

О.О. Лещук, д-р техн. наук; **О.П. Людвіченко**, д-р філ.; **А.М. Пацик**, асп.;
М.П. Беженар, д-р техн. наук, **О.М. Соколов**, канд. техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, Київ
04074, e-mail: ludvial@ukr.net*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ УМОВ У КУБІЧНІЙ КОМІРЦІ ВИСОКОГО ТИСКУ ЗА ВОЛЬТ-АМПЕРНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РЕЖИМУ РЕАКЦІЙНОГО СПІКАННЯ СИСТЕМИ cBN–Al

З використанням комп'ютерного моделювання досліджено тепловий стан шестипуансонного АВТ, який застосовано для реакційного спікання композиту на основі 90 % cBN + 10 % Al (за масою). При спіканні відбувається перехід досліджуваного зразка від діелектричного до провідного стану і навпаки, що було враховано при моделюванні. Значення електро- і теплофізичних властивостей матеріалів АВТ були відкориговані відповідно до експериментально визначених вольт-амперних характеристик процесу спікання. Отримані в результаті вирішення квазістаціонарної задачі термоелектричні поля описують тепловий стан реакційного об'єму на різних етапах реакційного спікання композиту.

Ключові слова: полікристалічний кубічний нітрид бору (PCBN), апарат високого тиску (АВТ), комірка, вольт-амперні характеристики, тепловий стан, моделювання.

Вступ

Полікристалічний кубічний нітрид бору (PCBN) – це надтвердий композит, що довів високу ефективність свого використання в якості інструментального матеріалу. На сьогодні завдяки хімічній інертності і температурній стабільності до 1500 °С з нього виготовляють інструменти, що є незамінними при обробці чавунів, спеціальних сплавів, інших важкооброблюваних матеріалів на основі заліза [1].

У більшості випадків отримання PCBN базується на використанні методів порошкової металургії [2], а саме – на реакційному спіканні кубічного нітриду бору з алюмінієм у системі cBN–Al або у системах із тугоплавкими сполуками в умовах високого тиску і температури [3–6].

Широкого застосування в промисловості набув розроблений в Україні PCBN-композит киборит [7]. Створений з шихти зі складом 90 % cBN + 10 % Al (за масою) киборит-2 застосовують в якості лезового інструмента при чорнових і напівчистових операціях. У пошуках можливостей розширення області застосування дослідники використовують киборит також як перспективну конструкційну кераміку, зокрема для виготовлення високомодульних стискаючих елементів в апаратах високого тиску (АВТ).

Генерацію високого тиску і температури для спікання шихти забезпечують АВТ. Для отримання PCBN в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України використовують АВТ типу «ковадл із заглибленнями» і «тороїд», що здатні генерувати тиск 5–7 ГПа і температуру 1500–2000 °С. Недоліком цих апаратів є невеликий розмір комірки. За використання АВТ типу «тороїд-40» отримувані зразки мають діаметр 18,5 мм, а за використання АВТ типу «ковадл із заглибленнями» (з діаметром заглиблень у 55 мм) – 32 мм, що є максимальним розміром спеченого зразка.

Отже, актуалізується пошук АВТ зі значно більшими розмірами комірки, що підвищить економічну ефективність процесу спікання і забезпечить можливість розширення області функціонального призначення PCBN. На сьогодні шестипуансонні АВТ з кубічною коміркою

з розмірами ребра до 100 мм здатні генерувати необхідні p , T -параметри для реакційного спікання PCBN-композитів.

Температура спікання є чільним фактором впливу на формування структури і, як наслідок, властивостей полікристалів [8, 9]. Для отримання даних з розподілу температури в реакційному об'ємі доцільно скористатись чисельним моделюванням. Досвід, набутий при вирішенні подібних задач для різних типів АВТ, частково представлений в роботах [10–16].

Постановка задачі

Метою роботи є комп'ютерне моделювання теплового стану комірки шестипуансонного АВТ при реакційному спіканні композиту на основі 90 % cBN + 10 % Al (за масою) відповідно до експериментально визначених вольт-амперних характеристик процесу. В якості програмного забезпечення скористались програмним комплексом ANSYS.

На рис. 1 зображено розрахункову схему пресової установки з коміркою для спікання PCBN в стисненому стані (1/8 частина). В нашому випадку реакційний об'єм обмежений графінітовими дисками 12 і доломітовою втулкою 14 (див. рис. 1, б).

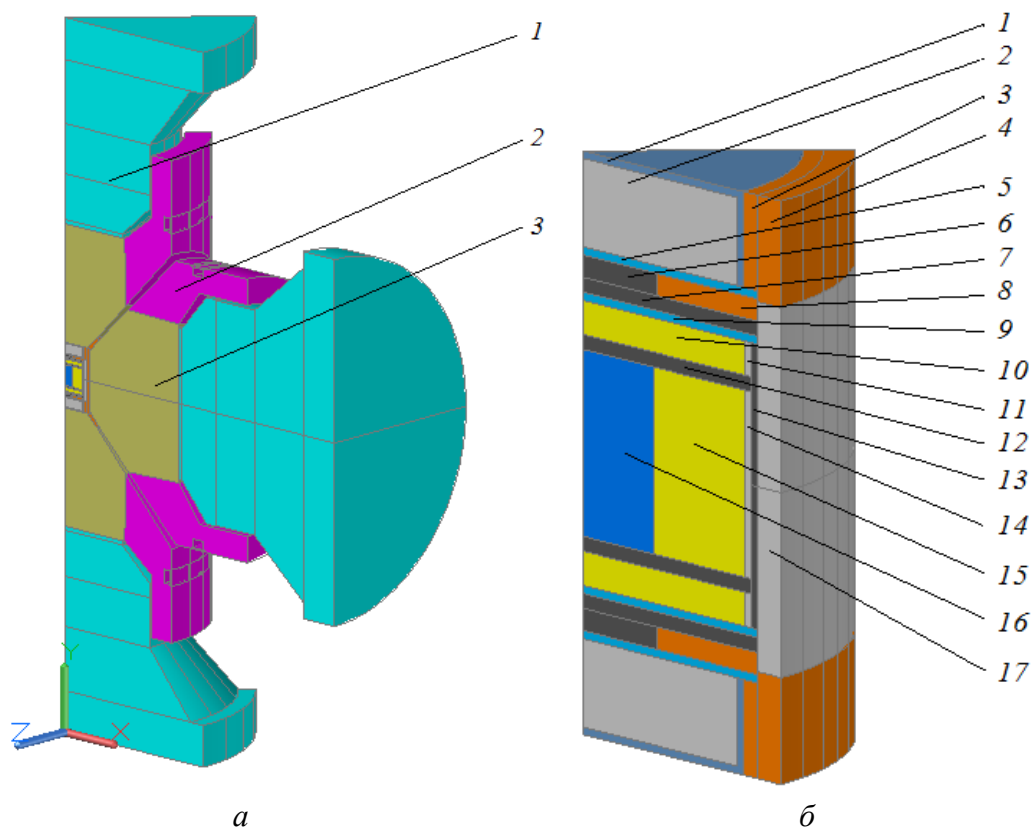


Рис. 1. Загальна схема шестипуансонного АВТ (а): 1 – опорні плити (сталь), 2 – система водяного охолодження (сталь), 3 – пуансон (твердий сплав). Схема комірки високого тиску (б): 1 – стакан (нержавіюча сталь), 2 – диск (доломіт), 3, 4, 8 – кільця (пірофіліт), 5, 9 – диски (титан), 6, 7 – диски (графіт), 10, 15 – диск і кільце (оксид алюмінію Al_2O_3), 11 – кільце (доломіт), 12 – диск (графіт), 13 – нагрівач (графіт), 14, 17 – втулки (доломіт), 16 – досліджуваний зразок 90 % cBN + 10 % Al (за масою)

