

Т.С. Панасюк, к.т.н., н.с.  
О.О. Лещук, д.т.н., зав. відділу  
В.В. Лисаковський, к.т.н., с.н.с.  
С.О. Івахненко, проф., д.т.н., зав. відділу  
О.В. Бовсунівський, аспір.  
В.Ю. Клочок, аспір.

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

## Застосування шестипуансонного апарата високого тиску для вирощування монокристалів алмазу інструментального призначення

*На сьогоднішній день активно досліджується задача промислового вирощування монокристалів алмазу інструментального призначення з використанням шестипуансонних апаратів високого тиску кубічного типу. Розподіл температури в ростовій комірці АВТ має виключне значення в процесі вирощування монокристалів алмазу. Експериментальне визначення розподілів температури в ростовому об'ємі займає багато часу та зусиль, тому доцільно використовувати комп'ютерне моделювання. За допомогою пакета програм ANSYS Workbench розроблено методику тривимірного чисельного моделювання процесу резистивного нагрівання шестипуансонного АВТ і проведено її тестування на прикладі спонтанної кристалізації алмазу в такому апараті. Розраховано температурні поля в ростовій комірці шестипуансонного АВТ при вирощуванні монокристалів алмазу методом температурного градієнта, на основі чого розроблено оптимальну схему нагрівання ростового об'єму. Наведено експерименти з вирощування монокристалів алмазу в шестипуансонному АВТ при тривалості циклів від 48 до 96 год та наведено характеристики отриманих кристалів.*

**Ключові слова:** шестипуансонний апарат високого тиску; метод температурного градієнта; монокристал; алмаз; поле температури; комп'ютерне моделювання; чисельне моделювання.

**Вступ. Постановка проблеми.** Завдяки своїм унікальним властивостям алмазні кристали широко використовують в різних областях науки і техніки, тому проблема їх штучного вирощування надзвичайно важлива. За статистичними даними 2013 року 90 % світового виробництва синтетичних алмазів припадало на Китай, де застосовують шестипуансонні кубічні апарати високого тиску (АВТ). Для спонтанного синтезу алмазу такі апарати є поза конкуренцією, проте їх стандартна заводська комплектація не дозволяє проводити вирощування одиничних кристалів алмазу методом температурного градієнта.

Розподіл температури в ростовій комірці АВТ має виключне значення в процесі синтезу кристалів алмазу, однак його експериментальне визначення є доволі складним і довготривалим. Тому для дослідження температурних полів в ростовій комірці широко використовують методи чисельного аналізу, ефективність яких була неодноразово доведена на практиці [1–10]. У цій роботі тепловий стан шестипуансонного АВТ визначали з використанням програмного скінченно елементного комплексу ANSYS.

**Постановка завдання.** Розглядали випадок стаціонарного розподілу температури в АВТ, що знаходився в здеформованому стані, коли під впливом стискаючого зусилля пресу пуансонні зблизилися, контейнер із пірофіліту здеформувався, утворивши замикаючі ущільнення. Внаслідок наявності двох вертикальних площин симетрії АВТ розглядали 1/4 його частину (рис. 1). Розміри здеформованих елементів ростової комірки були визначені після експериментів при тиску 5,5 ГПа: довжина ребра пірофілітового кубічного контейнера становила 55 мм (до експерименту – 58 мм), довжина замикаючих ущільнень – 12 мм.

Розрахункову схему АВТ дискретизували ~ 30000 елементами (~ 70000 вузлів), 60 % яких припадає на центральну частину апарата (рис. 2).

Нагрівання ростової комірки (рис. 3) відбувається за рахунок виділення джоулевого тепла при протіканні через неї електричного струму. Отже, для моделювання температурного поля в АВТ необхідно розв'язати зв'язану задачу електро- і теплопровідності.

Перевірку адекватності розробленої методики виконано на прикладі моделювання температурного поля в АВТ при спонтанному синтезі алмазу, коли оптимальним є практично однорідний розподіл температури в реакційному об'ємі ростової комірки. Граничні умови для задачі електропровідності задавали таким чином: на торцевих поверхнях *A* верхнього і нижнього пуансонів (рис. 1, *a*) значення

електричного потенціалу підбирали так, щоб розрахункова температура в центрі реакційного об'єму становила  $\sim 1400$  °С; на решті частини граничної поверхні густина струму дорівнювала нулю.

