

УДК 622.24.051:536.2:004.942

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

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ІНДУКЦІЙНОГО ТА ПРОМЕНЕВОГО НАГРІВАННЯ ПРИ СПІКАННІ КОМПОЗИТІВ

Представлено комп'ютерну модель температурного поля в технологічній установці при спіканні порошкових заготовок з використанням індукційного та променевого нагрівання. Проведено чисельний аналіз температурного поля в елементах установки та заготовках у процесі спікання. Показано, що з використанням комп'ютерного експерименту можна керувати розподілом температури в елементах технологічної установки, а отже, оптимізувати режим спікання.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, індукційне та променеве нагрівання, спікання, карбідні композити.

Вступ

При виборі режимів високотемпературного спікання порошкових сумішей з

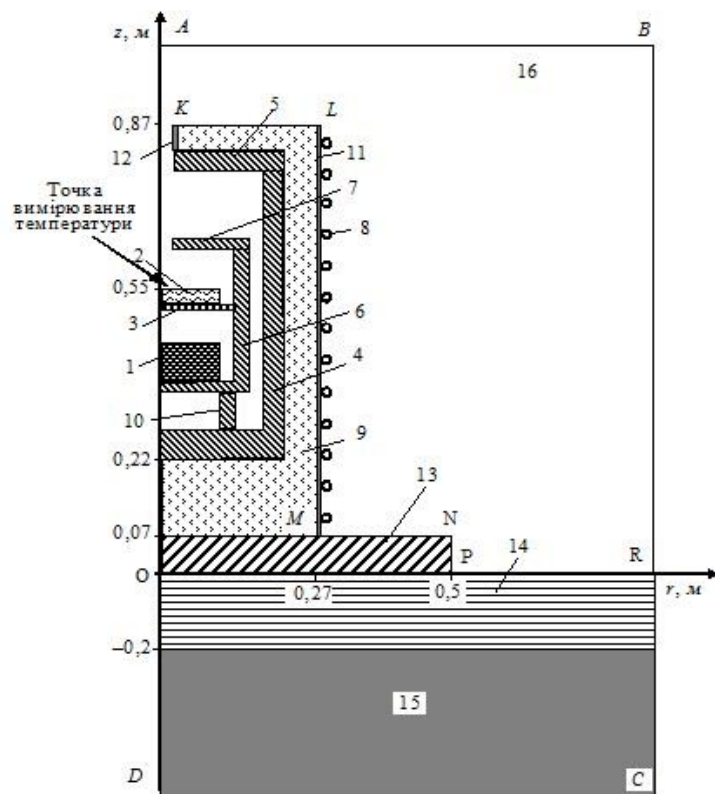


Рис. 1. Схема осьового перерізу установки: 1 – заготовка; 2 – інфільтрат; 3 – інфільтраційна решітка; 4 – зовнішній тигель із кришкою 5; 6 – внутрішній тигель із кришкою 7; 8 – індуктор; 9 – ізоляційна засипка; 10 – графітовий циліндр; 11 – азбестова прокладка; 12 – азбестова трубка; 13 – азбестова плита; 14 – бетон; 15 – ґрунт; 16 – повітря

використанням індукційного та променевого нагрівання важливо мати інформацію про температурне поле в елементах технологічної установки та виробів, що спікаються. Оскільки контроль за температурою в установці за допомогою приладів можливий лише в дуже обмеженому її об'ємі, тому важливим є комп'ютерне моделювання процесів індукційного та променевого нагрівання. На даний час багато праць дослідників присвячено моделюванню індукційного нагрівання в різних технологічних процесах [1–3] та комп'ютерному моделюванню процесів теплообміну випромінюванням [4–6]. Проте робіт, присвячених моделюванню індукційного нагрівання та променевого теплообміну, не виявлено.

Математична модель індукційного та променевого нагрівання

При протіканні в індукторі змінного електричного струму виникає індукований в електропровідних елементах установки – графітових тиглях 4, 6 (рис. 1) – коловий струм.

У свою чергу це зумовлює виникнення джерел тепла, в результаті дії яких температура підвищується від кімнатної до 2273–2473 К. Заготовка 1 та інфільтрат 2 нагріваються переважно випромінюванням тепла від внутрішніх поверхонь тиглів. Після нагрівання інфільтрату (кремнію) до температури плавлення (1688 К) він просочується крізь решітку на заготовку і просочується в неї. Таким чином спікається заготовка з її ущільненням в результаті просочування. У моделі прийнято спрощення: після просочення інфільтрату він зникає з інфільтраційної решітки, однак у комп'ютерній моделі зразок інфільтрату 2 використовується до завершення спікання.