За електрорезистивного нагрівання комірки і в припущенні, що процес квазістаціонарний, тепловий стан моделюють розв'язанням зв'язаної задачі електро- і теплопровідності. За умови відсутності електричних зарядів такий процес описують системою нелінійних рівнянь:

$$\operatorname{div}[\gamma(T)\operatorname{grad}U(t)] = 0, \quad (1)$$

$$\operatorname{div}[\lambda(T)\operatorname{grad}T] + \gamma(T)|\operatorname{grad}U(t)|^2 = 0, \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт електропровідності; T – температура; U – потенціал електричного поля; t – час; λ – коефіцієнт теплопровідності; $\gamma|\operatorname{grad}U|^2$ – питома потужність джерел Джоулевого тепла. Рівняння (1) і (2) доповнюються граничними умовами

$$U_{S_U} = U(t), \quad (3)$$

$$T_{S_T} = T(t), \quad (4)$$

де S_U, S_T – відповідно граничні поверхні, на яких задають значення напруги і температури.

Електро- і теплофізичні властивості матеріалів складових частин АВТ задавали з даних публікацій [17–30], з яких випливає необхідність врахування залежності електро- і теплофізичних властивостей від температури. Узгодження літературних та реальних значень провідних властивостей матеріалів комірки проводили згідно вольт-амперних характеристик процесу спікання, коригуючи опір зразка cBN + Al і графітових елементів електрорезистивного ланцюга, а також теплопровідність пірофіліту і доломіту.

Систему зв'язаних нелінійних рівнянь (1)–(4) розв'язували з використанням методу скінченних елементів з покроковою корекцією властивостей матеріалів і за умови досягнення заданого критерію збіжності ($T_i - T_{i-1} < 1$ °C, де i – номер ітераційного наближення).

На рис. 2 зображено підготовлену сітку скінченних елементів для шестипуансонного АВТ і комірки високого тиску. Граничні умови (див. рис. 2, а) визначали вимірюванням відповідних значень температури і електропотенціалу. Умову охолодження АВТ враховували завданням температури у 40 °C на внутрішніх поверхнях охолоджувальних каналів.

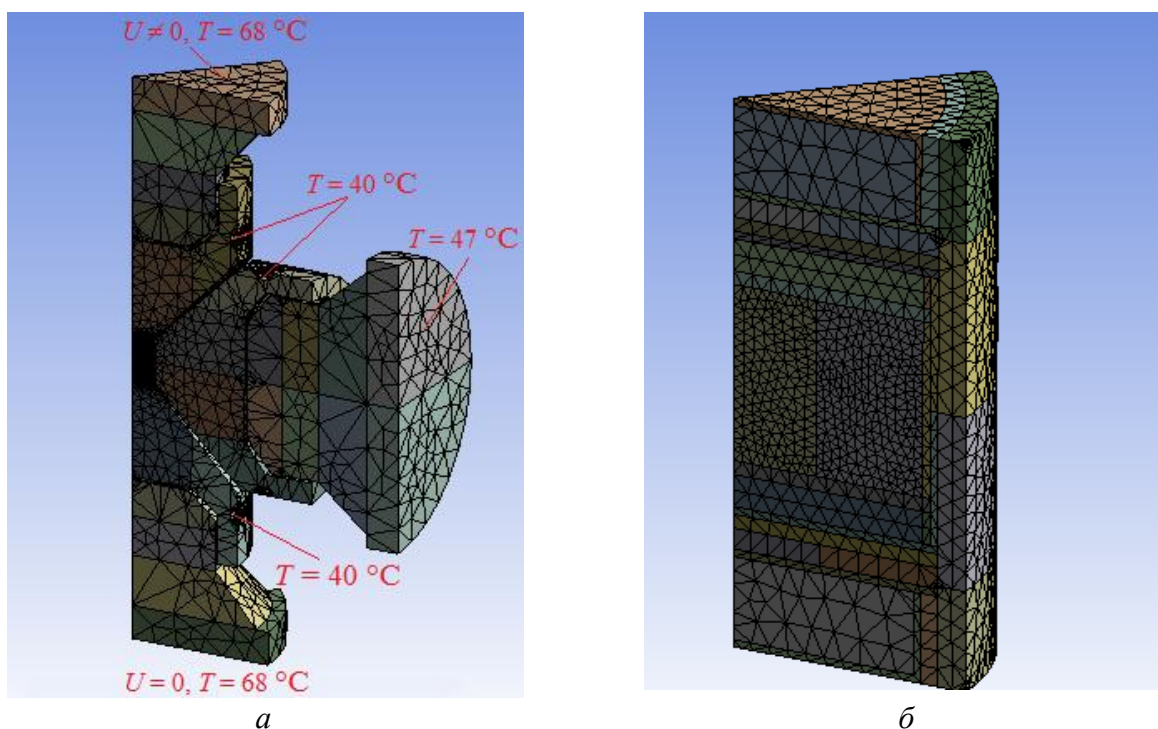


Рис. 2. Дискретизація на скінченні елементи 1/8 частини АВТ (а) і комірки високого тиску (б)

Аналіз результатів

На рис. 3 наведено зміну параметрів спікання в часі (тиск p у гідросистемі навантаження, напруга U , потужність W струму I нагрівання, опір R ланцюга нагрівання АВТ) за умови двостадійної термобаричної обробки композиції 90 % cBN + 10 % Al. Дисперсність порошків cBN і Al у підготовленій для спікання шихти варіювалась в інтервалах 14–20 і 5–15 мкм відповідно.

Маємо два етапи спікання (див. рис. 3). На першому алюміній плавиться і максимальне нагрівання досягається при $t = 319$ с за тиску ~ 2 ГПа. Потім комірку охолоджують і одночасно стискають до ~ 5 ГПа. Далі поступово знову нагрівають до вищої температури, алюміній знову плавиться і опір нагрівального ланцюга падає. При $t = 715$ с та потужності 12,2 кВт починається другий етап спікання. При цьому відбувається реакційна взаємодія алюмінію з кубічним нітридом бору з утворенням неелектропровідних фаз – нітриду і боридів алюмінію та твердих розчинів. Бачимо, що опір знову зростає і виходить на поличку. У цей час зразок вже неелектропровідний. При $t = 1295$ с нагрівання поступово відключають. Далі відбувається охолодження із розвантаженням апарата.

