

Вивчення закономірності контактоутворення в металевих порошкових матеріалах за результатами прецизійних механічних випробувань

Ю. М. Подрезов, В. А. Назаренко, Я. І. Євич,
Н. М. Марченко

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: nat-mar@ukr.net

Вивчено закономірності контактоутворення в порошковому титані на різних технологічних етапах його отримання за результатами випробувань на чотириточковий вигин. Проаналізовано вплив технологічних та структурних параметрів на еволюцію контакту. Показано, що процес контактоутворення в попередньо ущільнених пресовках здійснюється в дві стадії: на першій відбувається зарощування площинної пори, при цьому контакт росте самоподібно за механізмом об'ємної дифузії, на другій — об'ємне спікання. На цій стадії високопоруваті матеріали збільшують відносний розмір контакту значно більше, ніж більш щільні.

Ключові слова: чотириточковий вигин, структура, контактоутворення, поруватість, температура спікання.

Фізичні уявлення про закономірності формування контакту під дією капілярних сил є єдиними для спікання порошків під дією температури як без попереднього ущільнення, так і з ним. Перший випадок досліджений в багатьох класичних роботах щодо порошкової металургії, зокрема в [1—4]. В цих моделях розглядається перерозподіл речовини під дією капілярних сил за різноманітними механізмами повзучості. Відповідно, в залежності від дислокаційно-дифузійного механізму переносу маси в полі капілярної сили відбувається зміна розміру контактної поверхні за різними законами від часу або температури спікання. Основна модель, яка застосовується для аналізу формозмін, зазвичай являє собою дві сферичні порошинки, спікання яких веде до зміни геометричних параметрів приконтактної зони. Експерименти для перевірки цієї моделі виконуються на сферичному порошку або на дротиках циліндричної форми. В більшості випадків вивчається профіль спечених ділянок [4] або площа поверхні руйнування при дослідженні малопластичних металевих порошків [5, 6].

Дослідження структуроутворення контакту ущільненого пластичного металевого порошкового матеріалу мають деякі відмінності. На стадії компактування під дією зовнішнього прикладеного напруження (зусилля пресування) відбувається формозміна вихідних порошків з утворенням площинної пори. Якщо для аналізу формоутворення використовувати звичну модель двох сферичних порошків, то зміну форми та перерозподіл матеріалу при пресуванні можна оцінити, враховуючи зв'язок між параметрами ущільнення та деформації сферичної порошинки.

Розглянемо найпростіший випадок, коли дві порошинки діаметром l ущільнюються в прямокутній прес-формі, що в перерізі має квадрат зі

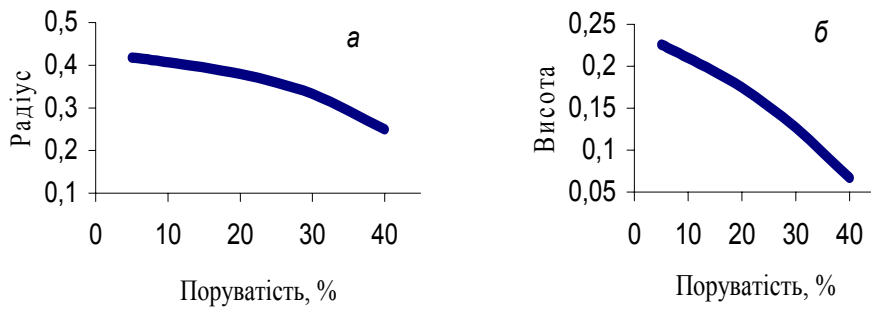


Рис. 1. Залежності радіуса сегмента кулі (а) та висоти (б) від поруватості.

стороною 1. В початковий момент поруватість системи, обмеженої прес-формою, можна визначити як $(1 - 4\pi/3 \cdot 8) \cdot 100\% = 48\%$. Враховуючи незмінність поперечного перерізу прес-форми під час усадки, зв'язок між зменшенням поруватості та розміру комірки може бути виражений як $\theta = \frac{(1-h) - 4\pi/3 \cdot 8}{1-h}$. Це рівняння дозволяє визначити зв'язок між висотою

сегмента кулі, об'єм якого перерозподіляється в порожнину комірки, та поруватістю ущільненого зразка. З урахуванням зв'язку між висотою сегмента, його радіусом та площею перерізу достатньо визначити площу контактуючих поверхонь та залежності цих параметрів від поруватості. Такі залежності наведені на рис. 1.