Математична модель індукційного нагрівання, теплопровідності та протікання неволого теплообміну між поверхнями елементів технологічної установки та заготовок, що спікаються, складається із системи рівнянь квазіусталеного електромагнітного поля і теплопровідності [2]

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{E}\right)-i\omega\mu_0(\mathbf{J}+\mathbf{J}_0)-\omega^2\mu_0\mathbf{D}=0, \quad \mathbf{J}=\frac{1}{\gamma}\mathbf{E}, \quad \mathbf{D}=\varepsilon_0\varepsilon\mathbf{E}; \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \frac{1}{2\gamma} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \quad (2)$$

з початковими та граничними умовами

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, 0) = \mathbf{0}; \quad T(\mathbf{r}, 0) = T_0; \quad \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{r} \in l_{Oz} \cup S_{ABCD}; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(\mathbf{r}, t) = 0, \quad \mathbf{r} \in l_{Oz} \cup S_{DCR}, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n}(\mathbf{r}, t) = \alpha(T_C - T), \quad \mathbf{r} \in S_{MNP R}; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(\mathbf{r}, t) = \alpha(T_C - T) + e\sigma(T_C^4 - T^4), \quad \mathbf{r} \in S_{KLM} \quad (5)$$

на осі симетрії l_{Oz} і зовнішніх поверхнях S_{ABCL} , S_{DCR} , S_{KLM} , $S_{MNP R}$ (див. рис. 1). В (1) – (5) вжито загальноприйняті позначення. Для моделювання теплообміну випромінюванням між поверхнями S_1, S_2, \dots, S_N використовуються рівняння [4]

$$\sum_{i=1}^{N_k} \left(\frac{\delta_{ji}}{e_i} - F_{ji} \frac{1-e_i}{e_i} \right) \frac{Q_i}{A_i} = \sum_{i=1}^{N_k} (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (6)$$

$$Q_i = \sigma e_i F_{ij} A_i (T_i^4 - T_j^4), \quad F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dS_j dS_i, \quad (7)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера, e_i – коефіцієнт випромінювання i -ї поверхні, Q_i – величина енергії, яку випромінює i -та поверхня, A_i – площа i -ї поверхні, N_k – кількість поверхонь, що входять в k -ту групу поверхонь, T_i, T_j – абсолютна температура i -ї та j -ї поверхні відповідно, F_{ij} – кутовий коефіцієнт, β_i – кут між вектором $P_i P_j$ і нормаллю до поверхні S_i в точці P_i , β_j – кут між вектором $P_i P_j$ і нормаллю до поверхні S_j в точці P_j ; r – відстань між точкою P_i поверхні S_i та точкою P_j поверхні S_j .

Результати обчислень

Для розв'язання задачі (1) – (7) використовували метод скінченних елементів у поєднанні з методом Гальоркіна та різницевою процедурою в часі, що базується на схемі Ньютона–Рафсона; для моделювання променевого теплообміну застосовували метод випромінювань [4]. Обчислення виконано при таких даних: внутрішній діаметр індуктора – 0,27 м, кількість його витків – 13 та висота – 0,74 м; зовнішній діаметр зовнішнього тигля – 0,20 м, його внутрішній діаметр – 0,175 м; розміри решти елементів установки можна визначити з пропорцій рис. 1. Розмір зовнішньої області ($0 \leq x \leq 1,5$ м, $-1,7 \leq y \leq 2,5$ м) вибрали такий, щоби в задачі для електромагнітного поля на її межі S_{ABCD} напруженість поля дорівнювала нулю. Властивості матеріалів заготовки (пористий SiC, пористість $n = 0,12$), інфільтрату, інфільтраційної решітки (графіт МГ), тиглів (графіт ЕГ-1), засипки (порошок ZrO_2), азбесту, бетону та ґрунту задавали згідно з даними, наведеними в [7–10]. Для

випромінювальної здатності графіту ЕГ-1 використали дані, наведені в [9], коефіцієнт випромінювання з поверхонь кремнію та заготовки дорівнював 0,8, з поверхонь ZrO_2 -засипки – 0,86. У формулах (4) і (5) при моделюванні конвекційного теплообміну на поверхнях S_{KL} і S_{MNP} $\alpha = 25$ Вт/(м²·°С), на поверхні S_{LM} $\alpha = 77,5$ Вт/(м²·°С) (вибрано на основі балансу теплоти в прокладці 11 з азбестового картону товщиною 3 мм). Частота струму становила 2200 Гц; режим нагрівання задавали згідно з даними табл. 1 для загальної потужності та діючої сили струму в індукторі; витрати на нагрівання води у трубці індуктора дорівнювали 10–30 кВт.

