

DOI: 10.20535/kpissn.2021.1.215024

УДК 621.762.53: 51-74

Ю.М. Романенко, О.В. Степанов, П.І. Лобода, Ю.І. Богомол*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: ubohomol@iff.kpi.ua

ЕФЕКТИВНІ ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА СПІКАННЯ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАГРІВАННЯ

Проблематика. Розроблення процесів консолідації порошкових виробів із використанням висококонцентрованих джерел енергії неможливе без детального аналізу теплових умов, що виникають у цих виробках.

Мета дослідження. Обрати метод розрахунку теплопровідності пористого тіла, яка буде встановлюватись за різних умов електронно-променевого спікання пресовок молібдену; вивчити вплив параметрів пористої структури на теплопровідність.

Методика реалізації. Аналіз спікання в скінченно-елементних розрахунках, задачах теплопровідності для двовимірних і тривимірних доменів, які моделюють реальну пористу структуру пресовки молібдену та регулярну пористу структуру за щільного вкладання сфер.

Результати дослідження. Виконано математичний аналіз внеску перевипромінювання до загальної теплопровідності пористого матеріалу. Наведено залежності відносної теплопровідності від пористості матеріалу та відносного радіуса контактів між його частинками.

Висновки. За результатами математичного аналізу умов теплообміну в пористій пресовці молібдену для випадку електронно-променевого нагрівання встановлено, що променистий складник теплопровідності пористого тіла з порами порядку 2,5 мкм на чотири порядки менший, ніж кондуктивний складник.

За результатами скінченно-елементного моделювання двовимірних і тривимірних пористих об'єктів встановлено значний вплив площі контактів між частинками на їхню інтегральну теплопровідність, особливо за малих розмірів цих контактів. Водночас встановлено практично лінійний вплив пористості на теплопровідність за радіусів контактів між частинками $> 0,1 R_{\text{частинки}}$. Показано значний вплив однорідності розподілу контактів у пористому матеріалі на однорідність температурного поля.

Ключові слова: теплопровідність; пористість; електронно-променеве нагрівання; спікання; контакт між частинками.

Вступ

Розроблення будь-якого варіанту технологій спікання порошкових виробів із використанням висококонцентрованих джерел енергії (лазерний або електронний промінь, іскровий розряд або електрична дуга) неможливе без детального вивчення теплових умов, що створюються у цих виробках. Таке вивчення можливо проводити експериментальними [1–3, 5, 7, 9, 11] та розрахунковими методами [3–9]. Точність і вірогідність, яку забезпечують сучасні методи моделювання, дають змогу не лише передбачати результат за визначених умов, а й, що цінніше, аналізувати весь змодельований процес у просторі та часі [10].

Головною складністю, що виникає під час спроби змодельувати процес спікання в умовах швидкісного нагрівання, що спричиняє високі температурні градієнти, є складний взаємозв'язок ефективних теплофізичних властивостей виробу та температурно-часових умов спікання. Так, процес спікання, що відбувається за певного режиму нагрівання, призводить до зміни параметрів пористості (об'єму, форми, кількості

ті пор), що нелінійно впливає на ефективну теплопровідність матеріалу. Останнє призводить до змін умов теплообміну та, як наслідок, режиму нагрівання.

Тож створення моделі процесу спікання порошкових виробів із застосуванням електронно-променевого нагрівання необхідно розпочинати з вивчення впливу параметрів пористої структури на ефективні теплофізичні властивості пресовок.

Щільність ($\rho^{\text{порист}}$) і теплоємність пресовки (пористого матеріалу) розраховуються із застосуванням правила адитивності [12]. З урахуванням того, що щільність та теплоємність другого складника (пор) в умовах електронно-променевого спікання (у вакуумі) дорівнює нулю, відповідна залежність буде такою:

$$\begin{aligned} c_p^{\text{порист}} &= c_p(1 - P); \\ \rho^{\text{порист}} &= \rho(1 - P), \end{aligned} \quad (1)$$

де c_p і ρ – теплоємність (Дж/(кг К)) і щільність (кг/м³) матеріалу порошку; P – пористість матеріалу (відносні одиниці).

