

4. Sait kompanii z vyrobnytstva kubichnykh presiv «Gulin guiye machinery Co., Ltd» [Site of company that produce cubic presses «Gulin guiye machinery Co., Ltd»]. *glguiye.en.made-in-china.com*. Retrieved from <https://glguiye.en.made-in-china.com/Product-Catalogs>.
5. Sumiya, H., Harano, K., & Tamasaku, K. (2015). HPHT synthesis and crystalline quality of large high-quality (001) and (111) diamond crystals. *Diamond and Related Materials*, 58, 221–225.
6. Khokhryakov, A. F., Palyanov, Y. N., Kupriyanov, I. N., et. al. (2011). Crystal growth and perfection of large octahedral synthetic diamonds. *Journal of Crystal Growth*, 317, 1, 32–38.
7. Lysakovskiy, V. V. Ivakhnenko, S. O., Kvasnytsya, V. M., et. al. (2020). Features of morphogenesis of diamond single crystals more than 2 carats grown by temperature gradient method. *Journal of Crystal Growth*, 550, 125890.
8. Katrusha, A. N. (2017). Fabrication and properties of ultra-large type IIa colorless synthetic diamonds. Proceedings from Diamond and Carbon Materials'17: 28th International Conference (3–7 September, 2017). (p. INV11). Goteburg, Sweden.
9. Buryakova V. A. (2008). *Inzhenernii analiz v Ansys Workbench [Engineer analysis in Ansys Workbench]*. Samara: Samarskiy gos. tehn. un-t. [in Russian].
10. Verezhahin, L. F., Yakovlev, E. N., Buchnev, L. M. et. al. (1977). Usloviia termodinamicheskoho ravnovesiia almaza s razlichnimi uhlerodnimi materialami [Conditions of thermodynamic equilibrium of diamond with various carbon materials] *Thermal physics of high temperatures*, 2, 316–321. [in Russian].
11. Sosedov V.P. (Eds.). (1975). *Svoistva konstruktivnykh materialov na osnove uhleroda [Properties of constructional materials based on carbon]*. Moskow: Metalurgiya [in Russian].
12. Okhotin V.S. (Eds.). (1984). *Teploprovodnost tverdikh tel [Thermal conductivity of solid states]*. Moskow: Nauka [in Russian].

УДК 004.94:539.893:539.4

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-159-168

С. Б. Полотняк, канд. техн. наук; **О. О. Лещук**, д-р техн. наук;
С. О. Івахненко, чл.-кор. НАН України; **О. О. Заневський**, канд. хім. наук;
О. В. Савіцький, асп.; **С. О. Гордєєв**, мол. наук. спів.

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

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ ПУАНСОНІВ ШЕСТИПУАНСОННОГО КУБІЧНОГО АПАРАТА ВИСОКОГО ТИСКУ НА РІВЕНЬ ДОСЯЖНОГО ТИСКУ ТА ГРАНИЧНИЙ СТАН ПУАНСОНІВ

Метою роботи є визначення впливу фізико-механічних властивостей матеріалу пуансонів на рівень згенерованого тиску в шестипуансонному кубічному апараті та граничний стан пуансонів. Проведено комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів процесу стиснення пірофілітового контейнера між пуансонами із вольфрам-кобальтових твердих сплавів ВК6, NF, НВ02UF та КF308 і досліджено напружено-деформований і граничний стани контейнера і пуансонів в процесі деформування. Рекомендовано використовувати пуанسونи із зарубіжних сплавів марок КF308, НВ02UF та NF, що забезпечують міцність апарата за тиску 5–7 ГПа.

Ключові слова: апарат високого тиску, комп'ютерне моделювання, границя плинності, тиск, напружено-деформований стан.

Вступ. Постановка задачі

В останні роки для вирощування структурно досконалих монокристалів алмазу методом температурного градієнта широко використовують шестипуансонні кубічні апарати високого тиску (АВТ) [1], оснащені пуансонами з подвійно скошеною робочою поверхнею у вигляді двоступінчастих пірамідальних площадок [2–4]. АВТ такого типу здатні створювати в достатньо великих ростових об'ємах (понад 10 см^3) високий квазігідростатичний тиск 6–8 ГПа при температурі до $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ та можуть підтримувати такі параметри протягом тривалого часу. Рівень досяжного в АВТ тиску обумовлений як конструкційними (розмірними) параметрами пуансонів і кубічного контейнера, так і фізико-механічними характеристиками матеріалу пуансонів. Тому при виготовленні найнавантажених елементів АВТ – пуансонів – використовують найміцніші на даний час конструкційні матеріали, а саме високоякісні вольфрам-кобальтові тверді сплави різних марок – ВК6, *НВ02UF*, *КФ308* та ін.

