

References

1. Tanner, B.K., & Phil, M.A. (1996). *X-Ray Diffraction Topography*. Pergamon Press.
2. Umanskii, Y. S. (1967). *Rentgenografiia metallov [Radiography of metals]*. Metallurgiya [in Russian].
3. Amelinks, S. (1968). *Metody pryamoho nabliudeniia dislokatsii [Methods for direct observation of dislocations]*. Mir [in Russian].
4. Kupera, K. E., Zedgenizov, D. A., Ragozin, A.L., et al. (2007). Three-dimensional distribution of minerals in diamondiferous eclogites, obtained by the method of high-resolution X-ray computed tomography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 575, 255–258.
5. Strong, H.M., & Wentorf, R.H. (1972). The grow of large diamond crystals *J. Naturwissenschaften*, 59, 1–7.
6. Vererschagin, L. F., Bakul, V. N., Semerchan, A. A., et al. (1974). *GB Patent 1360281. B01J 3/00. Apparatus for developing high pressures and high temperatures*. (GB Patent 1360281).
7. Frank, F. C., Puttick, K. E., & Wilks, E. M. (1958). Etch Pits and Trigons on Diamond: I. *Philosophical Magazine*, 3, 1262–1272.
8. Frank, F. C., & Lang, A. R. (1959). Observation by X-ray diffraction of dislocations in a diamond. *Philosophical Magazine*, 4(39), 383–384.
9. Grihoriev, O. N., Milman, Yu. V., & Trefilov, V. I. (1978). Osobennosti mekhanizma plasticheskoi deformatsii i parametry termicheski aktiviruemoho dvizheniia dislokatsii v almaze i nitride bora [Features of the mechanism of plastic deformation and parameters of thermally activated movement of dislocations in diamond and boron nitride]. *Elementarnye protsessy plasticheskoi deformatsii kristallov – Elementary processes of plastic deformation of crystals*. (p. 144–159). Naukova dumka [in Russian].
10. Sumiya, H., & Tamasaku, K. (2012). Large Defect-Free Synthetic Type IIa Diamond Crystals Synthesized via High Pressure and High Temperature. *Japanese Journal of Applied Physics*, 51, 090102.

УДК 621.921.34:53.092

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-116-127

В.З. Туркевич, академік НАН України; **О.М. Соколов**, канд. техн. наук;
М.П. Беженар, **О.О. Лещук**, доктори технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, 04074, вул.
Автозаводська, 2, E-mail: ansok1953@gmail.com*

КАЛІБРУВАННЯ РЕАКЦІЙНОЇ КОМІРКИ ШЕСТИПУАНСОННОГО КУБІЧНОГО ПРЕСУ ЗА ТЕМПЕРАТУРОЮ ТА ТИСКОМ

В роботі наведено результати випробування методики одночасного оцінювання температури і тиску в реакційному об'ємі при виготовленні алмазно-твердосплавних пластин з використанням шестипуансонного кубічного пресу китайського виробництва. В основі методики лежить калібрування комірки високого тиску за температурою і тиском на основі результатів, отриманих під час синтезу алмазів з використанням металів-розчинників вуглецю.

Одержані результати будуть корисні при створенні нових технологій одержання НТМ з використанням апаратів високого тиску різних типів.

Ключові слова: калібрування, високий тиск, апарат високого тиску, надтверді матеріали

Вступ

Тиск і температура (p - T) є найважливішими технологічними параметрами, що визначають процес спікання при високих тиску і температурі (НРНТ) алмазного полікристала і всі стадії формування його структури та властивостей. Під час промислового виробництва надтвердих матеріалів (НТМ) загалом і алмазних полікристалів зокрема з використанням апаратів високого тиску (АВТ) різних типів [1–5] необхідно точно регулювати тиск і температуру, щоб отримувати однорідну за якістю продукцію. Тому одним із головних завдань, що вирішуються як у дослідженнях із використанням високих тисків і температур, так і під час розроблення промислових технологій виробництва НТМ, є надійне та досить точне вимірювання тиску й температури.

Зазвичай, під час масового виробництва продукції відтворюваність тиску і температури підтримують за рахунок максимально повного обліку і точного контролю різних технологічних параметрів. Знання абсолютних значень тиску і температури в кожному циклі спікання не передбачається. Вважається, що при виконанні зазначених вище вимог забезпечується однаковість баротермічних умов, встановлених під час розроблення технології, в кожному циклі спікання і, відповідно, отримання однорідної за якістю продукції.

Під час фундаментальних досліджень процесів спікання в НРНТ умовах, перенесення технологій одержання ВТМ з одного типу апаратів високого тиску на інший, а також під час розроблення нових технологій спікання НТМ знання значень абсолютного тиску та температури є важливими для визначення фазової рівноваги в зоні спікання, розуміння механізму формування структури НТМ та його властивостей, встановлення визначальних чинників, що регулюють ці процеси.

Тиск усередині АВТ різних типів, що застосовуються для синтезу і спікання НТМ, не можна розрахувати так, як це можливо в простих установках типу «поршень-циліндр», вимірюванням зусилля стиснення і діаметра пуансона. Відношення цих зусиль залежить від конфігурації реакційної порожнини матриць, стану робочих поверхонь, матеріалу контейнера, товщини ущільнювальних шарів тощо, і не піддається точному розрахунку.

Крім того, одночасний контроль і калібрування тиску і температури в АВТ, що застосовуються для отримання СТМ, є складним завданням. Зокрема, експериментально встановлено [6], що існує деякий приріст тиску внаслідок термічного розширення матеріалів контейнера під впливом високих температур у процесі синтезу. З іншого боку, мають місце процеси, що призводять до зменшення тиску – об'ємні зміни внаслідок фазових перетворень у матеріалі контейнера та інших матеріалах осередку високого тиску, усадка спресованих матеріалів, безперервне витікання матеріалу контейнера через ущільнення, що деформується. У зв'язку з цим визначення реального тиску в реакційному об'ємі за високих температур завдання експериментально дуже складне. Тому на практиці переважно використовують роздільне визначення тиску та температури. Спочатку виконують градування АВТ у «холодному» стані методами, що базуються на визначенні якого-небудь фізичного явища (різка зміна об'єму, електроопору тощо), а потім калібрують комірку високого тиску в координатах потужність–температура, як правило, за допомогою введеної в її центральну частину термопари [7].