При стисканні ці площини щільно притискаються одна до одної та передають навантаження, що відповідає зусиллю пресування. При розвантаженні контактоутворення відбувається лише в найбільш сприятливих ділянках матеріалу [7], а більша частина площинних пор під дією пружних сил віддаляється одна від одної на певну відстань h , утворюючи щілинну поруватість. Такі щілини добре розрізняються методами оптичної та скануючої мікроскопії (рис. 2). Розмір щілини є важливим параметром, оскільки щілина формує початковий радіус капіляра R ($h = 2R$). Він залежить від зусилля пресування $\sigma_{пр}$, модуля пружності матеріалу E та початкового розміру порошинки d :

$$h = \sigma_{пр} d / E. \quad (1)$$

Таким чином, на початковий момент спікання структурний елемент, що приймає участь у формуванні контакту, має специфічний вигляд, який визначається розглянутими особливостями ущільнення. Розміри структурних елементів можна оцінити, враховуючи зазначені геометричні міркування. Ці особливості морфології та структури контактної зони визначають умови формування контакту при спіканні. Процес контактоутворення складається з залі-

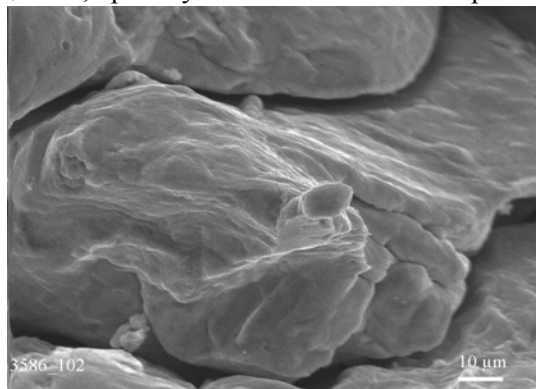


Рис. 2. Поверхня міжчастинкового руйнування пресуванням порошкового титану фракції -0315...+02.

ковування площинної пори та наступного об'ємного спікання. При цьому необхідно взяти до уваги, що процеси дифузії, які визначають спікання ущільнених порошків, відбуваються в деформованому тілі за наявності великої кількості дефектів дислокаційної природи.

Експериментальне дослідження еволюції контакту в цьому випадку значно складніше, ніж у разі недеформованих порошків, через малий розмір структурних елементів, що визначають процес структуроутворення, і складну форму реальних порошинок. Це утруднює, а у випадку порошків складної форми унеможлиблює вивчення профілю контакту. Тому для дослідження контактоутворення використано принципи фізико-механічного аналізу, що базуються на зв'язку між розміром контакту та відносною електропровідністю або відносним модулем пружності порошкового тіла на різних стадіях спікання.

Зв'язок електропровідності і розміру контактної поверхні встановлено в роботі [8]. Введено поняття коефіцієнта зв'язності

$$Z = \frac{2S_v(SS)}{2S_v(SS) + S_v(SP)}, \quad (2)$$

де $S_v(SS)$ — площа поверхні контакту метал—метал в одиничному об'ємі (досконалий контакт); $S_v(SP)$ — площа поверхні контакту метал—пора в одиничному об'ємі.

Фактично коефіцієнт зв'язності встановлює співвідношення між контактною поверхнею частинок і їхньою початковою поверхнею. В роботі [7] експериментально показано, що існує пряма залежність між коефіцієнтом зв'язності і відносною електропровідністю поруватого тіла:

$$Z = \lambda / \lambda_0. \quad (3)$$

Цей вираз є відправним для побудови наступної напівемпіричної моделі. Позначимо πx^2 — площу контакту між сферичними частинками радіуса a , що утворився в результаті спікання; n_v — число частинок в одиничному об'ємі; m_v — загальне число контактів в одиничному об'ємі. Оскільки кожен контакт між частинками усуває дві поверхні матеріал—пора, можна записати

$$Z = \frac{2(m_v \pi x^2)}{2(m_v \pi x^2) + (n_v 4\pi a^2 - 2m_v \pi x^2)}, \quad (4)$$

або

$$Z = \frac{2(m_v / n_v) \pi x^2}{4\pi a^2}. \quad (5)$$

Величину $2m_v / n_v$ можна визначити як координаційне число частинок N_c в тривимірному просторі:

$$N_c = 2m_v / n_v. \quad (6)$$

Тоді

$$Z = (N_c / 4)(x / a)^2. \quad (7)$$

Об'єднавши (3) і (7), отримаємо

$$\lambda / \lambda_0 = (N_c / 4)(x / a)^2. \quad (8)$$

Рівняння (8) достатньо добре узгоджується з експериментальними даними, отриманими на спечених сферичних кульках, для яких геометричні розміри x , a та координаційне число N встановлюються з металографічних досліджень.

Слід зазначити, що в порошкових матеріалах конструкційного призначення якість контакту визначає здатність пористого тіла витримувати зовнішні навантаження. Тому при аналізі закономірностей контактоутворення логічно використовувати механічні характеристики поруватого тіла. Якщо електроопір чи електропровідність асоціюються із здатністю поруватого тіла передавати електричний сигнал, то у випадку механічного навантаження така ж асоціація виникає у зв'язку з можливістю поруватого тіла передавати навантаження або пружну хвилю. В цьому сенсі серед механічних характеристик найбільш вживаним є модуль пружності. На відміну від границь міцності та плинності, ця характеристика не є чутливою до структури твердої фази, але змінюється в широких межах в залежності від поруватості та архітекtonіки порового простору. В моделі Жерно [9] на основі експериментальних даних відносний модуль визначається рівнянням (8), яке уточнюється додатковим множником $1 - \theta$:

$$E / E_0 = (N_c / 4)(x / a)^2 (1 - \theta). \quad (9)$$

Автор не пояснює фізичні причини цього уточнення, але виходить з того, що відносне значення модуля пружності при даній поруватості повинне бути нижче відносного значення електроопору. Співставлення рівнянь (8) і (9) показало, що при малих та середніх поруватостях ця різниця нівелюється. Таким чином, зміна відносного модуля або відносного електроопору характеризує зміну площі контакту в залежності від умов контактоутворення.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей зміни фізико-механічних властивостей пресовок з титанового порошку при спіканні і використання отриманих результатів для аналізу контактоутворення залежно від температури спікання, поруватості і розміру частинок. За питомою електропровідністю визначали якість електричного контакту, за відносним модулем пружності — якість механічного контакту. Для прикладу в табл. 1 представлено узагальнювальні дані для фракції $-05...+0315$. Проведено порівняльний аналіз процесу контактоутворення пресовок, що знаходяться в різних структурних станах.

Аналогічні таблиці отримано для інших досліджених фракцій. Аналіз результатів, наведених у табл. 1, показав, що абсолютні значення питомого електроопору і механічних властивостей змінюються в широких межах і залежать від структурного стану матеріалу і температури спікання. Отримані результати дозволяють проаналізувати закономірності контактоутворення за зміною величини електричних і механічних характеристик залежно від структурних і технологічних параметрів.

В попередніх роботах [10, 11] нами запропоновано оригінальну методику порівняльного аналізу процесу контактоутворення за результатами визначення фізико-механічних властивостей, коли ступінь досконалості контакту виражається у відсотках, які характеризують зростання вимірюваної характеристики за даних умов спікання у порівнянні із повним діапазоном її зміни від неспеченого до ідеально спеченого стану.

Для випадку електропровідності цей коефіцієнт можна визначити із співвідношення

$$K_\lambda = [(\lambda_{\text{изм}} - \lambda_{\text{несп}}) / (\lambda_{\text{теор}} - \lambda_{\text{несп}})] \cdot 100\%. \quad (10)$$

Т а б л и ц я 1. Властивості зразків, отриманих спіканням титанового порошку фракції –05...+0315

Порува- тість θ , %	$\rho_p, 10^8$ Ом·м	E , ГПа	σ_{001} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_p , МПа	ε , %
20 °C						
5	642,4	10,3	10,4	21,5	31,9	0,48
10	961,8	6,1	4,75	16,5	20,4	0,47
20	1272,1	2,3	1,79	5,95	7,14	0,42
30	3099,0	0,91	0,61	2,36	2,83	0,38
40	8175,3	0,24	0,16	0,36	0,47	0,25
300 °C						
5	493,8	10,2	10,6	21,1	31,5	0,48
10	687,1	6,2	4,9	16,9	19,5	0,43
20	960,0	2,4	1,8	6,1	7,3	0,40
30	2252,1	0,9	0,65	2,4	2,9	0,38
40	5450,1	0,2	0,2	0,4	0,55	0,25
500 °C						
5	143,1	11,3	16,0	33,0	38,0	0,44
10	244,1	6,4	9,0	20,7	23,7	0,41
20	446,7	2,6	3,6	8,7	8,9	0,23
30	864,7	0,5	0,6	—	1,4	0,13
40	2900,1	0,15	0,25	—	0,4	0,07
700 °C						
5	—	—	—	—	—	—
10	88,81	36	32,5	79,5	94	0,565
20	164,83	7,3	9,2	20,68	22,12	0,312
30	328,26	2,1	3,65	6,65	7,4	0,21
40	950	0,255	0,53	1	2,9	0,505
1000 °C						
5	—	—	—	—	—	—
10	54,23	74,6	147	262,5	397	4
20	79,46	42,6	73	132	203	2,65
30	132	25,1	35	61,1	98	1,8
40	182,26	12,1	17	37	48	0,6
1200 °C						
5	49,9	—	155,2	311,9	351,5	8,9
10	53,6	86,5	130,7	263,5	304	3,8
20	70,7	40,8	83,5	147,5	235,0	3,3
30	91,8	34,0	62,0	113,5	179,0	2,4
40	135,1	18,0	32,5	61,0	86,0	1,0

Для визначення якості механічного контакту це рівняння має вигляд

$$K_E = [(E_{\text{вим}} - E_{\text{несп}})/(E_{\text{теор}} - E_{\text{несп}})] \cdot 100\%. \quad (11)$$

Якість фізичного контакту визначається з порівняльного аналізу тріщиностійкості, а для більш пластичних — з порівняння деформації до руйнування e_p за формулою

$$K_e = [(e_p^{\text{вим}} - e_p^{\text{несп}}) / (e_p^{\text{теор}} - e_p^{\text{несп}})] \cdot 100\%. \quad (12)$$

