

- [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*

деформованого ущільнення, другий спосіб – через моделювання стиснення пірофілітового куба з врахуванням залежності коефіцієнта об'ємного стиску від тиску. Одержано близькі значення – 4,69 ГПа для першого і 4,35 ГПа для другого способу розрахунків.

**Ключові слова:** тиск, моделювання, кубічний апарат високого тиску, пуансон, стиснення, коефіцієнт об'ємного стиску

В світі щорічно випускаються десятки млрд. карат порошоків надтвердих матеріалів (алмазу і кубічного нітриду бору) і похідних матеріалів з них (полікристалів, композитів), при

цьому більша частина таких матеріалів випускається китайськими підприємствами (близько 20 млрд. карат в рік). Для випуску такої продукції в Китаї використовують шестипуансонні пресові установки і кубічні апарати високого тиску (АВТ). Для генерації в робочому об'ємі АВТ тисків більше 2 ГПа використовуються тверді матеріали з низьким коефіцієнтом внутрішнього тертя, найбільш поширеним серед яких є пірофіліт. В даній роботі проведено розрахунки тиску в робочому об'ємі шестипуансонного пресу китайського виробництва ZR 800.

Основний принцип роботи АВТ з твердофазовим середовищем передачі тиску є утворення прокладки стиснення без витікання (деформованого ущільнення), яка закупорює робочий об'єм (контейнер) за рахунок сил поверхневого тертя. На рис. 1 приведені креслення твердосплавного пуансона пресу ZR 800.

Основні характеристики шестипуансонного пресу ZR 800 наступні: діаметр робочого циліндра – 800 мм; максимальний тиск масла в циліндрі – 110 МПа. Зусилля одного пуансона при тиску масла в циліндрі 110

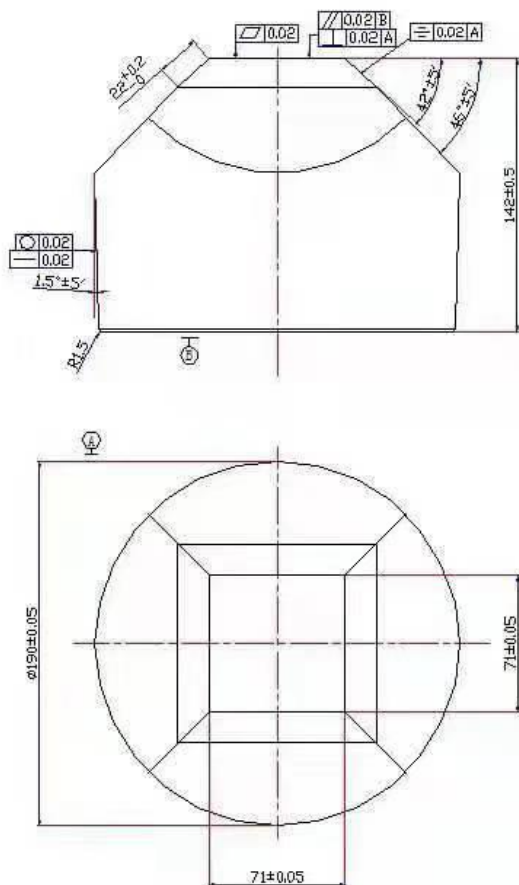


Рис. 1. Вид збоку і зверху твердосплавного пуансона шестипуансонного пресу китайського виробництва ZR 800 [1]

МПа:

$$F = p \cdot S = p \cdot \pi d^2 / 4 = (110 \cdot \pi \cdot 800^2 / 4) \cdot 10^6 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^2 = 55300000 \text{ Н} = 55,3 \text{ МН}$$

Шість пуансонів кубічного пресу генерують максимальне сумарне зусилля на комірку високого тиску  $55,3 \cdot 6 = 331,8 \text{ МН}$ .