Для задачі теплопровідності на торцевих поверхнях *A* верхнього і нижнього пуансонів задавали постійну температуру 40 °С. На поверхнях АВТ *B* (рис. 1, *a*), що охолоджуються завдяки природній конвекції повітря, задавали умову конвективного теплообміну за законом Ньютона  $h = \alpha(T - \theta)$ , де  $h$  – щільність теплового потоку,  $\alpha = 25$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) [11] – коефіцієнт тепловіддачі,  $T$  – розрахункова температура на граничній поверхні,  $\theta = 20$  °С – температура навколишнього середовища. На поверхнях *C* каналів внутрішньої водяної системи охолодження (рис. 1, *б*) задавали умову конвективного теплообміну з водою. При цьому  $\alpha$  розраховували за формулою для визначення коефіцієнта конвективної тепловіддачі при вимушеному русі текучого середовища в трубах і каналах  $\alpha = 0,023\lambda Re^{0,8} Pr^{0,33}/D$  [11], де  $\lambda = 0,602 \cdot \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$  [12] – теплопровідність води при 20 °С,  $Re = \rho V D / \mu$  – число Рейнольдса,  $\rho = 998,2$  кг/м<sup>3</sup> [12] – щільність води при 20 °С,  $V$  – швидкість води,  $D = 2wh/(w+h)$  – еквівалентний діаметр поперечного розрізу каналу з водою,  $w = 0,007$  м – ширина поперечного розрізу каналу,  $h = 0,014$  м – висота поперечного розрізу каналу,  $\mu = 10015 \cdot 10^{-7}$  Па·с [12] – динамічний коефіцієнт в'язкості води,  $Pr = 6,96$  [12] – число Прандтля для води. При  $V = 2,6$  м/с (верхній і нижній пуансони)  $\alpha = 9041$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), при  $V = 1,2$  м/с (бічні пуансони)  $\alpha = 4871$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

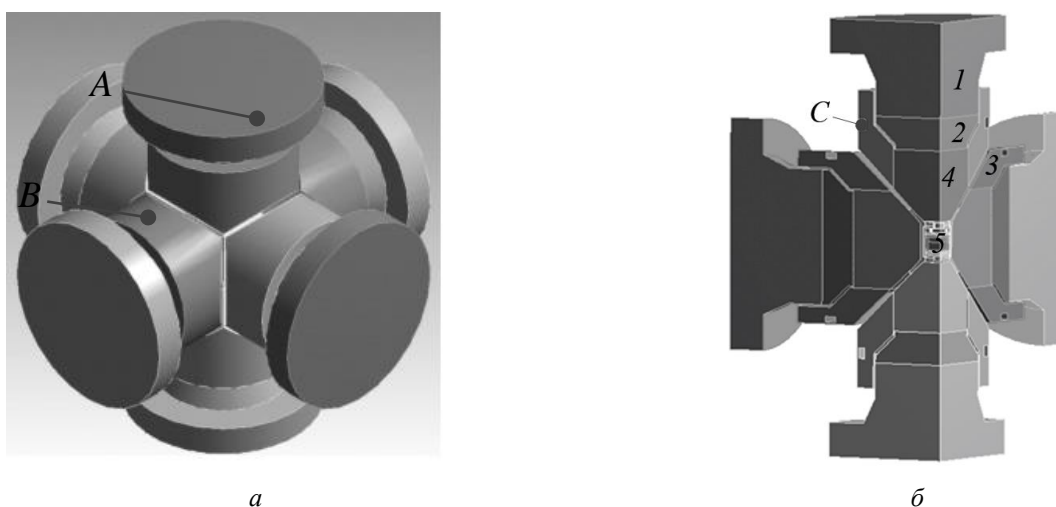


Рис. 1. Схема шестипуансонного АВТ для преса марки CS-VII: *a* – загальний вигляд; *б* – в розрізі площинами вертикальної симетрії; 1 – підкладна плита (сталь); 2 – опорна плита (сталь); 3 – охолоджуючо-скріплююче кільце (сталь); 4 – пуансон (твердий сплав); 5 – ростова комірка; *A* – торець пуансона; *B* – поверхня контакту з повітрям; *C* – охолоджуючий канал

