

15. Ishikawa, H., Higuchi, H., & Kawaguchi, M. (2018). Intercalation of Calcium into a Graphite-like Layered Material. *Chem. Lett.*, 47(7), 891–893. DOI: 10.1246/cl.180236.
16. Eremets, M. I., Takemura, K., Yusa, H., Golberg, D., Bando, Y., Sato, Y., Watanabe, K., Amaya, K., Stephan, O., & Blank, V. D. (1997). Laser Heating of Boron Nitride and Graphite in a Diamond Anvil Cell. *MRS Proceedings*, 499, 321–326. DOI: 10.1557/proc-499-321.
17. Corrigan, F. R., & Bundy, F. P. (1975). Direct transitions among the allotropic forms of boron nitride at high pressure and temperatures. *J. Chem. Phys.*, 63(11), 3812–3820. DOI.org/10.1063/1.431874.

УДК 621.762.5, 004.94

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-235-244

Я.М. Романенко, канд. техн. наук; **М.П. Беженар**, д-р техн. наук
*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074, м. Київ, e-mail: jarlo1@ukr.net*

РОЗРАХУНКИ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ОСЕРЕДКУ РОБОЧОЇ КОМІРКИ АПАРАТІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ТИПУ «ТОРОЇД» ТА «КЗ» ПРИ ОДЕРЖАННІ ОДНОШАРОВИХ НАДТВЕРДИХ КОМПОЗИТИВ СИСТЕМИ cBN–Al–TiC (TiN)

Висвітлено результати розрахунків температурних полів в робочій комірці апарату високого тиску методом комп'ютерного моделювання. Показано, як змінюється температурне поле, потоки тепла та температурні градієнти в залежності від умов спікання та складу шихти.

Ключові слова: апарат високого тиску, комірka високого тиску, температурне поле, температурні градієнти, кубічний нітрид бору, алюміній, нітрид титану, карбід титану.

Вступ

Полікристалічні надтверді матеріали на основі сфалеритного нітриду бору (PCBN матеріали) широко відомі як інструментальні матеріали для обробки деталей різанням [1]. Виготовлення таких матеріалів зазвичай відбувається із залученням техніки високого тиску (АВТ – апарати високого тиску) [2].

Додавання електропровідних фаз TiC та TiN у структуру полікристалів дозволяє отримувати електропровідні різальні PCBN матеріали, які можна обробляти методом електроіскрової обробки (ЕІО). Це зменшує економічні витрати порівняно з обробкою алмазним інструментом [3].

У роботі [4] для досягнення необхідних фізико-механічних властивостей в багатофакторному експерименті було досліджено вплив складу шихти системи cBN–Al–TiC (TiN) і дисперсності компонентів шихти на твердість і електропровідність PCBN композитів, спечених за високого тиску в сталевих АВТ типу «ковадло з заглибленням». Було виявлено, що геометрія робочого об'єму АВТ та схема зборки незначно впливають на електроопір композитів. Однак якість пластин значною мірою залежить від однорідності температурних полів у робочому об'ємі комірki високого тиску (КВТ) під час спікання. Однорідність температурних полів у робочому об'ємі досягається за допомогою корегування матеріалу і геометрії деталей комірок високого тиску, параметрів нагріву, властивостей робочої шихти. Важливо забезпечити в осередку робочого простору умови низькоградієнтного теплового поля для одержання однорідності структури та властивостей PCBN композитів.

Мета роботи – розрахунок нестационарного теплового поля у робочому об’ємі апаратів високого тиску типу «тороїд» та «ковадло з заглибленням» при одержанні одношарових надтвердих композитів систем $cBN-Al-TiC$ (TiN).

Матеріали та методи досліджень

У роботі використана спрощена комп’ютерна модель розподілу температурного поля в КВТ методом скінченних елементів, з програмним забезпеченням, описаним в [5]. Програма дозволяє у графічному форматі представити: спад напруги, напруженість електричного поля, густину струму, питомий опір та тепловиділення, розподіл температур, температурний градієнт, тепловий потік, а також інтегральні та локальні значення названих параметрів в будь-який заданий момент часу.

Для отримання даних і аналізу результатів, за допомогою вбудованого графічного редактора задається схема досліджуваної моделі, а також сітка скінченних елементів. Далі вводяться характеристики елементів зборки, їх залежності від температури, та граничні умови задачі.

Аналіз температурного поля проводився для АВТ «тороїд-20» (вставка блок-матриці з твердого сплаву ВК6) та «КЗ-55» (вставка блок-матриці з сталі Р6М5). Вихідними даними служили зняті показники струму та напруги при спіканні одношарових пластин надтвердих композитів систем $cBN-Al-TiC$ та $cBN-Al-TiN$. Значення температури поверхонь матриць, опорних плит та температури всередині комірки високого тиску піддавались певному коректуванню з врахуванням даних експериментів по вольт-амперним характеристикам процесу електронагріву і замірам температури в центрі КВТ та на периферії блок-матриць.

Результати досліджень

Схема АВТ «тороїд-20» і зборка КВТ представлені на рис. 1.