Для випадку пор як неперервних волокон, що мають один напрямок, теплопровідність у цьому напрямку також можна розрахувати за формулою адитивності [12]. Але в усіх інших практично значущих випадках за цією формулою можна визначити лише верхню межу ефективної теплопровідності та необхідно застосовувати інші розрахункові моделі [4, 6].

Постановка задачі

Метою дослідження є добір методу розрахунку теплопровідності пористого тіла, що буде встановлена за різних умов електронно-променевого спікання пресовок молібдену, та вивчення впливу параметрів пористої структури на теплопровідність.

Основні результати досліджень

Розробка моделі теплопередачі в пористому тілі. Теплопередача в пористому тілі загалом реалізується як сума кондуктивного та променистого складників [3, 5, 7, 9]. Заведено, що перенесення тепла шляхом випромінювання у порах відбувається як променистий теплообмін між дифузно-сірими поверхнями [12]:

$$q = \varepsilon \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4), \quad (2)$$

де q – тепловий потік між протилежними поверхнями пори в напрямку градієнта температури, Вт/м²; ε – коефіцієнт випромінювання матеріалу; σ_0 – стала Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_1 і T_2 – температури на протилежних поверхнях пори, К.

Якщо прийняти $\Delta T = T_1 - T_2$ – різниця температур на протилежних поверхнях пори, то рівняння (2) виглядатиме так:

$$q = \varepsilon \sigma_0 \Delta T (4T_2^3 + 6T_2^2 \Delta T + 4T_2 \Delta T^2 + \Delta T^3). \quad (3)$$

Якщо розглядати пору як елемент структури з розміром Δx у напрямку градієнта температури, то можна прийняти, що її еквівалентна теплопровідність з урахуванням рівняння (3) буде

$$\lambda = \frac{\varepsilon \sigma_0 \Delta T (4T_2^3 + 6T_2^2 \Delta T + 4T_2 \Delta T^2 + \Delta T^3)}{\Delta T} \Delta x = \varepsilon \sigma_0 \Delta x (4T_2^3 + 6T_2^2 \Delta T + 4T_2 \Delta T^2 + \Delta T^3). \quad (4)$$

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності пори товщиною 2,5 мкм для перепаду температур на її протилежних поверхнях до 90 К (рис. 1) і за температур матеріалу 0–2500 К не перевищує 0,01 Вт/(м·К).

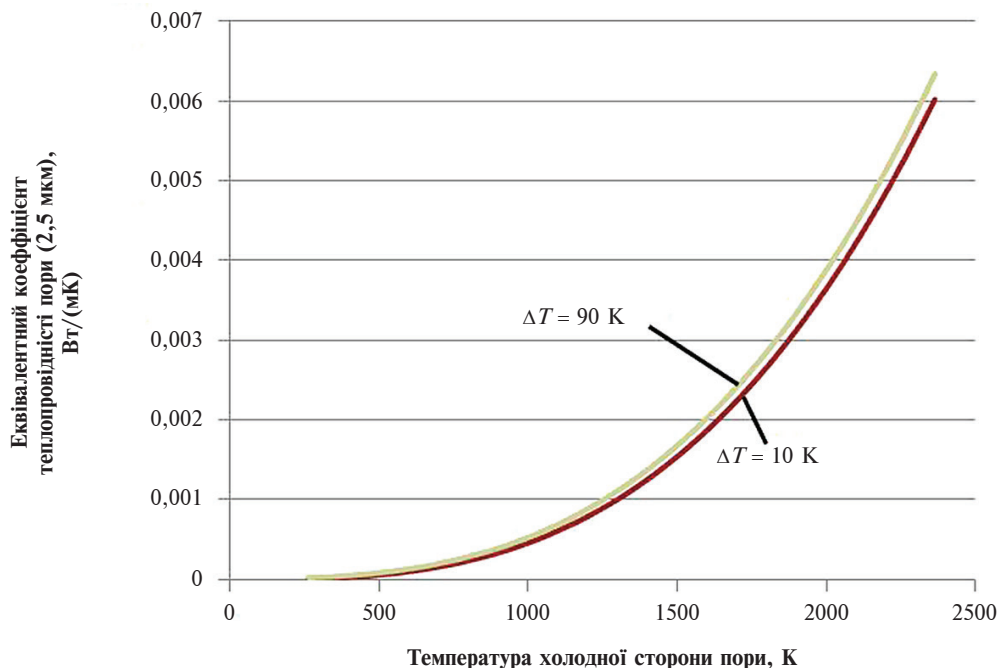


Рис. 1. Температурна залежність еквівалентного коефіцієнта теплопровідності пори товщиною 2,5 мкм шляхом випромінювання для різниці температур на сторонах пори 10 і 90 К