Метою даної роботи є визначення впливу фізико-механічних властивостей матеріалу пуансонів на рівень згенерованого в АВТ тиску та їх граничний стан. Для цього проведено комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів процесів стиснення в шестипуансонному АВТ пірофілітового контейнера між пуансонами із вольфрам-кобальтових твердих сплавів ВК6, *NF*, *НВ02UF* та *КФ308* і досліджено напружено-деформований і граничний стани контейнера і пуансонів в процесі деформування.

В якості об'єкту дослідження розглянуто шестипуансонний АВТ з діаметром плунжерів 560 мм, що використовують при вирощуванні монокристалів алмазу на затравці в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (ІНМ) [5]. Пуансони мають подвійно скошену робочу поверхню у вигляді двоступінчастих пірамідальних площадок з горизонтальною площадкою розмірами $46 \times 46 \text{ мм}$. Пірофілітовий контейнер має форму куба з розміром ребра 58 мм.

Для визначення напружено-деформованого і граничного станів контейнера і пуансонів в процесі деформування використано розроблену в ІНМ методику чисельного моделювання процесу стиснення пірофілітового контейнера між пуансонами шестипуансонного АВТ [6].

У зв'язку із симетрією АВТ та умов його навантаження в якості розрахункової схеми обрано $1/48$ його частину (рис. 1). Очевидно, що таке спрощення дає можливість значного скорочення часу розрахунків.

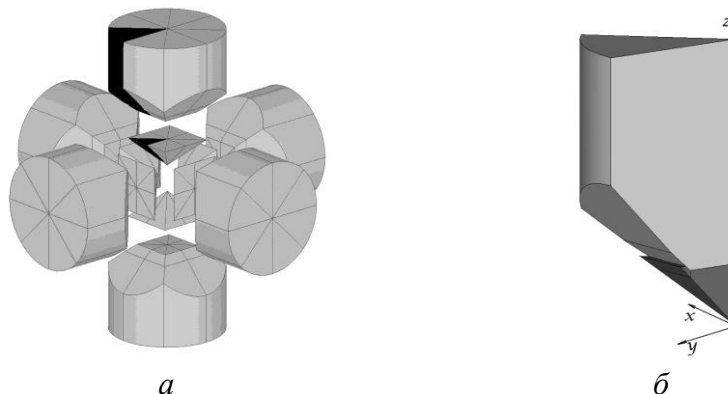


Рис. 1. Розрахункова схема шестипуансонного АВТ, що складається з контейнера та шести стискаючих пуансонів (а), та її $1/48$ частина (б)

Як і в роботі [6], процес навантаження контейнера в шестипуансонному АВТ поділено на два етапи. На першому етапі матеріал контейнера починає витікати в зазори між пуансонами і утворює так звані деформуючі прокладки довжиною 3–4 мм. Величина тиску в контейнері становить $\sim 0,2 \text{ ГПа}$ з практично рівномірним його розподілом. На другому етапі

довжина деформуючих прокладок досягає кінцевих значень у 11–13 мм, ростова комірка герметизується зі створенням робочого тиску $\sim 5,5$ ГПа.

Моделювання процесу стиснення контейнера починали з другого етапу, тобто кінцева стадія першого етапу була прийнята як початкова умова. Таке допущення дозволяє уникнути розбіжності у розв'язку задачі через високу спотвореність геометрії скінченних елементів і складний механізм пластичної течії матеріалу контейнера в кутах кубічних пуансонів на першому етапі стиснення.

Для визначення впливу фізико-механічних характеристик матеріалу пуансона на рівень досяжного в АВТ тиску та граничний стан пуансонів проведено чисельне моделювання процесу стиснення пірофілітового контейнера за умов використання в якості матеріалу пуансона вольфрам-кобальтових твердих сплавів ВК6 (модуль Юнга $E = 645$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,215$, границя плинності за атмосферного тиску $R_{p0,2}^0 = 4,9$ ГПа), NF ($E = 635$ ГПа, $\nu = 0,21$, $R_{p0,2}^0 = 8,11$ ГПа), $HB02UF$ ($E = 670$ ГПа, $\nu = 0,20$, $R_{p0,2}^0 = 6,80$ ГПа) та $KF308$ – «стандартного» для шестипуансонного АВТ ($E = 650$ ГПа, $\nu = 0,3$, $R_{p0,2}^0 = 6,25$ ГПа).

При моделюванні було задано наступні граничні і контактні умови:

- на торцевій поверхні пуансона – осьове переміщення $u_z = -3,0$ мм. (В подальшому в тексті будемо використовувати абсолютне значення u_z .);
- на поверхнях симетрії пуансона, куба та деформуючих прокладок – умова симетрії;
- на плоскій ділянці робочої поверхні контакту пуансона з контейнером – умова контактної взаємодії з коефіцієнтом тертя 0,95 (практично абсолютне зчеплення);
- на поверхнях контакту деформуючої прокладки з пуансоном – умова контактної взаємодії з коефіцієнтом тертя 0,05 (практично абсолютне прослизання).