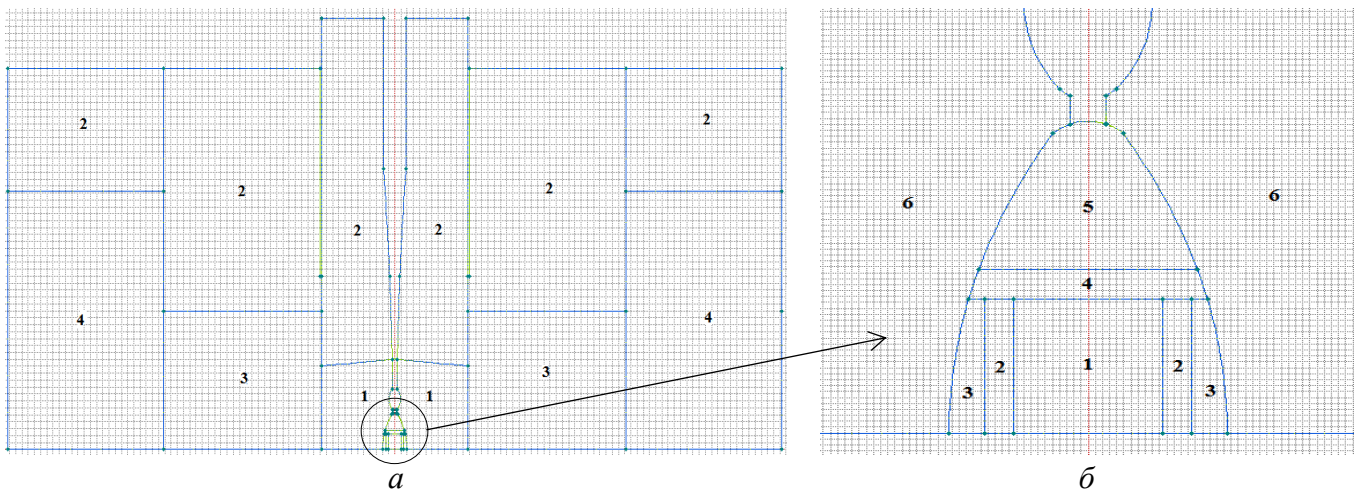


Рис. 1. Схема АВТ «тороїд-20» (а): 1 – матриця із ВК6, 2 – блоки та кільця із сталі 35ХГСА, 3 – плита опорна із ВК15, 4 – плита підкладна із сталі ШХ15; Схема зборки комірки високого тиску (б): 1 – шихта для спікання $cBN-Al-TiC$ (TiN), 2 – диски з графіту, 3 – теплоізоляційні пірофілітові диски, 4 – графітовий нагрівник, 5 – контейнер з літографського каменю, 6 – матриця із ВК6

Геометричні розміри елементів КВТ задавались такими, якими вони є під навантаженням. Оскільки модель має симетрію щодо вертикальної осі, початок координат розташували на осі симетрії. Розрахункову область будували до другої опорної плити включно.

Після того як геометрична модель АВТ побудована, задавалися властивості матеріалів по кожному елементу з моделі, джерела поля і граничні умови.

Щоб отримати зображення електричного поля в задачі електропровідності, задали питомий опір елементів моделі, а також напругу, яка подається на блок-матриці. Електро- та теплофізичні характеристики матеріалів вводилися на основі літературних даних, а потім коригувалися з урахуванням накопиченого експериментального матеріалу так, щоб результати розрахунків відповідали експериментальним [6, 7].

Схема АВТ «КЗ-55» і зборка КВТ представлені на рис. 2.

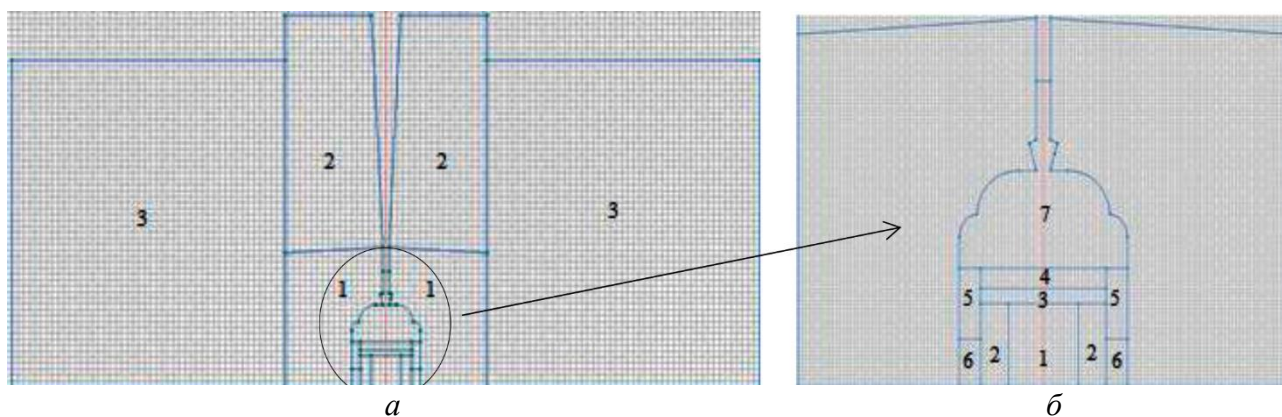


Рис. 2. Схема АВТ «КЗ-55» (а): 1 – матриця із Р6М5, 2,3 – блоки та кільця із сталі 35ХГСА; Схема зборки комірки високого тиску (б): 1 – шихта для спікання cBN-Al-TiC (TiN), 2 – пресовані диски з графіту, 3 – трубчатий нагрівник з графіту, 4 – теплоізоляційний диск з пірофіліту, 5 – кільце з літографського каменю, 6 – торцеве кільце із суміші графіт-літографський камінь, 7 – контейнер з літографського каменю

У даній частині програми неможливо задавати залежність питомого опору елементів від нагріву. Тому під час розв'язку задачі враховували значення електроопору при тій температурі, в якій конкретний елемент перебуває під час виходу температури на задану величину.