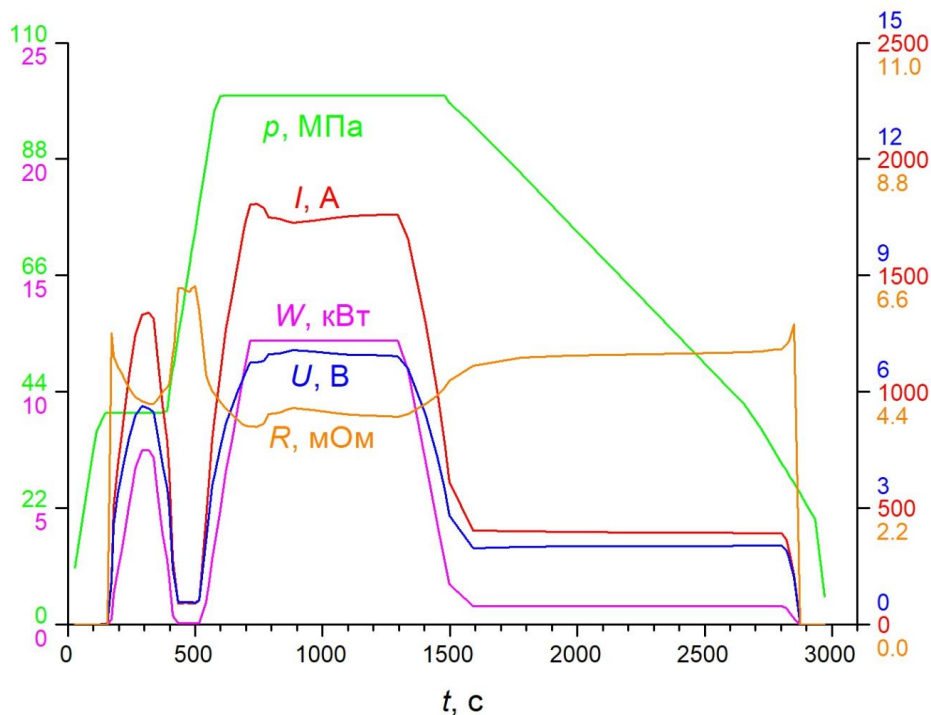


Рис. 3. Програма двостадійного спікання PCBN із шихти 90 % cBN + 10 % Al

Розглянемо спочатку **першу стадію** термобаричного навантаження, коли алюміній плавиться із просочуванням шихти cBN + Al, надаючи їй електропровідні властивості. Змодельємо тепловий стан комірки в момент пікового впливу потужності струму нагріву $t = 319$ с, коли $W = 7,5$ кВт, $I = 1339$ А, $U = 5,57$ В, $R = 4,17$ мОм. Нижче наведено розраховані поля напруги, щільності струму, температури та градієнта температури в елементах комірки (рис. 4–7). За рахунок прямого пропускання струму через зразок максимум температури (1105 °C) формується в його центрі, а максимальний перепад температури ΔT_{\max} становить 13 °C (рис. 6).

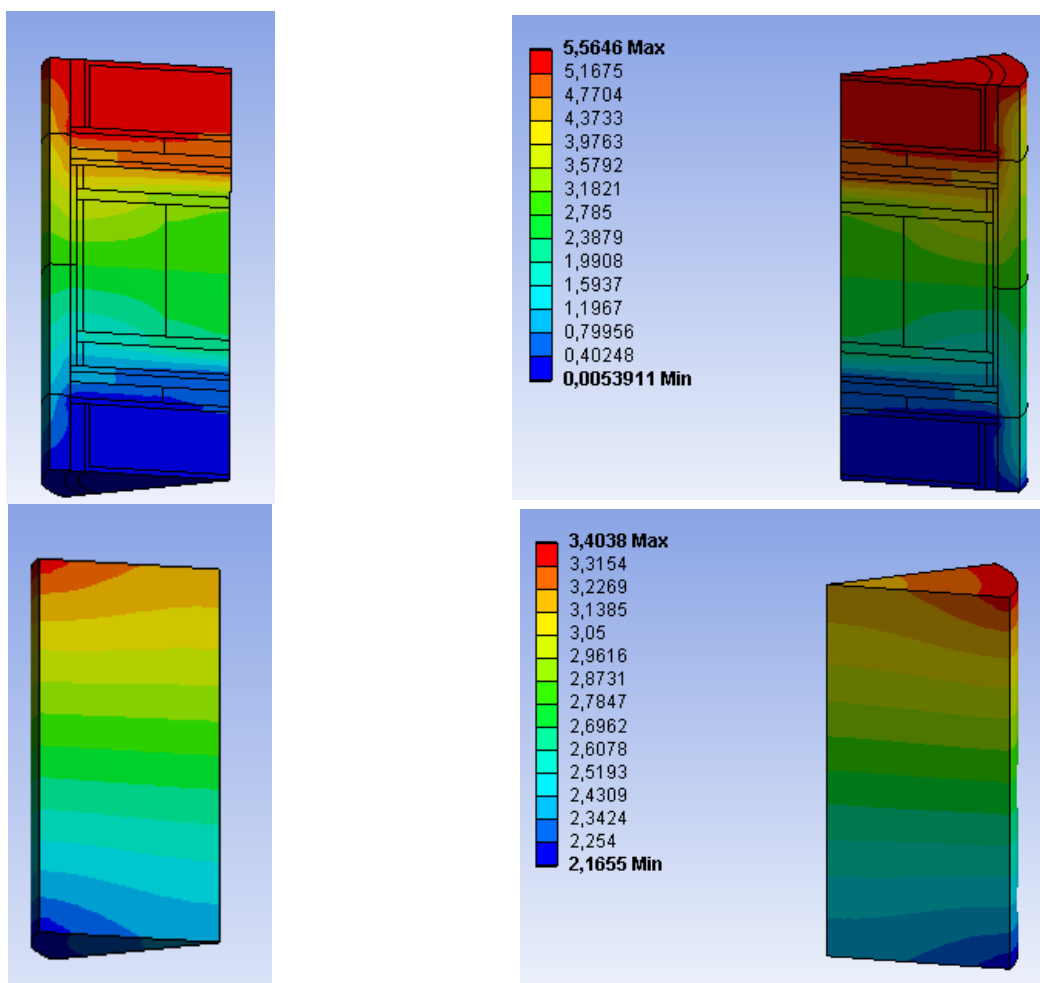


Рис. 4. Поля напруги (В) в діагональному і фронтальному перерізах комірки і реакційного об'єму за $t = 319$ с