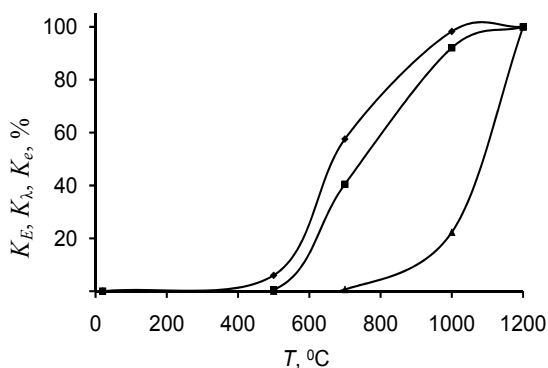
Такий підхід є плідним, оскільки дозволяє в однакових відносних одиницях порівнювати результати аналізу процесу контактоутворення, що отримані за даними вимірювання різних фізичних характеристик. Для титанового порошку фракції $-05...+0315$ результати цього порівняльного аналізу наведені на рис. 3. Видно, що електричний контакт формується при температурі приблизно на 50°C нижче, ніж механічний. На цьому ж рисунку наведено дані про формування фізичного контакту, коефіцієнт K_e розрахований згідно з рівняннями (11) і (12). Видно, що фізичний контакт формується при значно вищих температурах, ніж електричний і механічний.

Іншою важливою перевагою такого аналізу є можливість порівнювати умови спікання різних структурних станів, особливо коли повний діапазон змін властивостей від неспеченого до спеченого станів суттєво відрізняється. Наприклад, з табл. 1 випливає, що при поруватості 10% електроопір змінюється в 18 разів, при 40% — в 60 разів, модуль пружності, відповідно, при 10% — в 15 разів, при 40% — в 75 разів. Зрозуміло, що в цьому випадку вплив поруватості на формування контакту доцільно вивчати у відносних одиницях. Зміна якості електричного контакту для матеріалів фракції $-05...+0315$ для різної поруватості представлена на рис. 4. Видно, що в щільних зразках процес контактоутворення відбувається швидше, ніж у поруватих.

Визнаючи безумовні переваги такого аналізу, слід зазначити, що при дослідженні окремих стадій спікання більш доцільно проводити порівняння відносних величин, як то випливає з рівнянь (8) та (9). При дослідженні кінцевих етапів спікання доцільно порівнювати результати експерименту з теоретичним значенням, що відповідає ідеальному контакту. В цьому випадку коефіцієнт недосконалісті для електропровідності визначається як $K_\gamma^{\text{сп}} = E_{\text{теор}} / E_{\text{вим}}$, а для модуля пружності — $K_E^{\text{сп}} = E_{\text{теор}} / E_{\text{вим}}$.

Зазначимо, що коефіцієнт $K_\lambda^{\text{с}}$ використовується в моделі В. В. Скорохода та С. М. Солоніна для оцінки якості спікання [12]. На початкових стадіях доцільно визначати коефіцієнт зростання контакту із співставлення виміряного значення та значення, що характеризує неспечений стан.

Рис. 3. Залежності коефіцієнтів K_λ (◆), K_E (■) і K_e (▲) від температури спікання для зразків, виготовлених з порошку фракції $-05...+0315$ з поруватістю 10%.



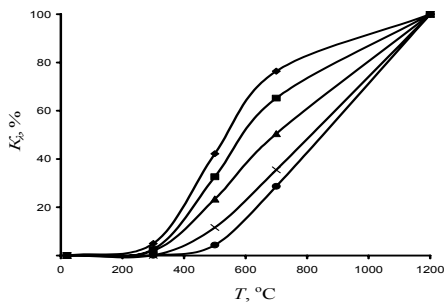


Рис. 4. Залежності коефіцієнтів K_λ від температури спікання для зразків фракції $-05...+0315$ з різною поруватістю (%): \blacklozenge — 5; \blacksquare — 10; \blacktriangle — 20; \times — 30; \bullet — 40.

Т а б л и ц я 2. Розраховані коефіцієнти K_λ^{HC} та K_E^{HC} для титанового порошку фракції $-05...+0315$ з поруватістю 10% за різних температур

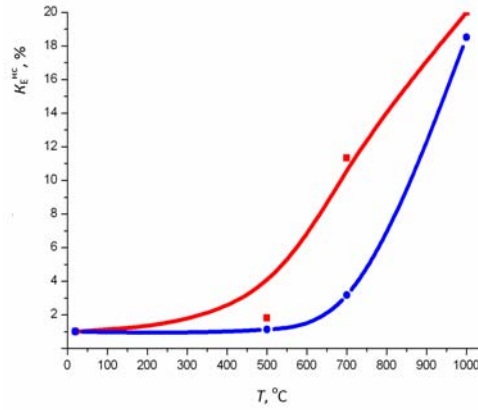
$T, ^\circ\text{C}$	K_λ^{HC}	K_E^{HC}
20	1	1
300	1,3	1
500	4,5	1,2
700	12	6

Коефіцієнт зростання контакту для електропровідності визначається як $K_\lambda^{\text{HC}} = \lambda_{\text{вим}} / \lambda_{\text{несп}}$, а для модуля пружності $K_\lambda^{\text{HC}} = \lambda_{\text{вим}} / \lambda_{\text{несп}}$. Згідно з рівняннями (8) та (9), зміна цих коефіцієнтів дозволяє розраховувати зростання площі контакту у порівнянні з вихідною площею контакту неспеченого матеріалу. Співставлення цих коефіцієнтів на початкових стадіях спікання дозволяє проаналізувати закономірності еволюції контакту.