Таблиця 1. Режим нагрівання у процесі спікання

| Час, хв. | 0–60 | 60–120 | 120–150 | 150–180 | 180–220 | 220–240 |
|-----------------------------|------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Потужність, кВт | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| Сила струму в індукторі, кА | 1,38 | 1,95 | 2,18 | 2,39 | 2,76 | 2,80 |

При моделюванні променевого теплообміну умови (6), (7) задавали для кожної з чотирьох груп поверхонь ($K = 4$ у (6)) (див. рис. 1): внутрішні поверхні зовнішнього тигля з кришкою, зовнішні поверхні внутрішнього тигля та поверхня графітового циліндра; поверхні інфільтрату, інфільтраційної решітки та внутрішні поверхні внутрішнього тигля; поверхні SiC-заготовки і інфільтраційної решітки та частина поверхні внутрішнього тигля; внутрішня поверхня графітового циліндра і відповідні частини поверхонь тиглів.

За результатами обчислень побудували картини розподілу температури в технологічній установці та SiC-заготовці, а також графіки зміни температури в характерних точках елементів установки, заготовки та інфільтрату. У процесі нагрівання вимірювали температуру на

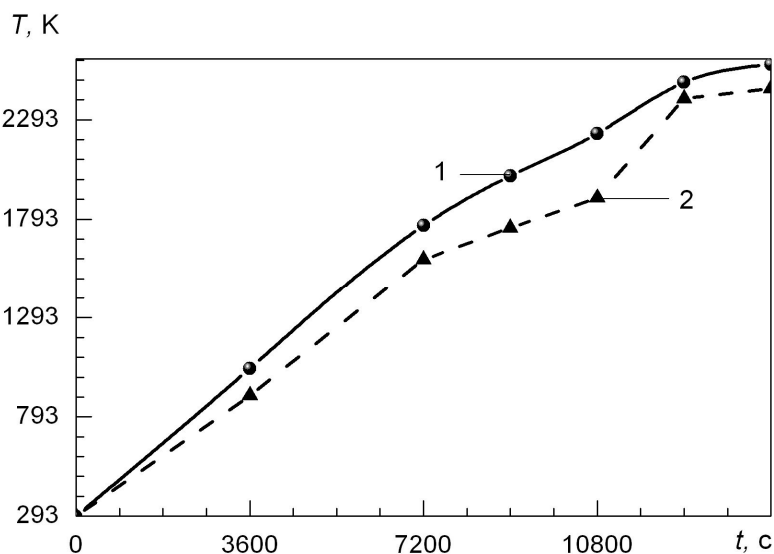


Рис. 2. Порівняння результатів обчислень (1) і вимірювань (2) температури на поверхні кремнію та інфільтраційної решітки

поверхні інфільтрату (див. рис. 1), а після його просочення крізь інфільтраційну решітку в SiC-заготовку – на поверхні решітки. Температуру вимірювали пірометром «Промінь» через трубку 12 та отвори у кришках обох тиглів. Результати обчислень та вимірювання показано на рис. 2. Як бачимо, обчислена температура перевищує виміряну. Ймовірно, це пов'язано із систематичною похибкою вимірювання, що зумовлена наявністю газового середовища в об'ємах тиглів, яке частково розсіює і поглинає світловий сигнал на шляху до пірометра. Отже, результати розрахунків та

вимірювань взаємоузгоджуються, що свідчить про адекватність комп'ютерної моделі.

За ступенем прогрівання інфільтрату та SiC-заготовки процес нагрівання можна поділити на дві стадії: перша триває від початку нагрівання до моменту – 6700 с – прогрівання всього об'єму інфільтрату до температури плавлення, друга – з моменту 6700 с до завершення спікання. Як впливає з аналізу результатів обчислень, на початку першої стадії – до моменту 2400 с – в

нагріванні заготовки та інфільтрату переважає нагрівання шляхом теплопровідності від більш нагрітих елементів установки до менш нагрітих SiC-заготовки та кремнію (рис. 3, а; 4,а), у подальші моменти часу переважає променеве нагрівання (рис. 3, б, в; 4, б).