Однак при такому підході треба мати на увазі, що тиск, який визначається при кімнатній температурі, відрізнятиметься від фактичних тисків, що реалізуються в АВТ у процесі синтезу або спікання. Так, завдяки термічному розширенню деталей конструкції АВТ матиме місце збільшення тиску; фазові та структурні зміни в матеріалах у реакційному об'ємі осередку високого тиску, що супроводжуються об'ємними ефектами, можуть призвести як до збільшення тиску, так і до його зниження; витікання матеріалу контейнера в процесі формування ущільнення, що деформується, також призводить до зниження тиску в реакційному об'ємі. Як показує аналіз великого обсягу накопичених експериментальних даних

і оціночних розрахунків, найчастіше результуюче значення тиску вище за отримане за кімнатної температури. Так, наприклад, в [1] встановлено, що в експериментах за високих тисків за умови використання як передавального середовища NaCl при високій температурі тиск підвищується приблизно на 20 %; водночас за умови використання комірок із пірофіліту тиск у них доволі швидко знижується за високих температур і, зрештою, падає нижче за тиск, відкалібрований при кімнатній температурі.

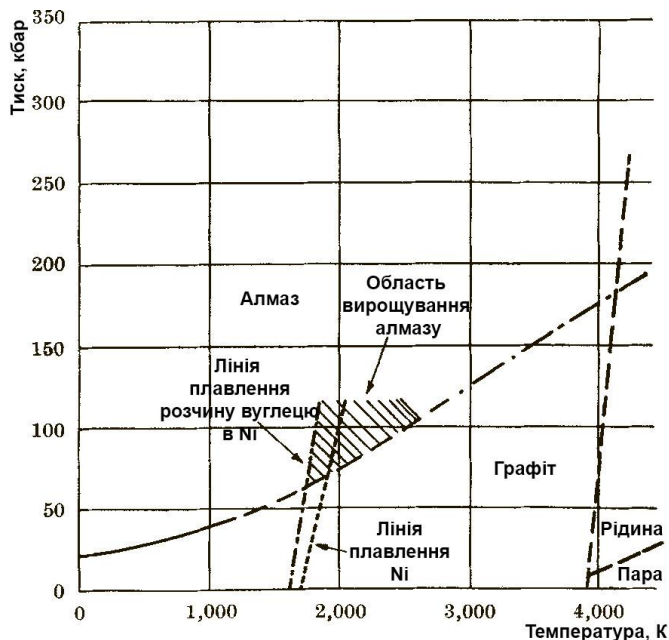


Рис. 1. Область вирощування алмазу [8]

Під час калібрування за температурою також виникають технологічні складнощі. Під час використання термопар особливу увагу приділяють захисту спаю та електродів від впливу агресивних компонентів шихти, їхній електроізоляції, зведенню до мінімуму деформуючого впливу навколишнього середовища на термопару, що призводить до виходу її з ладу. Оскільки виводи термопар проходять від зразка до зони тиску навколишнього середовища через деформуючий ущільнювач, іноді виводи перерізаються через велику напругу зсуву в ущільнювачі.

Добре відомо, що область баротермічних параметрів утворення алмазу обмежується двома виразними лініями (рис. 1), а саме лінією рівноваги

графіт-алмаз і лінією евтектики вуглець-розчинник [8, 9], і, таким чином, мінімальна точка p - T утворення алмазу визначатиметься як перетин двох цих ліній.

Базуючись на вище згаданому факті, О. Fukunaga з колегами запропонували методику одночасного оцінювання температури та тиску під час вирощування крупних монокристалів алмазу в апараті високого тиску типу «Белт» [10, 11].

В основі методики лежить калібрування комірки високого тиску за температурою і тиском на основі результатів, отриманих під час синтезу алмазів з використанням металів-розчинників вуглецю (рис. 2). Автори пропонують використовувати баротермічні значення, що ґрунтуються на мінімальних точках p - T

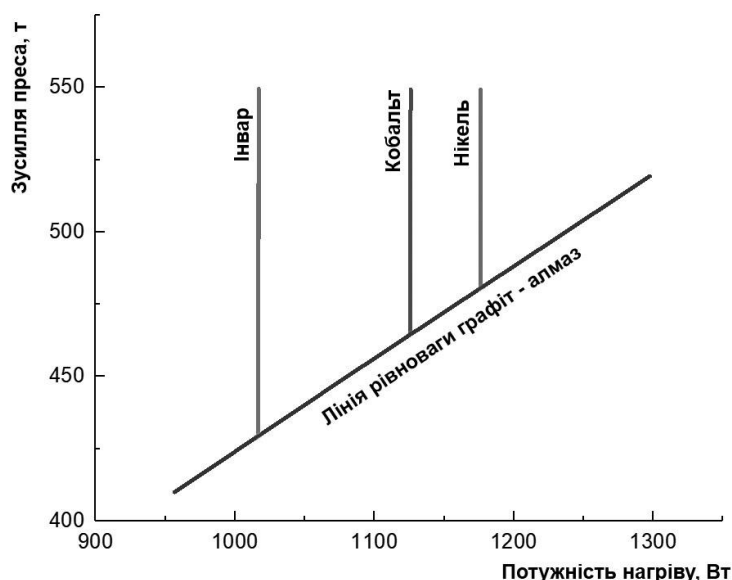


Рис. 2. Схематичне зображення перетину ліній плавлення евтектичних розчинів вуглецю в інварі, кобальті і нікелі з лінією рівноваги графіт-алмаз [11]

утворення алмазу в системах розчинників Ni, Co і invar, як еталони значень тиску і температури.

Евтектичні лінії рівноваги Co-C та інвар-C були визначені відповідно Н.М. Strong, R.E. Tuft [12] та Н.Р. Vovenkerk [9]. Екстрапольовані евтектичні лінії перетинають лінію рівноваги графіт-алмаз за 5,23 ГПа та 1316°C для Co-C; 4,84 ГПа та 1160°C для інвар-C. Евтектична лінія рівноваги Ni-C була визначена Н.М. Strong [13]. Згідно з отриманими в цій роботі даними, екстрапольована евтектична лінія перетинається за 5,42 ГПа і 1384°C з лінією рівноваги графіт-алмаз.