Порівнюємо зростання коефіцієнтів K_λ^{HC} та K_E^{HC} з температурою для титанового порошку фракції $-05...+0315$ з поруватістю 10%. Для цього експериментальні дані, що наведені в табл. 1, пораховано відповідним чином для визначення коефіцієнтів K_λ^{HC} та K_E^{HC} . Результати розрахунків наведені в табл. 2.

Аналіз результатів показав, що при низьких температурах спікання коефіцієнт K_λ^{HC} значно перевершує параметр K_E^{HC} . Співвідношення між цими характеристиками, визначене з рівнянь (8) та (9), при цих температурах не виконується. Надто швидке зростання параметра K_λ^{HC} можна пояснити тим, що отримані значення провідності визначаються не тільки провідністю ґратки, але і ефектом електричного пробивання, який значно підвищується за рахунок вакуумного травлення. В цьому випадку електрони можуть переноситись через щілину, імітуючи зростання контакту. Згадані електричні ефекти ніяким чином не впливають на параметр K_E^{HC} , зміни якого з температурою спікання визначаються лише збільшенням кількості металевих зв'язків у ґратці, тобто збільшенням розміру контакту. Порівняння чутливості цих характеристик до температури спікання вказує на те, що додаткові електричні ефекти найбільш суттєві при температурах 300 та 500 °C, коли площа контактів достатньо мала і додаткова електрична провідність перевищує або є порівняною з провідністю по металевій ґратці. При температурі спікання 700 °C значення коефіцієнтів K_λ^{HC} та K_E^{HC} стають співставними, а співвідношення між ними можна визначити з рівнянь (8) та (9). Таким чином, при низьких температурах процес контактоутворення доцільно аналізувати через зміни модуля пружності. При 700 °C однаково коректно аналізувати зміни електропровідності та модуля пружності.

Рис. 5. Зміна параметра K_E^{nc} від температури спікання для фракцій $-02...+01$ (■) та $-05...+0315$ (●).



Вплив розміру порошку на процес спікання проілюстровано на графіку зміни параметра K_E^{nc} від температури спікання (рис. 5), визначеного за результатами вимірювання модуля пружності зразків, виготовлених з порошку фракцій $-02...+01$ та $-05...+0315$ після спікання за різних температур. З наведених даних видно, що при температурах 500 та 700 °C контакт, який сформований більш мілкими порошинками, зростає значно швидше. З урахуванням рівняння (1) цей ефект можна пояснити меншим розміром щільності i , як наслідок, меншим капілярним радіусом.

Цікаві особливості виявляються при аналізі впливу поруватості на коефіцієнти K_λ^{nc} і K_E^{nc} та K_λ^{cp} і K_E^{cp} , що визначені для зразків титанового порошку з поруватістю 10, 20, 30 та 40%, які спечені при температурі 700 °C. Як вже відзначалось, при цій температурі використання обох характеристик однаково коректно. Результати досліджень наведені на рис. 6.

Як видно на наведених даних, відносна швидкість зростання контакту на початкових стадіях не залежить від поруватості. Цей результат в однаковій мірі підтверджується експериментами з вимірювання електропровідності та модуля пружності. Тобто для всіх поруватостей контакти збільшуються з однаковою швидкістю самоподібно початковому розміру контакту. Такі закономірності зростання контакту можливі за умови еволюції контакту, яка контролюється дією механізму об'ємної дифузії.

В цьому випадку для аналізу швидкості росту контакту можна скористатися експериментальними результатами дослідження процесу повзучості титану технічної чистоти, отриманими в роботі [13], де зв'язок між напругою, температурою і швидкістю деформації представлений у вигляді графіків (рис. 7).

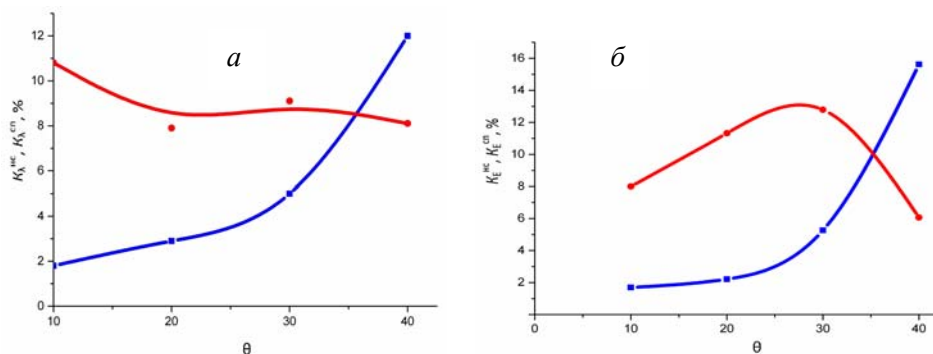


Рис. 6. Залежності коефіцієнтів K_λ^{nc} (■) і K_λ^{cp} (●) (а) та K_E^{nc} (■) і K_E^{cp} (●) (б) від поруватості.