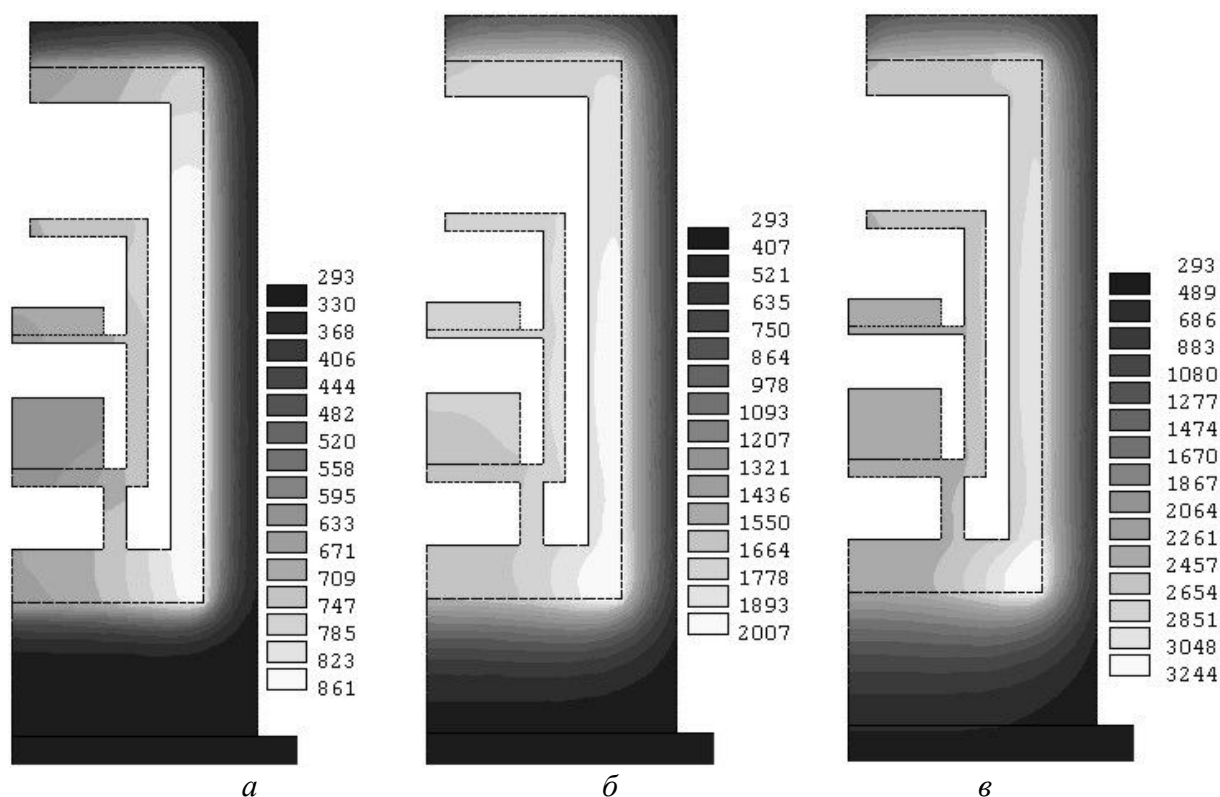


Рис. 3. Температурне поле (K) в технологічній установці в різні моменти процесу спікання: а – 1550 с; б – 6698 с; в – 12000 с