Композити системи cBN-Al-TiC (TiN) виготовляли з шихти, в якій вміст тугоплавкої сполуки змінювався від 8 до 40 мас. %, вміст Al складав 10 %, а решта – cBN . Питомий електричний опір карбиду титану і нітриду титану практично однаковий і становить близько 10^{-7} Ом·м. Тому в даній задачі умови спрощувалися, вважаючи, що питомий опір шихти для TiC і для TiN однаковий.

Спікання шихти проводили у два етапи. Для АВТ типу «тороїд-20» на першому етапі робочі параметри становили: тиск 2,5 ГПа, температура 1300 К, час 20 с. За таких умов алюміній рівномірно просочується в шихту, утворюючи електропровідний каркас, що зменшує загальний питомий опір шихти. На другому етапі параметри спікання змінювалися: тиск 7,7 ГПа, температура 2300 К, час 60 с. За таких умов алюміній реагує з нітридом бору, утворюючи неелектропровідний нітрид алюмінію та в невеликій кількості борид алюмінію.

Робочі параметри спікання для АВТ типу «КЗ-55» на першому етапі: тиск 2,5 ГПа, температура 1300 К, час 40 с. На другому етапі: тиск 4,2 ГПа, температура 1750 К, час 240 с.

У програмному забезпеченні відсутня можливість задавати залежність прикладеної напруги від часу. Тому задача розв'язувалася у два етапи: до просочення алюмінієм шихти (питомий опір суміші $\sim 10^6 - 10^2$ Ом·м), і після просочення (питомий опір $\sim 10^{-4}$ Ом·м). Початок просочення, а потім і хімічної взаємодії фіксували експериментально по зміні величини струму. Напруга під час спікання корегувалася таким чином, щоб загальна електрична потужність залишалася незмінною.

Визначивши температурні градієнти в комірці високого тиску, можна судити про перерозподіл джерел тепла в робочому об'ємі КВТ.

Властивості матеріалів конструкцій елементів АВТ наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Властивості елементів конструкції АВТ

Матеріал	Теплопровідність λ , Вт/К·м	Питома теплоємність C , Дж/Кг·К	Густина ρ , кг/м ³	Питомий електроопір ρ , Ом·м
ВК15	32,9+0,017T	147	14100	$1,1 \cdot 10^{-7}$
ВК6	35,78+0,00874T	147	15000	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Графіт МГ ОСЧ	$177,6-0,15T+4 \cdot 10^{-5}T^2$	720	2200	$1,24 \cdot 10^{-5}$
Літографський камінь	1,9	172	2800	1
Пірофіліт	1	172	2800	1
Сталь 35 ХГСА	$41,96-0,02T+2,62 \cdot 10^{-6}T^2$	500	7800	$9,04 \cdot 10^{-8}$
Сталь ШХ15	$32,9-0,04876T+1,96 \cdot 10^{-4}T^2$	500	7800	$9,04 \cdot 10^{-8}$
Шихта сBN– Al–TiC (TiN)	9,41+0,0353T	50	3500– 3900	$10^5 - 10^{-3}$

Залежності електро- та теплофізичних характеристик від температури взяті з [8-11].

Характер розподілу температурного поля та градієнти в залежності від етапів спікання для одношарових композитів системи сBN–Al–TiC (TiN) в АВТ типу «тороїд-20» і в АВТ типу «КЗ-55» представлено на рис. 3–8, в табл. 2, 3 та на рис. 9–10.

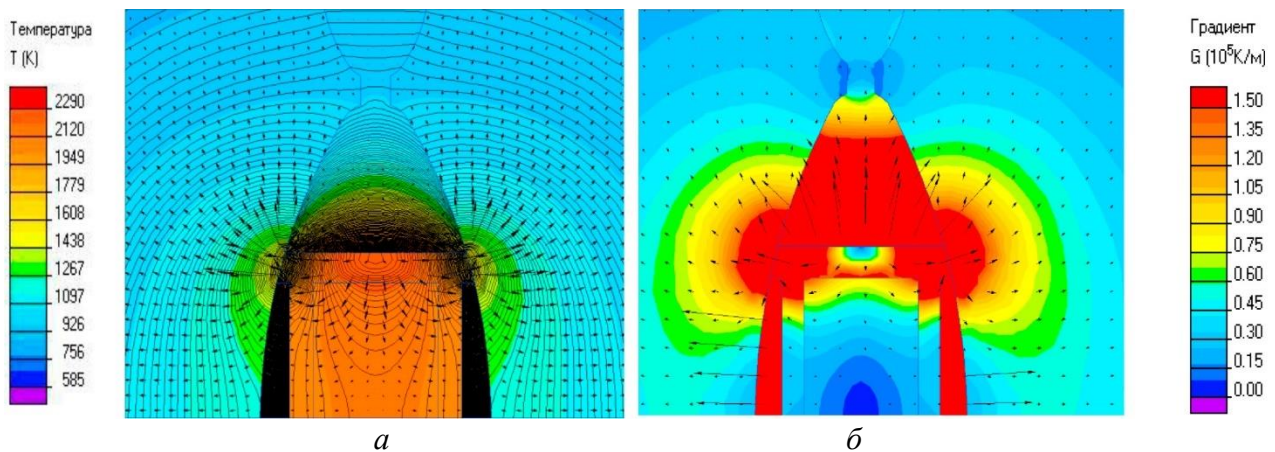


Рис. 3. II етап спікання. Температурне поле і вектори потоків тепла (а) та температурні градієнти (б) після хімічної взаємодії в шихті на 60 секунд спікання ($p = 7,7$ ГПа, $T = 2100-2300$ К, $U = 2,5$ В, $I = 1319$ А). Різниця між ізотермами 30 К. В центрі блоку шихти осьовий градієнт 10 К/мм, радіальний 24 К/мм, а біля бокового нагрівника осьовий – 76 К/мм, радіальний 7 К/мм (8% вмісту тугоплавкої сполуки)