При проведенні розрахунків застосовували розроблене в ІНМ програмне забезпечення для скінченно-елементного розв'язання контактних термопружнопластичних задач при скінченних деформаціях. Були прийняті вихідні положення, що матеріал пуансонів деформується пружно, пластичне деформування пірофілітового контейнера визначається моделлю лінійно-зміцненого тіла. Значення механічних властивостей пірофіліту і твердого сплаву прийняті з урахуванням їх залежностей від тиску [7–12].

Для оцінки граничного стану твердосплавних пуансонів використано критерії найбільших дотичних напружень

$$\sigma_e^{III} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq R_{p0,2}$$

та питомої потенціальної енергії формозміни

$$\sigma_e^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq R_{p0,2},$$

де σ_e^{III} , σ_e^{IV} – відповідно еквівалентні напруження за третьою і четвертою теоріями міцності; σ_1 , σ_2 , σ_3 – головні напруження.

Напружено-деформований та граничний стан АВТ

Характер розподілу тиску в кубічному контейнері АВТ з довжиною ребра 58 мм при переміщенні пуансонів $u_z = 3,0$ мм показано на рис. 2.

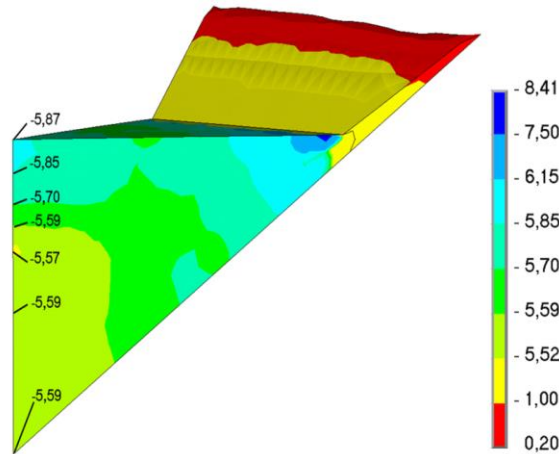


Рис. 2. Розподіл гідростатичного тиску (ГПа) в кубічному контейнері при стисненні його в АВТ

На рис. 3, б наведено зміну тиску в zdeформованому контейнері вздовж напрямку від його центру (рис. 3, а).

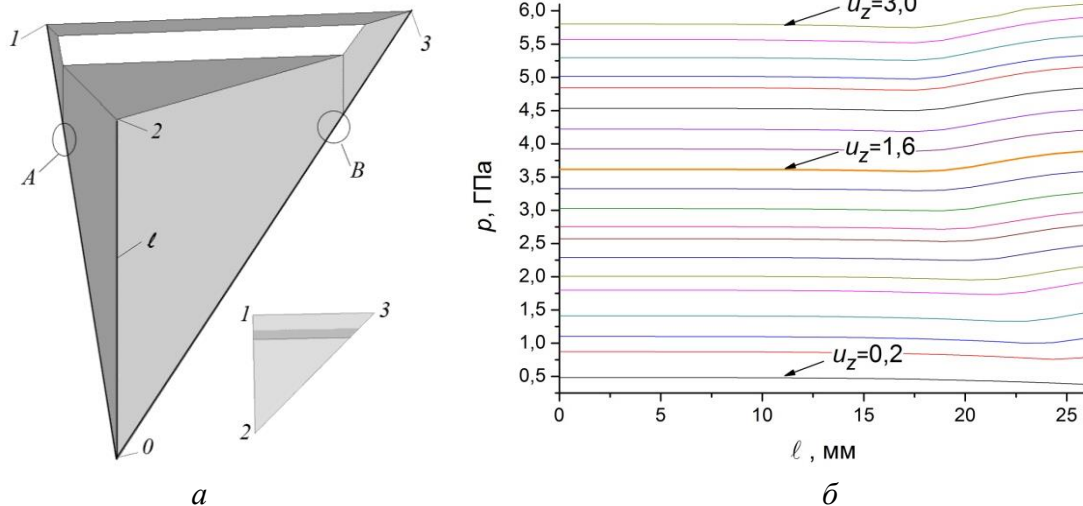


Рис. 3. Схема розрахункової частини zdeформованого контейнера (а) та зміна тиску в ньому вздовж напрямку 0–2 (б) в процесі стиснення

Як видно з рисунків, градієнт тиску на відстані 12–13 мм від центру контейнера практично відсутній ($< 0,001$ ГПа/мм), що пояснюється віддаленістю даної частини матеріалу контейнера від пуансонів – вона не бере участі в утворенні деформуючої прокладки, а лише стискається рівномірно з усіх сторін. В областях сходження пуансонів має місце суттєва концентрація напружень, обумовлена витіканням матеріалу контейнера з утворенням деформуючої прокладки. По мірі навантаження збільшення сили тертя між пуансоном і прокладкою призводить до сповільнення витікання матеріалу контейнера, ростова комірка герметизується і тиск підвищується у всьому об'ємі контейнера. Рівень напружень в прокладці суттєво зростає і забезпечує достатню силову підтримку бокових поверхонь пуансона.