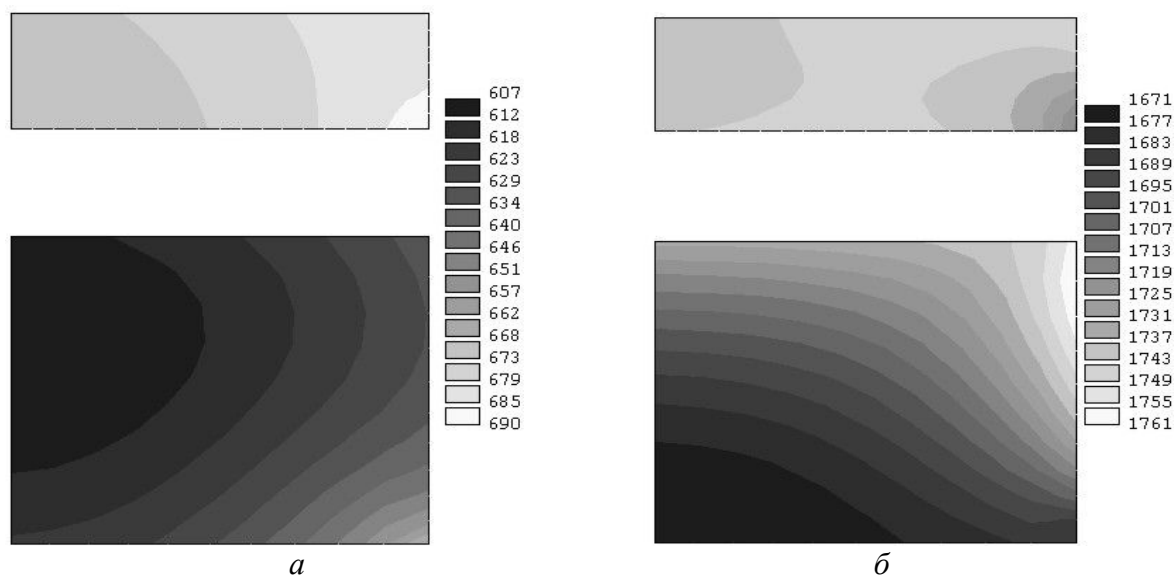


Рис. 4. Розподіл температури (K) в інфільтраті та SiC-заготовці в різні моменти часу: а – 1550 с; б – 6698 с

Як показано на рис. 3, зона найвищої температури установки розташована в об'ємі зовнішнього тигля, що спричинено його близькістю до обмотки індуктора. З плином часу ця

зона зміщується в нижню частину тигля, ближче до якої розміщена заготовка, ніж інфільтрат. Проте до моменту нагрівання інфільтрату до температури плавлення значна

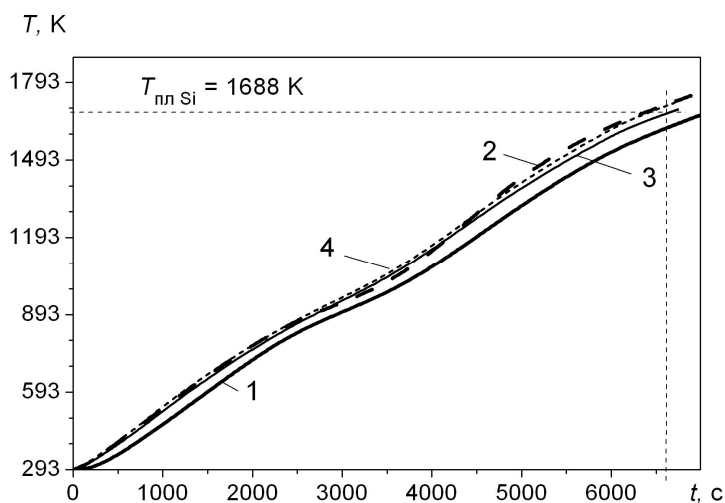


Рис. 5. Зміна в часі мінімальної (1) і максимальної (2) температури в заготовці та мінімальної (3) і максимальної (4) температури в інфільтраті (висота індуктора – 0,74 м)

меншій висоті індуктора – 0,6 м. Як засвідчили результати обчислень, при зменшенні висоти індуктора в технологічній установці відбувається концентрація електромагнітного поля в напрямі нижньої частини зовнішнього тигля. Відповідно зміщуються теплові джерела, внаслідок чого перерозподіляється температурне поле між інфільтратом і заготовкою. Цей перерозподіл полягає в тому, що тільки від початку нагрівання до моменту 2400 с заготовка нагрівається повільніше, ніж інфільтрат, а після цього моменту мінімальна температура в заготовці стає не меншою від максимальної температури в інфільтраті (рис. 6, 7). Тому після нагрівання інфільтрату до температури плавлення просочування інфільтрату в більш нагріту заготовку не уповільнюватиметься внаслідок температурного фактора. Таким чином, за допомогою комп'ютерного експерименту можна керувати розподілом температури в технологічній установці та оптимізувати процес спікання.