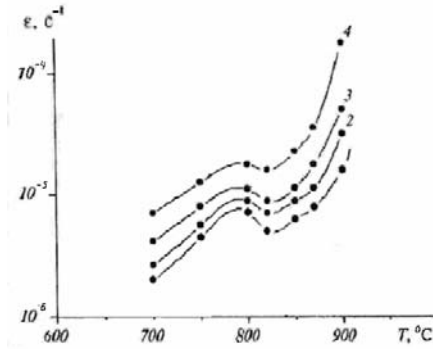


Рис. 7. Зміна швидкості сталої повзучості в області $\alpha \rightarrow \beta$ -перетворення при нарузі 0,5 (1), 0,9 (2), 1,2 (3) і 2,5 МПа (4) [13].

Величина капілярних сил, що діють в області міжчастинкових контактів титанової пресовки, розраховується з використанням рівняння

$$P = \frac{2\alpha}{R}, \quad (13)$$

де P — капілярна сила; α — поверхнева енергія; R — радіус кривизни в області контакту. Швидкість ущільнення прямо пропорційна величині цієї сили.

Відомо, що поверхнева енергія титану при 20 °С $\gamma = 1,24$ Дж/м² [14]. Радіус кривизни в області контакту оцінюємо розміром щілини між частинками порошку. За результатами фрактографічного аналізу (див. рис. 1) видно, що величина міжчастинкових щілин в пресовках порошкового титану фракції -0315...+02 змінюється в діапазоні 0—2,5 мкм. Це співпадає з розрахунком за рівнянням (1) для $\sigma_{пр} = 800$ МПа, $E = 110$ ГПа, $d = 500$ мкм. Підставляючи максимальне значення розміру щілини в рівняння (13), отримуємо капілярний тиск ~ 1 МПа. Саме такий рівень напружень характерний для повзучості титану технічної чистоти при температурах 700—900 °С [13].

Швидкість зростання контакту можна оцінити, враховуючи, що спікання відбувається впродовж 1 год. При швидкості повзучості 10^{-3} с⁻¹ деформація $e = 1$ досягається за 1000 с (~ 17 хв), а деформація $e = 2$ — за півгодини. При такій деформації площа зразка збільшиться приблизно в 7 разів, тобто як це відбувається під час спікання при 700 °С. Зрозуміло, що за 1 год таке збільшення буде відбуватися при швидкості $5 \cdot 10^{-4}$. Саме таку швидкість будемо вважати достатньою для реалізації процесу контактоутворення.

Згідно з даними, наведеними на рис. 7, швидкість повзучості при температурі 700 °С та відповідних навантаженнях сягає 10^{-5} — 10^{-6} . Проте при аналізі повзучості досліджених порошкових матеріалів слід враховувати наявність дислокаційної субструктури, яка збільшує коефіцієнт самодифузії в 10—100 разів і приблизно в цих же межах швидкість повзучості [15]. Тому можна вважати, що еволюція контакту відбувається за рахунок повзучості за механізмом, що відповідає об'ємній дифузії титану.

Результати, наведені на рис. 7, досить просто пояснюють чутливість швидкості контактоутворення до фракційного складу. Зменшення розміру порошокінки відповідно до рівняння (1) зменшує розмір щілини і збільшує капілярну силу, що, згідно з рис. 7, суттєво підвищує швидкість спікання.

Оскільки збільшення розмірів контактів для всіх пористостей відбувається з однаковою швидкістю відносно початкового розміру, можна стверджувати, що контакти збільшуються самоподібно за однаковим механізмом повзучості. Згідно з роботою [13], на початкових стадіях

спікання (700 °С) швидкість повзучості є достатньо малою, тому можна зробити висновок, що при цих умовах відбувається зарощування лише площинних пор, які при всіх поруватостях мають товщину 1—5 мкм. Заліковування порожнин з більшим радіусом при цих умовах неможливе через недостатню швидкість повзучості.

Аналізуючи вплив поруватості на процес спікання, слід звернути увагу на зміну обох коефіцієнтів K_{λ}^{hc} та K_{λ}^{hp} або K_E^{hc} та K_E^{cp} (рис. 6, а, б) від поруватості. Наведені на цих рисунках залежності коефіцієнтів K_{λ}^{hp} та K_E^{cp} , що характеризують недосконалість контакту від поруватості, вказують на те, що на цій стадії спікання контакти компактних пресовок лише трошки не досягають досконалості, тоді як для високопоруватого стану експериментальне значення поступається досконалому контакту майже в 10 разів. З цього випливає, що на першій стадії контактоутворення, коли відбувається зарощування площинної щілини, в більш компактних станах площа контакту досягає практично ідеальних розмірів і контакт формується практично повністю, тоді як у більш поруватих матеріалах контактоутворення продовжується при більш високих температурах за рахунок зміни геометрії приконтактної зони.