На рис. 4 показано зміну товщини деформуючої прокладки на початку та в кінці зони контакту з бічною поверхнею пуансона в процесі навантаження. По мірі стискання контейнера товщина прокладки зменшується практично лінійно. При досягненні значень товщини прокладки $h_1/2 \sim 1,4$ мм та $h_2/2 \sim 0,6$ мм пуансони починають через дуже тонкий прошарок пірофіліту тиснути один на одного, що призводить до різкого збільшення напружень в цих

областях. При подальшому стисненні контейнера рівень еквівалентних напружень в пуансонах перевищує допустимі значення, в них виникають і починають розвиватися мікротріщини, що в підсумку призводить до їх руйнування.

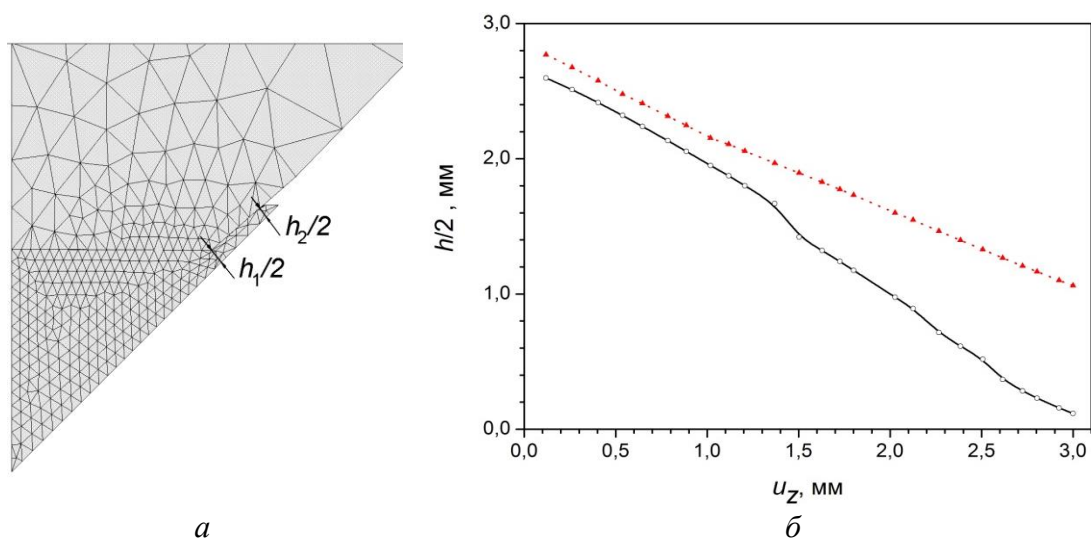


Рис. 4. Схема визначення товщини деформуючої прокладки (а) та її зміна в процесі стиснення контейнера (б) (пунктирна лінія – $h_1/2$, суцільна – $h_2/2$)

На рис. 5 наведено розподіл інтенсивності напружень в пуансоні із сплаву KF308 при стисненні пірофілітового контейнера. Можна виділити три області можливого руйнування пуансона при навантаженні: *I* – на осі симетрії над плоскою ділянкою робочої поверхні, *II* – на ребрі плоскої ділянки, *III* – на бічній поверхні поблизу лінії зміни кута її нахилу.

