

17. Denisov, M. A. (2011). *Matematicheskoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov: ANSYS i CAE-proyektirovaniye [Mathematical modeling of thermophysical processes: ANSYS and CAE-design]*. Yekaterinburg, Ural'sk. Federal'n. Un-t [in Russian].
18. Sosedov, V. P. (Eds). (1975). *Svoistva konstruktsionnykh materialov na osnove uhleroda: spravochnik [Properties of carbon-based construction materials: a Handbook]*. Moscow: Metallurgy [in Russian].
19. Paterson, M. S., & Edmond, J. M. (1972). Deformation of graphite at high Pressures. *Carbon*, 10, 29–34.

УДК 622.24.051:536.2

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-418-427

В. А. Дутка, канд. техн. наук; **А. Л. Майстренко**, чл.-кор. НАН України;
В. Г. Кулич, канд. техн. Наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074 м. Київ; E-mail: vadutka@ukr.net*

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ПЕРЕПАДУ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗАГОТОВЦІ З КАРБІДУ БОРУ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ СПІКАННІ ПІД ТИСКОМ

З використанням методу скінчених елементів виконано моделювання температурного поля в робочій комірці технологічної установки високошвидкісного спікання під тиском (ВШСТ) порошкових заготовок із карбіду бору. Враховано залежність властивостей порошкової заготовки від пористості та температури. Проведено комп'ютерне дослідження впливу схеми комірки на перепад температури в заготовці. За результатами моделювання вибрано схеми робочої комірки установки ВШСТ і відповідні режими нагрівання, при яких протягом 100–150 с досягається температура спікання 2000 °С, а перепад температури в заготовці на стадії витримки дорівнює 13–30 градусів. Реалізація вибраних схем робочої комірки в технологічній установці ВШСТ дала змогу отримати однорідність мікротвердості матеріалу спеченого виробу.

Ключові слова: високошвидкісне спікання під тиском, карбід бору, моделювання, перепад температури, однорідність мікротвердості

Вступ

Високу міцність виробів на основі карбіду бору В₄С вдається отримати при умовах, коли спечений матеріал має високу щільність, малий розмір зерна структури [1] та однорідність термомеханічних властивостей. Для цього спікання сумішей на основі В₄С необхідно проводити при високих температурах під тиском та при якнайменшій тривалості спікання. Актуальним при таких умовах є забезпечення допустимого – не більше 50 градусів – перепаду температури в заготовці на стадії витримки.

Порошкові суміші на основі карбіду бору залежно від добавок та розмірів зерен спікають в графітових прес-формах при тиску 30–100 МПа за температури 1800–2200 °С [1, 2]. Температуру спікання можна знизити на 200...300 градусів, а тривалість спікання скоротити, використовуючи спосіб високошвидкісного спікання під тиском (ВШСТ) при збільшенні тиску до 500 МПа [3] з використанням пуансонів із матеріалів, міцніших ніж графіт. На даний час є широкий спектр способів швидкісного спікання під тиском [4, 5] металевих та керамічних композицій.

В даній роботі для зменшення перепаду температури в заготовці в процесі ВШСТ виконано комп'ютерне моделювання температурного поля в робочій комірці технологічної установки для різних схем її робочої комірки.

Математична модель

В комп'ютерній моделі вибрано чверть осьового перетину робочої комірки технологічної установки (рис. 1).

