

УДК 620.22.546.07

*Д-р техн. наук Е.С. Геворкян,
асп. В.П. Нерубацький*

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ
AL₂O₃ ПРИ ПРЯМОМУ ПРОПУСКАННІ ЗМІННОГО
ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ З ЧАСТОТОЮ 50 ГЦ**

Постановка проблеми. У зв'язку з використанням методу гарячого пресування з прямим пропусканням електричного струму для спікання нанопорошків і тугоплавких з'єднань (монокарбїду вольфраму, оксиду алюмінію) правильний підбір режимів спікання має важливе значення.

Аналіз існуючих рішень. До сьогодні в технології гарячого пресування використовувалася модель Ешбі, яка враховує вплив пластичної деформації і дислокаційної повзучості на ущільнення матеріалу.

Як основа для моделі ущільнення при гарячому пресуванні при прямому пропусканні змінного електричного струму з частотою 50 Гц (Field Activated Sintering Technic – FAST) була взята модель гарячого ізостатичного пресування (ГІП), запропонована М.Ф. Ешбі із співавторами [1, 2]. Модель ущільнення при гарячому ізостатичному пресуванні заснована на одночасній можливості протікання процесів пластичної деформації, дислокаційної повзучості, повзучості Набарро – Херрінга, а також масопереносу в результаті об'ємної і граничної дифузії. Ця модель використовувалася багаточисельними авторами для оцінки зміни щільності при гарячому ізостатичному пресуванні різних порошків: металевих (мідь, сталь, тантал, берилій [1–4]), оксидів Al_2O_3 , UO_2 [5, 6], сплавів $Ti-Al$ [7] тощо.

Мета роботи. Розробити на основі моделі Ешбі модель, що дозволила б оцінити параметри процесу спікання при гарячому пресуванні з прямим пропусканням струму для нанопорошків, оксиду алюмінію і монокарбиду вольфраму.

Результати досліджень. Модель Ешбі передбачає дві стадії ущільнення. На початковій стадії процесу ($p_0 < p < 0,9$) відбувається зростання шийок контактів спочатку сферичних часток порошку радіуса R і збільшення кількості контактів. Частки розподілені випадковим чином і мають однаковий розмір. Ущільнення моделюється завдяки збільшенню радіусів часток довкола фіксованих центрів. Новий радіус R' частки визначається як

$$R' = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/3} \cdot R, \quad (1)$$

де p – відносна щільність;

p_0 – вихідна відносна щільність (для випадкової упаковки $p_0 = 0,64$).

При зростанні радіусів сфер відбувається їх часткове перекриття з найближчими сусідами. Об'єм перекриття обчислюється і перерозподіляється у порожньому просторі, збільшуючи при цьому радіус шийки і кількість контактів із сусідніми частками.

Кількість контактів окремої частки зі своїми сусідами Z пов'язано з відносною щільністю p таким чином:

$$Z = 12 \cdot p. \quad (2)$$

Z збільшується від величини 7,7 з початку гарячого ізостатичного пресування, що відповідає випадковій упаковці часток порошку з $p_0 = 0,64$, до 12, коли досягається повна теоретична щільність. Середня площа контакту частки дорівнює

$$s = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{(p - p_0)}{(1 - p_0)} \cdot R^2. \quad (3)$$

При цьому радіус контактної шийки x пов'язаний з щільністю таким виразом:

$$x = \sqrt{\frac{s}{\pi}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left\{ \frac{p - p_0}{1 - p_0} \right\}^{1/2} \cdot R, \quad (4)$$

а радіус кривизни поверхні контактної шийки дорівнює

$$\gamma = \frac{x^2}{2 \cdot (R - x)} \cong R \cdot (p - p_0). \quad (5)$$

Під впливом зовнішнього тиску P у місцях контакту часток виникає середнє зусилля f , яке дорівнює

$$f = \frac{4 \cdot \pi \cdot R^2}{Z \cdot p} \cdot P, \quad (6)$$

а отже, ефективний тиск P' у кожній точці контакту може бути визначено як

$$P' = \frac{f}{s} = \frac{(1 - p_0)}{p^2 \cdot (p - p_0)} \cdot P, \quad (7)$$

при цьому P' прагне до P при наближенні p до одиниці.

При $0,9 < p < 1$ пористість стає закритою і розподіляється рівномірно в кутових точках многогранників, що представляють поверхню часток на завершальній стадії пресування. Радіус пір r визначається таким співвідношенням:

$$r = R \cdot \left\{ \frac{1 - p}{6} \right\}^{1/3}. \quad (8)$$

Внутрішній тиск газу закритих пір може істотно ускладнити досягнення верхньої межі щільності. Цей внутрішній тиск P_i дорівнює

$$P_i = P_0 \cdot \frac{(1 - p_c) \cdot p}{(1 - p) \cdot p_c}, \quad (9)$$

де P_0 – залишковий тиск газу в закритих порах;

p_c – відносна щільність, при якій пори закриваються.

Розглянемо рівняння для розрахунку щільності при пластичній деформації і швидкостях ущільнення при дифузії, а також при дислокаційній повзучості.

Пластична деформація. Після досягання певного тиску ($P' > 3 \cdot \sigma_y$, де σ_y – межа текучості матеріалу) частки порошку ущільнюються завдяки дії пластичної деформації. При цьому відбувається збільшення площі контактів часток. Ущільнення, що забезпечується пластичною деформацією, на початковій стадії визначається таким рівнянням:

$$p_{pl} = \left(\frac{(1 - p_0) \cdot P}{1,3 \cdot \sigma_y} + p_0^3 \right)^{1/3}. \quad (10)$$

На завершальній стадії ущільнення відносна щільність по даному механізму дорівнює

$$p_{pl} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\sigma_y}\right). \quad (11)$$

Далі ущільнення відбувається за рахунок процесів дифузії і повзучості.