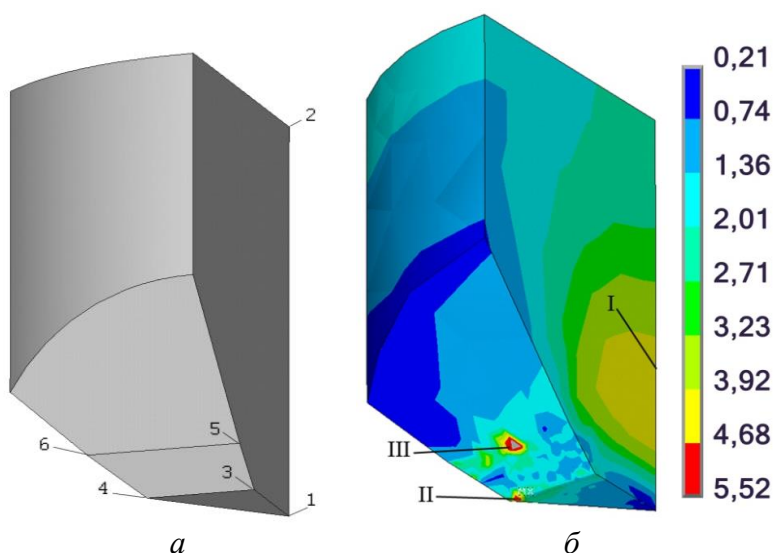


Рис. 5. Схема розрахункової частини пуансона (а) та розподіл інтенсивності напружень (ГПа) в пуансоні із сплаву KF308 при стисненні пірофілітового контейнера (б)

На рис. 6 наведено одержані в результаті моделювання дані зі зміни величини гідростатичного тиску в центрі кубічного контейнера (p_0) та товщини деформуючої прокладки на початку та в кінці зони контакту з бічною поверхнею пуансона в процесі навантаження АВТ з пуансонами із досліджуваних твердих сплавів.

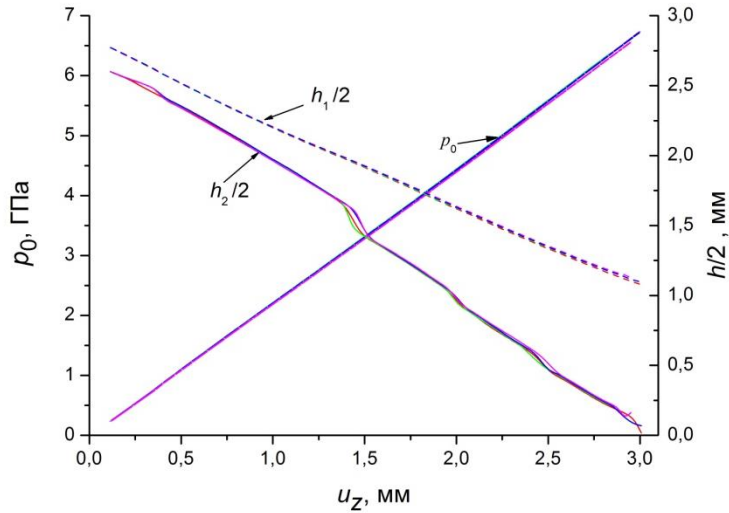
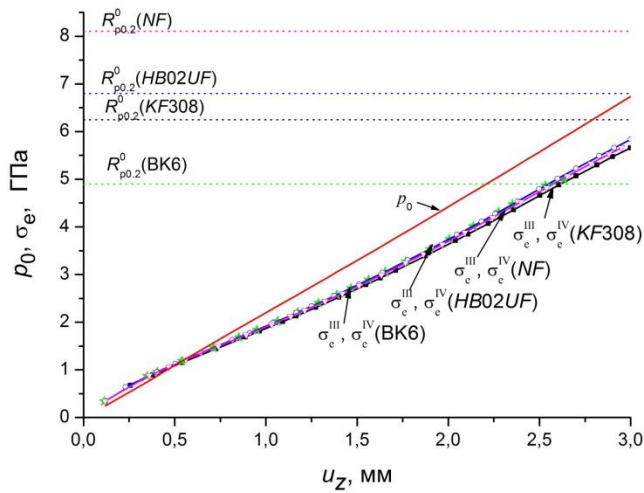


Рис. 6. Зміна гідростатичного тиску в центрі кубічного контейнера p_0 та товщини деформуючої прокладки на початку $h_1/2$ та в кінці $h_2/2$ зони контакту з бічною поверхнею пуансона в процесі навантаження АВТ з пуансонами із твердих сплавів ВК6, NF, HB02UF та KF308

Як видно з наведених даних, характеристики матеріалу пуансону практично не впливають на зміну величини гідростатичного тиску в центрі кубічного контейнера і товщини деформуючої прокладки в процесі навантаження АВТ. Будь яке відхилення даних на графіку лежить в межах похибки розрахунків.

На рис. 7 наведено одержані в результаті моделювання величини зміни гідростатичного тиску в центрі кубічного контейнера, товщини деформуючої прокладки в кінці зони контакту з бічною поверхнею пуансона та еквівалентних напружень в пуансоні із розглянутих твердих сплавів в областях його можливого руйнування в процесі навантаження АВТ.