Як порівняти з еквівалентною теплопровідністю пор, теплопровідність молібдену має на чотири порядки більші значення (у межах 90–140 Вт/(м·К)) [13]. Тому за моделювання спікання, що відбувається у вакуумі, можна нехтувати променистим складником теплообміну всередині пористого тіла. Як було показано в [1, 5], таке припущення справедливе та може використовуватись для частинок порошку, менших за 150 мкм.

Комп'ютерне моделювання теплопередачі.

На першому етапі досліджень кондуктивний теплообмін у пористому тілі моделювали методом скінченних елементів на основі двовимірного домену. Для моделювання обрали структуру на шліфі реальної пресовки порошку молібдену, зображення якої отримали за використання електронного мікроскопа, та провели бінаризацію (рис. 2, *а*). Зображення дискретизованого двовимірного розрахункового домену розміром 30×30 мкм показано на рис. 2, *б*.

Граничні умови на бічних сторонах домену – адіабатичні (брак теплових потоків), на верхній ($T = 2000\text{ °C}$) і нижній ($T = 1990\text{ °C}$) сторонах – ізотермічні (постійна температура). Використання двовимірної моделі не дає змоги адекватно оцінити теплопровідність реальної пресовки, але її можна застосовувати [8], бо вона суттєво спрощує дослідження впливу пористості та сумарної площі контактних перешийків між частинками на інтегральну теплопровідність пресовки. Так, за результатами досліджень описаної моделі встановлено, що збільшення площі контактів між частинками в 1,33 раза, за одночасного збільшення їх кількості у 1,55 раза (рис. 2, *б* і 2, *д*), призводить до зменшення пористості лише на 2,5 % (з 28,5 % до 26 %).

Водночас інтегральна теплопровідність пористого матеріалу збільшується у понад 3,5 раза (з 10,3 Вт/(м·К) до 36,5 Вт/(м·К), а однорідність температурного поля в пористому матеріалі підвищується у понад 5 разів (рис. 2, *в* і 2, *д*).