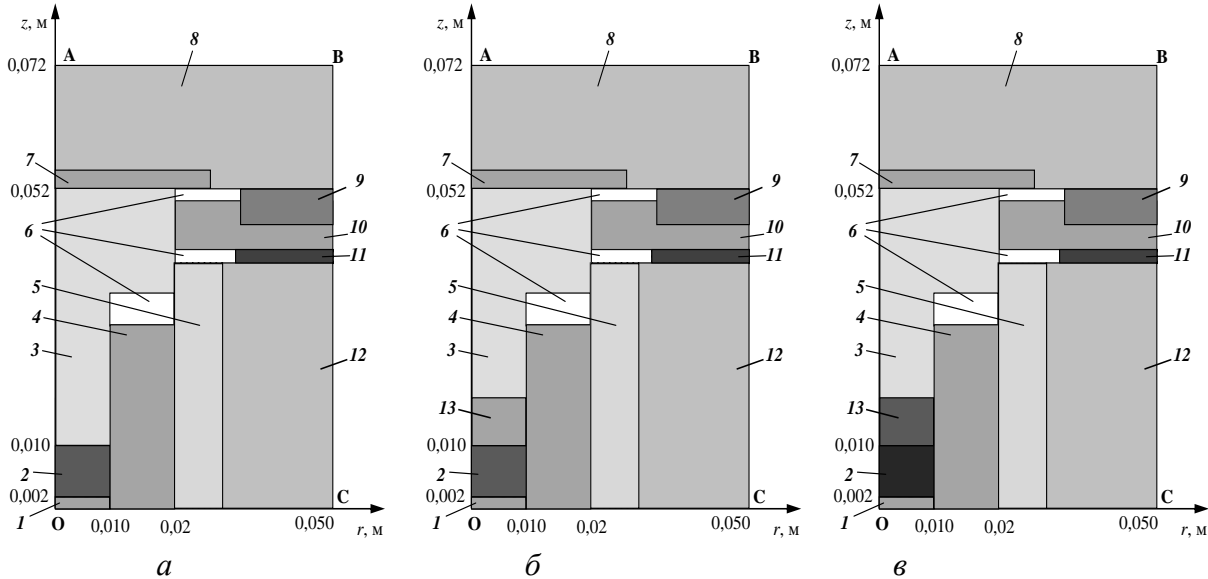


Рис. 1. Схеми робочої комірки технологічної установки ВШСТ (чверть осьового перетину): а – схема I, б – схема II, в – схема III; 1 – графітова прокладка (МПГ-6), 2 – брикет (В4С); 3 – пуансон (Мо), 4 – прес-форма (МПГ-6), 5 – контейнер (літографський камінь), 6 – повітряні порожнини, 7 – контактна пластина (латунь), 8 – пластина пресу (сталь 35ХГСА), 9 – пружний наповнювач (термостійка гума), 10 – роздільна пластина (сталь 35ХГСА), 11 – електроізоляційна пластина (кварц), 12 – обойма (сплав ЕІ); 13 – теплоізоляційний диск (б – графіт МПГ-6, в – ZrO_2)

Для моделювання електричного і температурного полів використовується зв'язана система рівнянь квазістаціонарної електропровідності та нестационарної теплопровідності

$$\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} U) = 0, \quad c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \sigma (\operatorname{grad} U)^2 \quad (1)$$

з початковими умовами

$$U(r, z, 0) = 0, \quad T(r, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

і граничними умовами на зовнішніх поверхнях S_{AB} і S_{BC} розрахункової області

$$U(r, z, t) = f(t), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n}(r, z, t) = \alpha_2(T_C - T), \quad (r, z) \in S_{AB}, \quad (3)$$

$$\sigma \frac{\partial U}{\partial n}(r, z, t) = 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n}(r, z, t) = \alpha_1(T_C - T), \quad (r, z) \in S_{BC}, \quad (4)$$

умовами симетрії на поверхні S_{OC}

$$U(r, z, t) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n}(r, z, t) = 0, \quad (r, z) \in S_{OC} \quad (5)$$

та на осі симетрії Oz

$$\frac{\partial U}{\partial n}(r, z, t) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n}(r, z, t) = 0, \quad (r, z) \in AO, \quad (6)$$

де $U=U(r, z, t)$, $T=T(r, z, t)$ – відповідно діюча величина електричного потенціалу і температура в момент часу t в точці з координатами r і z в циліндричній системі координат; σ , γ , c і λ – питома електропровідність, густина, питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності відповідно, які є функціями температури і координат точки; T_0 – початкова температура (20 °С), T_c – температура зовнішнього повітряного середовища (20 °С); $\alpha_1 = 15$ Вт/(м²·град) – коефіцієнт конвективного теплообміну; $\alpha_2 = 50$ Вт/(м²·град) – ефективний коефіцієнт теплообміну із плитою від пресу. В (1) – (6) використано загальноновживані позначення. Між поверхнями, що утворюють повітряні порожнини б (рис. 1), враховується променевий теплообмін із коефіцієнтами випромінювання: для графіту – 0,8, латуні – 0,7, молібдену – 0,8, сталі і латуні – 0,7, літографського каменю і кварцу – 0,6.

На поверхнях контакту: пуансону і заготовки, пуансону і прес-форми, пуансону і контейнера, пуансону і роздільної пластини; заготовки і прес-форми, заготовки і прокладки; прес-форми і контейнера; контейнера і обійми задаються умови електричного і теплового контактів [6, 7]

$$q_c|_1 = q_c|_2 = \lambda_c(T, p, r, z)(T_1 - T_2), \quad (7)$$

$$j_c|_1 = j_c|_2 = \sigma_c(T, p, r, z)(U_1 - U_2), \quad (8)$$

де q_c і j_c – відповідно тепловий потік та густина електричного струму на поверхні контакту, індексами 1 і 2 позначено значення величин по одну та по другу сторони поверхні контакту; λ_c і σ_c – контактні коефіцієнт теплопровідності та питома електропровідність, p – тиск. Величини контактних тепло- та електропровідностей були задані як функції температури з урахуванням тиску на поверхнях контакту та використанням даних [6, 7]: величину контактної теплопровідності було вибрано рівною $3,0 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град), а величину контактної питомої електропровідності σ_c вибрано залежною від температури (табл. 1).

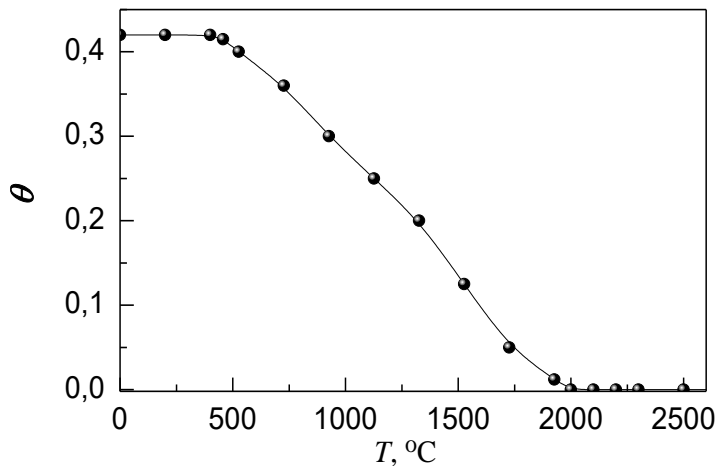
Таблиця 1. Залежність контактної електропровідності від температури