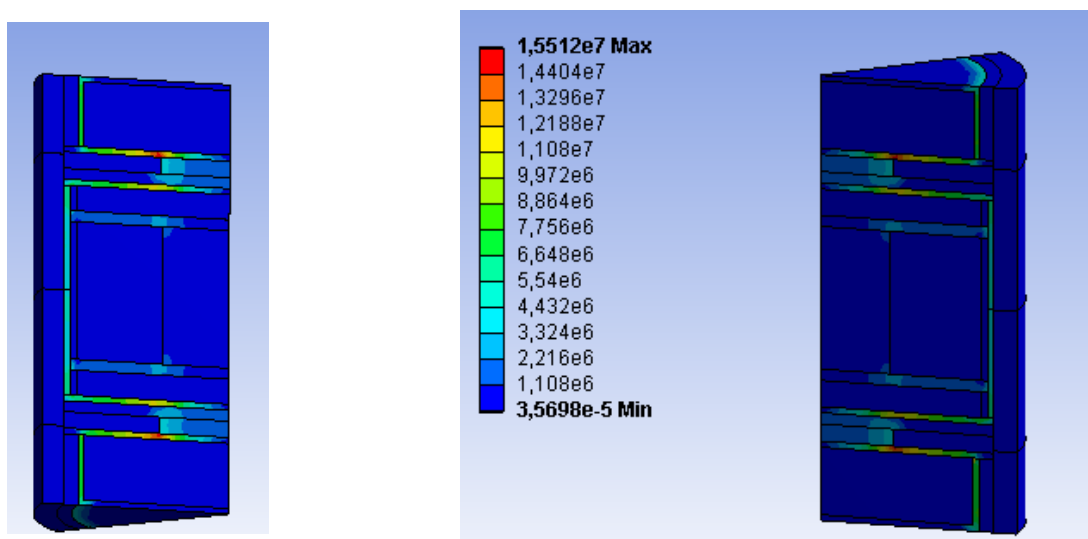


Рис. 5. Поле щільності струму (A/m^2) в діагональному і фронтальному перерізах комірки за $t = 319$ с

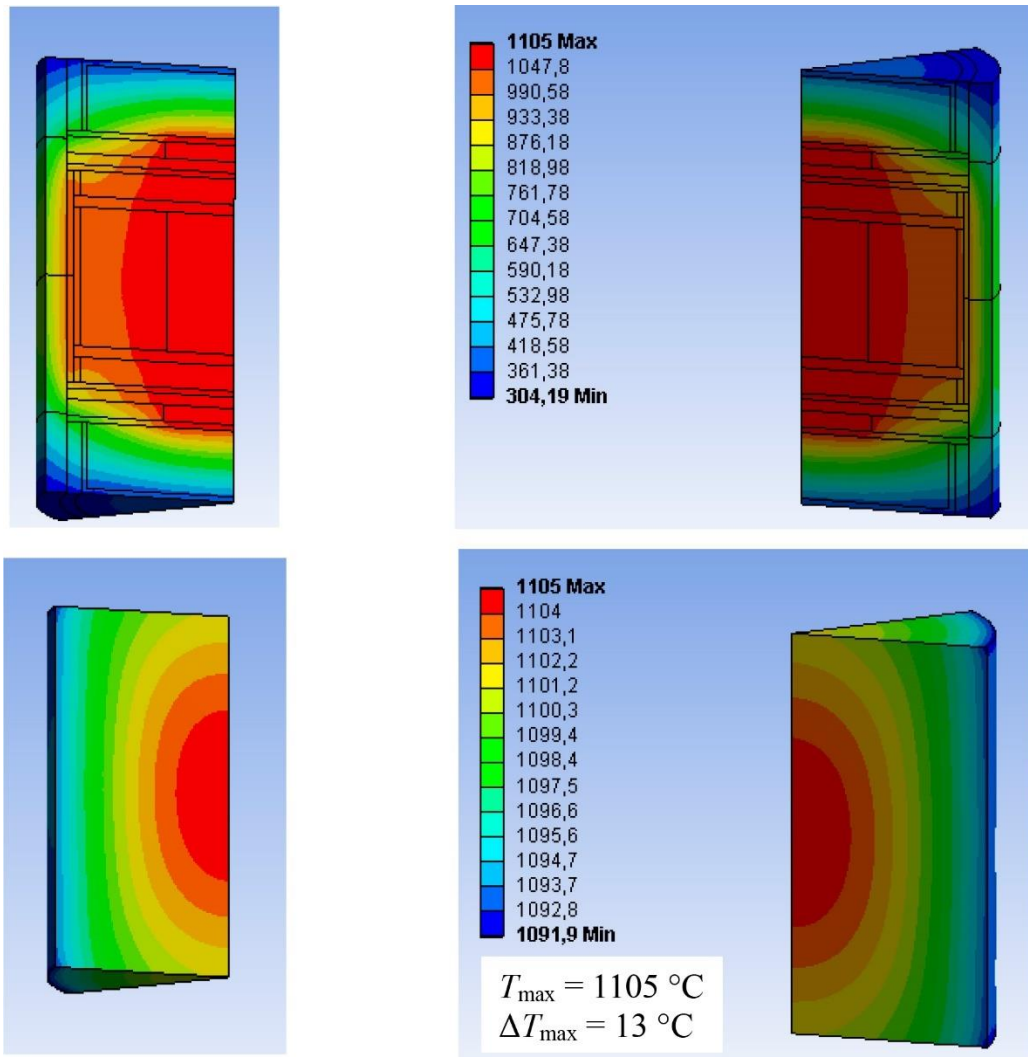


Рис. 6. Поля температури ($^{\circ}\text{C}$) в діагональному і фронтальному перерізах комірки і реакційного об'єму за $t = 319 \text{ c}$

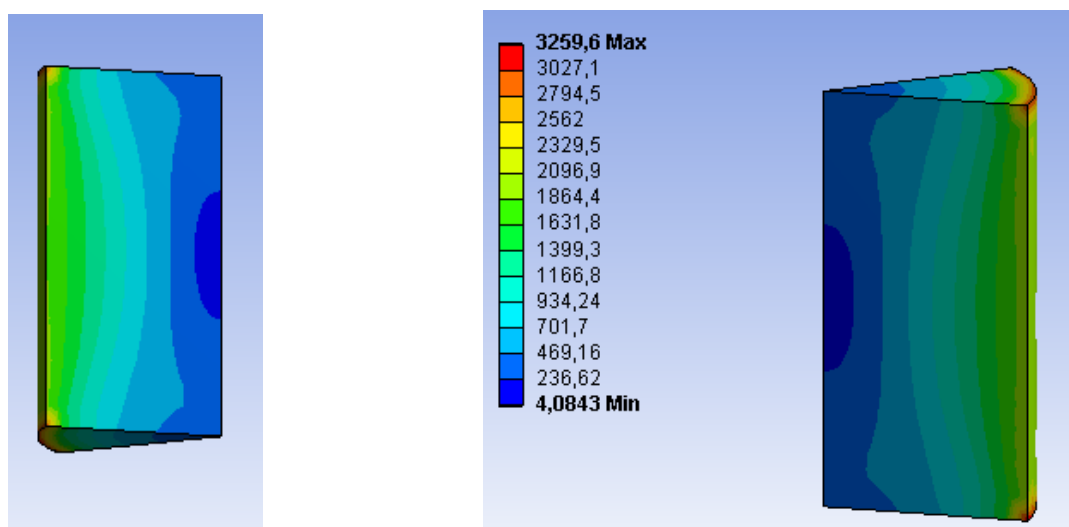


Рис. 7. Поля градієнта температури ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) в діагональному і фронтальному перерізах реакційного об'єму за $t = 319 \text{ c}$