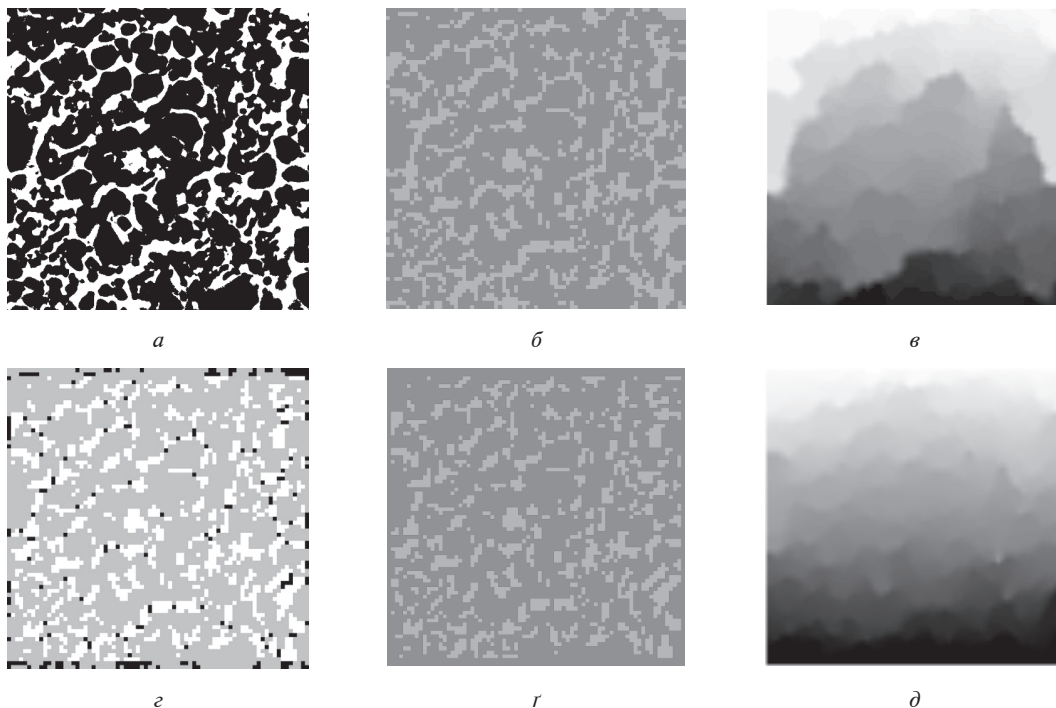


Рис. 2. Вплив кількості та площі контактів на теплопровідність пресовки молібдену: *а* – структура пресовки молібдену після бінаризації (чорним кольором позначено молібден); *б* – розрахунковий домен з умовною площею контактів між частинками 74 мкм² (чорним кольором позначено молібден); *в* – розподіл температур у домені з умовною площею контактів між частинками 74 мкм² у стаціонарному режимі (білий колір відповідає 2000 °С, чорний – 1990 °С); *г* – місця створення додаткових контактів для дослідження впливу площі контактів між частинками (чорним кольором позначено елементи, що додаються); *д* – розрахунковий домен з умовною площею контактів між частинками 98 мкм² (чорним кольором позначено молібден); *е* – розподіл температур у домені з умовною площею контактів між частинками 98 мкм² у стаціонарному режимі (білий колір відповідає 2000 °С, чорний – 1990 °С)

Результати, отримані на першому етапі досліджень, вказують на значний вплив площі контактів між частинками на інтегральну теплопровідність пресовки. Тому на другому етапі досліджено вплив розміру контактів між частинками порошку на теплопровідність пресовок різної пористості. Дослідження проведені з урахуванням залежності теплофізичних властивостей молібдену від температури [13]. Для адекватного відтворення об'ємних теплових потоків у пористому матеріалі моделювання проводили на тривимірному кубічному домені. Структурою, що моделювали, була щільна укладка сферичних частинок однакового розміру (рис. 3, *а*). Елементарний об'єм, який відповідав цій структурі, показано на рис. 3, *б*. На його основі створювали тривимірний розрахунковий домен.

Різні площі контактів між частинками моделювали як створенням відповідних граничних умов між скінченними елементами контактних частинок, так і збільшенням кількості скінченних елементів різних частинок, які знаходяться у контакті. Різну пористість матеріалу моделювали зміною початково сферичної форми частинок на ділянках, віддалених від контактів.

За результатами другого етапу досліджень отримано емпіричні залежності відносної теп-

лопровідності (відношення теплопровідності пористого матеріалу до теплопровідності суцільного) пресовок від відносного радіуса контактів (відношення радіуса контакту до радіуса частинки) між частинками для різних рівнів пористості (рис. 4). Відповідно до отриманих результатів, за збільшення відносного радіуса контактів 0–10 % відносна теплопровідність збільшується практично лінійно: 0–20 %, причому незалежно від пористості зразка (0–35 %), що свідчить про те, що за малої площі контактів теплові потоки визначаються саме контактами. В інтервалі відносних радіусів контактів 10–56 % зразки з більшою пористістю мають меншу теплопровідність, причому теплопровідність у цьому інтервалі визначається здебільшого пористістю. Інакше кажучи, за великих відносних радіусів контактів теплопровідність визначається саме пористістю зразка.

Розгляд отриманих даних у координатах пористість – відносна теплопровідність (рис. 5) показав, що пористість (у межах 0–35 %) практично лінійно впливає на теплопровідність. Причому, як було зазначено вище (рис. 4), збільшення площі контактів між частинками призводить до збільшення впливу пористості зразка на його теплопровідність.