$T, ^\circ\text{C}$	0	100	300	500	800	1000	1400	1900	2500
$\sigma_c \cdot 10^{-6}, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-2}$	3,0	3,2	3,4	3,5	4,2	5,0	5,3	6,1	7,4

Відомо [1, 2], що високої щільності зразки з карбїду бору отримують при температурі 2050–2150 °С, а при використанні добавок її можна знизити до 1800–2000 °С. В комп'ютерних експериментах було вибрано температуру спікання заготовки 2000 °С. Значення теплофізичних властивостей матеріалів було вибрано за даними [1, 8–11].

При моделюванні теплофізичних властивостей матеріалу заготовки враховується їх залежність від пористості θ [12]

$$C(T) = C_c(T)(1 - \theta(T)), \quad \lambda(T) = \lambda_c(T) \left(1 - \frac{3}{2}\theta(T) - \frac{1}{2}\theta^2(T) \right), \quad \sigma(T) = \sigma_c(T) \frac{1 - \theta(T)}{1 + 2\theta(T)} \quad (9)$$



і від температури, де $C_c(T)$, $\lambda_c(T)$, $\sigma_c(T)$ – питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, питома електропровідність суцільного матеріалу відповідно. При цьому, використовуючи експериментальні дані [12], враховується зміна пористості від температури. Графік функції $\theta = \theta(T)$ наведено на рис. 2.

Рис. 2. Зміна пористості від температури в процесі спікання [12]

Формули для $\lambda(T)$ і $\sigma(T)$ були скореговані таким чином

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_c(T) \left(1 - \frac{3}{2} \theta(T) - \frac{1}{2} \theta^2(T) \right) \cdot \left(1 + K_\lambda \cdot 10^{-\frac{bT}{T_0}} \right)^{-1}, & T_0 + 273 \leq T \leq 2273 \text{ K}, \\ \lambda_c(T) \left(1 - \frac{3}{2} \theta(T) - \frac{1}{2} \theta^2(T) \right), & T > 2273 \text{ K}, \end{cases}$$

$$\sigma(T) = \begin{cases} \sigma_c(T) \frac{1 - \theta(T)}{1 + 2\theta(T)} \cdot \left(1 + K_\sigma \cdot 10^{-\frac{aT}{T_0}} \right)^{-1}, & T_0 + 273 \leq T \leq 2273 \text{ K}, \\ \sigma_c(T) \frac{1 - \theta(T)}{1 + 2\theta(T)}, & T > 2273 \text{ K}, \end{cases}$$

($K_\sigma = 5,667 \cdot 10^7$, $a = -10,753$, $T_0 = 2273 \text{ K}$, $K_\lambda = 16,866$, $b = -3,680$), що значення коефіцієнту теплопровідності при 20 °С дорівнює 1,97 Вт/(м·град), електропровідності – $1,342 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ (виміряне при 20 °С і 500 МПа), а при температурі 2000 °С величини $\lambda(T)$ і $\sigma(T)$ відповідно дорівнюють коефіцієнту теплопровідності і питомій електропровідності ущільненого матеріалу з карбіду бору В₄С, обчисленим за формулами (9) при залишковій пористості 0,02. Детальний опис моделювання властивостей В₄С-зразка в процесі спікання наведено в [13].

Результати обчислень та їх обговорення

Для розв'язання задачі (1) – (8) використовується метод скінченних елементів у комплексі ANSYS [14]. Розрахункова область (рис. 1) розбивається на 8-вузлові елементи з квадратичною апроксимацією електричного потенціалу та температури. Розв'язання результуючої системи нелінійних рівнянь відносно вузлових значень потенціалу та температури виконується методом Ньютона-Рафсона у поєднанні з методом випромінювань. Обчислення проведено з відносною похибкою 10^{-2} .

Спочатку було виконано обчислення для трьох схем I, II і III технологічної установки (рис. 1). При переході від схеми I до схеми III перепад температури в заготовці на стадії витримки при 2000 °С зменшується від 310 до 50 градусів – криві 1, 2 і 3 на рис. 3. Якщо в

схемі III збільшити висоту теплоізоляційного диску із ZrO_2 від 0,008 м до 0,012 м, то перепад температури в заготовці можна зменшити на 30% – до 35 °С (крива 4 на рис. 3). Для цього випадку на рис. 4 наведено графіки зміни в часі електричного потенціалу пластини пресу та температури в чотирьох точках поверхні зразка, а на рис. 5 і 6 – картини температурного поля в комірці і в заготовці. З рис. 4 б і 6 видно, що під час нагрівання до температури витримки 2000 °С перепад температури в заготовці ΔT доходить до 290 °С, однак по мірі досягнення 2000 °С величина ΔT суттєво зменшується і прямує до 35 °С. Це є підставою для забезпечення однорідності фізико-механічних властивостей спеченого виробу.