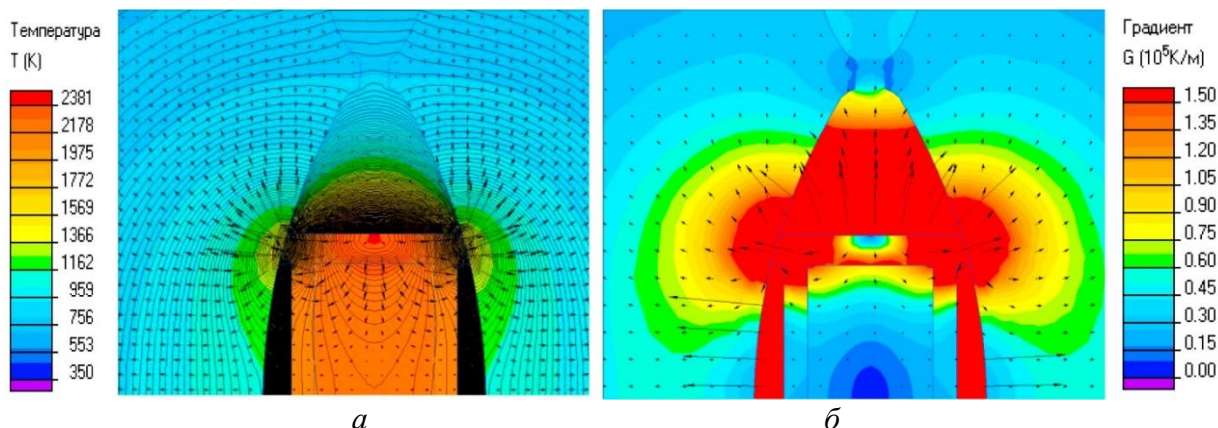


Рис. 4. II етап спікання. Температурне поле і вектори потоків тепла (а) та температурні градієнти (б) після хімічної взаємодії ($U = 2,58 \text{ В}$, $I = 1377 \text{ А}$). Різниця між ізотермами 25 К . В центрі блоку шихти осьовий градієнт 11 К/мм , радіальний 28 К/мм , біля бокового нагрівника осьовий – 84 К/мм , радіальний 6 К/мм (24% вмісту тугоплавкої сполуки)

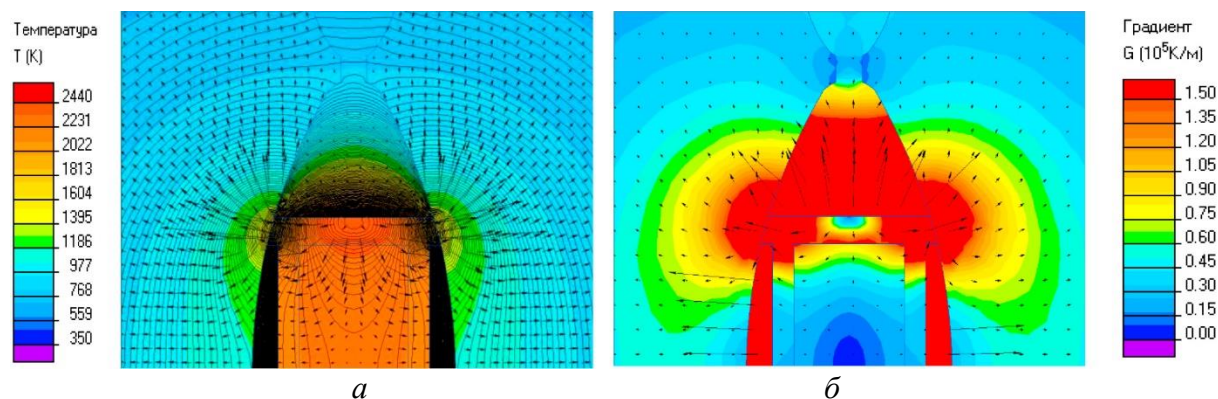


Рис. 5. II етап спікання. Температурне поле і вектори потоків тепла (а) та температурні градієнти (б) після хімічної взаємодії ($U = 2,36 \text{ В}$; $I = 1395 \text{ А}$). Різниця між ізотермами 24 К . В центрі блоку шихти осьовий градієнт 16 К/мм , радіальний 34 К/мм ., біля бокового нагрівника осьовий – 99 К/мм , радіальний 5 К/мм (40% вмісту тугоплавкої сполуки)