О. Fukunaga з колегами експериментально довели, що одержані згідно запропонованої методики тиск і температура добре узгоджуються з раніше одержаними експериментальними результатами.

Мета даної роботи – випробування згаданої методики одночасного оцінювання температури і тиску в реакційному об'ємі при виготовленні алмазно-твердосплавних пластин (АТП).

Обладнання та методика експерименту

При проведенні експериментів використовували шестипуансонний кубічний прес китайського виробництва (China cubic press – CCP), оскільки за останні роки цей тип пресів з діаметром плунжера 560–950 мм набув великої популярності як при виконанні наукових досліджень з розробки технологій синтезу порошків та вирощування монокристалів алмазу, спікання полікристалічних НТМ, так і при виробництві цих матеріалів в промислових масштабах. Схему навантаження комірки високого тиску в такому пресі наведено на рис. 3.

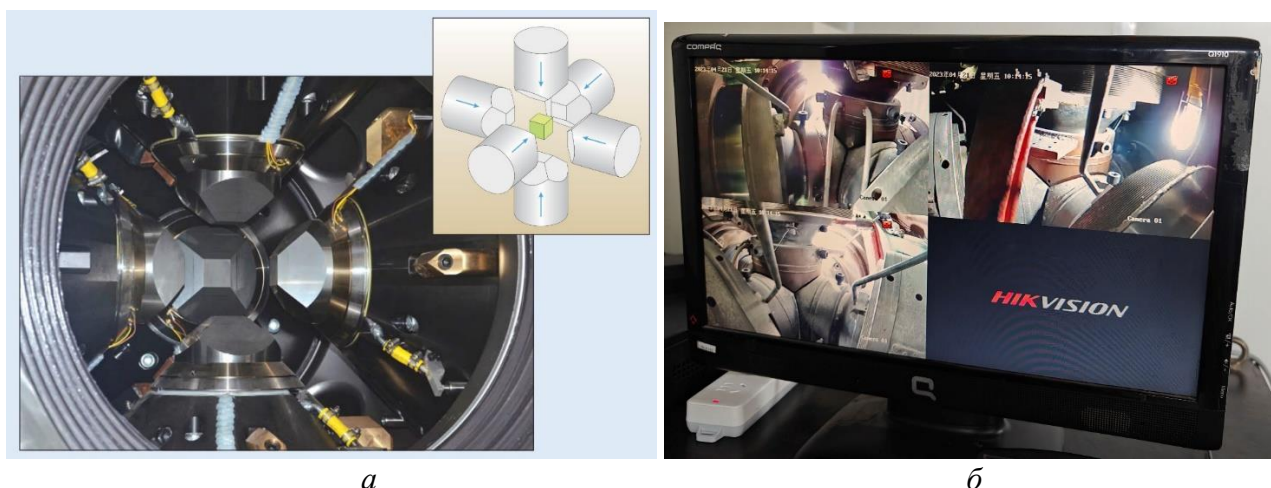


Рис. 3. Схема навантаження комірки високого тиску в шестипуансонному пресі високого тиску CCP [14] (а) та комп'ютерне керування рухом пуансонів (б)

Центр преса, керованого комп'ютером, оточений шістьма ковадлами (п'ять з яких показано), кожне з яких здатне прикладати понад 55 МН. Заготовка (зелена, вставка) розміщується в центрі преса, після чого ковадла одночасно притискаються до неї. Реакційний об'єм може складати $\sim 200 \text{ см}^3$. Такий великий об'єм дозволяє розміщувати в ньому до шести заготовок для спікання АТП.

Спікання АТП проводили згідно запропонованого в [15] способу. Принципову схему збирання комірки високого тиску було взято з роботи [16] (рис. 4).

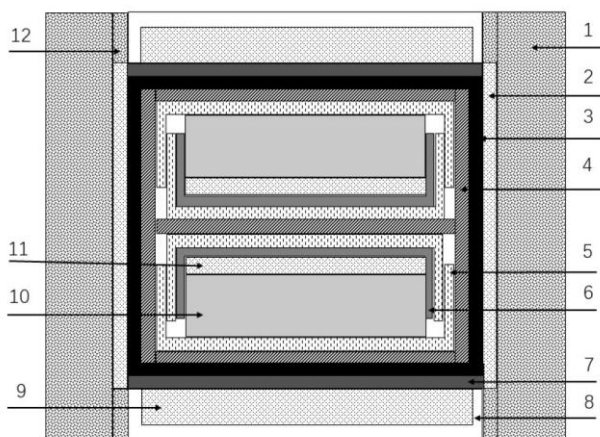


Рис. 4. Схема збірки комірки, що використовувалася в експериментах з НТНР: 1 – пірофіліт; 2 – доломітова трубка; 3 – графітовий диск; 4 – трубка з NaCl; 5 – молібденовий стаканчик; 6 – цирконієвий стаканчик; 7 – титановий диск; 8 – струмопровідне сталеве кільце; 9 – доломітовий диск; 10 – твердосплавна підкладка; 11 – алмазний порошок; 12 – пірофілітове кільце [16]

суміші порошків NaCl плюс 10 мас.% стабілізованого діоксиду цирконію (рис. 5).

Споряджену комірку для синтезу розміщували в одному із центральних модулів (заготовки АТП) в молібденовому стаканчику замість алмазного порошку і твердосплавної пластини.

Підготовленими в такий спосіб коміркою для синтезу і заготовками АТП споряджали пірофілітовий контейнер і проводили цикл синтезу (і, відповідно, цикл спікання) за різних значень електричної потужності (W , кВт) і тиску в гідросистемі преса (p , МПа) з метою визначення мінімальних термобаричних умов утворення алмазу в системах графіт–розчинник.

Час синтезу становив 15-20 хв.



Рис. 6. Зовнішній вигляд продукту синтезу

Як вже вище відзначалося, мінімальна точка p - T

утворення алмазу визначатиметься як перетин лінії рівноваги графіт–алмаз і лінії евтектики вуглець–розчинник (рис. 2).