а

Рис. 7. Зміна гідростатичного тиску в центрі кубічного контейнера p_0 , товщини деформуючої прокладки в кінці зони контакту з бічною поверхнею пуансона $h_2/2$ (в) та еквівалентних напружень σ_e^{III} , σ_e^{IV} в пуансоні із твердих сплавів різних марок в областях його можливого руйнування I (а), II (б) та III (в) (див. рис.5, б) в процесі навантаження АВТ

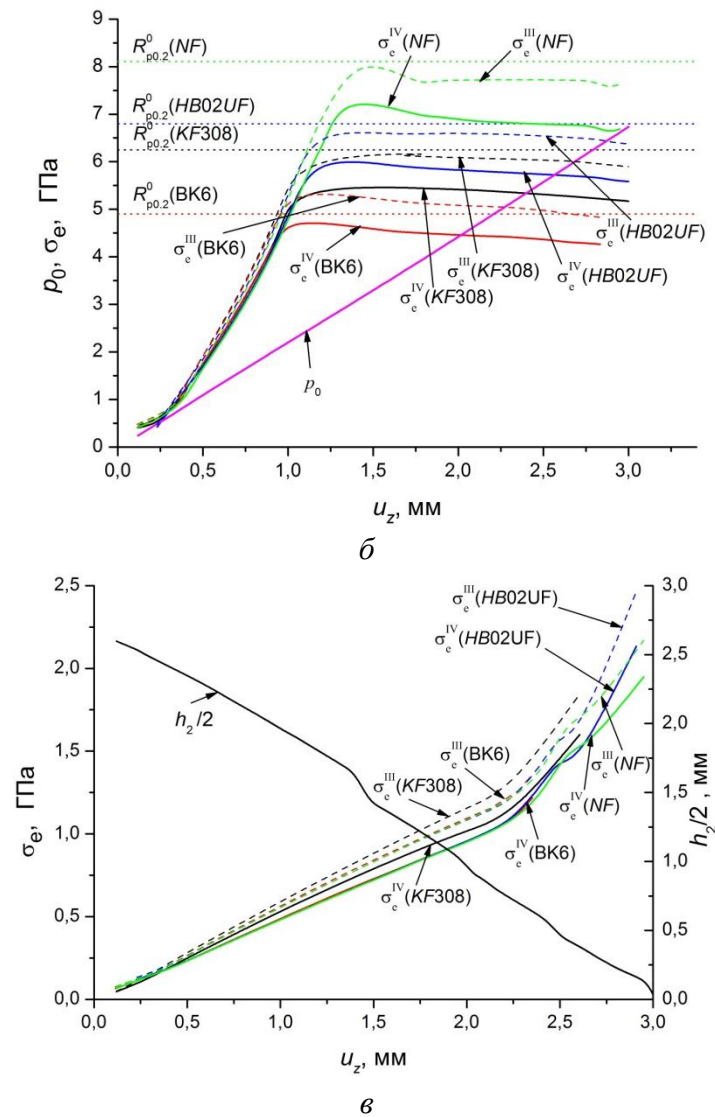


Рис. 7 (закінчення)

Розрахунки підтверджують, що на величину гідростатичного тиску в центрі кубічного контейнера і товщину деформуючої прокладки в кінці зони контакту з бічною поверхнею пуансона фізико-механічні характеристики розглянутих твердих сплавів практично не впливають. Як показано в [6], на ці параметри суттєвий вплив мають розмір і властивості матеріалу пірофілітового контейнера.

В області I можливого руйнування пуансона (рис. 7, а) характеристики його матеріалу мають незначний вплив (1,5–3%) на величину еквівалентних напружень σ_e^{III} і σ_e^{IV} . Беручи до уваги характеристики міцності розглянутих сплавів, можна розрахувати запас міцності, що мають пуансони, виготовлені з різних матеріалів для досягнення робочого для синтезу монокристалів алмазу тиску 5,5 ГПа в центрі кубічного контейнера. Так, сплав ВК6 має запас міцності близько 3%, сплав KF308 – 27%, HB02UF – 31%, NF – 42%. Тобто, використання сплаву ВК6 є недоцільним для отримання тисків понад 4,5 ГПа.

В області II можливого руйнування пуансона (рис. 7, б) характеристики його матеріалу мають вже суттєвий вплив на величину еквівалентних напружень σ_e^{III} і σ_e^{IV} . Так, для сплаву ВК6 рівень максимальних еквівалентних напружень досягає 5,45 ГПа, що перевищує його характеристики міцності. Для сплаву KF308 рівень максимальних еквівалентних напружень на 5–7 % нижчий за його характеристики міцності і, беручи до уваги вплив гідростатичного

тиску на характеристики міцності твердих сплавів із вмістом кобальту 3–8 мас. % [11, 12], запас міцності становитиме 15–17%. Високоякісні тверді сплави *HB02UF* і *NF* мають ще більш значний запас міцності і можуть бути використані в якості матеріалу пуансонів для досягнення робочих тисків, вищих за 5,5 ГПа.