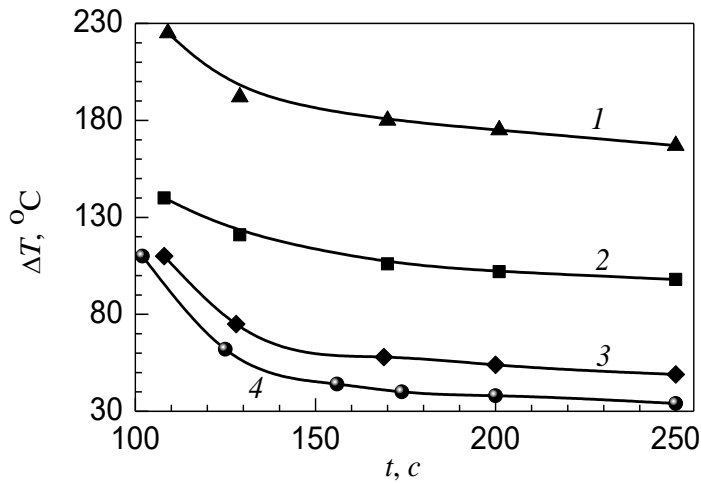


Рис. 3. Зміна в часі обчисленого перепаду температури ΔT в заготовці при використанні схеми III (із ZrO_2 -диском, рис. 1в) при різній товщині Δr стінки графітової прес-форми: 1 – $\Delta r = 0,005$ м, 2 – $\Delta r = 0,010$ м, 3 – $\Delta r = 0,015$ м, висота диску $h_d = 0,008$ м; 4 – $\Delta r = 0,015$ м, $h_d = 0,012$ м

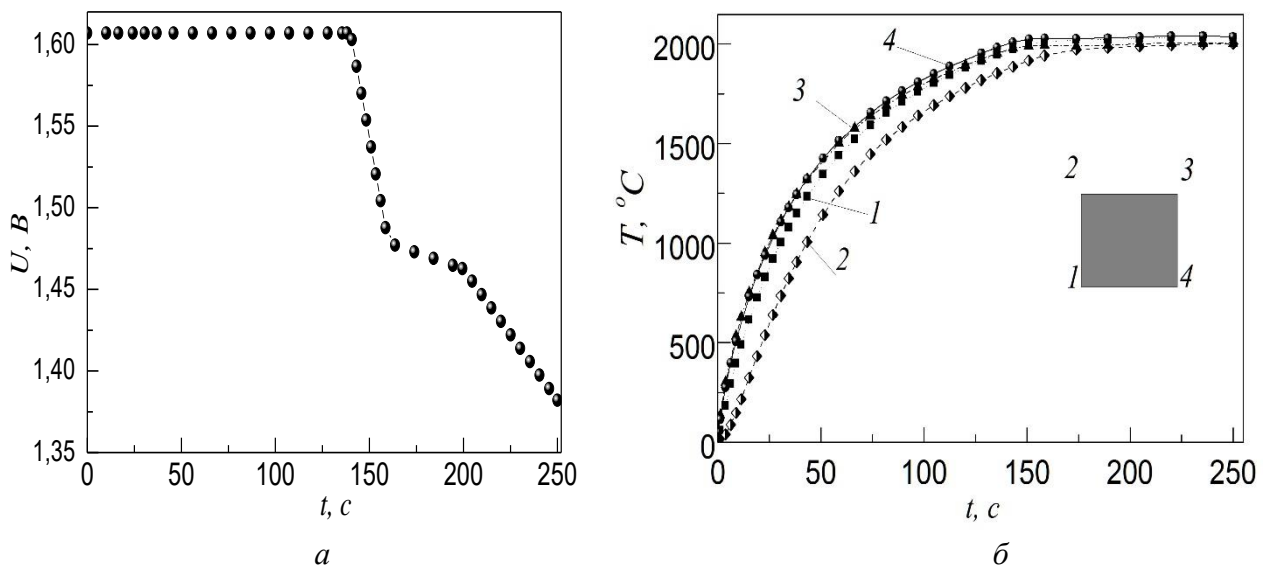


Рис. 4. Зміна електричного потенціалу (а) та температури (б) в точках 1, 2, 3 і 4 зразка в процесі спікання при використанні схеми III (рис. 1в): товщина стінки графітової прес-форми $\Delta r = 0,015$ м, висота диску $h_d = 0,012$ м