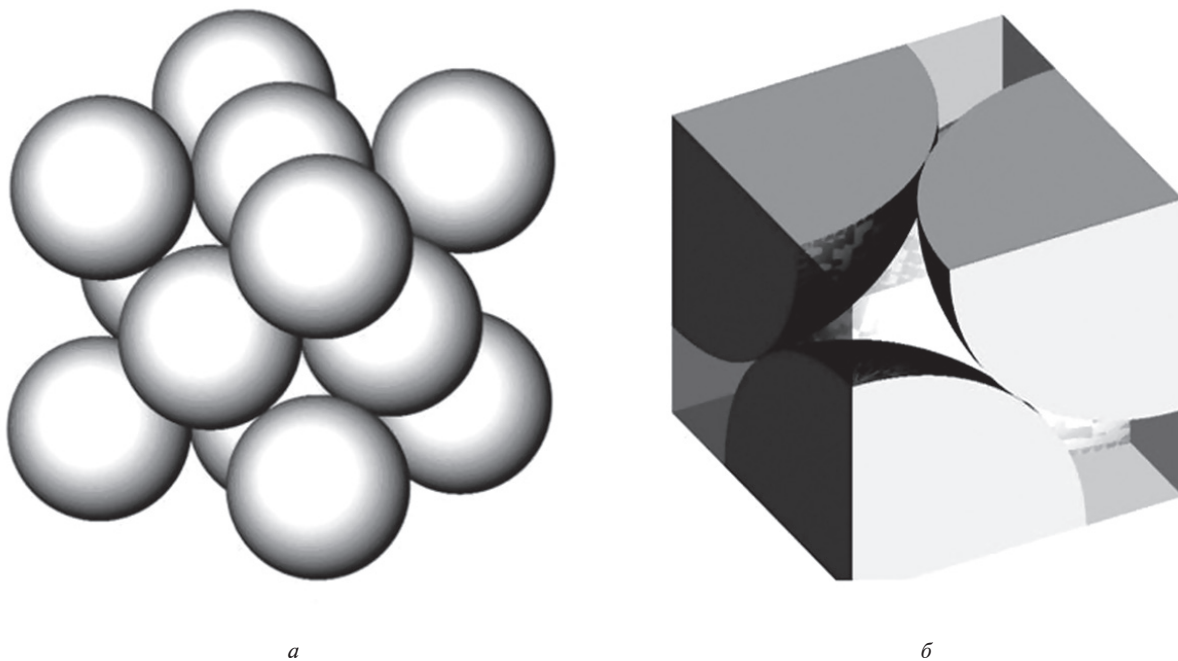


Рис. 3. Модель щільної укладки сферичних частинок (*а*) та розрахунковий домен (*б*)