Таким чином, стабілізація потужності на рівні 7,5 кВт за тиску 2 ГПа приводить до нагрівання зразка до 1100 °С за максимального перепаду температури в ньому у 13 °С, алюміній плавиться, зразок стає провідним, про що свідчить зменшення опору (див. рис. 4). Наведені на рис. 4–7 термоелектричні поля відповідають першому етапу спікання РСВН на основі 90 % cBN + 10 % Al.

Розглянемо *початок другого етапу* термобаричного навантаження, коли алюміній повторно розплавився, в момент впливу потужності струму нагрівання $t = 715$ с при $W = 12,2$ кВт, $I = 1805$ А, $U = 6,756$ В, $R = 4,17$ мОм.

Для відповідності розрахункових та експериментальних значень електротеплових параметрів процесу спікання зменшували опір як графіту, так і зразка у порівнянні з першим етапом, що відповідає зменшенню опору електропровідного ланцюга в експерименті зі збільшенням тиску.

Розраховані поля напруги, температури та її градієнта в елементах комірки наведені на рис. 8, 9. Аналогічно попередній задачі максимум температури формується в центрі зразка, що спікається, і максимальний перепад температури становить 19 °С (див. рис. 9).

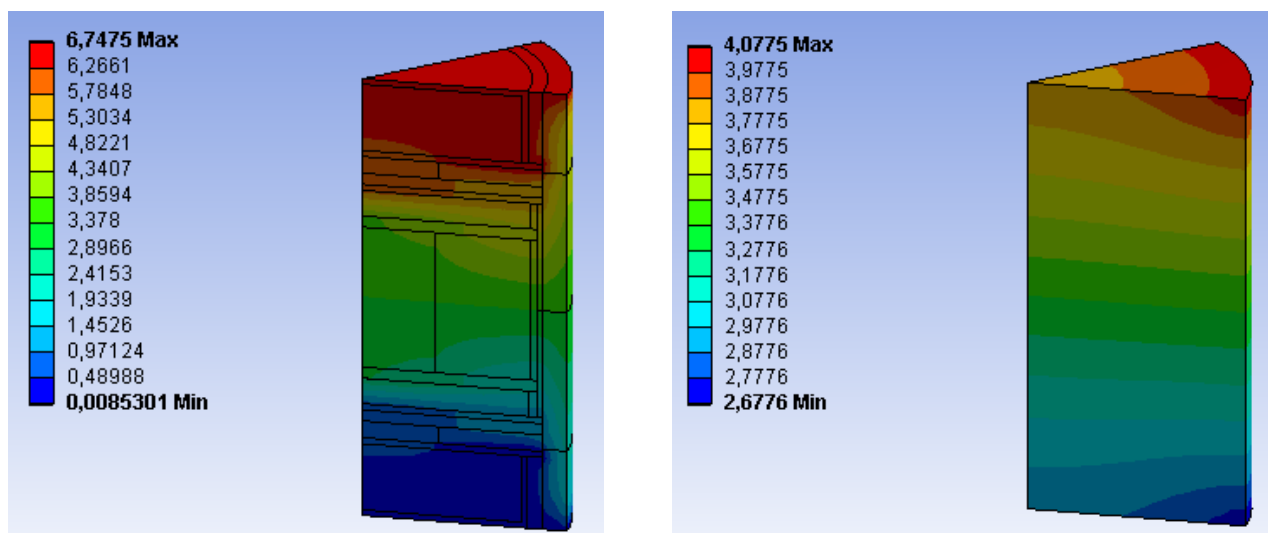


Рис. 8. Поля напруги (В) у фронтальному перерізі комірки і реакційного об'єму за $t = 715$ с

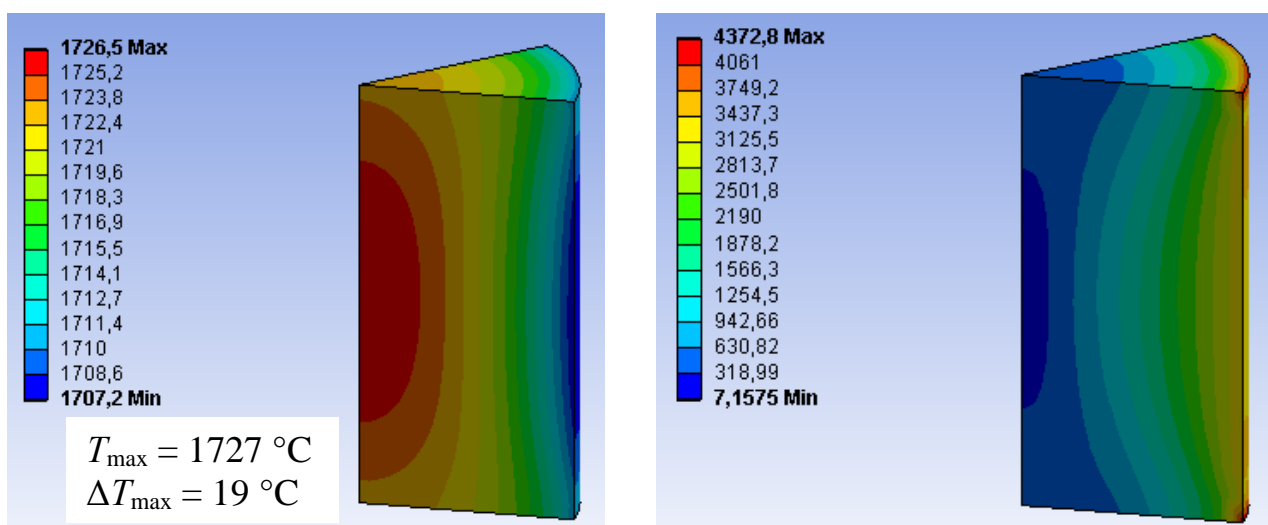


Рис. 9. Поля температури (°С) і градієнта температури (°С/м) у фронтальному перерізі комірки і реакційного об'єму за $t = 715$ с

Таким чином, наведені на рис. 8, 9 термоелектричні поля відповідають початку другого етапу реакційного спікання РСВН на основі 90 % сBN + 10 % Al. Стабілізація потужності на рівні 12,2 кВт за тиску ~ 5 ГПа приводить до нагрівання струмопровідного зразка до рівня 1700 °С, причому максимальний перепад температури в ньому становить 19 °С.