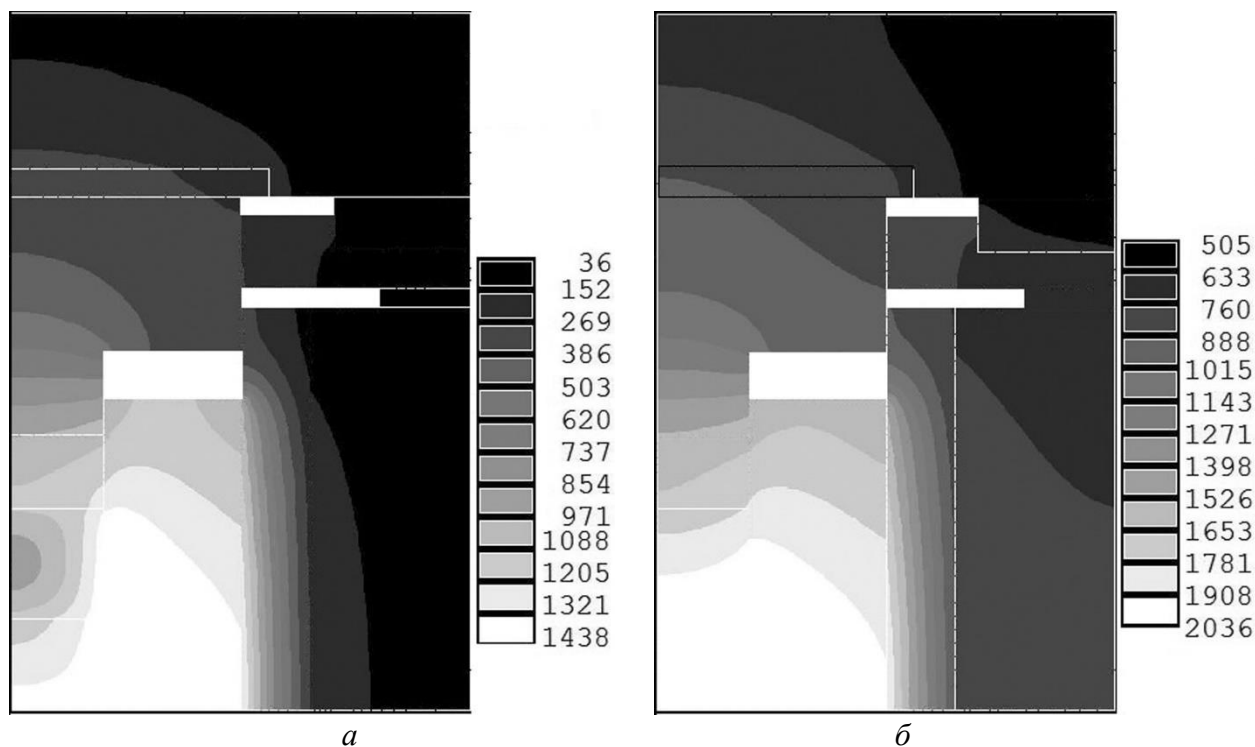


Рис. 5. Розрахований розподіл температури T ($^{\circ}\text{C}$) в технологічній установці зі схемою III в різні моменти спікання: а – 100 с, б – 250 с

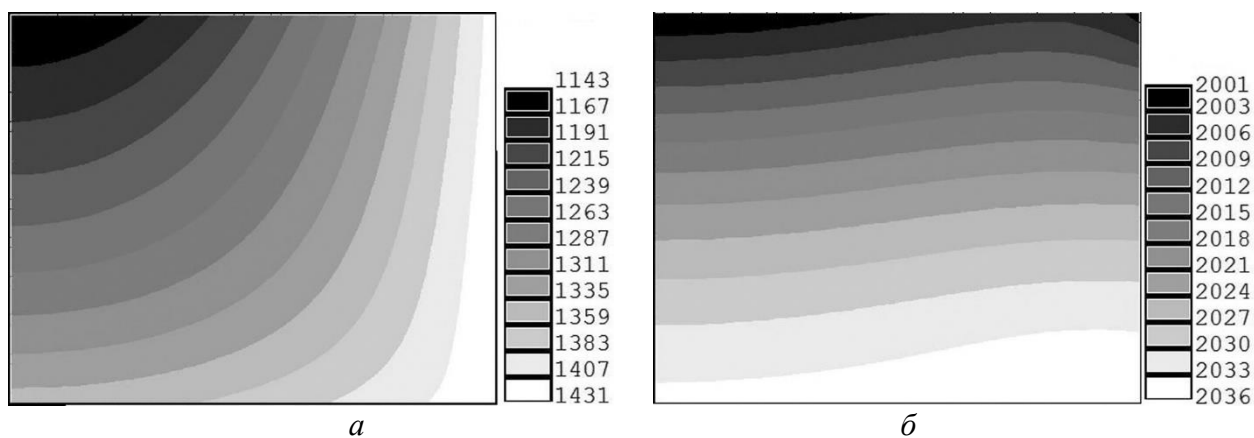


Рис. 6. Розрахований розподіл температури T ($^{\circ}\text{C}$) в заготовці в установці зі схемою III в різні моменти спікання: а – 100 с, б – 250 с

Схему III робочої комірки технологічної установки було використано при ВСШТ брикетів на основі карбіду бору B_4C . В дослідженнях використовувався порошок карбіду бору виробництва ПАТ "Запорізький абразивний комбінат" із середньою зернистістю 3,15 мкм. Два брикети з порошкової суміші на основі B_4C одночасно спікались в технологічній установці під тиском 185 МПа. Вимірювалась густина спечених зразків, зернистість і твердість. Густина спечених зразків вимірювали методом гідростатичного зважування. Рентгеноструктурний аналіз фазового складу проводився в центрі рентгеноструктурного аналізу "RIGAKU" Національного технічного університету України "КПІ" на універсальному дифрактометрі Ultima IV RIGAKU і дифрактометрі ДРОН-4.13001. Дослідження структури матеріалу

спеченого зразка і вимірювання твердості проводились у площині осьового перетину зразка. Твердість визначали методом індентування з використанням алмазної піраміди Кнупа при навантаженні на індентор 9,8 Н. Густина дослідних зразків дорівнює 2,43...2,46 г/см³. Завдяки швидкоплинності процесу ВШСТ зернистість матеріалу в результаті спікання зростає незначно і її середня величина становила 3,67 мкм. На рис. 7 зображено фрагмент мікроструктури спеченого зразка та результати вимірювання мікротвердості в площині осьового перетину спеченого зразка.