Щоб пояснити встановлене співвідношення між ступенем досконалості контакту і поруватістю (рис. 6), слід враховувати, що при підвищенні температури спікання (наприклад, до 1000 °С) швидкість повзучості значно збільшується і критична швидкість, яка відповідає умовам контактоутво-

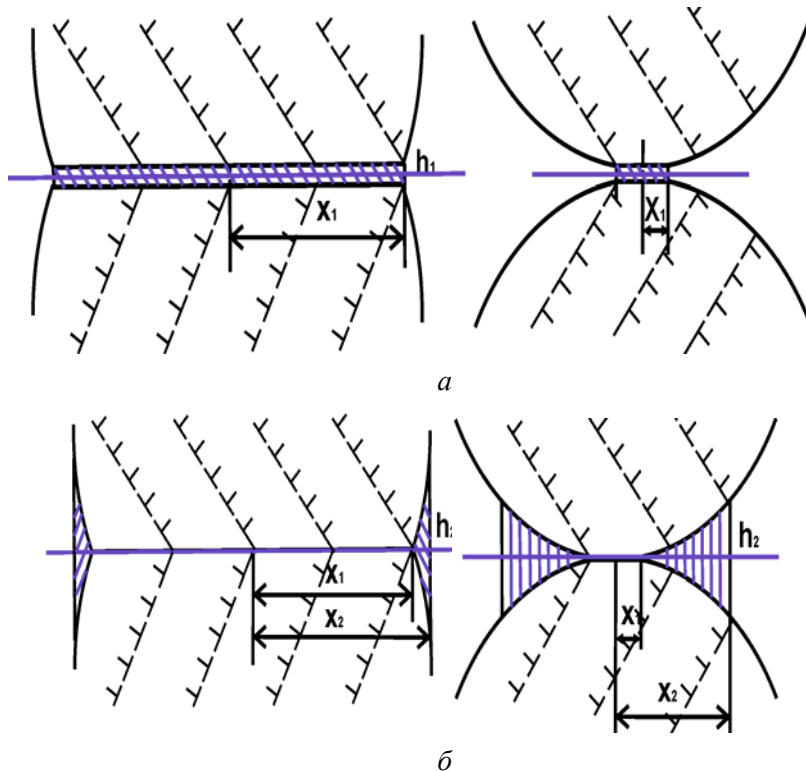


Рис. 8. Схема стадійності контактоутворення компактованих металевих порошків: а — зарощування площинної пори; б — об'ємна формозміна.

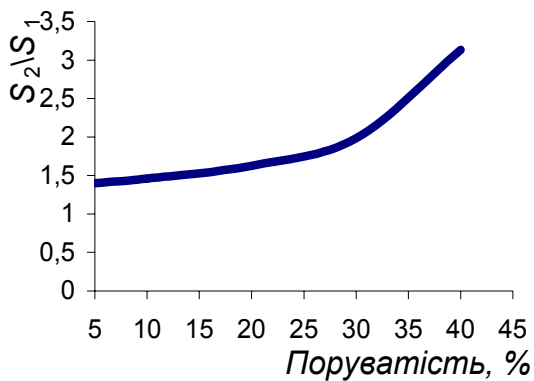


Рис. 9. Залежність відношення площ контакту на першій та другій стадії контактоутворення.

ний радіус, який визначає формозміну приконтактної зони, збільшиться в 10 разів (наприклад, до 0,1 від діаметра порошку). Тоді з простих геометричних міркувань (рис. 8) можна розрахувати площу контакту, що відповідає критичному радіусу, та порівняти цю площу з площею контакту на стадії зарощування щілини. Результати розрахунку, наведені на рис. 9, свідчать про те, що запропонована модель добре узгоджується з експериментом.

рення, може буде досягнута при значно менших навантаженнях. Якщо вважати, що критичне навантаження знизиться в десять разів, то, згідно з рівнянням (13), критич-

Висновки

Проведено порівняння швидкості зростання контакту на початкових стадіях за даними вимірювання електроопору та модуля пружності. Встановлено, що коефіцієнт, який характеризує швидкість зростання контакту за зміною електричних властивостей при низьких температурах спікання, зростає значно швидше, оскільки отримані значення провідності визначаються не тільки провідністю ґратки, але й ефектом електричного пробивання. Починаючи з 700 °С процес контактоутворення однаково коректно аналізувати за зміною електропровідності та модуля пружності.

Запропонована модель контактоутворення ущільненого пластичного металевго порошкового матеріалу демонструє, що процес контактоутворення здійснюється в дві стадії: на першій стадії відбувається зарощування площинної пори, при цьому контакт росте самоподібно за механізмом об'ємної дифузії, на другій — об'ємне спікання. На цій стадії високопоруваті матеріали збільшують відносний розмір контакту значно більше, ніж більш щільні.