Дифузія. Ущільнення на цій стадії відбувається завдяки руху матеріалу від зони контакту між частками порошку до поверхні шийки, що утворилася, шляхом зернограничної і об'ємної дифузії. Швидкість дифузійного ущільнення на початковій стадії ущільнення описується рівнянням

$$\dot{p}_1 = \frac{43 \cdot (1 - p_0)^2}{(p - p_0)^2} \cdot \frac{(\delta \cdot D_b + \gamma \cdot D_v)}{k \cdot T \cdot R^3} \cdot \Omega \cdot P, \quad (12)$$

де D_v – коефіцієнт об'ємної дифузії;

D_b – коефіцієнт дифузії по границях зерен;

δ – ефективна товщина границі зерна;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура;

Ω – атомний об'єм.

На завершальній стадії ущільнення рівняння для швидкості дифузійного ущільнення має вигляд

$$\dot{p}_1 = 54 \cdot \frac{\Omega \cdot (\delta \cdot D_b + r \cdot D_v)}{k \cdot T \cdot R^3} \cdot \sqrt[5]{1 - p} \cdot P. \quad (13)$$

Повзучість. Ущільнення при тиску також може здійснюватися деформаційною повзучістю у місцях контакту часток. Повзучість підпорядковується степеневому закону

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad (14)$$

де $\dot{\varepsilon}_0, \sigma_0, n$ – параметри матеріалу;

$\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації;

σ – діюча напруга.

На початковій стадії швидкість ущільнення при повзучості визначається виразом

$$\dot{p}_2 = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\sigma_0^n} \right) \cdot \frac{p \cdot (1-p)}{[1-(1-p)^{1/n}]^n} \left(\frac{3}{2 \cdot n} \cdot p \right)^n, \quad (15)$$

а на завершальній – з рівняння

$$\dot{p}_2 = 5.3 \cdot (p^2 \cdot p_0)^{1/3} \cdot \frac{x}{R} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\sigma_0^n} \right) \cdot \left(\frac{P'}{3} \right)^n. \quad (16)$$

Висновки. Таким чином, на основі розробленої установки гарячого пресування з прямим пропусканням струму нами була розроблена модель процесу гарячого пресування для нанопорошків, субмікронних порошків, а також звичайних порошків оксиду алюмінію і монокарбїду вольфраму. Розроблена модель адекватна отриманим експериментальним результатам, що дозволяє у перспективі використовувати її для оцінки спікання інших порошкових неметалічних матеріалів.

Список літератури

1. Andrievski R.A. In Nanoslruciured Materials, Science and Technology // Kluvver Academic, Dordrecht. – 1998. – P. 263–268.

2. Wilkinson D.S., Ashby M. F. Pressure sintering by powder law creep // *Acta met.* – 1975. – Vol. 23. – №11. – P. 1277–1285.
3. Arzt E.L., Ashby M.K. Easterling Practical Applications of Hot–Isostatic Pressing Diagrams: Four Case Studies // *Met. Trans.* – 1983.–Vol.14. – №1. – P. 211–221.
4. Mayo M.J. In *Nanostructured Materials. Science and Technology* // Kluwer Academic. Dordrecht. – 1998. – P. 361–371.
5. Helle A.S., Easterling K.E., Ashby M.F. Hot–Isostatic Pressing Diagrams: New Developments // *Acta Metall.* – 1985. – Vol. 33. – №12. – P. 2163–2174.
6. Mishra R.S., Mukherjee A.K. Electric pulse assisted rapid consolidation of ultrafine grained alumina matrix composites // *Mat. Sci. Eng.* – 2000. – №28. – P. 178–182.
7. Mishra R.S., Risbud S. H., Mukherejee K.T. Influence of initial crystal structure and electrical pulsing on densification of nanocrystalline alumina powder // *J. Mat. Res.* – 1998. – №13. – P.86–89.

Ключові слова: модель, щільність, гаряче пресування, порошки, стадія.

Анотації

На основі розробленої установки гарячого пресування з прямим пропусканням струму розроблена модель процесу гарячого пресування для нанопорошків, субмікронних порошків, а також звичайних порошків оксиду алюмінію і монокарбиду вольфраму.

Зроблено висновок, що розроблена модель адекватна отриманим експериментальним результатам, що дозволяє у перспективі використовувати її для оцінки спікання інших порошкових неметалічних матеріалів.

На основе разработанной установки горячего прессования с прямым пропусканьем тока разработана модель процесса горячего прессования для нанопорошков, субмикронных

порошков, а также обычных порошков оксида алюминия и монокристал вольфрама.

Сделан вывод, что разработанная модель адекватна полученным экспериментальным результатам, что позволяет в перспективе использовать её для оценки спекания других порошковых неметаллических материалов.

On the basis of the developed setting of hot-pressed with the direct key-in of current the model of process of hot-pressed is developed for nanopowders, submicrometer powders, and also ordinary powders of oxide of aluminium and tungsten wolfram of tungsten. A conclusion is done, that the developed model is adequate the got experimental results, that allows in a prospect to use it for the estimation of spekaniya of other powder-like non-metal materials.