Розглянемо *другий етап* термобаричного навантаження, коли відбулося реакційне спікання шихти і вона стала неелектропровідною: $t = 1043$ с, $W = 12,2$ кВт, $I = 1745$ А, $U = 6,986$ В, $R = 4$ мОм.

Для відповідності розрахункових та експериментальних значень електротеплових параметрів процесу спікання несуттєво зменшили опір графіту у порівнянні з першим етапом (при завданні максимально великого опору зразка).

Розраховані поля температури та градієнта температури в реакційній комірці представлено на рис. 10. На цей раз, на відміну від попередніх випадків, максимум температури формується в центрі циліндричного нагрівача, а максимальний перепад температури у зразку становить 8 °С.

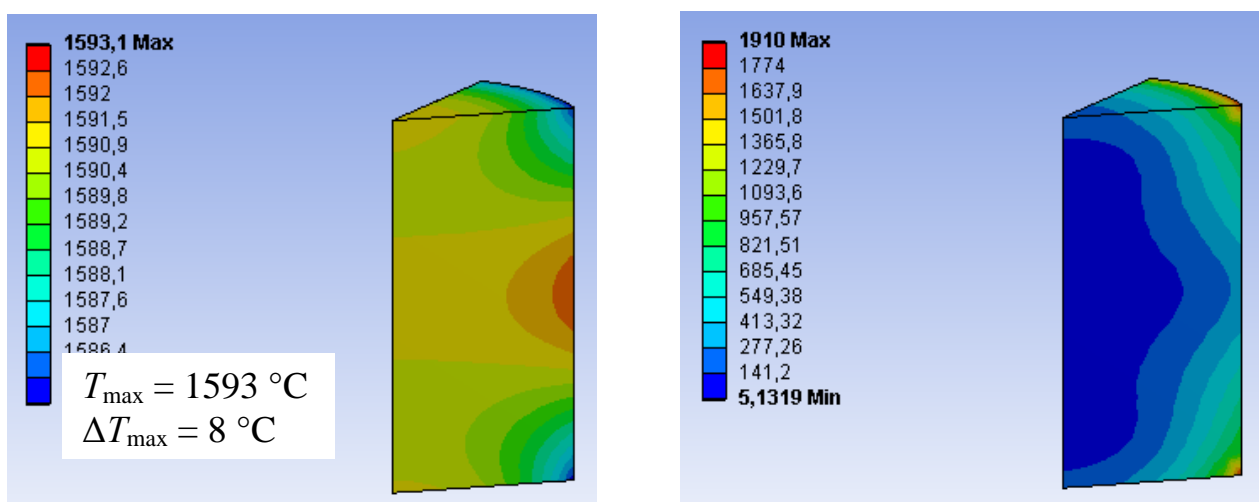


Рис. 10. Поля температури (°С) і градієнта температури (°С/м) у фронтальному перерізі комірки і реакційного об'єму за $t = 1043$ с

Таким чином, наведені на рис. 10 теплові поля відповідають протіканню другого етапу реакційного спікання РСВН на основі 90 % сBN + 10 % Al за умови утворення неелектропровідних фаз нітриду та боридів алюмінію і твердих розчинів. В умовах стабілізації потужності струму нагрівання на рівні 12,2 кВт за тиску ~ 5 ГПа і реакційного спікання, в результаті якого зразок стає неелектропровідним, температура в ньому знижується до рівня 1600 °С, а максимальний перепад температури – до 8 °С.

В табл. 1 зведено дані зареєстрованих параметрів спікання (тиск, напруга, сила струму, потужність) і розрахованих значень екстремумів температури в реакційному об'ємі для двох етапів спікання за різних моментів часу. Як видно, запропонований варіант складання комірки АВТ забезпечує доволі однорідний розподіл температури у масивному зразку РСВН під час спікання за високих тисків і температур.

Таблиця 1. Параметри спікання PCBN-зразка 90 % cBN + 10 % Al

Етап – t , с	T , °C	p , ГПа	U , В	I , кА	W , кВт
1 – 319	$T_{\max} = 1105$ $T_{\min} = 1092$	2	5,57	1,339	7,5
2 – 715	$T_{\max} = 1727$ $T_{\min} = 1707$	5	6,756	1,805	12,2
2 – 1043	$T_{\max} = 1593$ $T_{\min} = 1585$	5	6,986	1,745	12,2

Висновки

1. Методика моделювання електрорезистивного нагрівання реакційної комірки дозволяє визначати **термоелектричні поля** з урахуванням вольт-амперних характеристик процесу реакційного спікання композита на основі 90 % cBN + 10 % Al. Враховано залежність провідних властивостей матеріалів складових елементів АВТ від температури. При симуляції двостадійного процесу спікання калібрували провідні властивості матеріалів АВТ, задовольняючи умову точного збігу розрахункової потужності нагрівання з експериментально реєстрованою.

2. Розрахунки показали, що в момент часу спікання $t = 319$ с (перший етап процесу), коли зразок cBN+Al електропровідний, максимальний перепад температури в ньому становить 13 °C. При $t = 715$ с (початок другого етапу спікання) зразок залишається електропровідним, і максимальний перепад температури в ньому становить 19 °C. При $t = 1043$ с, коли шихта внаслідок реакційного спікання набуває властивостей діелектрика, максимальний перепад температури в реакційному об'ємі становить 8 °C, і відбувається зміщення точки максимуму температури з центру реакційного об'єму в циліндричний нагрівач. В цілому спікання зразків відбувається в досить високо однорідних температурних умовах.

3. Отримані розрахункові дані використано при проектуванні схеми складання кубічної комірки високого тиску шестипуансонного АВТ для отримання зразків PCBN-композита відносно великих розмірів.

O. Lyeshchuk, O. Liudvichenko, A. Patsyk, M. Bezhenar, O. Sokolov

Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

INVESTIGATION OF THERMAL CONDITIONS IN A HIGH-PRESSURE CUBIC CELL BASED ON THE VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF THE cBN–Al SYSTEM REACTION SINTERING

The thermal state of six-punch HPA, which is used for reaction sintering of a composite based on 90 wt.% cBN + 10 wt.% Al, is studied using computer modeling. During sintering, the test sample transforms from the dielectric to the conducting state and vice versa, which was taken into account in the simulation. The values of the electro- and thermophysical properties of HPA materials were adjusted in accordance with the experimentally determined volt-ampere characteristics of the sintering process. The thermoelectric fields obtained as a result of solving the quasi-stationary problem describe the thermal state of the reaction volume at different stages of composite reaction sintering.