1. Гегузин Я. Е. Физика спекания. — М. : Наука, 1984. — 312 с.
2. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания. — К. : Наук. думка, 1972. — 151 с.
3. Федорченко И. М. Основы порошковой металлургии / И. М. Федорченко, Р. А. Андриевский. — Киев : Изд-во АН УССР, 1961. — 420 с.
4. Ashby M. F. The influence of a dispersion of particles on the sintering of metal powders and wires / [M. F. Ashby, S. Bahk, J. Bevk, D. Tunbull] // Progress in Mater. Sci. — 1980. — 25, No. 1. — P. 1—34.
5. Скороход В. В. Электронно-оптическое исследование кинетики спекания порошков вольфрама с частицами шаровидной формы. II. Взаимосвязь между кинетикой усадки и кинетикой роста контактов / В. В. Скороход, Л. А. Верменко, О. И. Гетьман // Порошковая металлургия. — 1987. — № 6. — С. 20—28.
6. Гетьман О. И. Реологический и термоактивационный анализ кинетики спекания порошков вольфрама / О. И. Гетьман, С. П. Ракитин, В. В. Скороход // Там же. — 1984. — № 10. — С. 27—32.

7. *Подрезов Ю. Н.* Роль сдвиговой деформации в консолидации порошковых материалов / Ю. Н. Подрезов, Д. Г. Вербилло, Я. И. Евич // Физика и техника высоких давлений. — 2014. — **24**, № 1. — С. 14—31.
8. *Jernot J. P.* Model to describe the elastic modulus of sintered materials / J. P. Jernot, M. Coster, F. L. Chermant // Phys. Stat. Solid. (A). — 1982. — **71**, No. 1. — P. 141—147.
9. *Jernot J. P.* A New model to describe the variation of electrical conductivity in materials sintered in solid phase / J. P. Jernot, J. L. Chermant and M. Coster // Ibid. — 1982. — **74**, No. 2. — P. 467—475.
10. *Подрезов Ю. М.* Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. III. Влияние технологических и структурных параметров порошкового титана на закономерности контактообразования / [Ю. М. Подрезов, В. А. Назаренко, Я. И. Евич, А. В. Вдовиченко] // Порошковая металлургия. — 2009. — № 3/4. — С. 100—113.
11. *Подрезов Ю. М.* Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. IV. Физико-механические свойства и закономерности контактообразования в порошковом титане, полученном ГПД / [Ю. М. Подрезов, В. А. Назаренко, А. В. Лаптев и др.] // Там же. — 2009. — № 5/6. — С. 60—68.
12. *Скорород В. В.* Физико-металлургические основы спекания порошков / В. В. Скорород, С. М. Солонин. — М.: Металлургия, 1984. — 158 с.
13. *Пищак В. К.* Высокотемпературная прочность и физические свойства технически чистого титана ВТ1-0 / В. К. Пищак, И. В. Моисеева, П. Н. Крайнец // Металлофиз. новейшие технологии. — 2001. — **23**, № 9. — С. 1243—1257.
14. *Бокштейн С. З.* Строение и свойства металлических сплавов. — М.: Металлургия, 1971. — 496 с.
15. *Свойства элементов.* Ч. 1. Физические свойства / Под ред. Г. В. Самсонова. — М.: Металлургия, 1976. — 600 с.

**Изучение закономерности контактообразования
в металлических порошковых материалах
по результатам прецизионных механических испытаний**

Ю. Н. Подрезов, В. А. Назаренко, Я. И. Евич, Н. М. Марченко

Изучены закономерности контактообразования в порошковом титане на разных технологических этапах его получения по результатам испытаний на четырехточечный изгиб. Проанализировано влияние технологических и структурных параметров на эволюцию контакта. Показано, что процесс контактообразования в предварительно уплотненных прессовках осуществляется в две стадии: на первой происходит зарацивание плоскостной поры, при этом контакт растет самоподобно по механизму объемной диффузии, на второй — объемное спекание. На этой стадии высокопористые материалы увеличивают относительный размер контакта значительно больше, чем более плотные.

Ключевые слова: *четырёхточечный изгиб, структура, контактообразование, пористость, температура спекания.*

**Studying of the contact formation patterns in metal powder materials
based on the results of precision mechanical testing**

Y. N. Podrezov, V. A. Nazarenko, Y. I. Yevich, N. M. Marchenko

This work is aimed to study the contact formation into titanium powder at the different manufacturing stages with a use of four-point bending. The effect of technological and structural parameters on the contact evolution is analyzed. It is shown that contact formation into packed powders occurs in two stages: at the first stage the plane pore overgrowths, it is accompanied by diffusion-driven growth of contact. At the second stage the volume sintering takes place. At this stage the relative size of contact increases more for high pores materials then for materials with lower pore concentration.

Keywords: *four-point bend, structure, contact formation, porosity, the sintering temperature.*