

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу А.Л.Максименка
**« Наукові засади прогнозування консолідації порошкових матеріалів на
основі аналізу багаторівневої взаємодії елементів їх структури»**
представленої на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за
спеціальністю 05.16.06- порошкова металургія та композиційні матеріали.

Дисертаційна робота А.Л. Максименка присвячена дослідженню методів досягнення високих службових характеристик порошкових та керамічних виробів за рахунок багатомасштабного моделювання зв'язку між методами консолідації та одержаною внутрішньою структурою виробів.

Актуальність. Значне збільшення кількості матеріалів порошкового походження викликало необхідність розвитку нових технологій консолідації порошків. Такі новітні матеріали як функціонально-градієнтні композити чи наноструктурні матеріали відрізняються чутливістю їх службових характеристик до способу одержання. Внаслідок цього, широкого розповсюдження набули підходи, що використовують складні кінематичні схеми для рухомих елементів прес-обладнання, різноманітні комбінації режимів прикладання тиску та нагріву. Можливості гнучкого вибору технологічних режимів консолідації порошків можуть призводити як до суттєвого покращення, так і до погіршення якості виробів у випадку невдалого застосування технологій. В кінцевому підсумку, успіх обраного методу консолідації залежить від тих структурних характеристик матеріалу, які вдається досягти під час ущільнення порошків. Типовими структурними дефектами при консолідації порошків є залишкова пористість, розшарувальні тріщини, аномально великі зерна в полікристалічному матеріалі, порушення розподілу фаз в композитах. Комп'ютерне моделювання використовується для оптимізації багатьох технологічних процесів порошкової металургії та виробництва кераміки. Зараз на часі поява таких методів комп'ютерного моделювання консолідації порошків, які б відображали не тільки особливості технологічного процесу, але й взаємозв'язок технологічних підходів та

характерних рис одержаної структури матеріалу. Саме такий новий багато масштабний метод комп'ютерного моделювання запропоновано в дисертаційній роботі.

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

У вступі обґрунтовані 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.

В першому розділі наведено аналітичний огляд ефектів впливу структурних параметрів порошкових тіл на особливості їх ущільнення в процесах пресування та спікання. Експериментальні дані та теоретичні результати різних авторів вказують на те, що хоча найбільший вплив на кінетику консолідації порошків має пористість, інші структурні параметри порошкового тіла також можуть суттєво змінювати перебіг процесу ущільнення. Як у випадку пресування так і у випадку спікання кінетика ущільнення і одержана структура матеріалу залежать від форми пор, розподілу пор і частинок за розмірами, наявності або відсутності площинних контактних дефектів між частинками порошку. Показано, що при розгляді пресування металічних та керамічних порошків експериментальні дані вказують на необхідність врахування деформаційного зміцнення частинок порошку, умов тертя між частинками, розвитку накопиченої анізотропії властивостей пористої заготовки, що може викликатись як нерівноосною формою пор так і анізотропією розташування та розмірів міжчастинкових контактів. Підкреслено, що у випадку спікання крім перерахованих вище параметрів суттєву роль відіграє також рекристалізація матеріалу, що тісно пов'язана з ущільненням спільними рушійними силами зменшення внутрішніх поверхонь.

Другий розділ присвячено чисельним оцінкам впливу різноманітних структурних особливостей порошкових тіл на ущільнення порошків при пресуванні. Головним методом аналізу є дослідження впливу цих особливостей на зусилля пресування для різних схем навантаження. Систематичний аналіз пластичного деформування порошкових тіл дозволив в аналітичному вигляді оцінити вплив форми пор на зусилля пресування для різних схем навантаження шляхом побудови макроскопічної поверхні текучості порошкового матеріалу. У випадку агломерованих порошків проведено теоретичний аналіз можливості досягнення однорідної внутрішньої структури заготовки за рахунок вирівнювання розмірів великих міжагломератних та менших за розмірами внутрішньоагломератних пор. При дослідженні деформаційного зміцнення частинок порошку в процесі пресуванні запропоновано оптимальну схему знаходження середніх значень границі текучості матеріалу частинок порошку і спосіб обчислення розподілу деформаційного зміцнення в об'ємі заготовки.

В третьому розділі сформульовано метод прямого багатомасштабного моделювання, що дозволило одночасно враховувати вплив і відслідковувати еволюцію декількох структурних параметрів при пресуванні порошків. На основі застосування цього методу досліджено закономірності розвитку макроскопічної неоднорідності механічних властивостей заготовок при пресуванні в жорстких прес-формах. Зокрема запропоновано моделі та алгоритми для знаходження розподілу пористості, показників анізотропії матеріалу, накопиченої пошкодженості. Новий підхід апробовано на тестових задачах Європейської асоціації порошкової металургії. Порівняння експериментальних та теоретичних даних вказує на ефективність запропонованого підходу. Застосування багатомасштабного моделювання до задач іскро-плазмового спікання та проведені експерименти дозволили дослідити головні закономірності поведінки металічних порошків при ущільненні цим новим методом гарячого пресування. Зокрема, на відміну від інших моделей гарячого пресування, для порошку міді встановлено важливість врахування деформаційного зміцнення в процесі ущільнення.