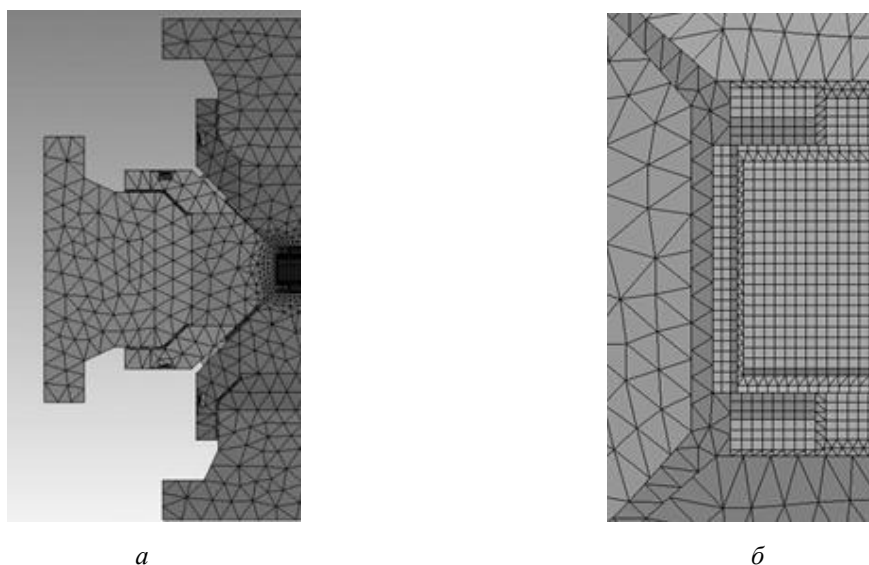


Рис. 2. Фрагменти дискретної схеми шестипуансонного АВТ: *a* – загальний вигляд; *б* – центральна частина

Електро-, теплофізичні властивості конструкційних матеріалів АВТ залежно від температури брали з довідників [13, 14]. Контактними електричним і тепловим опорами деталей АВТ нехтували.

**Викладення основного матеріалу.** На рисунку 4 представлено результат розрахунку температурного поля в АВТ при спонтанному синтезі алмазу. Як видно, температура в реакційному об'ємі розподілена практично однорідно, температурний максимум сформувався в його центрі, радіальний і осьовий перепади температури не перевищують 6 град.

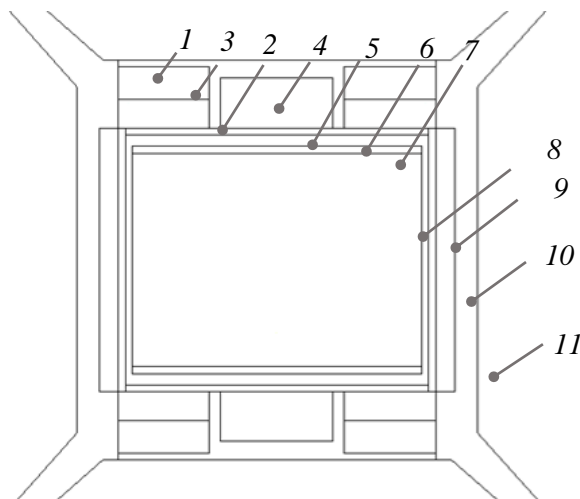


Рис. 3. Схема спорядження ростової комірки для спонтанного синтезу алмазу: 1 – стальний струмовідвід; 2 – пірофілітове кільце; 3 – доломітове кільце; 4 – доломітовий диск; 5 – графітовий струморозподільний диск; 6 – переклазовий ізолятор; 7 – теплоізоляційний диск (CsCl); 8 – реакційний об'єм (суміш графіту ГМЗ зі сплавом-розчинником Fe–Ni); 9 – графітовий циліндр; 10 – теплоізоляційна втулка (доломіт); 11 – деформівний контейнер (пірофіліт)

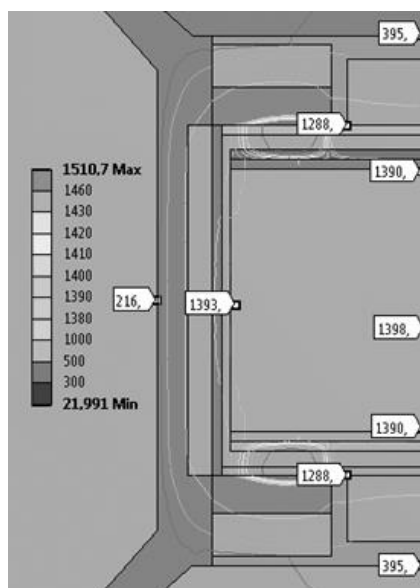


Рис. 4. Поле температури в ростовій комірці шестипуансонного АВТ при спонтанному синтезі алмазу

Наведена на рисунку 3 схема спорядження ростової комірки пройшла експериментальні випробування в шестипуансонному АВТ ССР-типу марки CS-VII з діаметром плунжера 560 мм та зусиллям 27 МН на кожний плунжер. Контейнер у вигляді куба зі стороною 58 мм і циліндричним отвором діаметром 42 мм для розміщення ростового об'єму із зовнішніми сталевими електропідводами виготовляли з пресованого пірофіліту. Як сплав-розчинник використовували Fe–Ni. Дослідження проводили при тиску в реакційному об'ємі  $5,7 \pm 0,1$  ГПа і температурі 1350–1400 °С. Тиск визначали за калібровочними кривими, що побудовані по фіксованим точкам фазових переходів у селеніді і телурид