Головні розміри, необхідні нам для подальших розрахунків, наступні: сторона квадрату площадки пуансона, через яку передається зусилля на комірку високого тиску – 71 мм, кут між площадкою і боковою поверхнею пуансона  $42^\circ$  ( $138^\circ$ ), висота рівнобедреної трапеції – прокладки стиснення без витікання (деформівного ущільнення ДУ) – 22 мм. **Тиск – сила, що діє по нормалі на одиницю площі.** Комірка високого тиску після спікання – куб, довжина ребра  $L$ , площа поверхні куба  $S_1 = 6 \cdot L^2$ .

Прокладка стиснення без витікання (ДУ) – це зрізана піраміда з прямокутними основами. На рис. 2 приведено схематичне зображення фрагмента деформованого ущільнення; всього таких фрагментів 12, як і ребер куба.

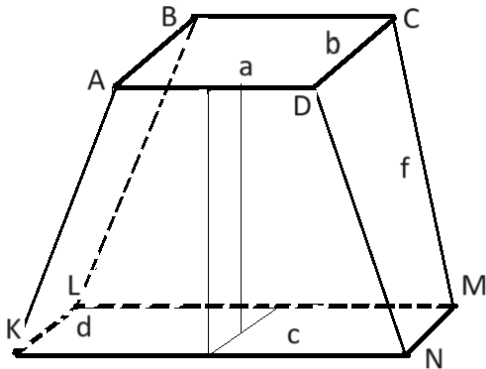


Рис. 2. Схематичне зображення фрагмента деформованого ущільнення (прокладки стиснення без витікання)

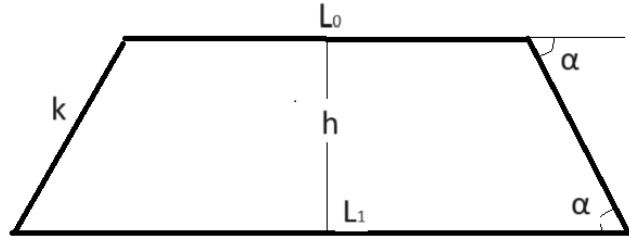


Рис. 3. Поверхня елемента деформованого ущільнення

Поверхня ДУ – 24 рівнобедрені трапеції з верхньою основою  $L$ , висотою  $h = 22$  мкм, кутом при нижній основі  $\alpha = 42^\circ$  (рис. 3). Площа однієї такої трапеції  $S_{ДУ} = (L + h * ctg\alpha) * h$ , а вся площа  $S_2 = 24 S_{ДУ}$ .

Для створення ізостатичного тиску  $p_1$  в робочому об'ємі на поверхню куба має діяти сила  $F_1 = p_1 \cdot S_1 = 6 p_1 \cdot L_2$ .

Щоб визначити силу, яка діє на деформоване ущільнення, прийемо наступні припущення тиску в ДУ:  $p = p_1$  при  $h = 0$  і  $p = 0$  при  $h = h_1 = 22$  мм.

Сила  $F_2$  діє під кутом  $90^\circ$  до поверхні деформованого ущільнення і визначається наступним чином:  $F_2 = p_1 \cos(90^\circ - \alpha) \int dS_2 = p_1 \sin\alpha \int dS_2$ .

$$dS_2 = d \{24 h (L + h ctg\alpha)\} = 24(L + 2h ctg\alpha)dh$$

$$F_2 = p_1 \sin\alpha \int_0^{h_1} dS_2 = 24 p_1 \sin\alpha \int_0^{h_1} (L + 2h * ctg\alpha) dh = 24 p_1 \sin\alpha (L h_1 + h_1^2 ctg\alpha)$$

Зв'язок між силою і тиском в робочому об'ємі наступний:

$$F = F_1 + F_2 = 6 p_1 \cdot L^2 + 24 p_1 \sin\alpha \cdot (L h_1 + h_1^2 ctg\alpha) \quad (1)$$

Тиск в робочому об'ємі АВТ

$$p_1 = \frac{F}{6L^2 + 24 \sin\alpha (L h_1 + h_1^2 ctg\alpha)} \quad (2)$$

Для визначення тиску не вистачає значення довжини ребра стисненого куба.