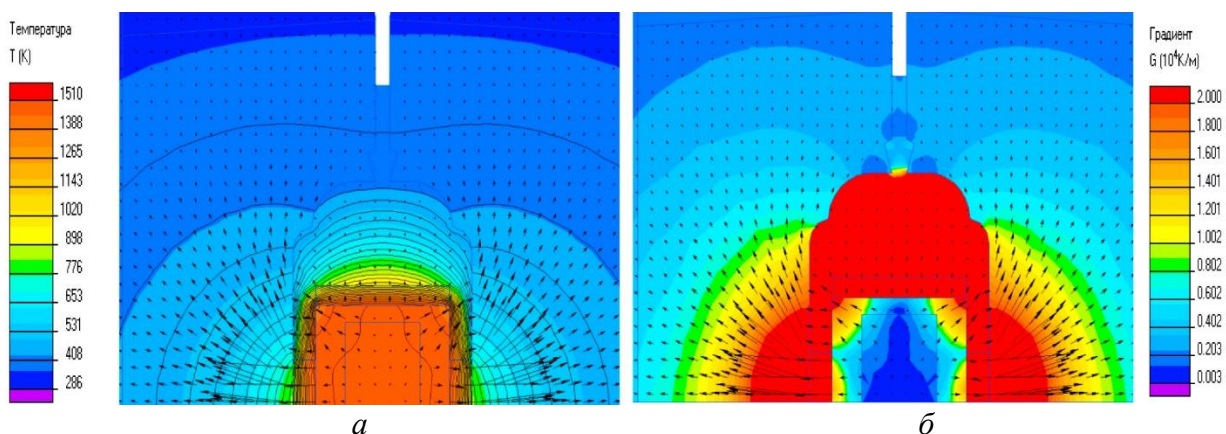


Рис. 6. II етап спікання: температурне поле і вектори потоків тепла (а) та температурні градієнти (б) після хімічної взаємодії в шихті на 240 секунд спікання ($p=4,2 \text{ ГПа}$, $T=1750 \text{ К}$, $U = 2,13 \text{ В}$; $I = 1280 \text{ А}$). Різниця між ізотермами 40 К . В центрі блоку шихти осьовий градієнт $0,6 \text{ К/мм}$, радіальний $-0,3 \text{ К/мм}$, біля бокового нагрівника осьовий $3,4 \text{ К/мм}$, радіальний $1,6 \text{ К/мм}$ (8% вмісту тугоплавкої сполуки)

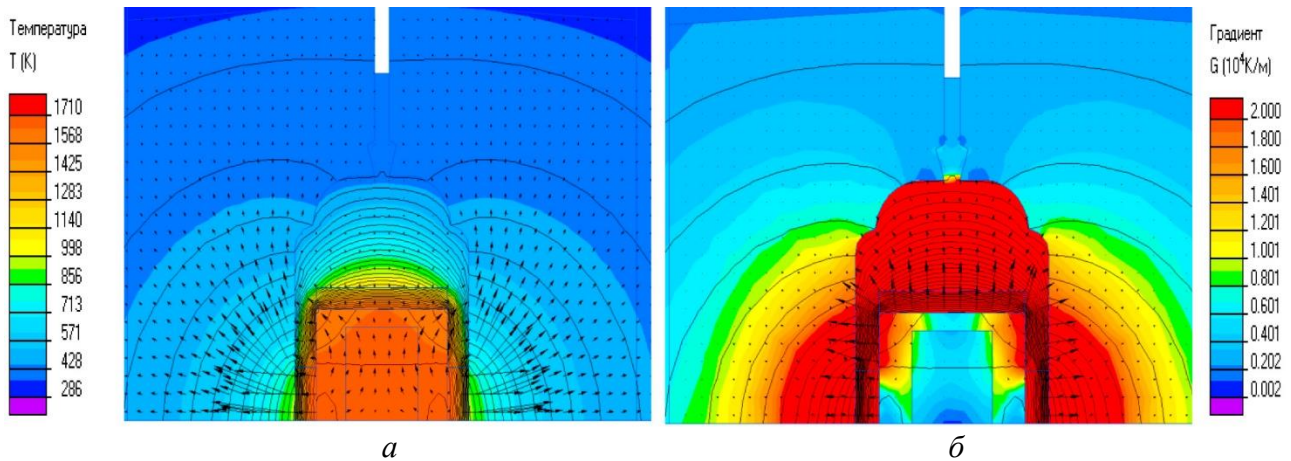


Рис. 7. II етап спікання: температурне поле і вектори потоків тепла (а) та температурні градієнти (б) після хімічної взаємодії в шихті на 240 секунд спікання ($U = 2,13 \text{ В}$; $I = 1351 \text{ А}$). Різниця між ізотермами 40 К. В центрі блоку шихти осьовий градієнт $-2,2 \text{ К/мм}$, радіальний $-3,7 \text{ К/мм}$, біля бокового нагрівника осьовий $3,4 \text{ К/мм}$, радіальний $6,4 \text{ К/мм}$ (24% вмісту тугоплавкої сполуки)