свинцю. Нагрів ростової комірки здійснювали змінним струмом, що пропускався через систему резистивних елементів, з'єднаних з верхнім і нижнім пуансонами пресу. Потужність нагріву підтримували по програмі за допомогою системи управління пресової установки. Рівень потужності нагріву змінювали від 6,1 до 6,2 кВт на початку циклу синтезу до 5,8–5,9 кВт перед вимкненням нагріву в кінці циклу. Тривалість циклу синтезу становила 20–25 хв.

У результаті проведених експериментів отримано кристали алмазу, що були рівномірно розподілені в реакційному об'ємі. На рисунку 5 представлено фрактограми осьового перетину реакційного об'єму і його збільшені фрагменти. Видно, що щільність кристалів спонтанного синтезу приблизно однакова по всьому зламу реакційного об'єму. Розмір синтезованих кристалів алмазу становить 0,3–0,6 мм, габітус – кубооктаедричний (рис. 6).

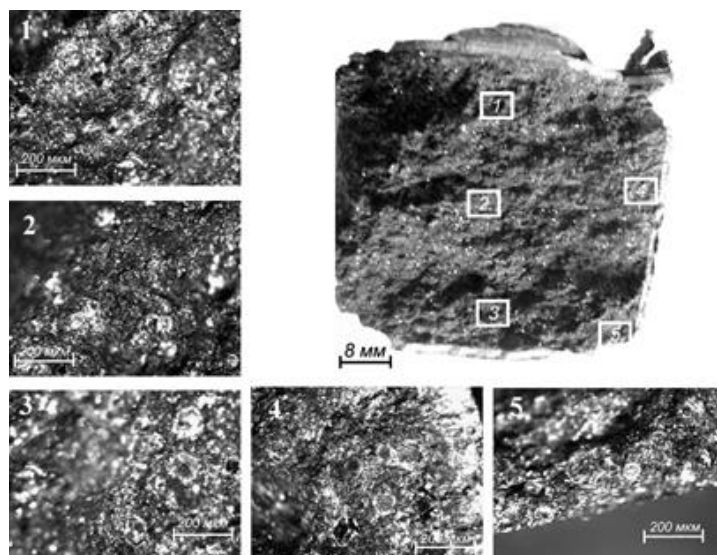


Рис. 5. Розподіл кристалів алмазу спонтанного синтезу на зламі реакційного об'єму

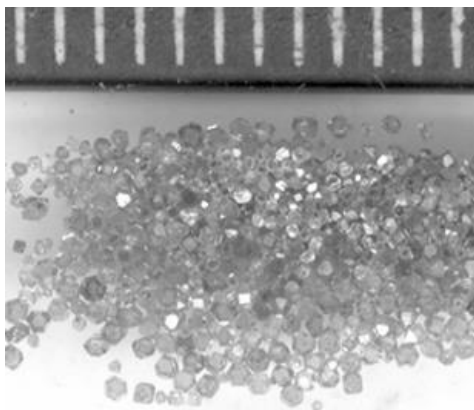


Рис. 6. Кристали алмазу, отримані спонтанним синтезом у системі Fe–Ni–C (ціна ділення – 1 мм)

Таким чином, комп'ютерне моделювання електрорезистивного нагрівання шестипуансонного АВТ при спонтанному синтезі алмазу достатньо добре відповідає експериментальним результатам щодо незначного розкиду розмірів синтезованих алмазів та однорідності їх форми. Отже, таке моделювання перспективно використовувати для розробки ростових комірок із заданими величинами і напрямленням температурних градієнтів. У подальшому розроблену методику застосували для моделювання температурних полів при вирощуванні одиничних кристалів алмазу методом температурного градієнта. Розрахунки проводили для схеми спорядження ростової комірки, що зображена на рисунку 7.

Загальна схема АВТ та граничні умови для задачі електро- і теплопровідності аналогічні наведеним для випадку спонтанного синтезу алмазу. При цьому точка фіксованої температури (1400 °С) знаходилася в центрі затравочної поверхні. Для отримання оптимальних величин осьового градієнта температури в ростовому об'ємі і мінімізації температури в характеристичних точках ростової комірки були проведені розрахунки для декількох значень внутрішнього і зовнішнього діаметрів графітового струмопідводу 9, складу композиційного нагрівача 12 та висоти теплоізоляційного кільця 10.