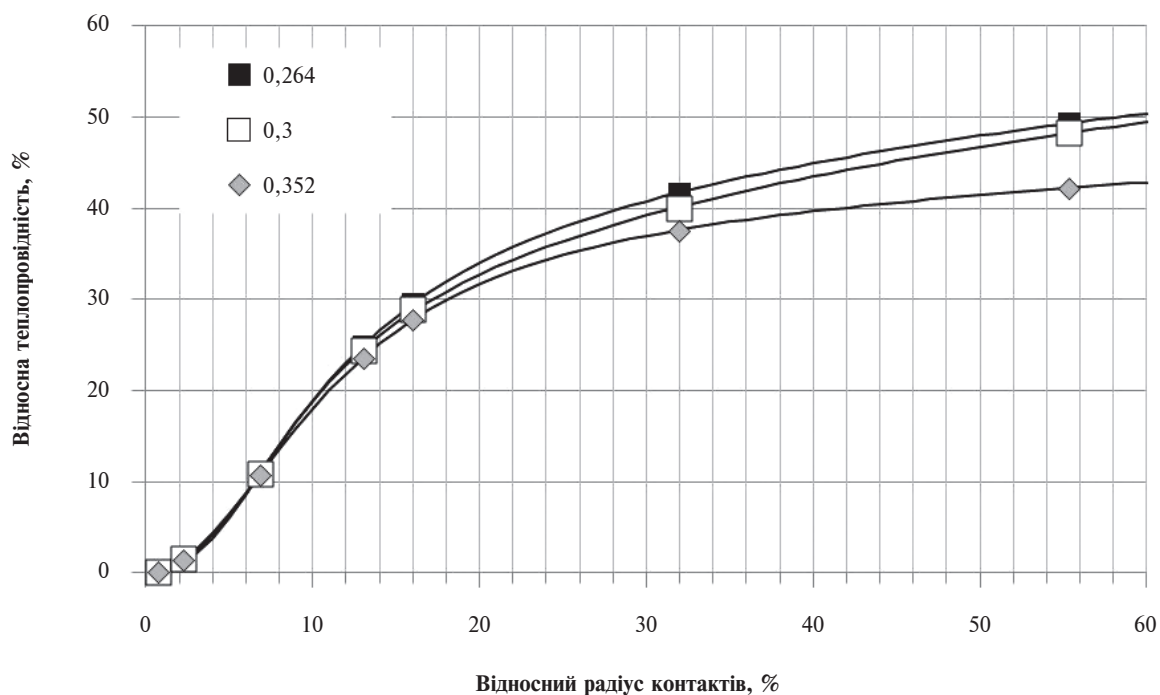


Рис. 4. Залежність відносної теплопровідності пористого матеріалу від відносного радіуса контактної поверхні для зразків різної пористості

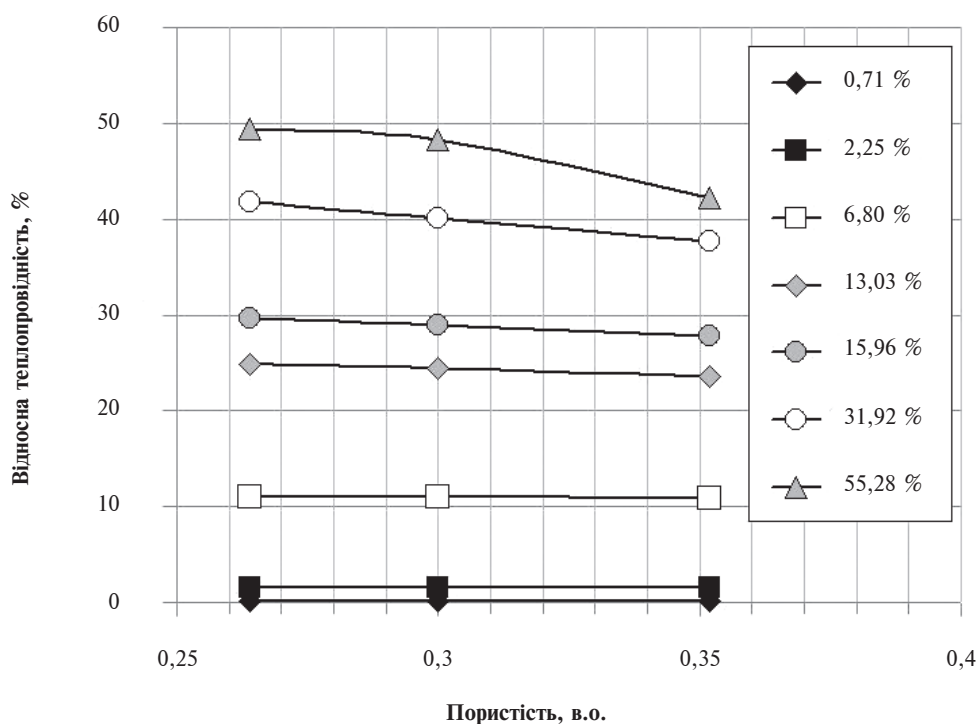


Рис. 5. Залежність відносної теплопровідності пористого матеріалу від пористості для зразків із різними відносними радіусами контактної поверхні між частинками

Проведення математичної обробки отриманих результатів дало змогу виконати апроксимацію (рис. 6) та отримати математичну залежність відносної теплопровідності пористого матеріалу від пористості та розміру контактів між частинками. Використання цієї залежності дає можливість проводити математичне моделювання процесу спікання та пов'язаних між собою процесів зміни температури за нагрівання, еволюції пористої структури, зміни ефективної теплопровідності матеріалу, впливу одержаного теплового поля на еволюцію пор тощо. Особливо важливим є оцінювання такого процесу в умовах швидкісного нагрівання, зокрема електронним променем. Враховуючи закономірності різних механізмів спікання, з'являється можливість передбачати еволюцію пористої структури в умовах заданих режимів електронно-променевого нагрівання та уникати нерівномірної усадки виробів, яка призводить до їх розтріскування та коалесценції пор.

Висновки

За результатами математичного аналізу умов теплообміну в пористій пресовці молибдену для випадку електронно-променевого нагрівання встановлено, що променистий складник теплопровідності пористого тіла з порами порядку 2,5 мкм на чотири порядки менший, ніж кондуктивний.