В області III можливого руйнування пуансона (рис. 7, в) величина еквівалентних напружень σ_e^{III} і σ_e^{IV} досягає значень в 1,5–2 ГПа, що суттєво нижче характеристик міцності матеріалу пуансонів. Але при досягненні критичної товщини прокладки $h_2/2 \sim 0,6$ мм пуансони починають через дуже тонкий прошарок пірофіліту тиснути один на одного, що призводить до різкого збільшення напружень в цій області. І при подальшому стисненні контейнера рівень напружень в пуансонах може перевищити допустимі значення, що в підсумку призведе до їх руйнування.

Висновки

Результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану та міцності елементів шестипуансонного АВТ показали:

- марка типу матеріалу тврдосплавних пуансонів практично не впливає на величину згенерованого в пірофілітовому контейнері тиску та товщину сформованих деформуючих прокладок;
- пуансони зі сплаву ВК6 придатні для генерації тиску в контейнері, що не перевищує 4,5 ГПа;
- для генерації вищого тиску рекомендується використовувати пуансони із зарубіжних сплавів марок *KF308*, *HB02UF* та *NF*, що забезпечують міцність АВТ за тиску 5–7 ГПа.

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт № 2020.02/0160 «Розробка нових складів розчинників вуглецю для вирощування монокристалів алмазу в області термодинамічної стабільності з контрольованим вмістом домішок азоту і бору з метою створення концепційних конструкцій електронних приладів».

**S. B. Polotnyak, O. O. Lyeshchuk, S. O. Ivakhnenko,
O. O. Zanevskyi, O. V. Savitskyi, S. O. Hordieiev**

Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE PUNCH MATERIAL OF A SIX-PUNCH HIGH-PRESSURE CUBIC APPARATUS ON THE LEVEL OF ACHIEVABLE PRESSURE AND PUNCH STRENGTH

The aim of the work is to determine the influence of the physico-mechanical properties of the material of the punches on the level of the generated pressure in the six-punch cubic apparatus and the limit state of the punches. Computer modeling using the finite element method of compression of a pyrophyllite container between punches made of tungsten-cobalt hard alloys VK6, NF, HB02UF and KF308 has been carried out, and the stress-strain and limit states of the container and punches in the process of deformation have been investigated. It is recommended to use punches from foreign alloys KF308, HB02UF and NF, which ensure the strength of the apparatus at a pressure of 5–7 GPa.

Key words: *high pressure apparatus, computer modeling, yield strength, pressure, stress-strain state.*

С. Б. Полотняк, А. А. Лещук, С. А. Ивахненко, О. А. Заневский, А. В. Савицкий, С. А. Гордеев

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПУАНСОНОВ ШЕСТИПУАНСОННОГО КУБИЧЕСКОГО
АППАРАТА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА УРОВЕНЬ ДОСТИЖИМОГО ДАВЛЕНИЯ И
ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПУАНСОНОВ**

Целью работы является определение влияния физико-механических свойств материала пуансонов на уровень сгенерированного давления в шестипуансонном кубическом аппарате и предельное состояние пуансонов. Проведено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов процесса сжатия пирофиллитового контейнера между пуансонами из вольфрам-кобальтовых твердых сплавов ВК6, NF, HB02UF и KF308 и исследовано напряженно-деформированное и предельное состояния контейнера и пуансонов в процессе деформирования. Рекомендуется использовать пуансоны из зарубежных сплавов марок KF308, HB02UF и NF, обеспечивающих прочность аппарата при давлении 5–7 ГПа.

Ключевые слова: *аппарат высокого давления, компьютерное моделирование, предел текучести, давление, напряженно-деформированное состояние.*