На рисунку 8 наведено розраховане поле температури в ростовій комірці, що максимально відповідає початковим технологічним умовам вирощування монокристалів алмазу методом температурного градієнта. Отримане середнє значення осьового градієнта температури становить 10 град/мм, радіального – 1,2 град/мм.

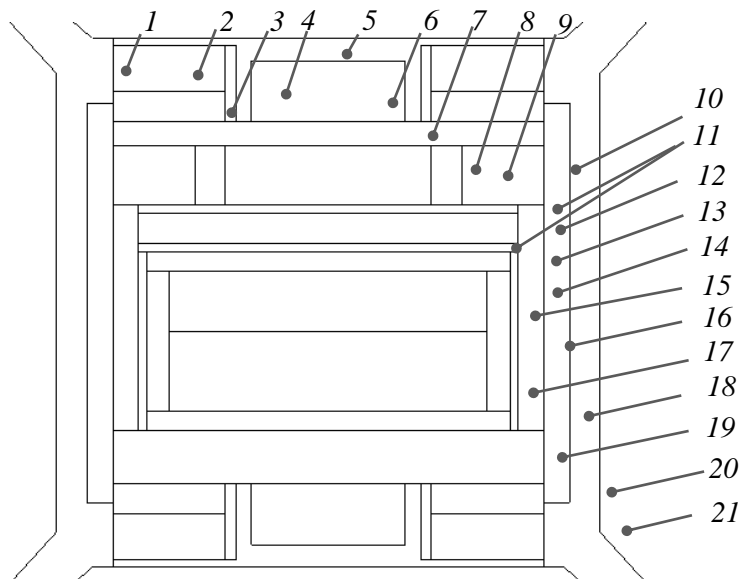


Рис. 7. Схема спорядження ростової комірки для вирощування кристалів алмазу методом температурного градієнта: 1 – деформівний контейнер (пірофіліт); 2 – теплоізоляційне кільце (пірофіліт); 3 – теплоізоляційне кільце (доломіт); 4, 9 – кільцеві струмопідводи (графіт); 5 – електроконтактний елемент (сталь); 6 – теплоізоляційний диск (доломіт); 7, 11, 19 – електро- і теплорозподільні диски (графіт); 8, 10, 13, 14, 18, 20 – теплоізоляційні елементи ( $ZrO_2$  або  $CsCl$ ); 12 – композиційний нагрівач; 15 – джерело вуглецю (графіт); 16 – графітовий трубчастий нагрівач; 17 – сплав-розчинник (Fe-Ni); 21 – теплоізоляційний циліндр (доломіт)

Наведена на рисунку 7 ростова комірка з попередньо розрахованим полем температури (рис. 8) пройшла експериментальну перевірку при вирощуванні одиничних кристалів алмазу методом температурного градієнта в шестипуансонному АВТ. Експерименти проводили в АВТ ССР-типу марки CS-VII з діаметром плунжера 560 мм та зусиллям 27 МН на кожний плунжер. Процес вирощування проводили методом температурного градієнта при тиску  $\sim 5,5$  ГПа та температурі 1400–1470 °С. Тривалість циклів вирощування становила 48–96 год. Сплав-розчинник Fe-Ni виготовляли вакуумно-індукційною плавкою. Затравочна система складалась з 21–23 кристалів, орієнтованих гранню куба до сплаву-розчинника і ізольованих платиною фольгою товщиною  $\sim 0,025$  мм.

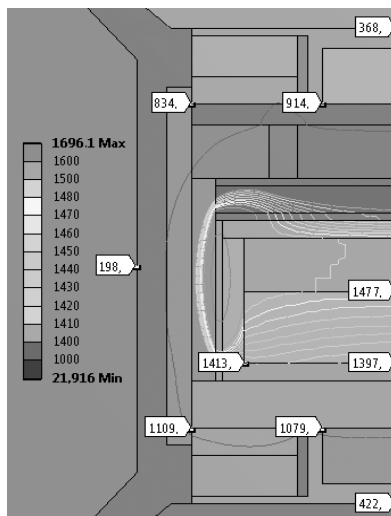


Рис. 8. Поле температури в ростовій комірці шестипуансонного АВТ при вирощуванні кристалів алмазу методом температурного градієнта

При циклі вирощування 48 год отримали 23 кристали розмірами 1,4–3,6 мм, масою 0,13–0,45 кар, загальною масою 6,3 кар (рис. 9, а). Всі отримані кристали не містили включень сплаву-розчинника. Габітус кристалів – кубооктаедричний, співвідношення граней куба і октаедра – приблизно однакове. Три монокристали, розташовані в центральній частині затравочної поверхні, містили включення сплаву-розчинника розміром до 0,5 мм поблизу зовнішньої поверхні кристалів.