Після зняття температури і тиску продукт синтезу (рис. б) аналізували за допомогою оптичної мікроскопії з метою підтвердження утворення алмазу.

Як правило, утворений алмаз можна було чітко ідентифікувати під оптичним мікроскопом. У випадку, коли синтез ішов не за оптимальних параметрів і не було впевненості в утворенні алмазу, спершу проводили експрес-аналіз на абразивну здатність продукту

В залежності від реакційного об'єму комірки в ній можна розмістити до шести заготовок АТП.

Експерименти з оцінювання температури і тиску в реакційному об'ємі комірки високого тиску проводили наступним чином.

Були виготовлені комірки для синтезу алмазу в системі графіт – метал-розчинник вуглецю, для чого були спресовані диски із суміші порошків NaCl та 10 мас.% стабілізованого діоксиду цирконію. У диску по центру було вирізано наскрізний циліндричний отвір діаметром 15 мм. В цьому отворі розміщували диск із тієї ж суміші висотою 1 мм. Далі шарами, що чергуються, розміщували диски, спресовані з тигельного графіту і металу-розчинника вуглецю (кобальт, нікель, інвар складу Fe74-Ni36), і закривали зверху другим диском із

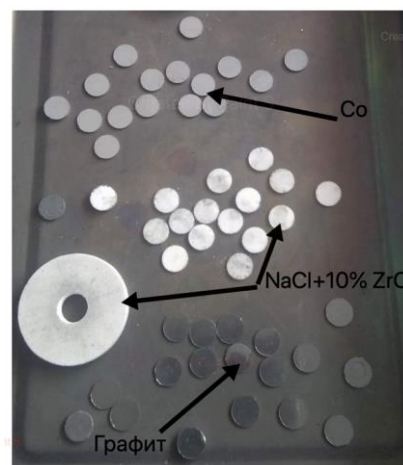


Рис. 5. Деталі спорядження комірки високого тиску для синтезу алмазу в системі графіт – метал-розчинник вуглецю

синтезу методом склерометрії по склу. Як відомо [17], склерометрія – це метод, що дає змогу швидко та наочно характеризувати мікро- або нанотвердість різних структурних складових, виявляти зміцнення біля границь кристалів, вивчати анізотропію кристалів.

Факт успішного синтезу алмазу підтверджували також за допомогою рентгенофазового аналізу.

Таким чином, провівши експерименти з визначення мінімальних баротермічних параметрів алмазоутворення в трьох системах з використанням металів-розчинників вуглецю, можна отримати абсолютні значення тиску і температури в зоні спікання АТП.

Результати експериментів та їх обговорення

Досягнення мінімальних баротермічних параметрів синтезу визначали за кількістю і морфологією синтезованих кристалів алмазу. За мінімальних параметрів утворюються окремі, досить великі кристали кубічного або кубооктаедричного габітусу.

На рис. 7 показано зовнішній вигляд продукту синтезу при мінімальних баротермічних параметрів алмазоутворення в вивчених нами системах, а на рис. 8 – результати рентгенофазового аналізу.