Деформоване ущільнення – це зрізана піраміда. На рис. 2 приведено схематичне зображення зрізаної піраміди (фрагмента деформованого ущільнення; всього таких фрагментів 12, як і ребер куба).

Ребро зрізаної піраміди DC – це товщина ДУ на виході з робочого об'єму АВТ, а ребро MN – це товщина прокладки стиснення (ДУ), де припиняється витікання матеріалу. Візьмемо  $MN = 1,6$  мм (роботи [2–5] і наші експериментальні дані). Кут NDC приблизно рівний  $87^\circ$ , тоді довжина сторони трапеції DC буде рівна:

$$DC = 1,6 + 2 \cdot 22 \cdot tg3^\circ = 3,9 \text{ мм} \quad (3)$$

Сторона стисненого пірофілітового куба буде рівна:

$$L = 71 + 2 \cdot 3,9 \cdot \sin 45^\circ = 76,5 \text{ мм} \quad (4)$$

При підстановці в (2) значень  $L = 76,5$  мм,  $h_1 = 22$  мм,  $\alpha = 42^\circ$ ,  $F = 331,8$  МН, тиск в робочому об'ємі АВТ становить 4,69 ГПа. Зусилля пресу майже порівну розподілене між робочим об'ємом і деформованим ущільненням (49,6 % і 50,4 % відповідно).

Другий підхід для визначення тиску, який генерується в кубічному АВТ – модельний числовий експеримент по стисненню пірофілітового куба.

Для досліджень використовувався пірофілітовий контейнер (куб) з довжиною ребра 86 мм. Пірофіліт – природний мінерал, хімічна формула  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , другий варіант запису  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Рентгенівська густина  $2,81$  г/см<sup>3</sup>, модуль об'ємного стиску при кімнатній температурі  $K$  залежності від тиску  $K = (25 + 5p)$  ГПа [4], КТР лінійний –  $6 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>. Пірофілітовий куб з ребром 86 мм важив 1635 г (визначено експериментально), густина становила  $2,57$  г/см<sup>3</sup>, враховуючи, що рентгенівська густина пірофіліту  $2,81$  г/см<sup>3</sup>, пористість вихідного куба становила 8,7 %.

При навантаженні частина матеріалу куба видавлюється за межі робочого об'єму в ДУ, основна маса стискується в робочому об'ємі і ущільнюється до безпористого стану.

Після зняття навантаження (330 МН) довжина ребра  $L_1$  спресованого пірофілітового куба становила 80 мм (дані експерименту), пористість – 0%, при густині  $2,81$  г/см<sup>3</sup> вага такого куба  $m = \rho L_1^3 = 1439$  г, а маса пірофіліту за межами робочого об'єму (в ДУ і за його межами) – 196 г.

Коефіцієнт об'ємного стиску речовини виражається формулою:

$$\frac{1}{K} = - \frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial p} \quad (5)$$

Визначимо зміну об'єму під дією тиску:

$$\Delta V = - \frac{V_0}{K} \nabla p \quad (6)$$

В нас  $K = (25 + 5p)$ , запишемо рівняння в диференційному вигляді і проінтегруємо по тиску в межах від атмосферного до  $p_0$ , при цьому  $p_0$  може набувати будь-яких значень більше атмосферного тиску.

$$dV = - \frac{V_0}{K} dp = - \frac{V_0}{25+5p} dp \quad (7)$$

$$\frac{V_1}{V_0} = - \int_0^{p_0} \frac{dp}{25+5p} = - \frac{1}{5} \ln(5+p) \left\{ \begin{matrix} p_0 \\ 0 \end{matrix} \right. = - \frac{1}{5} \ln\left(1+\frac{p_0}{5}\right) \quad (8)$$

В таблиці приведені значення зміни об'єму при стисненні і величини ребра стисненого пірофілітового куба від величини  $p_0$ , тобто тиску в робочому об'ємі АВТ.