При циклі вирощування 72 год отримали 21 кристал розмірами 2,1–5,7 мм, масою 0,28–0,93 кар, загальною масою 11,3 кар (рис. 9, б). Слід зазначити, що маса кристала, розташованого в центрі, була найбільшою і містила включення сплаву-розчинника розміром до 2 мм. Сім кристалів, що були розташовані в центральній частині, містили включення сплаву-розчинника розмірами до 0,5 мм. Інші вирощені зразки відрізнялися високою структурною досконалістю, хоча деякі з них містили включення розмірами до 0,05 мм.

При збільшенні тривалості вирощування до 96 год отримали 22 кристали розмірами 4,3–7,2 мм, масою 0,45–1,36 кар, загальною масою 18,2 кар (рис. 9, в). Монокристали, вирощені в центральній частині затравочної поверхні, містили багато великих (розмірами до 2 мм) включень сплаву-розчинника, утворених на різних стадіях росту (всі інші кристали були високої структурної досконалості і не містили включень розмірами, більшими за 0,1 мм). Такі результати щодо розподілення включень пов'язані із змінюванням напрямку потоку вуглецю в процесі росту кристалів алмазу і відповідним захопленням домішок. Скоригувати потік вуглецю можна за рахунок розміщення більшого числа затравок у центральній зоні. В цьому разі кристали будуть досконалішими за структурою, але меншими за розміром.

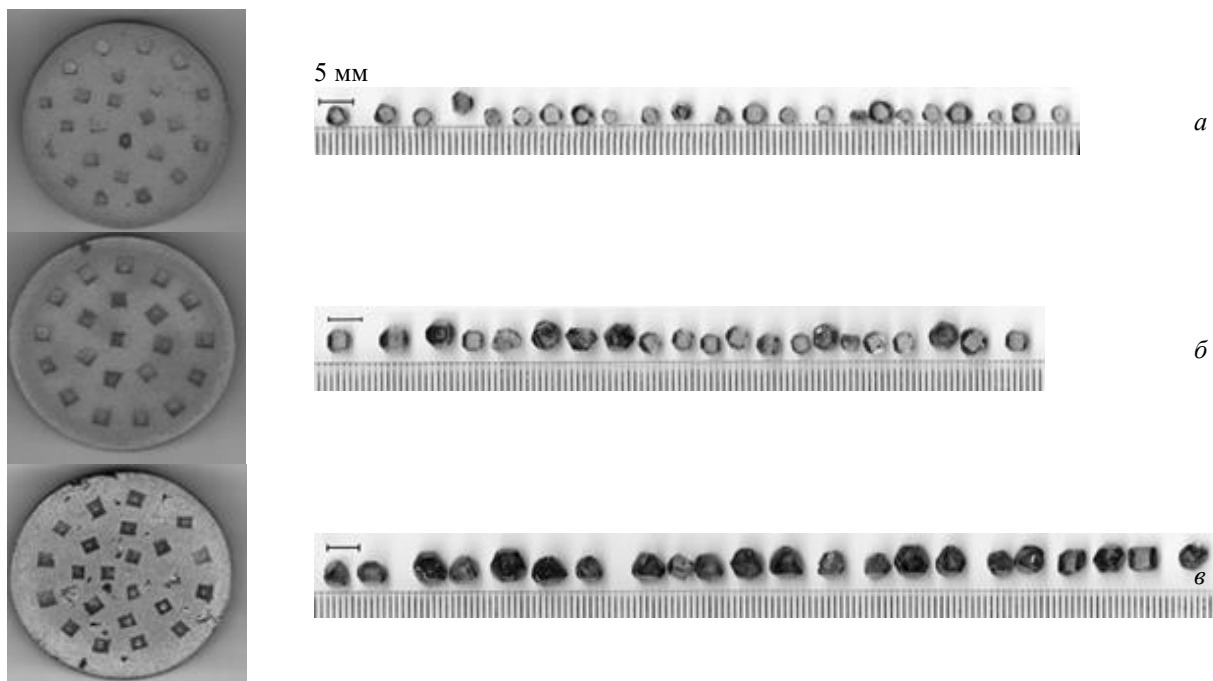


Рис. 9. Вигляд монокристалів алмазу типу Ib, вирощених в шестипуансонному АВТ ССР-типу: а – за 48 год, б – за 72 год, в – за 96 год

**Висновки та перспективи подальших розвідок.** У результаті дослідження дійшли висновку, що форма кристалів та розвиток їх граней залежать від місцезнаходження на затравочній поверхні. У кристалів, що росли в центральній частині, добре розвинені грані октаедра; співвідношення площ граней куба і октаедра складало приблизно 30/70. Кристали, що росли на периферії, мали співвідношення граней октаедра і куба приблизно 50/50.