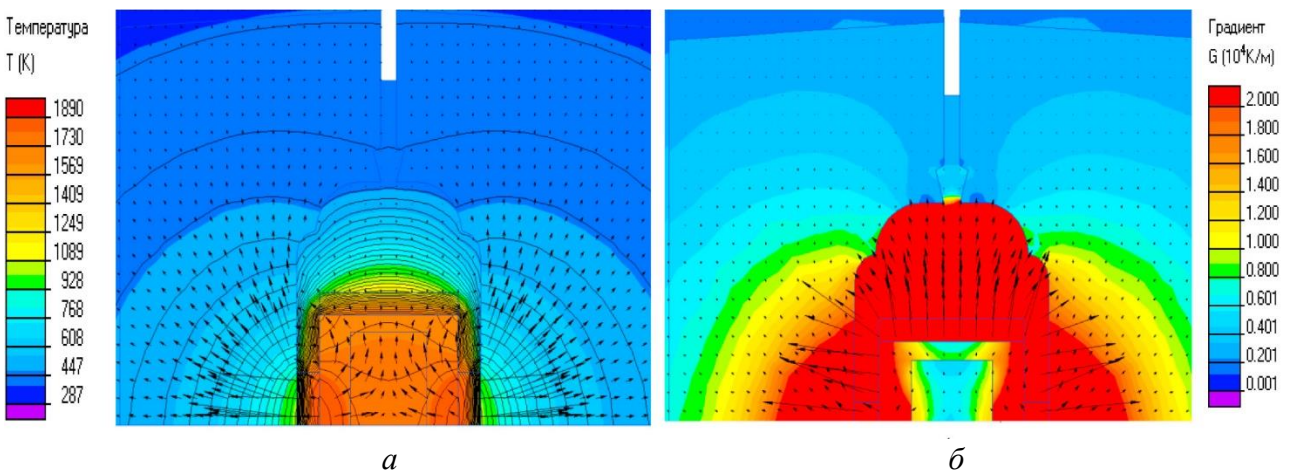


Рис. 8. II етап спікання: температурне поле і вектори потоків тепла (а) та температурні градієнти (б) після хімічної взаємодії в шихті на 240 секунд спікання ($U = 2,13 \text{ В}$; $I = 1404 \text{ А}$). Різниця між ізотермами 40 К. В центрі блоку шихти осьовий градієнт $-6,8 \text{ К/мм}$, радіальний $-4,9 \text{ К/мм}$, біля бокового нагрівника осьовий $2,6 \text{ К/мм}$, радіальний $9,3 \text{ К/мм}$ (40% вмісту тугоплавкої сполуки)

Згідно з розрахунками, температурне поле в АВТ типу «КЗ-55» є більш однорідним, ніж у АВТ типу «тороїд-20». Це пов'язано з тим, що в АВТ типу «КЗ-55» застосовується комбіноване нагрівання внаслідок використання графітових дисків та трубчастих нагрівників з графіту у комірці високого тиску. Це забезпечує більш рівномірне розподілення тепла.

При переході від першого до другого етапу спікання в АВТ типу «тороїд-20», коли утворюється неелектропровідний каркас продуктів реакції алюмінію з нітридом бору, спостерігається різке збільшення температурних градієнтів на 50%-100%, окрім радіального з боку нагрівника, що зменшується на 5-30% (табл. 2). В АВТ типу «КЗ-55» відбуваються більш рівномірні умови спікання на першому етапі з незначним збільшенням градієнтів на другому етапі спікання, при цьому виявлено зменшення радіального градієнту (табл. 3).

Таблиця 2. Градієнти температур в осередку КВТ АВТ типу «тороїд-20»

Вміст тугоплавкої сполуки у вхідній шихті, мас.%	Градієнт температури в осередку комірки високого тиску, К/мм			
	<i>Перший етап спікання</i>			
	Осьовий в центрі КВТ	Радіальний в центрі КВТ	Осьовий боковий	Радіальний боковий
8	5	16	51	6
24	6	17	53	5
40	7	20	59	4
	<i>Другий етап спікання</i>			
	Осьовий в центрі КВТ	Радіальний в центрі КВТ	Осьовий боковий	Радіальний боковий
8	10	24	76	7
24	11	28	84	6
40	16	34	99	5

Таблиця 3. Градієнти температур в осередку КВТ АВТ типу «КЗ-55»

Вміст тугоплавкої сполуки у вхідній шихті, мас.%	Градієнт температури в осередку комірки високого тиску, К/мм			
	<i>Перший етап спікання</i>			
	Осьовий в центрі КВТ	Радіальний в центрі КВТ	Осьовий боковий	Радіальний боковий
8	1	1	2,8	-0,2
24	1	1	2,8	-0,2
40	1	1	2,8	-0,2
	<i>Другий етап спікання</i>			
	Осьовий в центрі КВТ	Радіальний в центрі КВТ	Осьовий боковий	Радіальний боковий
8	0,6	-0,3	3,4	1,6
24	-2,2	-3,7	3,4	6,4
40	-6,8	-4,9	2,6	9,3

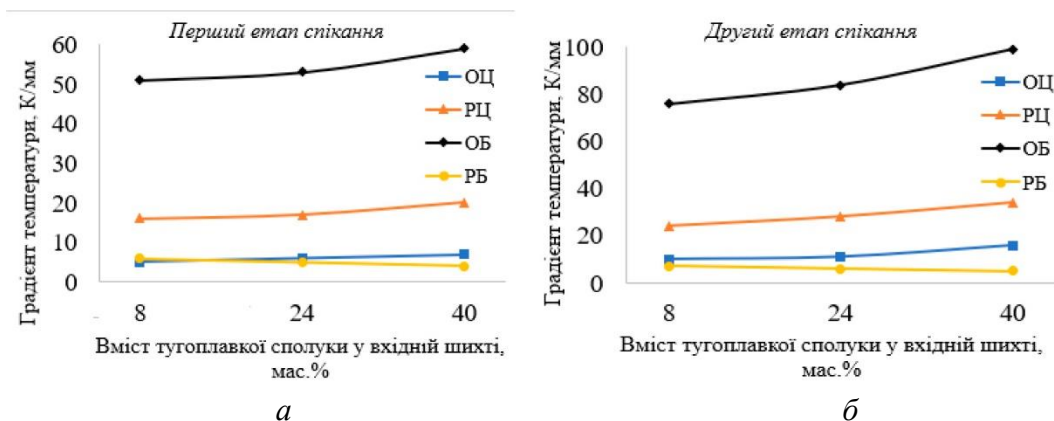


Рис. 9. Графічні залежності зміни градієнтів температури від різного вмісту тугоплавкої сполуки у шихті на першому (а) і на другому етапі спікання (б) в АВТ типу «тороїд-20»