**Зміна об'єму і довжини ребра пірофілітового куба при стисненні  
від величини тиску в робочому об'ємі АВТ**

| $p_0$ , ГПа | $(V_0 - V_1)/V_0$ | $V_1$ | $L_1$ , мм |
|-------------|-------------------|-------|------------|
| 1           | 0,036             | 0,964 | 79,0       |
| 2           | 0,067             | 0,933 | 78,2       |
| 3           | 0,094             | 0,906 | 77,4       |
| 4           | 0,118             | 0,882 | 76,7       |
| 5           | 0,139             | 0,861 | 76,1       |
| 6           | 0,158             | 0,842 | 75,54      |

Порівняємо одержане вище значення довжини ребра стисненого куба (76,5 мм) з приведеними в табл. 1. При тиску 4 ГПа довжина ребра куба – 76,7 мм, а при 5 ГПа – 76,1 мм. Тиск, при якому за кімнатної температури довжина ребра пірофілітового куба в АВТ з стороною квадрата площадки пуансона 71 мм, становить 4,35 ГПа.

Визначений двома абсолютно різними способами тиск при кімнатній температурі в робочому об'ємі АВТ (4,69 ГПа і 4,35 ГПа) незначно відрізняється (на 7,8 %, що можна вважати непоганим співпаданням).

При одержанні надтвердих матеріалів температура в робочому об'ємі АВТ становить, як правило, 1500 – 1800 К. Термічне розширення деталей комірки високого тиску сприяє підвищенню тиску в робочій області АВТ. Підвищує тиск в робочому об'ємі і наявність високомодульних компонентів серед елементів зборки комірки високого тиску. Тому в окремих випадках шляхом підбору складових комірки високого тиску і при відповідних температурах можна досягти тиску в робочому об'ємі до 6 ГПа і вище.

### Висновки

1. При максимальному зусиллі пресу (330 МН) при кімнатній температурі тиск в робочому об'ємі кубічного АВТ з стороною квадрата робочого пуансону 71 мм може досягати 4,69 ГПа.

2. Зусилля пресу, яке діє на робочий об'єм і на деформоване ущільнення, розподіляється майже порівну, 49,6 % і 50,4 % відповідно.

3. При стисненні пірофілітового контейнера в кубічному апараті високого тиску за кімнатної температури можна досягти тиску 4,35 ГПа.

4. Визначений двома абсолютно різними способами тиск при кімнатній температурі в робочому об'ємі АВТ (4,69 ГПа і 4,35 ГПа) незначно відрізняється (на 7,8 %, що можна вважати непоганим співпаданням).

5. Для досягнення вищих тисків в робочий об'єм АВТ необхідно вводити складові з вищими модулями пружності. Нагрів комірки високого тиску також сприятиме підвищенню тиску завдяки термічному розширенню складових робочого об'єму.

**M. Bezhenar, A. Patsik, Ya. Romanenko, O. Sokolov, O. Lyeshchuk**

*V. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukra[ne*

### CUBIC HIGH-PRESSURE APPARATUS AND ITS CAPABILITIES FOR PRESSURE GENERATION

*Two methods were used to calculate the pressure at room temperature in a cubic high-pressure apparatus with a working punch square side of 71 mm and a press load of 331.8 MN. The first method is to determine the pressure as the ratio of the force acting normally on the area of the cube and the deformed seal, the second method is to model the compression of a pyrophyllite cube taking into account the dependence of the volume compression coefficient on pressure. Close values were obtained: 4.69 GPa for the first and 4.35 GPa for the second calculation method.*

**Key words:** *pressure, modeling, cubic high-pressure apparatus, punch, compression, volume compression ratio*

### Література

1. Liu, X., Chen, J., Tang, J., He, Q., Li, S., Peng, F., Hed D., Zhang L., Fei, Y. A large volume cubic press with a pressure-generating capability up to about 10 GPa. High Pressure Research. 2012. Vol. 32, N 2. P. 239–254.
2. Бакуль В. Н., Герасимович А. В., Ивахненко С. А. Зависимость напряжений сдвига литографского камня и пирофиллита от давления. *Синтетические алмазы*. Научно-

производственный сборник. Вып. 2. Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля, НАН Украины, 1976. – С. 25–30.