В цілому наведені результати підтверджують ефективність використання комп'ютерного проектування схем спорядження ростових комірок шенстипуансонного АВТ для забезпечення оптимального розподілу температури в них і, як наслідок, для високопродуктивного вирощування монокристалів алмазу інструментального призначення.

## Список використаної літератури:

1. Simulation of electrical, temperature, and thermal-stress fields in a high-pressure apparatus by the finite-element method / N.V. Novikov, V.I. Levitas, S.I. Shestakov et al. // *Soviet J. Superhard Mater.* – 1983. – Vol. 5, No. 3. – P. 1–7.
2. Lyeshchuk O. Computational modeling of superhard materials synthesis / O.Lyeshchuk // *Comp. Mater. Sci.* – 2010. – Vol. 49, No. 1S. – P. 85–94.
3. FEM simulations and experimental studies of the temperature field in a large diamond crystal growth cell / L.Zhan-Chang, J.Xiao-Peng, H.Guo-Feng, H.Mei-Hua // *Chin. Phys. B.* – 2013. – Vol. 22. – Art. 014701.
4. Gu X. Finite element simulation of the temperature field in the large volume cubic high pressure apparatus cavity / X.Gu, R.Li, Y.Tian // *J. Cryst. Growth.* – 2014. – Vol. 390. – P. 109–113.
5. Thermal analysis of the growth process of synthetic diamond in the large volume cubic press apparatus with large deformation of high pressure cell / Q.Zhang, R.Li, X.Gu et al. // *J. Cryst. Growth.* – 2015. – Vol. 420. – P. 80–83.
6. Finite element design of a temperature field for high-pressure diamond synthesis / R.Lia, G.Zheng, Y.Liu // *Diamond Relat. Mater.* – 2016. – Vol. 69. – P. 133–137.
7. 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 / T.S. Panasyuk, O.O. Lyeshchuk, V.V. Lusakovs'kyi // *J. Superhard Mater.* – 2017. – Vol. 39, No. 6. – P. 390–396.
8. Комп'ютерне моделювання температурних полів в шестипуансонному апараті високого тиску при зміні складу композитного нагрівача / Т.С. Панасюк, О.О. Лещук, П.М. Присяжнюк // *Вісн. ЖДТУ. Сер. : Техн. науки.* – 2017. – № 2. – С. 119–123.
9. Компьютерное моделирование условий кристаллизации алмаза в аппаратах высокого давления большого объема / Т.С. Панасюк, А.А. Лещук, В.В. Лысаковский и др. // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения : Сб. науч. тр. – К. : Ин-т сверхтв. материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.* – 2013. – Вып. 16. – С. 251–257.
10. Моделирование температурных полей в шестипуансонном аппарате высокого давления при изменении температуры окружающей среды / Т.С. Панасюк, А.А. Лещук, В.В. Лысаковский и др. // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения : сб. науч. тр. – К. : Ин-т сверхтв. материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины,* 2015. – Вып. 18. – С. 208–211.
11. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф.Крейт, У.Блэк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.
12. Варгафник Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафник. – М. : Наука, 1972. – 720 с.
13. Свойства конструкционных материалов на основе углерода : справочник / Под ред. В.П. Соседова. – М. : Металлургия, 1975. – 336 с.
14. Теплопроводность твёрдых тел : справочник / под ред. В.С. Охотина. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.