Четвертий та п'ятий розділи дисертації присвячені дослідженню спікання. В четвертому розділі аналізується початкова стадія спікання, характерною особливістю якої є можливість вирізняти окремі контакти між частинками. В аналітичному вигляді одержані співвідношення кінетики зростання перешийків та зближення частинок для різних типів їх пакування, комбінації різних механізмів дифузійного масопереносу та умов навантаження. Зокрема, досліджено ефекту комбінованого впливу зернограничної, об'ємної та поверхневої дифузії на розвиток контактів між частинками. Одержано вирази для ефективних коефіцієнтів дифузії які встановлюють зв'язок між ефективністю різних напрямків масопереносу. Показано, що такі коефіцієнти відрізняються при моделюванні зростання міжчастинкових контактів та моделюванні усадки заготовки. Досліджено вплив зовнішнього як стискуючого так і розтягуючого навантаження на кінетику спікання і знайдено інтервал значень навантаження для якого швидкість ущільнення та зростання перешийків є лінійною функцією значень цього навантаження. Ці результати застосовано до оцінки накопичення пошкоджень при спіканні з кінематичними обмеженнями. Одержані і порівняні з експериментальними даними результати моделювання накопичення пошкоджень при спіканні композитів з жорсткими краплями та двохшарових композитів. Одержано оцінки рівнів зовнішнього тиску, які дозволяють уникнути появи пошкоджень при спіканні.

П'ятий розділ присвячено аналізу впливу структурних параметрів, розробці моделей і дослідженню фінальної стадії спікання. Нове варіаційне формулювання моделі дифузійного спікання дозволило одночасний розгляд ущільнення та рекристалізації матеріалу. Знайдено закономірності кінетики спікання пористих матеріалів з початково нерівноосною формою пор та зерен. Встановлено також, що в залежності від відносних розмірів пор та зерен змінюється механізм масопереносу в пори при спіканні під тиском: великі пори ущільнюються ковзанням зерен а малі - дифузійним масо переносом. Побудована модель дозволила дослідити спікання виробів складної форми. Зокрема, у випадку функціонально-градієнтних композитів розроблено підхід, що дозволяє знаходити початкову форму заготовки що забезпечує необхідну

кінцеву форму виробу. Ці результати застосовані до розробки технології виготовлення функціонально-градієнтних ендопротезів. Для випадку спікання функціонально-градієнтних твердих сплавів знайдено оптимальний режим термообробки, що дозволяє уникнути вирівнювання розподілу металічної зв'язки в матеріалі при спіканні. Застосування методу прямого багато масштабного моделювання до задач спікання композитів з жорсткими вкрапленнями дозволило пояснити ефект значного впливу на швидкість спікання навіть невеликої концентрації жорстких вкраплень. Ефект викликаний зменшенням лапласівського тиску внаслідок зростання розмірів пор.

Загальні висновки повністю відображають результати дисертації. Структура роботи по складу та послідовності розділів логічна та відповідає необхідним вимогам до оформлення.

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.

Наукова новизна отриманих результатів. При виконанні роботи автором отримані результати, які складають суттєву наукову новизну:

Запропоновано і обґрунтовано новий метод моделювання консолідації порошоків – метод прямого багатомасштабного моделювання який, на відміну від більшості відомих, дозволяє контролювати властивості порошкової заготовки, як на макроскопічному рівні, так і на структурному рівні окремих частинок порошку;

На підставі запропонованого методу та одержаних результатів з кінетики контактоутворення при спіканні сформульовано концепцію накопичення пошкоджень, які формуються за певних умов на початковій стадії спікання композитів, з'ясовано роль впливу зовнішнього тиску на запобігання формування макроскопічних дефектів, що обумовлюють руйнування або небажане спотворення форми деталі;

Автором сформульовано власну версію критерію утворення дефектів на мезорівні, яка базується на факті існування одnobічних контактів; її застосування разом із методом прямого багато масштабного моделювання дозволило отримати новий розв'язок однієї із важливіших задач порошкової металургії - передбачити зародження та розвиток дефектів під час процесів пресування порошків із подальшим їх запобіганням шляхом вдосконалення режиму консолідації; наведений метод застосовано до моделювання пресування східчастих виробів із використанням багатоходових пресів.

Багатомасштабне моделювання було використано для нових оцінок внеску основних фізичних та структурних характеристик порошкового матеріалу у його макроскопічні властивості; зокрема, розглянуто деформаційне зміцнення порошків, форма пор, початкова і наведена анізотропія, наявність недосконалих контактів та тертя між частинками порошків у процесах їх холодного ущільнення.