Key words: polycrystalline cubic boron nitride (PCBN), high-pressure apparatus (HPA), cell, volt-ampere characteristics, thermal state, modeling.

Література

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова. М.: Машиностроение, 2005. 556 с.

2. Беженар М.П., Коновал С.М., Гарбуз Т.О., Романенко Я.М., Білявіна Н.М. Вплив тиску на формування структури і властивостей надтвердих РсВN матеріалів. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 20. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2017. С.384–392.
3. Беженар М.П., Божко С.А., Гарбуз Т.О., Коновал С.М. Композити кубічного нітриду бору, зміцнені тугоплавкими борідами. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 12. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2009. С. 223–235.
4. Коновал С.М., Гарбуз Т.О., Беженар М.П., Божко С.А., Нагорний П.А., Білявіна Н.М., Марків В.Я. Реакційне спікання кубічного нітриду бору з алюмінієм і тугоплавкими сполуками при високому тиску. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 12. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2009. С. 235–244.
5. Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: сб. науч. тр. / отв. ред. Н.В. Новиков. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2005. 255 с.
6. Беженар М.П. Матеріали на основі кубічного нітриду бору. *Енциклопедія Сучасної України*. К.: Ін-т енцикл. дослідж. НАН України, 2018. URL: <https://esu.com.ua/article-66001>.
7. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: моногр. в 6-ти т. Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. К: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ “АЛКОН” НАНУ, 2006. 316 с.
8. Шульженко А.А., Божко С.А., Соколов А.Н., Петруша И.А. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора. К.: Наук. думка. 1993. 256 с.
9. Синтетические сверхтвердые материалы: в 3-х т. Т. 1: Синтез сверхтвердых материалов / редкол. Н.В. Новиков (отв. ред.) и др. К.: Наук. думка, 1986. 280 с.
10. Lyeshchuk O. Computational modeling of superhard materials synthesis. *Comp. Mater. Sci.* 2010. Vol. 49, N 1S. P. S85–S94.
11. Li R., Zheng G., Liu Y., Wang M., Chen P., Chen M., Zhang Q. Finite element design of a temperature field for high-pressure diamond synthesis. *Diam. Relat. Mater.* 2016. Vol. 69. P. 133–137.
12. Li Y., Wang C., Chen N., Chen L., Guo L., Jia X., Ma H. Significant improvement of multi-seed method of diamond synthesis by adjusting the lateral cooling water temperature. *Cryst. Eng. Comm.* 2017. Vol. 19. P. 6681–6685.
13. Panasyuk T.S., Lyeshchuk O.O., Lusakovs'kyi V.V., Kalenchuk V.A., Zanevs'kyi O.O. Modeling of temperature fields in the growth volume of the high-pressure cell of the six-punch high pressure apparatus in growing of diamond crystals by *T*-gradient method. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, N 6. P. 390–396.
14. Li R., Ding M., Shi T. Finite element design for the HPHT synthesis of diamond. *J. Cryst. Growth.* 2018. Vol. 491. P. 111–115.
15. Dutka V.A., Maystrenko A.L., Borymskyi O.I., Kulich V.G., Kosenchuk T.O. Modeling the temperature field in a high-pressure apparatus during the sintering of large-sized products based on boron carbide. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, N 4. P. 240–250.
16. Liudvichenko O.P., Lyeshchuk O.O., Petruscha I.A. Effect of the concentration of components and the size of heaters on the thermal state of a high-pressure cell to study the solubility of gallium nitride in iron. *Ibid.* 2023. Vol. 45, N. 2. P. 83–92.
17. Туманов В.И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама–кобальт: справ. Москва: Металлургия, 1971. 96 с.

18. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы): справ. кн. Ленинград: Энергия, 1973. 336 с.
19. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. Москва: Металлургия, 1975. 368 с.
20. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: справ. / под ред. В.П. Соседова. Москва: Металлургия, 1975. 336 с.
21. Исследование теплофизических свойств материалов реакционного сосуда и их влияния на работоспособность кристаллов алмаза и свойств примесей в них: Отчет о НИР. Т. 1: Исследование теплофизических свойств материалов реакционного сосуда. К.: Ин-т сверхтв. материалов АН УССР, 1978. 213 с.
22. Физико-химические свойства окислов: справ. / под ред. Г.В. Самсонова. Москва: Металлургия, 1978. 471 с.
23. Теплопроводность твердых тел: справ. / под ред. А.С. Охотина. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
24. Материалы для электротермических установок: справ. пособ. / под ред. М.Б. Гутмана. М.: Энергоатомиздат, 1987. 296 с.
25. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справ. Москва: Металлургия, 1989. 384 с.
26. Chen W., Decker D.L. Pressure dependence of the thermal conductivity of pyrophyllite to 40 kbar. *J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 71, N 6. P. 2624–2627.
27. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем: справ. Москва: НПО «Информ ТЭИ», 1992. 184 с.
28. Савицький О.В., Лисаковський В.В. Електропровідність графітових деталей резистивного нагрівання, виготовлених шляхом пресування. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 21. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2018. С. 295–300.
29. Савицький О.В., Лисаковський В.В., Бовсунівський О.В. Електрорезистивні властивості графіту за високих тисків та високих температур. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 22. К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2019. С. 299–303.
30. Solfiti E., Berto F. A review on thermophysical properties of flexible graphite. *Procedia Struct. Integrity*. 2020. Vol. 26. P. 187–198.

Надійшла 30.08.2024

References

1. Novikov, N.V. (Ed.). (2005). *Instrumenty iz sverkhтвердыkh materialov* [Tools made from superhard materials]. Mashinostroenie [in Russian].
2. Bezhenar, M.P., Konoval, S.M., Garbuz, T.O., Romanenko, Ya.M., & Biliavyna, N.M. (2017). Vplyv tysku na formuvannia struktury i vlastyvostei nadtverdykh PcBN materialiv [The influence of pressure on the formation of the structure and properties of superhard PcBN materials]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiiia eho izhotovleniia i primneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications* (20nd Issue, p. 384–392). ISM im. V.N. Bakulia NAN Ukrainy [in Ukrainian].