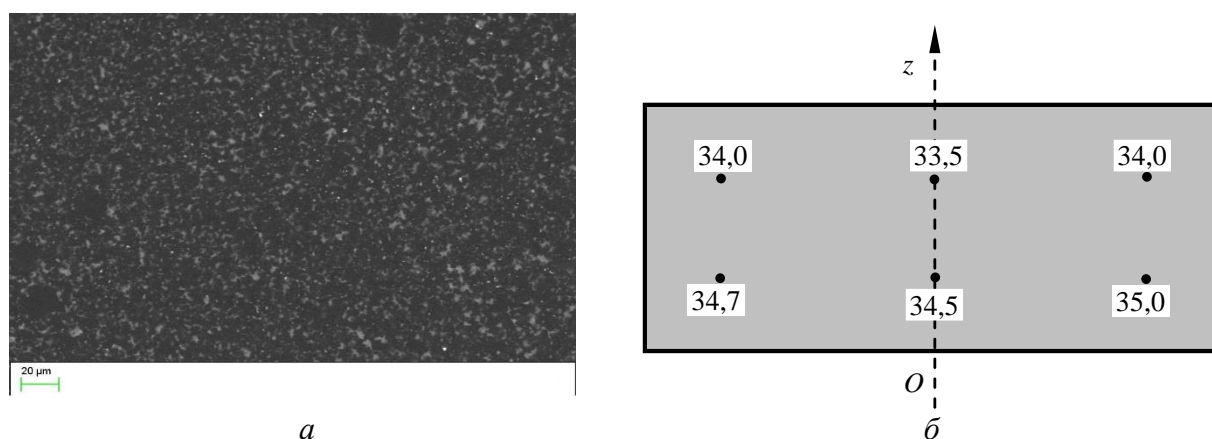


Рис. 7. Фрагмент мікроструктури спеченого зразка із V_4C (домішки заліза від 3 до 8%) – (а) та розподіл мікротвердості (ГПа) в площині осьового перетину спеченого зразка із V_4C діаметром 20 і висотою 10 мм – (б)

З рис. 7 а видно, що матеріал спеченого зразка має рівномірно розподілену мікроструктуру. На рис. 7 б чорними кружечками позначено точки площини, в яких вимірювалась мікротвердість.

Видно, що різниця між максимальним і мінімальним значеннями мікротвердості знаходиться в межах 5% від її середнього значення, що свідчить про практично рівномірний розподіл мікротвердості в об'ємі спеченого зразка. Таким чином, наведені дані підтверджують доцільність використання схеми III комірки технологічної установки для забезпечення невеликого перепаду температури в об'ємі зразка на стадії витримки в процесі ВШСТ і отримання рівномірного розподілу мікротвердості та інших фізико-механічних властивостей в спеченому зразку.

Як бачимо з рис. 5 і 6, перепад температури в зразку зумовлений неоднорідністю потужності теплових джерел в прес-формі. Цю неоднорідність можна іще зменшити, змінивши форму зовнішньої поверхні прес-форми, зменшивши зовнішній радіус її торця до 0,015 м (рис. 8 а, б). В результаті перепад температури в зразку зменшується іще в 2,5 рази і на момент завершення витримки 250 с дорівнює 14 градусів (рис. 8 в), що є ще більш сприятливою умовою для забезпечення однорідності властивостей спеченого зразка. Зауважимо, що ідею зменшення неоднорідності теплових джерел у прес-формі можна реалізувати також за допомогою інших схем, крім запропонованої схеми IV.