## References:

1. Novikov, N.V., Levitas, V.I., Shestakov, S.I. et al. (1983), «Simulation of electrical, temperature, and thermal-stress fields in a high-pressure apparatus by the finite-element method», *Soviet J. Superhard Mater.*, Vol. 5, No. 3. pp. 1–7.
2. Lyeshchuk, O.O. (2010), «Computational modeling of superhard materials synthesis», *Comp. Mater. Sc.*, Vol. 49, No. 1S, pp. 85–94.
3. Zhan-Chang, L., Xiao-Peng, J., Guo-Feng, H., Mei-Hua, H. (2013), «FEM simulations and experimental studies of the temperature field in a large diamond crystal growth cell», *Chin. Phys. B.*, Vol. 22, art. 014701, doi: 10.1088/1674-1056/22/1/014701
4. Gu, X., Li, R., Tian, Y. (2014), «Finite element simulation of the temperature field in the large volume cubic high pressure apparatus cavity», *J. Cryst. Growth.*, Vol. 390, pp. 109–113, doi:10.1016/j.jcrysgro.2013.12.044
5. Zhang, Q., Li, R., Gu, X., Qin, J., Jia, X., Ma, H. (2015), «Thermal analysis of the growth process of synthetic diamond in the large volume cubic press apparatus with large deformation of high pressure cell», *J. Cryst. Growth*, Vol. 420, pp. 80–83, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2015.03.036
6. Lia, R., Zheng, G., Liu, Y., Wang, M., Chen, P., Chen, M., Zhang, Q. (2016), «Finite element design of a temperature field for high-pressure diamond synthesis», *Diamond Relat. Mater.*, Vol. 69, pp. 133–137, doi: 10.1016/j.diamond.2016.08.003
7. Panasyuk, T.S., Lyeshchuk, O.O., Lusakovs'kyi, V.V., Kalenchuk, V.A., Zanevs'kyi, O.O. (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.*, Vol. 39, No. 6, pp. 390–396.
8. Panasyuk, T.S., Lyeshchuk, O.O., Prisyazhnyuk, P.M. (2017), «Комп'ютерне моделювання температурних полів в шестипуансонному апараті високого тиску при зміні складу композитного нагрівача», *Вісн. ЖДТУ, Сер. Техн. науки*, No. 2, pp. 119–123, doi: 10.26642/tn-2017-2(80)-119-123
9. Panasyuk, T.S., Leshchuk, A.A., Lysakovskij, V.V. i dr. (2013), «Комп'ютерное моделирование условий кристаллизации алмаза в аппаратах высокого давления большого объема», *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*, Сб. науч. тр., Ин-т сверхтв. материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Issue 16, pp. 251–257.
10. Panasyuk, T.S., Leshchuk, A.A., Lysakovskij, V.V. i dr. (2015), «Моделирование температурных полей в шестипуансонном аппарате высокого давления при изменении температуры окружающей среды»,

- Porodorazrushajushhij i metalloobrabatyvajushhij instrument – tehnika i tehnologija ego izgotovlenija i primeneniya*, Sb. nauch. tr., In-t sverhtv. materialov im. V.N. Bakulja NAN Ukrainy, Kiev, Issue 18, pp. 208–211.
11. Kreith, F. and Black, W. (1983), «Basic heat transfer», *Harper and Row Publ.*, New York, 556 p. translated by Anfimova, I.A., Mir Publ., Moscow, 512 p.
  12. Vargafnik, N.B. (1972), *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i gidkostey*, Nauka Publ., Moscow, 720 p.
  13. Sosedov, V.P. (1975), *Svoystva konstruktsionnykh materialov na osnove ugleroda*, Metallurgiya Publ., Moscow, 336 p.
  14. Okhotin, V.S. (1984), *Teploprovodnost' tverdykh tel*, Energoatomizdat Publ., Moscow, 320 p.

**Панасюк** Тетяна Сергіївна – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- розробка методів комп'ютерного моделювання температурних полів реакційних комірок АВТ.
- E-mail: scripse@ukr.net.

**Лещук** Олександр Олександрович – доктор технічних наук, завідувач відділу, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- термомеханіка матеріалів;
- комп'ютерне матеріалознавство;
- розробка фізико-механічних моделей та комп'ютерне моделювання технологічних процесів отримання функціональних матеріалів та виробів в екстремальних умовах високих тисків та температур.

E-mail: leshchuk@ism.kiev.ua.

**Лисаковський** Валентин Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- розчин-розплавна кристалізація монокристалів алмазу методом температурного градієнта при високих тисках та температурах.

E-mail: Valentin\_vl@inbox.ru

**Івахненко** Сергій Олексійович – завідувач відділу, професор Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- розробка методів спрямованого вирощування монокристалів алмазу методом температурного градієнта в області термодинамічної стабільності при високих тисках і температурах.

E-mail: sioz@ismv13.kiev.ua

**Бовсунівський** Олесь Вікторович – аспірант Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- розробка методів спрямованого вирощування монокристалів алмазу при високих тисках і температурах.

E-mail: olesbov@gmail.com

**Клочок** В'ячеслав Юрійович – аспірант Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- розробка методів контролю і підготовки вихідних матеріалів для контейнерів апаратів високого тиску;
- спрямована кристалізація алмазу в області термодинамічної стабільності.

E-mail: teinidiaga@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 18.10.2019