На підставі результатів комп'ютерного моделювання автором одержані в аналітичному вигляді рівняння швидкості контактоутворення при спіканні як функції радіусу контакту, зовнішнього навантаження, коефіцієнтів зернограничної, об'ємної та поверхневої дифузії для різних типів пакувань частинок.

Автором запропоновано нову варіаційну модель ущільнення при дифузійному спіканні з врахуванням росту зерен; отримані результати було покладено в основу пояснення ефекту Бордье, який полягає у наявності чутливості напряму зміни форми пор до їх розмірів та у пояснення ефекту значного уповільнення спікання керамічних композитів з твердими інертними включеннями.

На основі розроблених нових моделей для спікання функціонально-градієнтних композитів здійснено оптимізацію початкової форми заготовок для спікання керамічних голівок ендопротезів та запропоновані температурні режими, які дозволяють зберігати розподіл фаз при спіканні твердосплавних градієнтних покриттів в різноманітних технічних застосуваннях.

Значення отриманих результатів для науки.

Використання багато масштабного моделювання вперше дозволяє ефективно аналізувати взаємовплив еволюції та неоднорідності структури порошкового тіла на поведінку порошкової заготовки в процесі консолідації та зворотній вплив умов консолідації на структуру матеріалу. Запропонований підхід є новим напрямком в моделюванні процесів порошкової металургії та керамічного виробництва який дозволив розв'язати ряд важливих задач пов'язаних насамперед з оцінкою накопичення пошкоджень при пресуванні та спіканні. Оскільки багатомасштабне моделювання запропоноване в роботі базується на осередненні результатів моделювання на рівні частинок порошку, важливими є також побудовані в роботі моделі пресування та спікання на структурному рівні пакувань частинок. Одержані закономірності консолідації порошків мають важливе значення як для оптимізації існуючих технологій, так і для створення нових процесів пресування та спікання.

Практична значимість отриманих результатів. Створені моделі та алгоритми дозволили встановити зв'язок накопичення пошкоджень при пресуванні ступеневих виробів зі схемою пресування та обґрунтувати методику вибору діаграм деформування, які забезпечують запобігання руйнування. У випадку спікання запропонований підхід дозволяє знайти оптимальний режим термообробки та, можливого застосування зовнішнього тиску для запобігання дефектоутворення та викривлення форми деталі.

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 твердосплавного інструменту в Католицькому університеті м.Льовен (Бельгія)

Результати досліджень автора включені в університетський курс лекцій з теорії спікання в Лабораторії порошкових технологій, Державний університет Сан-Дієго (США).

Зауваження по дисертації та автореферату

1. Відомо, що на початковій стадії спікання важливе значення відіграє не тільки дифузійний масоперенос, але й дислокаційний. Про це свідчить поява «розеток спікання» та аномально висока активність спікання при формуванні міжчастинкових контактів на цій стадії процесу. В дисертаційній роботі в четвертому розділі, присвяченому вивченню початкової стадії спікання, враховуються лише дифузійні механізми зростання розмірів контактів.
2. При моделюванні накопичення пошкодженості при спіканні композитів в четвертому розділі вважається, що досягнення певного рівня значення параметру пошкодженості призводить до появи макроскопічних тріщин в матеріалі. Видається ймовірним, що вже після їх утворення, макроскопічні тріщини можуть «заліковуватись» в умовах спікання. Це явище в дисертації не досліджується.
3. В моделі консолідації порошків іскро-плазмовим спіканням (третій розділ дисертації) дисертант нехтує впливом ефектів, пов'язаних з протіканням електричного струму, на кінетику формування контакту. Відомо, що електричний струм впливає на швидкість зростання контактів при спіканні як внаслідок появи термомеханічних напружень в контактній зоні між частинками, так і внаслідок дії, так званого, «електронного вітру» який впливає на рухомість дислокацій.

Наведені зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертації, яка за вагомістю та новизною результатів, обсягом розв'язаних задач та їх практичним спрямуванням може розглядатись як повноцінне наукове дослідження.

Ідентичність автореферату змісту дисертації

Автореферат в достатній мірі відповідає змісту дисертації

Загальний висновок по дисертації

В цілому, дисертаційна робота А.Л.Максименка «Наукові засади прогнозування консолідації порошкових матеріалів на основі аналізу багаторівневої взаємодії елементів їх структури» є новим напрямком в моделюванні технологічних процесів порошкової металургії та кераміки, вирішує актуальну науково-практичну задачу, має суттєві прикладні результати і є завершеною науковою працею. Дисертація виконана у відповідності до вимог пп.9,11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» МОН України затвердженого постановою КМУ №567 від 24.07.2013р. Зміст дисертації відповідає формулі та напрямкам досліджень паспорту спеціальності.

Тому автор дисертації МАКСИМЕНКО Андрій Леонідович заслуговує на присудження йому наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06- порошкова металургія та композиційні матеріали

Доктор фіз.-мат. наук,
проф. кафедри фізики кристалів Харківського
Національного Університету ім. В.Н. Каразіна



Ю.І. Бойко