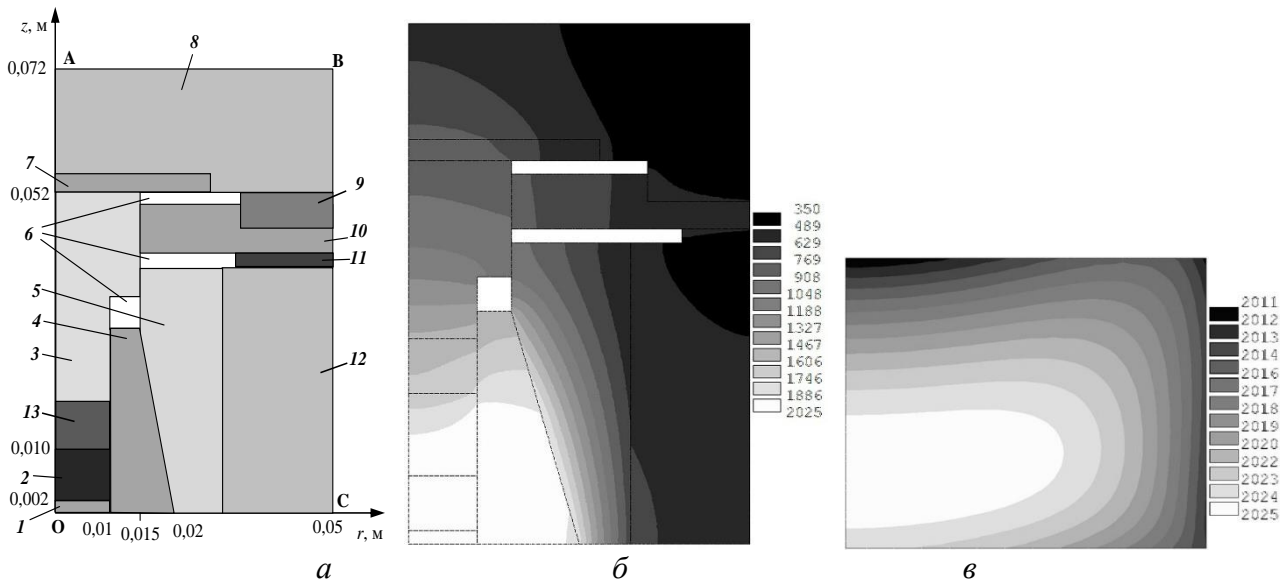


Рис. 8. Розрахункова схема IV комірки (а), розрахований розподіл температури в ній (б) та в зразку (в) в момент 250 с завершення витримки

Висновки

1. Виконано комп'ютерне моделювання температурного поля в робочій комірці технологічної установки ВШСТ порошкових заготовок із карбіду бору. Враховано залежність властивостей порошкової заготовки від пористості та температури. Встановлено, що на перепад температури в заготовці суттєво впливає товщина стінки графітової прес-форми, її конфігурація та висота теплоізоляційного диску на шляху відтоку тепла від заготовки.

2. За результатами моделювання показано, що шляхом вибору схеми комірки можна на стадії витримки отримувати в заготовці однорідне температурне поле (із перепадом температури 14 градусів), що є важливою умовою забезпечення однорідності фізико-механічних властивостей в спеченому виробі.

3. За результатами лабораторних експериментів встановлено, що використання однієї зі схем комірки дає змогу отримати практично однорідний розподіл мікротвердості матеріалу спеченого виробу.

С использованием метода конечных элементов выполнено моделирование температурного поля в рабочей ячейке установки высокоскоростного спекания под давлением (ВССД) порошковых заготовок из карбида бора. Учтены зависимости свойств порошковой заготовки от пористости и температуры. Проведено компьютерное исследование влияния схемы ячейки на перепад температуры в заготовке. По результатам моделирования выбрано схемы рабочей ячейки установки ВССД и соответствующие режимы нагрева, при которых в течение 100–150 с достигается температура спекания 2000 °С, а перепад температуры в заготовке на стадии выдержки составляет 13–30 градусов. Реализация выбранных схем рабочей ячейки в технологической установке ВШСТ позволила получить однородность микротвердости материала спеченного изделия.

Ключевые слова: высокоскоростное спекание под давлением, карбид бора, моделирование, перепад температуры, однородность микротвердости

V. A. Dutka, A. L. Maystrenko, V. G. Kulich

V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine

**USING OF MODELLING FOR MINIMIZATION OF TEMPERATURE DROP IN B₄C-SAMPLE
DURING HIGH-SPEED SINTERING UNDER PRESSURE**

Using the finite element method, a simulation of the temperature field in the work cell of the technological unit during high-speed sintering under pressure (HSSP) of the powder boron carbide samples was performed. The dependence of the properties of the powder billet on porosity and temperature is taken into account. A computerized study of the effect of the cell circuit on the temperature drop in the B₄C-sample is carried out. According to the results of simulation, the schemes of the working cell of HSSP-unit and the corresponding heating regimes have been selected, during which the temperature reach 2000 °C within 100–150 s, and the temperature drop in the preform during the dwell stage is 13–30 degrees. Implementation of the selected schemes of the working cell of HSSP in the technological unit allowed to obtain homogeneity of the microhardness of the material of the sintered product.

Key words: high-speed sintering under pressure, boron carbide, modeling, temperature difference, uniformity of microhardness