3. Bezhenar, M.P., Bozhko, S.A., Harbuz, T.O., & Konoval, S.M. (2009). Kompozyty kubichnoho nitrydu boru, zmitsneni tuhoplavkymy borydamy [Composites of cubic boron nitride strengthened by refractory borides]. *Ibid* (12nd Issue, p. 223–235) [in Ukrainian].
4. Konoval, S.M., Harbuz, T.O., Bezhenar, M.P., Bozhko, S.A., Nahorni, P.A., Biliavyna, N.M., & Markiv, V.Ya. (2009). Reaktsiine spikannia kubichnoho nitrydu boru z aliuminiem i tuhoplavkymy spolukamy pry vysokomu tysku [Reactive sintering of cubic boron nitride with aluminum and refractory compounds at high pressure]. *Ibid* (P. 235–244) [in Ukrainian].
5. Novikov, N.V. (Ed.). (2005). Sintez, spekanie i svoistva sverkhтверdykh materialov: sb. nauch. tr. [Synthesis, sintering and properties of superhard materials: coll. sci. papers]. ISM im. V.N. Bakulia NAN Ukrainy [in Russian].
6. Bezhenar, M.P. (2018). Materialy na osnovi kubichnoho nitrydu boru [Materials based on cubic boron nitride]. *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy – Encyclopedia of Modern Ukraine*. In-t entsykl. doslidzh. NAN Ukrainy. <https://esu.com.ua/article-66001> [in Ukrainian].
7. Klimenko, S.A. (2006). Sverkhтвердые материалы. Poluchenie i primenenie: monohr. v 6-ti t. T. 5: Obrabotka materialov lezviinym instrumentom [Superhard materials. Obtaining and applying: monograph. in 6 vol. Vol. 5: Processing of materials with blade tools]. ISM im. V.N. Bakulia, IPTs “ALKON” NAN Ukrainy [in Russian].
8. Shulzhenko, A.A., Bozhko, S.A., Sokolov, A.N., & Petruscha, I.A. (1993). Sintez, spekanie i svoistva kubicheskoho nitrida bora [Synthesis, sintering and properties of cubic boron nitride]. *Nauk. dumka* [in Russian].
9. Novikov N.V. (1986). Sinteticheskiye sverkhтвердые материалы: v 3-kh t. T. 1: Sintez sverkhтверdykh materialov [Synthetic superhard materials: in 3 vol. Vol. 1: Synthesis of superhard materials]. *Nauk. dumka* [in Russian].
10. Lyeshchuk, O. (2010). Computational modeling of superhard materials synthesis. *Comp. Mater. Sci.*, 49(1S), S85–S94.
11. Li, R., Zheng, G., Liu, Y., et al. (2016). Finite element design of a temperature field for high-pressure diamond synthesis. *Diam. Relat. Mater.*, 69, 133–137.
12. Li, Y., Wang, C., Chen, N., et al. (2017). Significant improvement of multi-seed method of diamond synthesis by adjusting the lateral cooling water temperature. *Cryst. Eng. Comm.*, 19, 6681–6685.
13. Panasyuk, T.S., Lyeshchuk, O.O., Lusakovskyi, V.V., et al. (2017). Modeling of temperature fields in the growth volume of the high-pressure cell of the six-punch high pressure apparatus in growing of diamond crystals by T-gradient method. *J. Superhard Mater.*, 39(6), 390–396.
14. Li, R., Ding, M., & Shi, T. (2018). Finite element design for the HPHT synthesis of diamond. *J. Cryst. Growth.*, 491, 111–115.
15. Dutka, V.A., Maystrenko, A.L., Borymskyi, et al. (2020). Modeling the temperature field in a high-pressure apparatus during the sintering of large-sized products based on boron carbide. *J. Superhard Mater.*, 42(4), 240–250.
16. Liudvichenko, O.P., Lyeshchuk, O.O., & Petruscha, I.A. (2023). Effect of the concentration of components and the size of heaters on the thermal state of a high-pressure cell to study the solubility of gallium nitride in iron. *J. Superhard Mater.*, 45(2), 83–92.
17. Tumanov, V.I. (1971) Svoistva splavov sistemy karbid volframa–kobalt: sprav. [Properties of the tungsten carbide–cobalt system alloys: ref. book]. *Metallurgiiia* [in Russian].
18. Krzhizhanovskii, R.Ye., & Shtern, Z.Yu. (1973) Teplofizicheskie svoistva nemetallicheskih materialov (okisly): Sprav. kn. [Thermophysical properties of non-metallic materials (oxides): ref. book]. *Energiia* [in Russian].

19. Kazantsev, E.I. (1975). Promyshlennye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlia raschetov i proektirovaniia [Industrial furnaces. A reference guide for calculations and design.]. Metallurgiiia [in Russian].
20. Sosedov, V.P. (Ed.). (1975). Svoistva konstruktsionnykh materialov na osnove uhleroda: sprav [Properties of structural materials based on carbon: ref. book]. Metallurgiiia [in Russian].
21. (1978). Issledovanie teplofizicheskikh svoistv materialov reaktsionnoho sosuda i ikh vliianiia na rabotosposobnost kristallov almaza i svoistv primesei v nikh: Otchet o NIR. T. 1: Issledovanie teplofizicheskikh svoistv materialov reaktsionnoho sosuda [Investigation of the thermophysical properties of reaction vessel materials and their effect on the performance of diamond crystals and the properties of impurities in them: R&D Report. Vol. 1. Investigation of thermophysical properties of reaction vessel materials]. In-t sverkhstv. materialov AN USSR [in Russian].
22. Samsonov, G.V. (Ed.). (1978). Fiziko-khimicheskie svoistva okislov: sprav. [Physicochemical properties of oxides: ref. book]. Metallurgiiia [in Russian].
23. Ohotin, A.S. (Ed.). (1984). Teploprovodnost tverdykh tel: sprav. [Thermal conductivity of solids: ref. book]. Enerhoatomizdat [in Russian].
24. Gutman, M.B. (Ed.). (1987). Materialy dlia elektrotermicheskikh ustanovok: sprav. posob. [Materials for electrothermal installations: ref. manual]. Enerhoatomizdat [in Russian].
25. Zinovev, V.Ye. (1989). Teplofizicheskie svoistva metallov pri vysokikh temperaturakh: sprav. [Thermophysical properties of metals at high temperatures: ref. book]. Metallurgiiia [in Russian].
26. Chen, W., & Decker, D.L. (1992). Pressure dependence of the thermal conductivity of pyrophyllite to 40 kbar. J. Appl. Phys., 71(6), 2624–2627.
27. Sheludiak, Yu.Ye., Kashporov, L.I., Malinin, L.A., & Tsalkov, V.N. (1992). Teplofizicheskie svoistva komponentov goruchikh sistem [Thermophysical properties of components of combustible systems]. NPO “Inform TEI” [in Russian].
28. Savitskyi, O.V., & Lysakovskiy, V.V. (2018). Elektroprovodnist hrafityvykh detalei rezystyvnoho nahrivannia, vyhotovlenykh shlyakhom presuvannia [Electrical conductivity of resistive heating graphite parts made by pressing]. Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiiia eho izhotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications (21st Issue, p. 295–300). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
29. Savitskyi, O.V., Lysakovskiy, V.V., & Bovsunivskiy, O.V. (2019). Elektrozystyvni vlastyvyosti hrafitu za vysokykh tysktiv ta vysokykh temperatur [Electroresistive properties of graphite at high pressures and high temperatures]. Ibid (22nd Issue, p. 299–303) [in Ukrainian].
30. Solfiti, E., & Berto, F. (2020). A review on thermophysical properties of flexible graphite. Procedia Struct. Integrity., 26, 187–198.