Література

1. Chien-Min J. Sung. Optimised cell design for high-pressure synthesis of diamond // High Temp. – High Press. – 2001. – V. 33. – P. 489–501.
2. Han Q. G., Yang W. K., Zhu P. W. et al. Design and performance of tapered cubic anvil used for achieving higher pressure and larger sample cell // Rev. Sci. Instrum. – 2013. – V. 84. – P. 073902-1–073902-5.
3. Wang H. K., He D. W. A hybrid pressure cell of pyrophyllite and magnesium oxide to extend the pressure range for large volume cubic presses // High Press. Res. – 2012. – V.32. – P. 186–194.
4. Han Q. G., Jia X. P., Qin J. M. et al. FEM study on a double-beveled anvil and its application to synthetic diamonds // High Press. Res. – 2009. – V. 29. – P. 449–456.
5. Лысаковский В. В., Новиков Н. В., Ивахненко С. А. и др. Выращивание структурно совершенных монокристаллов алмаза при высоких давлениях и температурах. Обзор // Сверхтв. материалы. – 2018. – № 5. – С. 25–37.
6. Бовсунівський О. В., Полотняк С. Б., Лисаковський В. В. та ін. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого і граничного станів пірофілітового контейнера та пуансонів шестипуансонного апарата високого тиску // Сверхтв. материалы. – 2020. – № 2. – С. 12–23.
7. Бакуль В. Н., Герасимович А. В., Ивахненко С. А. Зависимость напряжений сдвига литографского камня и пирофиллита от давления // Синт. алмазы. – 1976. – Вып. 2. – С. 25–30.
8. Edmont J. M., Paterson M. S. Strength of solid pressure media and implications for high pressure apparatus // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1971. – V. 30, N 2. – P. 141–160.
9. Sachse W., Ruoff A. L. Elastic moduli of precompressed pyrophyllite used in ultrahigh pressure research // J. Appl. Phys. – 1975. – V. 46, N 9. – P. 3725–3730.
10. Герасимович А. В., Григорьев Н. М. Сопrotивление сдвигу материалов деформируемых уплотнений твердофазовых аппаратов высокого давления // Сверхтв. материалы. – 1996. – № 1. – С. 36–43.

11. Малиновский И. Ю., Ран Э. Н. Влияние изостатического давления на прочность материалов. Общие закономерности и прочность твердых сплавов // Исследования по экспериментальной минералогии. – Новосибирск, 1978. – С. 117–137.
12. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 328 с.

Надійшла 07.06.21

References

1. Chien-Min, J. Sung. (2001). Optimised cell design for high-pressure synthesis of diamond. *High Temp. – High Press.*, 33, 489–501.
2. Han, Q. G., Yang, W. K., Zhu, P. W., et al. (2013). Design and performance of tapered cubic anvil used for achieving higher pressure and larger sample cell. *Rev. Sci. Instrum.*, 84, 073902-1–073902-5.
3. Wang, H. K., & He, D. W. (2012). A hybrid pressure cell of pyrophyllite and magnesium oxide to extend the pressure range for large volume cubic presses. *High Press. Res.*, 32, 186–194.
4. Han, Q. G., Jia, X. P., Qin, J. M., et al. (2009). FEM study on a double-beveled anvil and its application to synthetic diamonds. *High Press. Res.*, 29, 449–456.
5. Lysakovskiy, V. V., Novikov M. V., Ivakhnenko S. O., et al. (2018). Vyrashchivanie strukturno sovershennykh monokristallov almaza pri vysokikh davleniiah i temperaturakh. Obzor [Growing structurally perfect diamond single crystals at high pressure and temperature. Overview]. *Sverkhtv. Materialy. – Superhard Materials*, 5, 25–37 [in Russian].
6. Bovsunovskiy, O. V., Polotnyak, S. B., Lusakovskyi, et al. (2020). Computer-aided simulation of the stress-strain and limit states of the pyrophyllite cell and punches of a six-punch high-pressure apparatus. *J. Superhard Mater.*, 42, 2, 58–67.
7. Bakul, V. M., Gerasymovych, O. V., & Ivakhnenko, S. O. (1976). Zavisimost napriazhenii sdviga litografskogo kamnia i pirofillita ot davleniya [Dependence of shear stresses of lithographic stone and pyrophyllite on pressure]. *Sint. Almazы. – Synthetic Diamonds*, 2, 25–30 [in Russian].
8. Edmont, J. M., & Paterson, M. S. (1971). Strength of solid pressure media and implications for high pressure apparatus. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 30, 2, 141–160.
9. Sachse, W., & Ruoff, A. L. (1975). Elastic moduli of precompressed pyrophyllite used in ultrahigh pressure research. *J. Appl. Phys.*, 46, 9, 3725–3730.
10. Gerasymovych, O. V., & Hryhoriev M. M. (1996). Soprotivlenie sdvigu materialov deformiruemykh uplotnenii tverdogazovykh apparatov vysokogo davleniia [Shear resistance of materials of deformable seals of solid-phase high pressure apparatuses]. *Sverkhtv. Materialy. – Superhard Materials*, 1, 36–43 [in Russian].
11. Malinovskii, I. Yu., & Ran, E. N. (1978). Vliianie izostaticheskogo davleniia na prochnost materialov. Obshchie zakonomernosti i prochnost tverdyykh splavov [Effect of isostatic pressure on the strength of materials. General laws and strength of hard alloys]. *Issledovaniia po eksperimentalnoi mineralogii. – Research in experimental mineralogy*. (pp. 117–137). Novosibirsk [in Russian].
12. Loshak, M. H. (1984). *Prochnost i dolgovechnost tverdyykh splavov [Strength and durability of hard alloys]*. Kiev: Nauk. Dumka [in Russian].