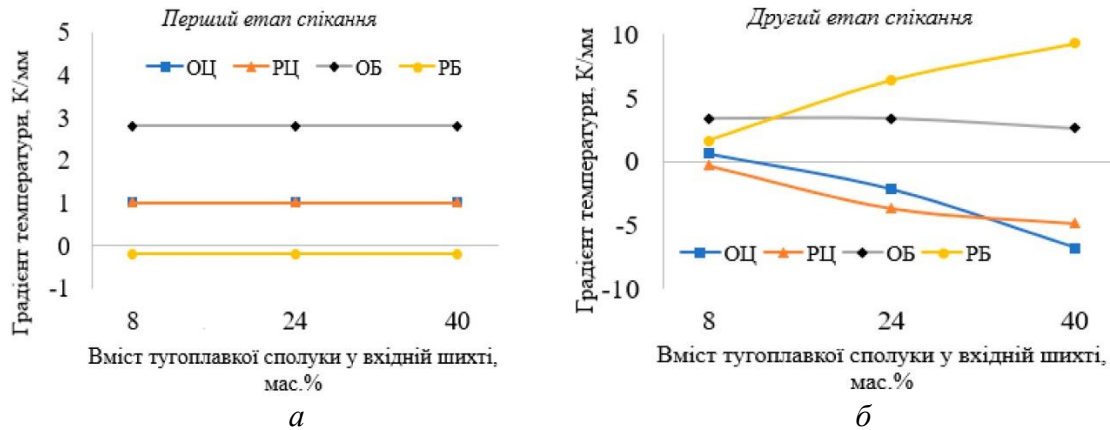


Рис. 10. Графічні залежності зміни градієнтів температури від різного вмісту тугоплавкої сполуки у шихті на першому (а) і на другому етапі спікання (б) в АВТ типу «КЗ-55»

Збільшення вмісту тугоплавкої сполуки в суміші з 8% до 40% (мас.) призводить до збільшення температурних градієнтів в комірці АВТ типу «тороїд-20» в центрі шихти: по осі від 10 до 16 К/мм, радіальний від 24 до 34 К/мм. З боку нагрівника: по осі збільшується від 76 до 99 К/мм, а радіальний зменшується від 7 до 5 К/мм.

В АВТ типу «КЗ-55» збільшення вмісту тугоплавкої сполуки в суміші з 8% до 40% (мас.) зменшує градієнти в центрі шихти: по осі від 0,6 до -6,8 К/мм, а радіальний від -0,3 до -4,9 К/мм. З боку нагрівника: по осі зменшується від 3,4 до 2,6 К/мм, а радіальний збільшується від 1,6 до 9,3 К/мм.

Висновки

Результати розрахунків температурних полів у осередку робочої комірки апаратів високого тиску типу «тороїд» та «КЗ» при одержанні одношарових надтвердих композитів системи cBN–Al–TiC (TiN) показали:

Температурне поле в АВТ типу «КЗ-55» більш однорідне, ніж у АВТ типу «тороїд-20». Це пов'язано з комбінованим нагріванням комірки високого тиску, що забезпечує більш рівномірне розподілення тепла. Щоб забезпечити однорідність спікання шихти в АВТ типу «тороїд-20», рекомендується додатково облаштувати комірку високого тиску графітовими нагрівниками з усіх боків.

Збільшення вмісту тугоплавкої сполуки в суміші з 8% до 40% (мас.) призводить до збільшення температурних градієнтів в комірці АВТ типу «тороїд-20» в центрі шихти; з боку нагрівника по осі градієнт збільшується, а радіальний зменшується.

В АВТ типу «КЗ-55» в центрі шихти по осі і з боку нагрівника температурні градієнти зменшуються незначно, окрім радіального, що збільшується від 1,6 до 9,3 К/мм.

Ya. Romanenko, M. Bezhenar

V. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine

CALCULATIONS OF THE TEMPERATURE FIELDS IN THE CELL OF THE WORKING CELL OF THE HIGH PRESSURE APPARATUS OF THE «THOROID» AND «AR» TYPES IN THE PREPARATION OF SINGLE-LAYER SUPERHARD COMPOSITES OF THE cBN–Al–TiC (TiN) SYSTEM

The results of calculations of temperature fields in the working cell of a high-pressure apparatus by computer modelling are presented. It is shown how the temperature field, heat fluxes and temperature gradients change depending on the sintering conditions and the composition of the charge.

Key words: *high pressure apparatus, high pressure cell, temperature field, temperature gradients, cubic boron nitride, aluminum, titanium nitride, titanium carbide.*