Література

1. Кислый П. С., Кузенкова М. А., Боднарчук Н. И., Грабчук Б. Л. Карбид бора. – К.: Наукова думка, 1988. – 216 с.
2. Уплотнение порошка карбида бора при горячем прессовании / И. Т. Остапенко, В. В. Слезов, Р. В. Тарасов и др. // Порошковая металлургия. – 1979. – № 5. – С. 38–43.
3. Майстренко А. Л., Иванов С. А., Переяслов В. П., Волошин М. Н. Интенсивное электроспекание алмазосодержащих композиционных материалов // Сверхтвердые материалы. – 2000. – № 5. – С. 39–45.
4. Wang X., Fang Z., Sohn H. Y. Nanocrystalline Cemented Tungsten Carbide Sintered by an Ultra-High-Pressure Rapid Hot Consolidation Process // Int. Conf. on Powder Metallurgy & Particulate Mater. Engquist. – Denver, US. – 2007. – P. 8–10.
5. Ultrahigh-pressure consolidation and deformation of tantalum carbide at ambient and high temperatures / D. Lahiri, V. Singh, G. R. Rodrigues et al. // Acta Materialia. – 2013. – V. 61. – P. 4001–4009.
6. Electric Contact Resistance in Spark Plasma Sintering Tooling Setup / X. Wei, D. Giuntini, A. L. Maximenko, et. al. // J. of the American Ceramic Society. – 2015. – N 3 – P. 1–35.
7. Rothe S., Kalabukhov S., Frage N. Hartmann S. Field assisted sintering technology. Part I: Experiments, constitutive modeling and parameter identification // GAMM-Mitt. – 2016. – 39. – N 2. – P. 114–148.
8. Thevenot F. A review on Boron Carbide // Key Engineering Materials. – 1991. – V. 56–57. – P. 59–88.
9. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.
10. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения: справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
11. Моргунова Н. Н., Клыпин Б. А., Бояршинов В. А. Сплавы молибдена. – М.: Металлургия, 1975. – 392 с.
12. Continuum modeling of B₄C densification during Spark Plasma Sintering / J. Liu, F. Zeng, Z. Zou, et al. // J. Mater. Res. – 2017. – P. 1–9. – режим доступа: <https://www.cambridge.org/core>.
13. Дутка В. А., Майстренко А. Л., Кулич В. Г. Вплив конструктивних параметрів технологічної установки на перепад температури в заготовці при високошвидкісному спіканні під тиском // Сверхтв. Материалы. – 2019. – (Прийнято до друку).
14. Денисов М. А. Математическое моделирование теплофизических процес-сов: ANSYS и САЕ-проектирование. – Екатеринбург: Уральск. Федеральн. Ун-т, 2011. – 149 с.

Надійшла 24.06.19

References

1. Kislyi, P. S., Kuzenkova, M. A., Bodnaruk, N. I., & Hrabchuk B. L. (1988). *Carbid bora [Boron carbide]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
2. Ostapenko, I. T., Slezov, V. V., Tarasov, R. V. et al. (1979) Uplotneniye poroshka karbida bora pri goryachem pressovanii [Compaction of boron carbide powder during hot pressing]. *Poroshkovaya metallurgia. – Powder Metallurgy*, 5, 38–43 [in Russian].
3. Maystrenko, A. L., Ivanov, S. A., Pereyaslov, V. P., & Voloshin, M. N. (2000). Intensivnoye elektrospekaniyealmazosoderzhashchikh kompozitsionnykh materialov [Intensive electropacking of diamond-containing composite materials]. *Sverkhtverdye materialy. – J. of Superhard materials*, 5, 39–45 [in Russian].
4. Wang, X., Fang, Z., & Sohn H. Y. (2007). Nanocrystalline Cemented Tungsten Carbide Sintered by an Ultra-High-Pressure Rapid Hot Consolidation Process. *Int. Conf. on Powder Metallurgy & Particulate Mater. Engquist.* (pp. 8–10). Denver, US.
5. Lahiri, D., Singh, V., Rodrigues, G. R. et al. (2013) Ultrahigh-pressure consolidation and deformation of tantalum carbide at ambient and high temperatures. *Acta Materialia*, 61, 4001–4009.
6. Wei, X., Giuntini, D., Maximenko, A. L. et. al. (2015) Electric Contact Resistance in Spark Plasma Sintering Tooling Setup. *Journ. of the American Ceramic Society.* – 3, 1–35.
7. Rothe, S., Kalabukhov, S., Frage, N., Hartmann, S. (2016) Field assisted sintering technology. Part I: Experiments, constitutive modeling and parameter identification. *GAMM-Mitt.*, 39, 2. 114–148.
8. Thevenot F. (1991) A review on Boron Carbide / *Key Engineering Materials*, 56-57, 59–88.
9. Khimushin F. F. (1969) *Zharoprochnyye stali i splavy [Heat-resistant steels and alloys]*. Moskva: Metallurgiya [in Russian].
10. Samsonov, G. V., & Vinitkiy, I. M. (1976) *Tugoplavkiye soyedinenniya: spravochnik [Refractory Connections: a Handbook]*. Moskva: Metallurgiya [in Russian].
11. Morgunova, N. N., Klypin, B. A., & Boyarshinov, V. A. (1975) *Splavy molibdena [Molybdenum alloys]*. Moskva: Metallurgiya [in Russian].
12. Liu, J., Zeng, F., Zou, Z., et al. (2017) Continuum modeling of B₄C densification during Spark Plasma Sintering. *J. Mater. Res*, 1–9. Retrieved from <https://www.cambridge.org/core>.
13. Dutka, V. A., Maystrenko, A. L., Kulich V. H. (2019) Vplyv konstruktyvnykh parametriv tekhnolohichnoyi ustanovky na perepad temperatury v zahotovtsi pry vysokoshvydkisnomu spikanni pid tyskom [Influence of structural parameters of the technological unit on the temperature difference in the preform at high-speed sintering under pressure]. *Sverkhtverdye materialy. – J. of Superhard materials, (Accepted for publication)* [in Ukrainian].
14. Denisov, M. A. (2011) *Matematicheskoye modelirovaniye teplofizicheskikh protsessov: ANSYS i CAE-proyektirovaniye [Mathematical modeling of thermophysical processes: ANSYS and CAE-design]*. Yekaterinburg, Ural'sk. Federal'n. Un-t [in Russian].