За результатами скінченно-елементного моделювання двовимірних і тривимірних пористих об'єктів встановлено значний вплив площі контактів між частинками на їхню інтегральну теплопровідність, особливо за малих розмірів цих контактів. Водночас з'ясо-

вано практично лінійний вплив пористості на теплопровідність за радіусів контактів між частинками $> 0,1 R_{\text{частинки}}$. Показано значний вплив однорідності розподілу контактів у пористому матеріалі на однорідність температурного поля.

У подальших дослідженнях доцільно виконати порівняльний аналіз модельних результатів, отриманих у ході математичних розрахунків, із реальними значеннями теплообміну, що виникає під час консолідації порошкових пресовок молибдену за електронно-променевого нагрівання.

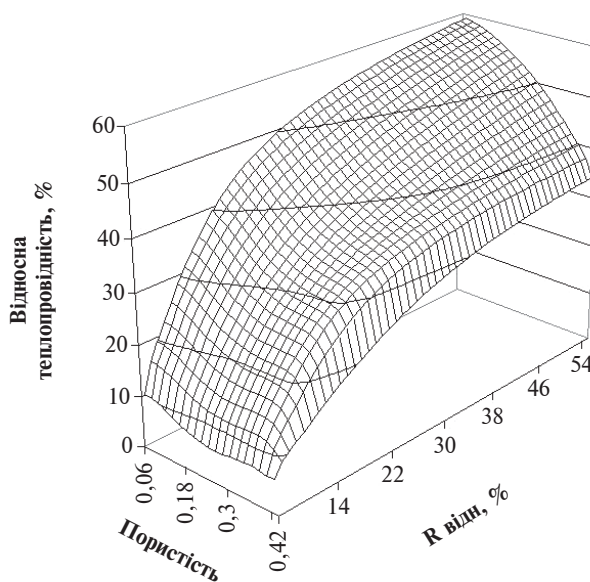


Рис. 6. Апроксимація розрахункових даних відносної теплопровідності від пористості та відносного радіуса контактних поверхонь між частинками

References

- [1] E.S. Huetter *et al.*, "Determination of the effective thermal conductivity of granular materials under varying pressure conditions," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, no. E12, pp. 286–296, 2008. doi: 10.1029/2008je003085
- [2] J. Mo and H. Ban, "Measurements and theoretical modeling of effective thermal conductivity of particle beds under compression in air and vacuum," *Case Stud. Thermal Eng.*, vol. 10, pp. 423–433, 2017. doi: 10.1016/j.csite.2017.10.001
- [3] D. Moser *et al.*, "Computation of effective thermal conductivity of powders for selective laser sintering simulations," *J. Heat Transf.*, vol. 138, no. 8, pp. 977–988, 2016. doi: 10.1115/1.4033351
- [4] N. Sakatani *et al.*, "Thermal conductivity model for powdered materials under vacuum based on experimental studies," *AIP Advances*, vol. 7, no. 1, p. 015310, 2017. doi: 10.1063/1.4975153
- [5] C.K. Chan and C.L. Tien, "Conductance of packed spheres in vacuum," *J. Heat Transf.*, vol. 95, no. 3, pp. 302–308, 1973. doi: 10.1115/1.3450056
- [6] W. Schotte, "Thermal conductivity of packed beds," *AIChE J.*, vol. 6, no. 1, pp. 63–67, 1960. doi: 10.1002/aic.690060113
- [7] D. Shah and A.N. Volkov, "Calculation of effective thermal conductivity of powder bed systems using smoothed particle hydrodynamics method," in *The 16th Annual Early Career Technical Conf.*, Birmingham, 2016.
- [8] G. Weidenfeld *et al.*, "A theoretical model for effective thermal conductivity (ETC) of particulate beds under compression," *Granul. Matter*, vol. 6, no. 2–3, pp. 121–129, 2004. doi: 10.1007/s10035-004-0170-1

- [9] D. de Moraes and A. Czekanski, "Parametric thermal FE analysis on the laser power input and powder effective thermal conductivity during selective laser melting of SS304L," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 2, no. 3, p. 47, 2018. doi: 10.3390/jmmp2030047
- [10] M.R. Alkahari *et al.*, "Thermal conductivity of metal powder and consolidated material fabricated via selective laser melting," *Key Eng. Mater.*, vol. 523–524, pp. 244–249, 2012. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.244
- [11] Kh. Uong, *Basic formulae and data on heat transfer for engineers*. Moscow, Russia: Atomizdat, 1979.
- [12] V.E. Zinovev, *Thermophysical properties of metals at high temperatures*. Moscow, Russia: Metallurgy, 1989.