Література

1. Беженарь Н. П. Кубический нитрид бора, поликристаллические и композиционные материалы на его основе. *Неорганическое материаловедение. Материалы и технологии* / за ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. Київ, 2008. Наук. думка. К. 1., Т. 2. С. 503–511.
2. Шульженко А. А., Божко С. А., Соколов А. Н., Петруша И. А., Беженарь Н. П., Игнатуша А. И. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора. Киев: Наук. думка, 1993. 256 с.
3. Шульженко А. А., Беженарь Н. П., Божко С. А., Боримский А. И., Нагорный П. А., Ващенко А. Н. Новый композит КНБ для использования в сложнопрофильном лезвийном инструменте. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 7, Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2004, – С. 173–176.
4. Беженарь Н. П., Божко С. А., Романко Л. А., Белявина Н. Н. Твердость и электрическое сопротивление композитов системы cBN-Al-TiC (TiN), полученных реакционным спеканием при высоком давлении. *Сверхтвердые материалы*. 2006. № 3. С. 34–43.
5. Коновал С. М. Вивчення динаміки температурного поля в робочому об'ємі апаратів високого тиску при одержанні надтвердих композитів систем cBN-Al. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 17, Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2014, – С. 291-301.
6. Исследовать условия получения, физико-механические и эксплуатационные свойства композитов на основе КНБ диаметром до 25 мм. Киев: Институт сверхтвердых материалов НАН Украины, 1995. 123 с.
7. Беженарь Н. П. Об изменении давления в рабочем объеме АД при спекании порошков кубического нитрида бора. *Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов*. Сб. науч. тр. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2000. – С. 261–266.
8. Компьютерное моделирование и сравнительный анализ эффективности слоистого и объемнораспределенного размещения фазовых составляющих в ячейках различных типов АД при синтезе алмазов. Киев, 1996. 161 с.
9. Сорокин В. Г., Волосникова А. В., Вяткин С. А., Гервасьев М. А., Гредитор М. А., Крылова К. М., Кубачек В. В., Мирмельштейн В. А. Марочник сталей и сплавов / за ред. В. Г. Сорокина. Москва: Машиностроение, 1989, 640 с.
10. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике (справочник) / за ред. Б. Е. Неймарк. Москва, Ленинград: Энергия, 1967, 240 с.
11. Большакова Н. В., Борисанова К. С., Бурцев В. И., Воронкии И. В., Грязнов А. Г., Гутман М. Б., Мальтер В. Л., Орлов Б. К., Сасса В. С., Тишкина А. С., Шумков Ю. В., Шур Н. Ф. Материалы для электротермических установок (справочное пособие) / за ред. М. Б. Гутмана. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 296 с.

Надійшла 09.10.23

References

1. Bezhenar, N. P. (2008). *Kubicheskyi nytryd bora, polykrystallicheskye ta kompozytysonnye materyaly na eho osnove* [Cubic boron nitride, polycrystalline and

- composite materials based on it]. G. G. Hnesyna & V. V. Skorokhoda (Ed.), *Neorhanycheskoe materyalovedenye. Materyaly ta tekhnolohyy [Inorganic materials science. Materials and technologies]* (B. 1, V. 2., p. 503–511). Naukova dumka, Kyiv [in Russian].
2. Shulzhenko, A. A., Bozhko, S. A., Sokolov, A. N., et al. (1993). *Syntezy, spekanie i svoistva kubicheskoho nitrída bora [Synthesis, sintering and properties of cubic boron nitride]*. Naukova dumka [in Russian].
 3. Shulzhenko, A. A., Bezhenar, M. P., Bozhko, S. O., et al. (2004). *Novyi kompozit KNB dlia ispolzovaniia v slozhnoprofilnom lezviinomu instrumencie [New CBN composite for use in complex blade tools]. Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal–Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications* (7nd Issue, p. 173–176). ISM im. V. N. Bakulia NAN Ukrainy [in Russian].
 4. Bezhenar, N. P., Bozhko, S. A., Romanko, L. A. & Beliavyna, N. N. (2006). *Tverdost y elektrycheskoe soprotivleniye kompozytov systemy cBN-Al-TiC (TiN), poluchennykh reaktsionnym spekanyem pry vysokom davlenii [Hardness and electrical resistance of cBN-Al-TiC (TiN) system composites obtained by reaction sintering at high pressure]. Sverkhtverdye materyaly – Superhard Materials*, (3), 34–43 [in Russian].
 5. Konoval S. M. (2014). *Vyvchennia dynamiky temperaturnoho polia v robochomu obiemi aparativ vysokoho tysku pry otrymanni nadtverdykh kompozytiv system cBN-Al [Study of the dynamics of the temperature field in the working volume of high-pressure devices during the production of superhard composites of cBN-Al systems]. Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal–Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications* (17nd Issue, p. 291–301). ISM im. V. N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
 6. *Issledovat usloviia polucheniia, fiziko-mekhanicheskie iy ekspluatatsionnye svoistva kompozitov na osnove KNB diametrom do 25 mm [To investigate conditions of production, physical, mechanical and operational properties of composites based on BHA with diameter up to 25 mm]* (Отчет по теме 0192). (1995b). Institut sverkhtverdykh materialov NAN Ukrainy [in Russian].
 7. Bezhenar N. P. (2000). *Ob izmenenii davleniia v rabochem obeme AVD pry spekanii poroshkov kubicheskoho nitrída bora [On the change in pressure in the working volume of the high pressure apparatus during sintering of cubic boron nitride powders]. Syntezy, spekanie ta svoistva sverkhtverdykh materyalov [Synthesis, sintering and properties of superhard materials]*. (p. 261–266). ISM im. V. N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
 8. (1996). *Kompiuternoe modelirovanie i sravnitelnyi analiz efektyvnosti sloistoho i obyemnoraspredelennoho razmeshcheniia fazovykh sostavliaiushchikh v iacheikakh razlichnykh tipov AVD pry sintezealmazov [Computer modeling and comparative analysis of the efficiency of layered and volume-distributed placement of phase components in the cells of different types of ADF during diamond synthesis]* (Отчет о NIR № HR 0195U027176). Institut sverkhtverdykh materialov NAN Ukrainy [in Russian].
 9. Sorokyn, V. G., Volosnykova, A. V., Viatkyn, S. A., et al. (1989). *Marochnik stalei i splavov [Brand of steels and alloys]*. Mashinostroenie [in Russian].
 10. Neumark, B. E. (Ed.). (1967). *Fizicheskie svoistva stalei i splavov, primeniaemykh v enerhetike [Physical properties of steels and alloys used in energy]*. Enerhiia [in Russian].
 11. Bolshakova, N. V., Borysanova, K. S., Burtsev, V. Y., et al. (1987). *Materialy dlia elektrotermichnykh ustanovok [Materials for electrothermal installations]*. Enerhoatomizdat [in Russian].