне пресування є більш ефективним з точки зору закриття великих міжагломератних пор, ніж гаряче. Запропоновано чисельні підходи, що дозволяють враховувати деформаційне зміцнення частинок порошку в процесі пресування. Одержані оцінки підтверджують важливе значення коректного врахування впливу внутрішніх параметрів порошкового тіла на зусилля пресування і кінетику ущільнення.

В **третьому розділі** запропоновано новий підхід в моделюванні консолідації порошків, який дістав назву метод прямого багатомасштабного моделювання. Метод полягає в одночасному чисельному моделюванні процесів консолідації на двох масштабних рівнях: рівні частинок порошку і макроскопічному рівні порошкової заготовки в цілому. Особливістю цього підходу є те, що макроскопічні реологічні співвідношення не формулюються наперед в аналітичному вигляді, а одержуються в кожний момент часу як результат віртуальних експериментів з репрезентативними комірками. В розділі методом прямого багатомасштабного моделювання досліджено пресування ступеневих виробів, одержано оцінки розподілу пористості та накопиченої

пошкодженості, що викликана впливом тертя при пресуванні. Теоретичні результати виявились близькими до результатів експериментів.

В четвертому розділі запропоновано моделі дифузійного контактоутворення на початковій стадії спікання. Одержано кінематичні співвідношення, що пов'язують швидкість зростання середніх радіусів перешийків та швидкість зближення частинок з коефіцієнтами зернограничної, поверхневої, об'ємної дифузії та рівнем зовнішнього навантаження порошкової заготовки. Проведені дослідження дозволили встановити границі можливого застосування традиційних лінійних моделей спікання, сформулювати умови руйнування міжчастинкових контактів під дією розтягуючих напружень. Ці результати застосовано до оцінок накопичення пошкоджень при спіканні двошарових ламінатів та композитів з жорсткими інертними включеннями. Достовірність одержаних оцінок підтверджується результатами експериментів щодо двошарових дисків.

П'ятий розділ роботи присвячено моделюванню фінальної стадії спікання, яка характеризується пористістю у вигляді замкнених ізольованих пор. В цьому розділі запропоновано варіаційну модель ущільнення при дифузійному спіканні, яка враховує зростання розмірів зерен в матеріалі. Застосування цієї моделі дозволило знайти закономірності впливу співвідношення розмірів зерен та пор на формозміну останніх в умовах спікання під тиском. Методом прямого багатомасштабного моделювання досліджено вплив жорстких включень на кінетику ущільнення при спіканні і показано, що експериментально доведене значне уповільнення спікання композитів із збільшенням концентрації жорстких вкраплень може бути викликане швидким дифузійним зростанням розмірів пор в околі включення. Також розглянуто моделювання спікання функціонально-градієнтних композитів. Для твердофазного спікання керамічних композитів запропоновано підхід, що дозволяє знаходити оптимальну початкову форму заготовки і, як наслідок, забезпечувати задану кінцеву форму виробу. Цей підхід застосовано для оптимізації технології виготовлення функціонально-градієнтних ендопротезів. У випадку комбінованого твердофазного та рідкофазного спікання функціонально-градієнтних твердих сплавів запропоновано режими нагріву, що запобігають вирівнюванню концентрації металевої зв'язки в функціонально-градієнтній заготовці.

Найбільш вагомні наукові результати

1. Запропоновано новий метод моделювання пресування та спікання порошків, що ґрунтується на одночасному моделюванні процесу консолідації на двох масштабних рівнях.
2. Вперше в процесі консолідації заготовки досліджено зміну в об'ємі розподілу структурних параметрів порошкового тіла: накопичення

пошкодженості, деформаційного зміцнення частинок порошку, накопиченої анізотропії пористого тіла.

3. Вперше використано багатомасштабне моделювання для оцінки внеску основних фізичних та структурних характеристик порошкових заготовок на зусилля пресування.

4. Одержано нові кінематичні співвідношення для зростання розмірів контактів на початковій стадії спікання і сформульовано умови руйнування контактів при спіканні з кінематичними обмеженнями.

5. Запропоновано нову модель ущільнення порошків на фінальній стадії дифузійного спікання, яка враховує вплив еволюції середніх розмірів зерен та пор на кінетику консолідації. Цим методом дано пояснення ефекту зміни напрямку орієнтації пор при спіканні під тиском в залежності від співвідношення розмірів зерен та пор. Запропоновано нове пояснення значного уповільнення швидкості спікання композитів зі збільшенням концентрації жорстких включень.

6. Запропоновано нові підходи щодо спікання функціонально-градієнтних композитів, які дозволяють знаходити оптимальну початкову форму заготовок та зберігати необхідну задану структуру виробу в процесі термообробки.

Зауваження по дисертації та автореферату

1. При розрахунках напружень пресування для репрезентативних комірок (розділи 2 та 3 дисертації) використовувались жорстко-пластичні моделі деформування частинок порошку, що не враховують внесок пружної складової в розподіл напружень і деформацій. Відомо, що врахування пружного деформування впливає на вигляд поверхні текучості і оцінку зусилля пресування.

2. При моделюванні іскро-плазмового спікання металічних порошків (розділ 3) не враховано неоднорідність розподілу температури в заготовці. Разом з тим, нагрів за допомогою електричного струму може викликати значні градієнти температури в об'ємі заготовки.

3. З дисертації і автореферату не зрозуміло, чи використовувались в роботі комерційні пакети програм.

4. В авторефераті наукова новизна та висновки практично повторюють одне одного. Крім того, є помилки в їх нумерації (див. пункт 3 новизни і пункт 4 висновків).

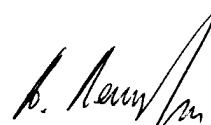
Ідентичність автореферату змісту дисертації

Автореферат в повній мірі відповідає змісту дисертації.

Загальний висновок по дисертації

В цілому, дисертаційна робота Андрія Леонідовича Максименка «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, є завершеною науковою працею. Робота загалом за своїм обсягом, актуальністю, науковим рівнем, новизною, а також достовірністю і практичною цінністю отриманих результатів повністю відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. Зміст дисертації відповідає формулі та напряму досліджень згідно паспорта спеціальності 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали, а її автор, **Максименко Андрій Леонідович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, завідувач відділу
фізико-механічних досліджень та
нанотестування матеріалів Інституту
надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ



О. О. Лещук

Підпис Лещука Олександра Олександровича засвідчує
В. о. вченого секретаря Інституту надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАНУ, к.т.н.



В. В. Смоквина