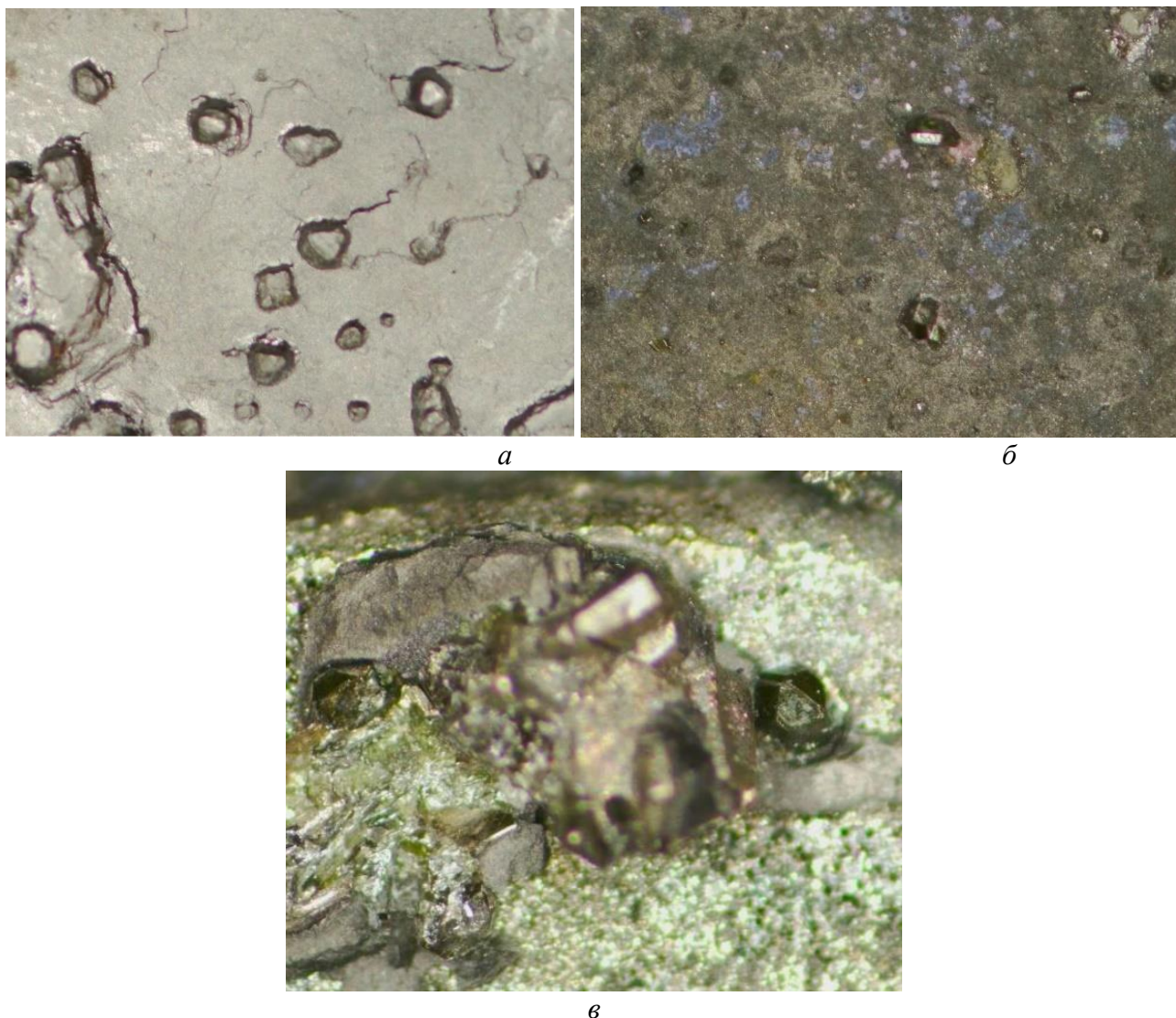
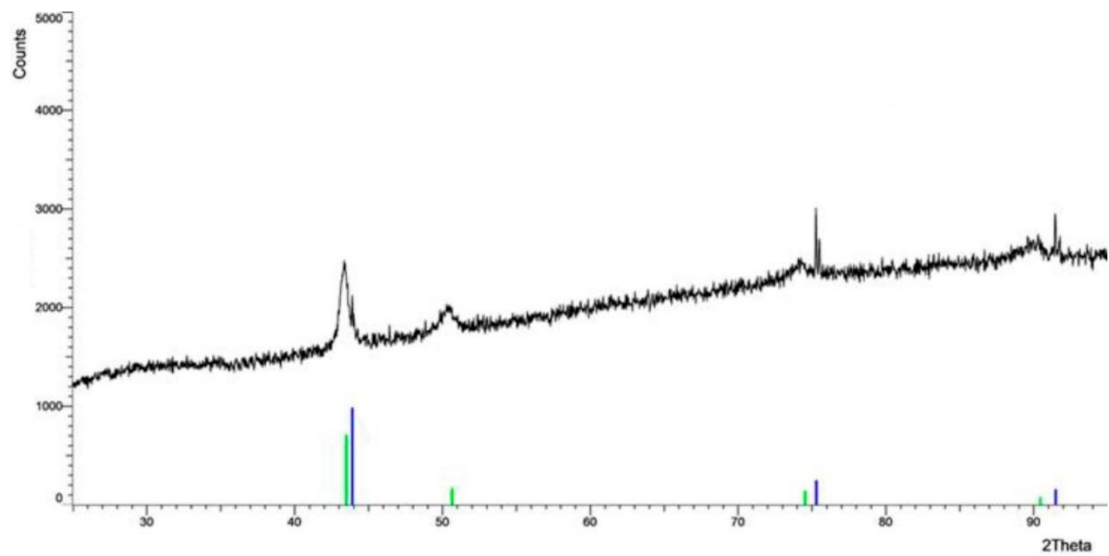
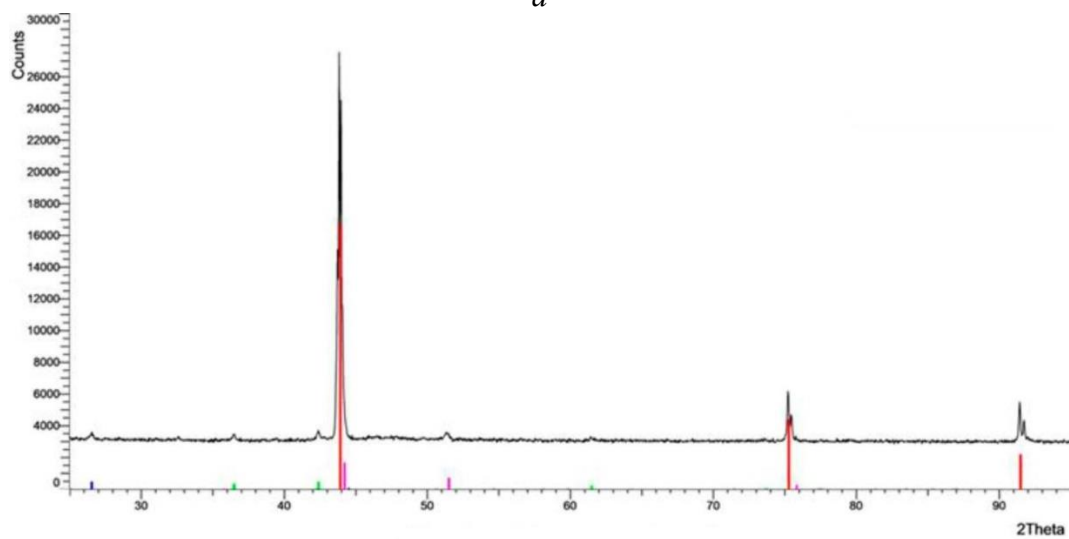


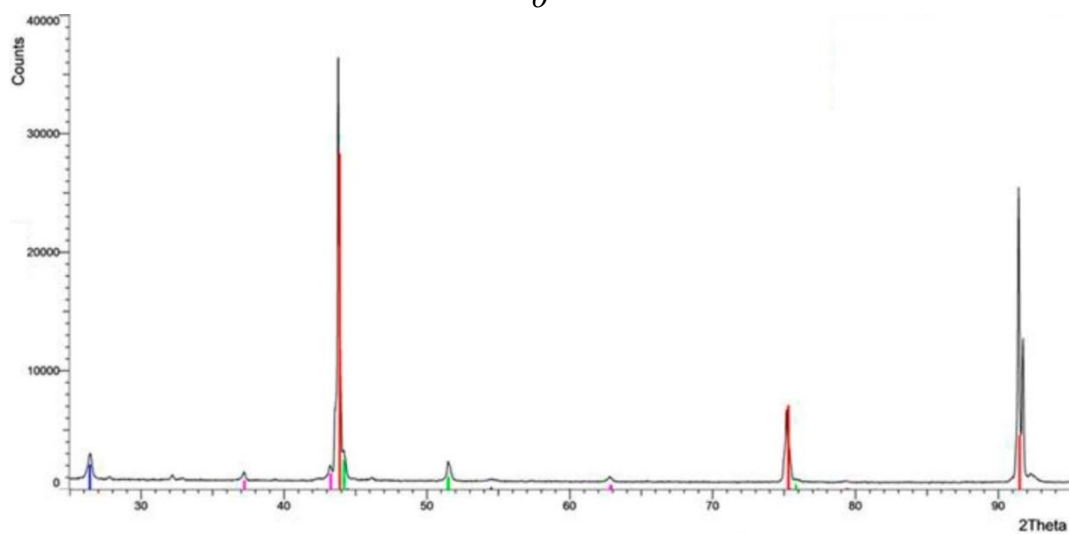
Рис. 7. Зовнішній вигляд ділянки продукту синтезу, отриманий з використанням як розчинника вуглецю інвару (а), кобальту (б), нікелю (в)



a



б



в

Рис. 8. Рентгенівські спектри продукту синтезу, отриманого з розчинниками вуглецю: *a* – інвару; *б* – кобальту; *в* – нікелю