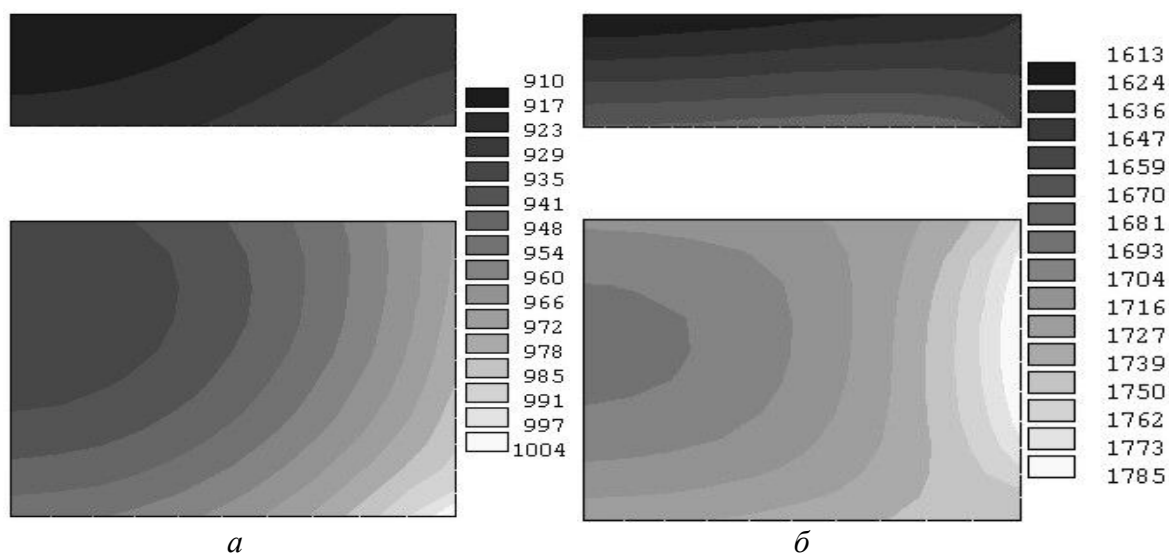


Рис. 6. Розподіл температури (К) в інфільтраті та SiC-заготовці в різні моменти часу: а – 2400 с; б – 5717 с (висота індуктора – 0,6 м)

частина об'єму заготовки не встигає нагрітися до цієї температури (рис. 4, 5). Отже, протягом першої стадії нагрівання температура нижньої частини заготовки менша від мінімальної температури інфільтрату. Зазначена обставина може спричинити уповільнення процесу просочування кремнієм карбідокремнієвої заготовки, що може призвести до зниження якості виробу в результаті спікання.

З метою дослідження можливості коригування розподілу температури в заготовці та інфільтраті було виконано комп'ютерний експеримент при

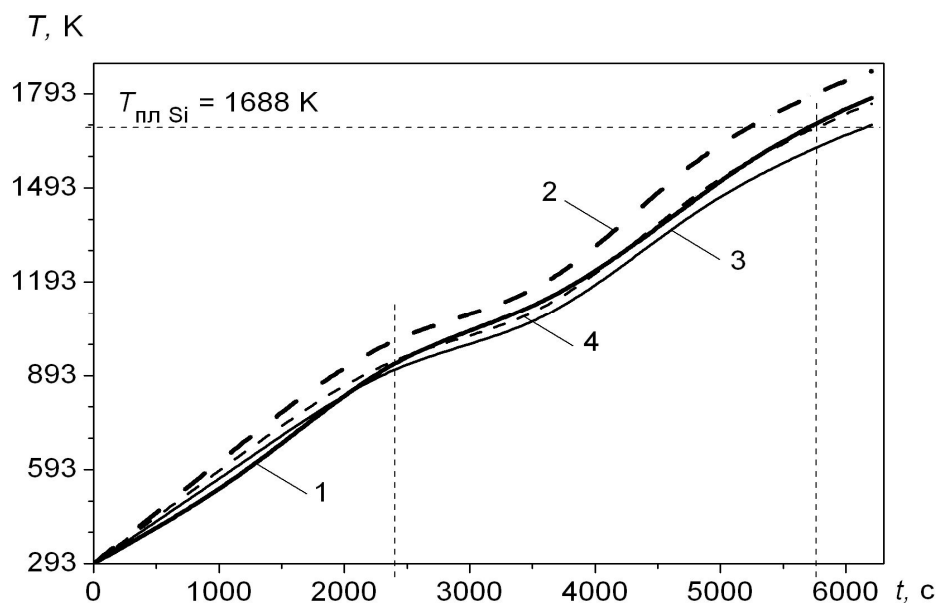


Рис. 7. Зміна в часі мінімальної (1) і максимальної (2) температури в заготовці та мінімальної (3) і максимальної (4) температури в інфільтраті (висота індуктора – 0,6 м)

Висновки

Розроблено комп'ютерну модель температурного поля технологічної установки у процесі спікання композитних матеріалів з використанням індукційного та променевого нагрівання. Показано, що при використанні комп'ютерного експерименту можна керувати розподілом температурного поля в установці при спіканні та оптимізувати режими спікання.