Ю.Н. Романенко, О.В. Степанов, П.И. Лобода, Ю.И. Богомол

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СПЕКАНИИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

Проблематика. Разработка процессов консолидации порошковых изделий с использованием высококонцентрированных источников энергии невозможна без детального анализа тепловых условий, возникающих в этих изделиях.

Цель исследования. Выбрать метод расчета теплопроводности пористого тела, которую будут устанавливать при различных условиях электронно-лучевого спекания прессовок молибдена; изучить влияние параметров пористой структуры на теплопроводность.

Методика реализации. Анализ спекания в конечно-элементных расчетах, задачах теплопроводности для двумерных и трехмерных доменов, моделирующих реальную пористую структуру прессовки молибдена и регулярную пористую структуру при плотной укладке сфер.

Результаты исследования. Выполнен математический анализ вклада переизлучения в общую теплопроводность пористого материала. Приведены зависимости относительной теплопроводности от пористости материала и относительного радиуса контактов между его частицами.

Выводы. По результатам математического анализа условий теплообмена в пористой прессовке молибдена для случая электронно-лучевого нагрева установлено, что лучистая составляющая теплопроводности пористого тела с порами порядка 2,5 мкм на четыре порядка меньше кондуктивной составляющей.

По результатам конечно-элементного моделирования двумерных и трехмерных пористых объектов установлено значительное влияние площади контактов между частицами на их интегральную теплопроводность, особенно при малых размерах этих контактов. Одновременно установлено практически линейное влияние пористости на теплопроводность при радиусах контактов между частицами $> 0,1 R_{\text{частицы}}$. Показано значительное влияние однородности распределения контактов в пористом материале на однородность температурного поля.

Ключевые слова: теплопроводность; пористость; электронно-лучевой нагрев; спекание; контакт между частицами.

Yu.M. Romanenko, O.V. Stepanov, P.I. Loboda, Yu.I. Bogomol

EFFECTIVE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF POWDER MATERIALS DURING SINTERING UNDER ELECTRON-BEAM HEATING

Background. Development of the consolidation processes of powder products using highly concentrated energy sources is impossible without a detailed analysis of the processes of thermal conditions arising in these products.

Objective. The aim of the study is to select a method for calculating the thermal conductivity of a porous body, which will be established under various conditions of electron-beam sintering of molybdenum compacts, and to study the effect of the parameters of the porous structure on the thermal conductivity.

Methods. An analysis of the sintering process in finite element calculations, in problems of thermal conductivity for two-dimensional and three-dimensional domains, simulating the real porous structure of molybdenum compaction and a regular porous structure with dense packing of spheres is proposed.

Results. Mathematical analysis of the contribution of re-radiation to the total thermal conductivity of the porous material is performed. The obtained dependences of the relative thermal conductivity on the porosity of the material and the relative radius of contacts between its particles are presented.

Conclusions. According to the results of the mathematical analysis of the conditions of heat transfer in a porous compact of molybdenum for the case of electron-beam heating, it was found that the radiant component of the thermal conductivity of a porous body with pores of the order of 2.5 μm is four orders of magnitude less than the conductive component of its thermal conductivity.

Based on the results of finite element modeling of two-dimensional and three-dimensional porous objects, a significant effect of the contact area between particles on their integral thermal conductivity has been established, especially at small sizes of these contacts. At the same time, almost linear effect of porosity on thermal conductivity was established at contact radii between particles $> 0.1 R_{\text{particles}}$. A significant influence of the uniformity of the distribution of contacts in a porous material on the uniformity of the temperature field in it is shown.

Keywords: thermal conductivity; porosity; electron-beam heating; sintering; contact between particles.

Рекомендована Радою
Інституту матеріалознавства та зварювання
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
26 жовтня 2020 року

Прийнята до публікації
29 березня 2021 року