В таблиці наведено технологічні параметри синтезу, які відповідають мінімальним p - T параметрам алмазоутворення в досліджуваних системах.

Мінімальні технологічні параметри алмазоутворення в досліджуваних системах

Розчинник вуглецю	Технологічні параметри синтезу		Мінімальні p - T параметри алмазоутворення	
	тиск у гідросистемі пресової установки, МПа	електрична потужність нагріву, кВт	p , ГПа	T , °C
Інвар	70	11	4,84 [9]	1160 [9]
Со	80	11,5	5,23 [12]	1316 [12]
Ni	85	12	5,42 [13]	1384 [13]

Проведені експерименти з визначення мінімальних умов утворення алмазів у ростових середовищах, які містять метали та сплав-розчинник вуглецю, є достатніми для побудови градувальних графіків для одночасного визначення абсолютного (реального) тиску та температури в АВД.

На рис. 9 і 10 представлено градувальні графіки, що дають змогу визначати абсолютні значення температури та тиску в АВТ залежно від технологічних параметрів обладнання високого тиску (тиску в гідросистемі та електричної потужності, яка підводиться) під час реалізації розглянутої вище технологічної схеми спікання АТП.

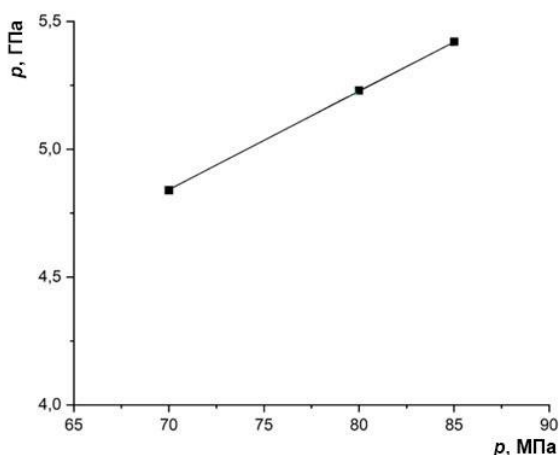


Рис. 9. Калібрувальний графік тиску в АВТ під час спікання АТП залежно від тиску в гідросистемі преса

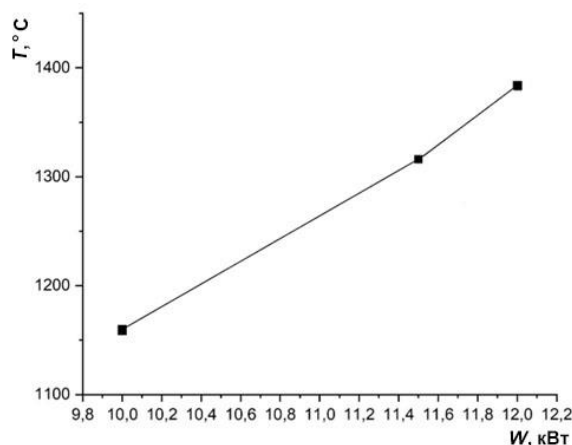


Рис. 10. Калібрувальний графік температури в АВТ під час спікання АТП залежно від електричної потужності, що підводиться

Поряд з наведеними вище дослідженнями був проведений експеримент з визначення тиску АВТ за фазовими перетвореннями вісмуту VI_{I-II} та VI_{II-III} . Відмінність цього експерименту від стандартної методики полягала в тому, що його не можна було проводити за кімнатної температури, оскільки технологічна температура пуансонів шестипуансонного кубічного преса має становити 100 °C.

Відомо [18], що за температури 25 °C фазові перетворення VI_{I-II} і VI_{II-III} фіксуються за тиску 2,52 і 2,69 ГПа відповідно. При підвищенні температури тиски фазових перетворень зсуваються в бік зменшення і при 192 °C становлять відповідно 1,65 і 1,96 ГПа.

Враховуючи, що температура твердосплавних пуансонів підтримується на рівні 100 °C, елементи збірки комірки високого тиску перед дослідом становить 140 °C, і крім того, під час

дослідження через вісмутівий датчик проходить струм від 20 до 34 А, що призводить до додаткового виділення тепла в теплоізолюваному дроті вісмуту, можна стверджувати, що в нашому експерименті температура при визначенні фазового переходу у вісмуті буде складати щонайменше 140 °С. Тоді тиск перетворення $Ві_{II-II}$ становитиме 1,92 ГПа, а $Ві_{II-III}$ – 2,19 ГПа.

Цю особливість враховували під час експерименту по калібруванню за вісмутом.

На рис. 11 наведено значення електроопору в системі під час зміни тиску в циліндрі преса від 10 до 60 МПа і постійної потужності струму нагрівання. На значущу зміну електроопору системи нагріву преса з датчиком вісмуту вплинула зміна питомого електроопору вісмуту під час фазових перетворень (зменшення у 2,7 рази за фазового перетворення $Ві_{II-II}$ і його збільшення на 40 % за фазового перетворення $Ві_{II-III}$).