3. Герасимович А. В., Кулемза В. В., Крикун В. Н. Исследование материалов деформируемых уплотнений АД. *Сверхтвердые материалы*. 1982. № 4. С. 9–11.
4. Новиков Н. В., Герасимович А. В. Исследование деформируемых уплотнений АД типа наковальни с углублением. *Сверхтвердые материалы*. 1983. № 4. С. 3–7.
5. Синтетические сверхтвердые материалы: в 3 т. Т. 1. / уклад.: редкол. Новиков Н.В. (отв. ред.) и др. Киев: Наук. думка, 1986. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов. 280 с.

Надійшла 12.10.23

## Reference

1. Liu, X., Chen, J., Tang, J., et al. (2012). A large volume cubic press with a pressure-generating capability up to about 10 GPa. *High Pressure Research*, 32(2), 239–254.
2. Bakul V. N., Herasymovych A. V. & Ivakhnenko S. A. (1976). Zavysymost napriazhenyi sdyvha lytohrafskoho kamnia y pyrofylyta ot davleniya [Pressure dependence of shear stresses of lithic stone and pyrophyllite]. *Syntetycheskye almazы – Synthetic diamonds*. Nauchno-proyvodstvennyi sbornyk. (2nd Issue, p. 25–30). ISM im. V. N. Bakulia, NAN Ukraine [in Russian].
3. Herasymovych, A. V., Kulemza, V. B. & Krykun, V. N. (1982). Issledovanye materyalov deformyruemykh uplotneniy AVD [Research of materials of deformable seals of HPM]. *Sverkhtverdye materyaly – Superhard Materials*, (4), 9–11 [in Russian].
4. Novykov, N. V. & Herasymovych, A. V. (1983). Issledovanye deformyruemykh uplotneniy AVD tyra nakovalny s uhlublenyem. [Investigation of deformable seals of anvil-type HPM with a recess]. *Sverkhtverdye materyaly – Superhard Materials*, (4), 3–7 [in Russian].
5. Novykov, N.V. (Ed.). (1986). Syntetycheskye sverkhtverdye materyaly [Synthetic superhard materials]. *Syntezy sverkhtverdykh materyalov [Synthesis of superhard materials]*. (V. 1). Nauk. dumka [in Russian].

УДК 004.94:539.893:539.4

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-132-140

**С. Б. Полотняк**, канд. техн. наук; **О. О. Лещук**, **В. В. Лисаковський**, доктори технічних наук; **С. О. Івахненко**, член-кор. НАНУ

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074 Київ, e-mail: psb@ism.kiev.ua*

## **ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ СКОСУ БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ПУАНСОНА КУБІЧНОГО АПАРАТА ВИСОКОГО ТИСКУ НА МІЦНІСТЬ ПУАНСОНА ТА РІВЕНЬ ДОСЯЖНОГО ТИСКУ**

*Метою роботи є визначення впливу розміру скошеної бічної поверхні пуансонів на рівень згенерованого тиску в шестипуансонному кубічному апараті та граничний стан пуансонів. Проведено комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів процесу стиску пірофілітового контейнера між пуансонами з різною довжиною скошеної бічної поверхні і досліджено граничний стан пуансонів. Встановлено, що розмір скошеної бічної поверхні практично не впливає на розподіл тиску, згенерованого в контейнері. Зменшення довжини скошеної бічної поверхні зумовлює зростання величини еквівалентних напружень на ребрах плоскої ділянки робочої поверхні. У випадку*