Представлено компьютерную модель температурного поля в технологической установке при спекании порошковых заготовок с использованием индукционного и лучистого нагревания. Проведен численный анализ температурного поля в элементах установки и заготовке в процессе спекания. Показано, что при использовании компьютерного эксперимента можно управлять распределением температуры в элементах технологической установки, а следовательно, оптимизировать режим спекания.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, индукционное и лучистое нагревание, спекание, карбидные композиты.

The computer model of temperature field in technological furnace during sintering of the powder specimen using inductive and radiation heating was presented. The numerical analysis of temperature field in technological furnace and in briquette was accomplished. It was shown that using computer experiment it is possible to govern the temperature field in technological furnace and in briquette during sintering and, hence, to optimize the regime of sintering.

Key words: computer simulation, induction and radiative heating, sintering, carbide composites.

Література

1. Lavers J. D., Ahmed M. R. A boundary element method to predict the shape of a molten metal free surface in an electromagnetic confinement field // IEEE Trans. Magnetics. – 1988. – N 24. – P. 2521–2523.
2. Дутка В. А. Математическое моделирование электромагнитных и термомеханических полей при горячем прессовании керамических материалов с использованием индукционного нагрева // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1991. – № 2. – С. 15–19.

3. Barglik J, Arendarska J., Dolega D., Smagor A. Numerical modeling of induction hardening of steel bodies // Int. Sci. Collog.: Model. for Electromagn. Proc., Hannover, Oct. 27–29, 2008. – P. 111–116.
4. Greenberg D. P., Cohen M. F., Torrance K. E. Radiosity: a method for computing global illumination // The Visual Computer. – 1986. – N 2. – P. 291–297.
5. Colomer G., Costa M., Consul R., Oliva A. Three-dimensional numerical simulation of convec and radiation in a differentially heated cavity using discrete ordinates method// Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2004. – N 47. – P. 257–269.
6. Тимошпольский В. И., Герман М. Л., Гринчук П. С., Андрианов Д. Н. Расчет характеристик переноса теплового излучения в рабочем пространстве кольцевой печи// Инж.-физ. ж. – 2005. – 78. – № 3. – С. 3–14.
7. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
8. Физико-химические свойства окислов: справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1969. – 456 с.
9. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / Под ред. В. П. Соседова. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
10. Єлізаров М. О., Журав В. В. Вплив механічного складу і вологості ґрунту на його електропровідність // Вісн. Кременчуцьк. нац. ун-ту. – 2010. – Вип. 6. – Ч. 1. – С. 182–185.

Надійшла 11.04.12

УДК 621.791.92.04

Е. Н. Еремин, В. В. Шалай, доктора технических наук; **А. С. Лосев**

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

ВЛИЯНИЕ БОРИДОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ

Приведены результаты исследования механических свойств и термической стойкости инструментальной мартенситно-стареющей стали Fe–Ni–Mo–Cr–V–Si–Ti–Al с композиционной структурой, содержащей соединения бора. Показано влияние боридов на характер упрочнения композиционного материала. Проанализирована роль боридов в повышении термостойкости стали, предназначенной для изготовления металлообрабатывающего инструмента.

Ключевые слова: *мартенситно-стареющая сталь, бориды, прочность, термостойкость.*

Методы горячей пластической деформации для изготовления деталей широко применяют в крупносерийном и массовом производстве. Это обусловлено, прежде всего рациональным использованием металла заготовки, чем в случае механической обработки, а также высокой производительностью процесса вследствие автоматизации, что в конечном итоге способствует снижению себестоимости изделия. С усложнением условий деформирования, в частности, более широким применением различных технологий выдавливания, накатки, вытяжки и вырубки более твердых металлов в условиях повышенного давления и нагрева, значительно ужесточились требования к работоспособности инструментальной оснастки. К важнейшим показателям, определяющим срок службы штампов и оснастки для горячей обработки металлов