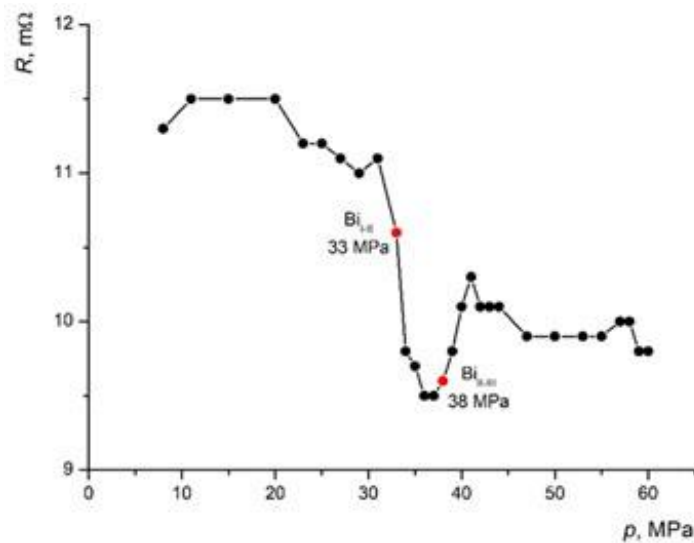


Рис. 11. Залежність електроопору системи нагріву преса з датчиком вісмуту від тиску масла в циліндрі преса

На рис. 12 наведено зведений графік калібрування за тиском, отриманий за двома методиками.

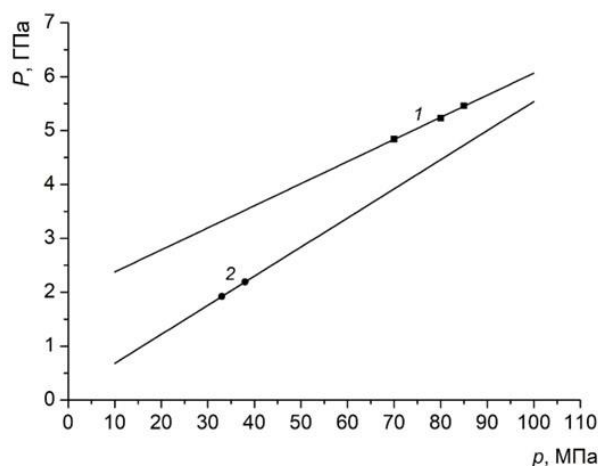


Рис. 12. Залежність тиску в робочому об'ємі апарата високого тиску від тиску оливи в циліндрі преса для схеми збирання, що застосовується для одержання АТП: 1 – калібрування комірки високого тиску за температурою та тиском на основі результатів, отриманих під час синтезу алмазів із використанням металів-розчинників вуглецю; 2 – калібрування за тиском із використанням вісмуту як реперного металу

Як впливає з одержаних даних, значення тиску в комірці високого тиску, визначені при калібруванні за тиском з використанням вісмуту як реперного металу, нижчі, ніж у випадку калібрування за температурою та тиском на основі результатів синтезу алмазів із використанням металів-розчинників вуглецю. Такий результат відповідає багаточисельним експериментальним даним, які вказують на важливу роль передавального середовища, в якому відбувається спікання/синтез НТМ, на створення і підтримання необхідного тиску на протязі технологічного циклу. В багатьох випадках при високих температурах тиск в реакційному об'ємі вище тиску, відкаліброваного при кімнатній температурі [6]. Цей ефект, зокрема, ми спостерігаємо в наших експериментах по спіканню АТП.

Висновок

Проведені експерименти з визначення мінімальних умов утворення алмазів у ростових середовищах, які містять метали та сплав-розчинник вуглецю (Ni, Co, invar), дали змогу побудувати грабуювальні графіки, що визначають абсолютні значення температури та тиску в АВТ при спіканні АТП з використанням шестипуансонного кубічного пресу китайського виробництва залежно від технологічних параметрів обладнання високого тиску.

Одержані результати будуть корисні при створенні нових технологій одержання НТМ з використанням апаратів високого тиску (АВТ) різних типів.

V. Turkevych, O. Sokolov, M. Bezhenar, O. Lyeshchuk

V.M. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

CALIBRATION OF THE REACTION CELL OF THE HIGH-PRESSURE APPARATUS BY TEMPERATURE AND PRESSURE

This paper presents the results of testing a methodology for the simultaneous evaluation of temperature and pressure in the reaction volume during the manufacture of diamond carbide plates using a Chinese six-punch cubic press. The methodology is based on the calibration of a high pressure cell in terms of temperature and pressure based on the results obtained during the synthesis of diamonds using carbon solvent metals.

The results obtained will be useful in the development of new technologies for the production of SHMs using high pressure apparatus of various types.

Key word: *calibration, high pressure, high pressure apparatus, superhard materials*

Література

1. High temperature high pressure apparatus: pat. 2941248 US: B01J 3/065. № 707432; fill. 06.01.58; publ. 21.06.60.
2. Новиков Н. В., Балабанов П. А., Лысаковский В. В., Шевчук С. Н. Применение аппарата высокого давления «Belt-40» для выращивания монокристаллов алмаза на затравках. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 15. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2012. С. 227–231.
3. Прихна А.И. Аппараты высокого давления в производстве синтетических алмазов (обзор). *Синтетические алмазы*. 2008. № 1. С. 3–22.
4. High pressure press: pat. 2918699 US: B01J 3/067. № 731543; fill. 28.04.58; publ. 29.12.59.
5. Новиков Н. В., Балабанов П. А., Лысаковский В. В., Шевчук С. Н. Многопуансонные аппараты высокого давления с гидростатическим приводом. *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. 191–214.

6. Bundy F.P. Temperature measurement at high pressures. *Accurate Characterization of the High- Pressure Environment* / Ed. E.L. Lloyd. NBS Special Pub. 326, 1971. P. 309–311.
7. Modern very high pressure techniques / Ed. R. H. Wentorf, Jr. London: Butterworths Inc, 1962. 233 p.
8. Bovenkerk H. P., Bundy F. P., Hall H. T., Strong H. M., Wentorf R. H., Jr. Preparation of Diamond. *Nature*. 1959. 184(4693). P. 1094–1098.
9. Bundy F. P., Bovenkerk H. P., Strong H. M., Wentorf, R. H. Diamond-Graphite Equilibrium Line from Growth and Graphitization of Diamond. *The Journal of Chemical Physics*. 1961. Vol. 35, N 2. P. 383–391.
10. Fukunaga, O., Yamaoka, S., Endoh, T., Akaishi, M., Kanda, H. Modification of Belt-Like High-Pressure Apparatus/ *High-Pressure Science and Technology* / Eds. K.D. Timmerhaus, M.S. Barber. Springer, Boston, MA., 1979. P. 846–852. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7470-1_111.
11. Fukunaga O., Ko Y.S., Konoue M., Ohashi N., Tsurumi T. Pressure and temperature control in flat-belt type high pressure apparatus for reproducible diamond synthesis. *Diamond and Related Materials*. 1999. 8. P. 2036–2042.
12. Strong H.M., Tuft R.E. *Technical Rep. No. 74CRD118*, G.E. Corp. R and D, Schenectady NY, July, 1974.
13. Strong H.M. Variation with pressure of the nickel-carbon eutectic. *Acta Metallurgica*. 1964. Vol. 12, N 12. P. 1411–1419.
14. Bruton G., Crockett R., Taylor M., DenBoer D., Lund J., Fleming C., Ford R., Garcia G., White A. PDC bit technology for the 21st century. *Oilfield Review*. 2014. Vol. 26, N 2. P. 48–57.
15. Diamond tools for machining: pat. 3745623 US: B26D 1/00. № 212408; fill. 27.12.71; publ. 17.07.73.
16. Yang X., Deng, F. Synthesis and characterisation of Ø62 mm polycrystalline diamond compact. *Diamond & Related Materials*. 2019. Vol. 100. P. 107594.
17. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
18. Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М.: Наука, 1979. 192 с.

Надійшла 01.09.2023

References

1. Hall H.T. (1960). *US Patent 2941248. IC B01J 3/065. High temperature high pressure apparatus* (US Patent 2941248).
2. Novikov, N.V., Balabanov, P.A., Lysakovskii, V.V., & Shevchuk, S.N. (2012). Primenenie apparata vysokoho davleniia «Belt-40» dlia vyrashchivaniia monokrystallov almaza na zatravkakh [Application of high-pressure apparatus "Belt-40" for growing single crystals of diamond on inoculums]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologii ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications* (15nd Issue, p. 227–231). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
3. Prikhna, A.I. (2008). Apparaty visokoho davleniia v proizvodstve sinteticheskikh almazov (obzor) [High-pressure apparatuses in synthetic diamond production (review)]. *Sinteticheskie almazы – Synthetic diamonds, 1*, 3–22 [in Russian].
4. Hall H. T. (1959). *US Patent 2918699. IC B01J 3/067. High pressure press* (US Patent 2918699).
5. Novikov, N.V., Balabanov, P.A., Lysakovskii, V.V., & Shevchuk, S.N. (2014). Mnohopuansonnnye apparaty vysokoho davleniia s hidrostatcheskim privodom

- [Hydrostatically driven multi-punch high-pressure apparatuses]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications* (17nd Issue, p. 191–214). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
6. Bundy F.P. (1971). Temperature measurement at high pressures. E.L. Lloyd (Ed.), *Accurate Characterization of the High- Pressure Environment* (309–311). NBS Special Pub. 326.
 7. Wentorf, R.H., Jr. (Ed.). (1962). *Modern very high pressure techniques*. Butterworths Inc.
 8. Bovenkerk, H. P., Bundy, F. P., Hall, H. T., Strong, H. M., et al. (1959). Preparation of Diamond. *Nature*, 184(4693), 1094–1098.
 9. Bundy, F. P., Bovenkerk, H. P., Strong, H. M., & Wentorf, R. H. (1961). Diamond-Graphite Equilibrium Line from Growth and Graphitization of Diamond. *The Journal of Chemical Physics*, 35(2), 383–391.
 10. Fukunaga O., Yamaoka S., Endoh T., Akaishi M., Kanda H. (1979). Modification of Belt-Like High-Pressure Apparatus. Timmerhaus, K.D., Barber, M.S. (Eds.), *High-Pressure Science and Technology* (p. 846–852). Springer.
 11. Fukunaga O., Ko Y.S., Konoue M., et al. (1999). Pressure and temperature control in flat-belt type high pressure apparatus for reproducible diamond synthesis. *Diamond and Related Materials*, 8, 2036–2042.
 12. Strong, H.M., Tuft, R.E. (1974). Technical Rep. No. 74CRD118, G.E. Corp. R and D, Schenectady NY.
 13. Strong, H.M. (1964). Variation with pressure of the nickel-carbon eutectic. *Acta Metallurgica*, 12(12), 1411–1419.
 14. Bruton, G., Crockett, R., Taylor, M., et al. (2014). PDC bit technology for the 21st century. *Oilfield Review*, 26(2), 48–57.
 15. Wentorf R.H., Jr., Rocco W.A. (1973). *US Patent 3745623. B26D 1/00. Diamond tools for machining* (US Patent 3745623).
 16. Yang, X. & Deng, F. (2019). Synthesis and characterisation of Ø62 mm polycrystalline diamond compact. *Diamond & Related Materials*, 100, 107594.
 17. Hrihorovich, V. K. (1976). *Tverdost i mikrotverdost metallov [Hardness and microhardness of metals]*. Nauka [in Russian].
 18. Tonkov, E.Yu. (1979). *Fazovye diaqrammy elementov pri vysokom davlenii [Phase diagrams of elements at high pressure]*. Nauka [in Russian].

УДК 621.762.5, 004.94

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-127-132

М. Беженар, д-р техн. наук; **А. Пацик** аспір.;
Я. Романенко, **О. Соколов**, кандидати технічних наук; **О. Лещук**, д-р техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,
04074, м. Київ, e-mail: bezhenar@ukr.net, pacik.andr@gmail.com, jarlo1@ukr.net,
kybor@ism.kiev.ua, leshchuk@ism.kiev.ua*

КУБІЧНИЙ АПАРАТ ВИСОКОГО ТИСКУ І ЙОГО МОЖЛИВОСТІ ЩОДО ГЕНЕРАЦІЇ ТИСКУ

Двома способами виконано розрахунок тиску при кімнатній температурі в кубічному апараті високого тиску зі стороною квадрату робочого пуансону 71 мм при навантаженні пресу 331,8 МН. Перший спосіб – визначення тиску як відношення сили, що діє по нормалі на площу куба і