

УДК 004.94:539.893:539.4

С. Б. Полотняк*, О. І. Боримський**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,

м. Київ, Україна

**psb@ism.kiev.ua*,

***lab7@ism.kiev.ua*

Чисельне моделювання механічного стану багатоуансонного двоступінчастого апарату високого тиску

Розроблено розрахункові схеми та алгоритми для чисельного моделювання методом скінченних елементів механічного стану багатоуансонного двоступінчастого апарату високого тиску (АВТ). Встановлено розподіл компонент тензору напружень, контактних та еквівалентних напружень у елементах першого та другого ступенів АВТ при створенні в контейнері тиску 18 ГПа. Досліджено вплив геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей деформованої прокладки та пуансонів другого ступеня, виготовлених із вольфрам-кобальтового твердого сплаву різних марок та полікристалічного нітриду бору, на граничний стан пуансонів другого ступеня та рівень граничних тисків, досяжних в АВТ.

Ключові слова: *високий тиск, апарат високого тиску, Kawai-ture апарат, пуансон, напружений стан, міцність, метод скінченних елементів.*

ВСТУП

Для виготовлення високотехнологічних матеріалів з унікальними фізико-механічними характеристиками в умовах промислового виробництва широко використовуються апарати високого тиску (АВТ) різних конструкцій [1], здатні створювати тиски до 10 ГПа та температуру до 2500 °С. Серед різноманіття відомих конструкцій АВТ найбільш широке застосування знайшли апарати трьох типів – ковадла із заглибленнями (чечевиця, тороїд), циліндричні (белт, циліндр-поршень) та багатоуансонні (чотирипуансонні – тетраедричні, шестипуансонні – кубічні, восьмипуансонні – октаедричні). Яскравим прикладом використання АВТ при вказаних екстремальних параметрах є промисловий синтез надтвердих матеріалів (НТМ) – алмазу і кубічного нітриду бору та спікання композитів на їхній основі.

Останнім часом, завдяки успіхам сучасного матеріалознавства в області техніки високих тисків та температури, прикладом яких є синтез нанополікристалів алмазу (NPD) [2] та кубічного нітриду бору [3], підвищився науковий та практичний інтерес до АВТ, здатних створювати тиски до 20 ГПа та температуру до 3000 °С. Для цього зазвичай використовують АВТ одно- та багатовісного стискування [1–9]. В першому випадку – це різні модифікації ковадл Бріджмена [4]. Завдяки простій конструкції вони широко використовуються для досліджень, але не знаходять промислового застосування через невеликий робочий об'єм. В другому – це багатоуансонні дво- та триступеневі АВТ [5–11], порівняно великий (до 10 мм³) робочий об'єм яких

та широкий діапазон досяжних тисків робить їх найбільш придатними для проведення різноманітних досліджень при високих тисках і температурі та практичного застосування, включаючи синтез нових матеріалів, вивчення фазових рівноваг та ін.

Багатопуансонні АВТ в залежності від схеми навантаження та конфігурації реакційної комірки характеризуються різноманітними конструкціями – це апарати Kawai-type (системи 6-8, октаедрична комірка), Cubic anvil type (системи 6-6, кубічна комірка) та Tetrahedral-type (тетраедрична комірка), Split-cylinder type (система 6-8, октаедрична комірка), BARS або Split-sphere type (система 8-6, кубічна комірка), DIA-type (системи 8-6 та 8-6-8 з кубічною та октаедричною комірками відповідно), Walker-type (система 6-8, октаедрична комірка) та ін. Найбільш перспективними з них є Kawai-type та Walker-type апарати. Так, в разі використання пуансонів другого ступеня із вольфрам-кобальтового твердого сплаву максимально досяжний тиск становив 27 ГПа при температурі 3040 К [10], а при використанні пуансонів із синтетичного алмазу – 109 ГПа при температурі 1200 К [11].

Максимальний тиск, який може бути досягнуто в багатопуансонних АВТ, в значній мірі залежить від напружено-деформованого стану (НДС) найбільш навантажених його елементів – пуансонів першого та другого ступенів. Тому при розробці і дослідженні АВТ широко застосовуються чисельні методи моделювання умов їхнього термосилового навантаження [12–15].

Мета даної роботи полягала в визначенні, за допомогою методу скінчених елементів, НДС і граничного станів, що виникають у елементах першого та другого ступенів АВТ 6-8 при створенні в контейнері апарату тиску 18 ГПа та дослідженні впливу на граничний стан геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей деформованої прокладки та пуансонів другого ступеня, виготовлених із вольфрам-кобальтового твердого сплаву різних марок та полікристалів на основі кубічного нітриду бору.

В наступних розділах викладено результати комп'ютерного моделювання механічного стану одного із серії розроблених в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України двоступінчастих АВТ 6-8 (куб-октаедр) оригінальної конструкції, подібного до апарату Kawai-type 6-8, розрахованого для сприйняття максимального зусилля стискання пресом до 5 МН (рис. 1).

Перший ступінь АВТ 6-8 складається (див. рис. 1) з шести сталевих пуансонів, запресованих в скріплюючі кільця. Другий ступінь апарату, близький по конструкції до Kawai-type module, включає вісім пуансонів та контейнер. Кожен пуансон другого ступеня має форму куба, одна з вершин якого усічена для формування трикутної робочої грані, завдяки чому пуансони в зборі утворюють в центрі АВТ порожнину в формі октаедра, в якій встановлено контейнер відповідних розмірів і форми з досліджуваним зразком. В зборі другий ступінь АВТ має форму куба, і, в свою чергу, розміщується у порожнині з відповідними формою та розмірами, яка утворена квадратними робочими гранями 6-ти пуансонів першого ступеня.

Для створення високого тиску АВТ 6-8 стискають пресом між проміжними опорними плитами.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ ТА ГРАНИЧНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ БАГАТОПУАНСОННОГО ДВОСТУПІНЧАСТОГО АВТ 6-8

Моделювання механічного стану АВТ 6-8 проводили в два етапи: перший – аналіз НДС силових елементів першого ступеня, при якому визначали гра-

ничні умови навантаження пуансонів другого ступеня, другий – дослідження напруженого та граничного станів пуансонів другого ступеня. При проведенні розрахунків застосовували розроблені в ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України алгоритми та програмне забезпечення для чисельного, з використанням методу скінченних елементів (МСЕ), розв'язку контактних термопружнопластичних задач при скінченних деформаціях [16–21]. Були прийняті вихідні положення, що матеріал пуансонів другого ступеня деформується пружно, а пластичне деформування сталевих елементів першого ступеня визначається моделлю лінійно-зміщеного тіла.

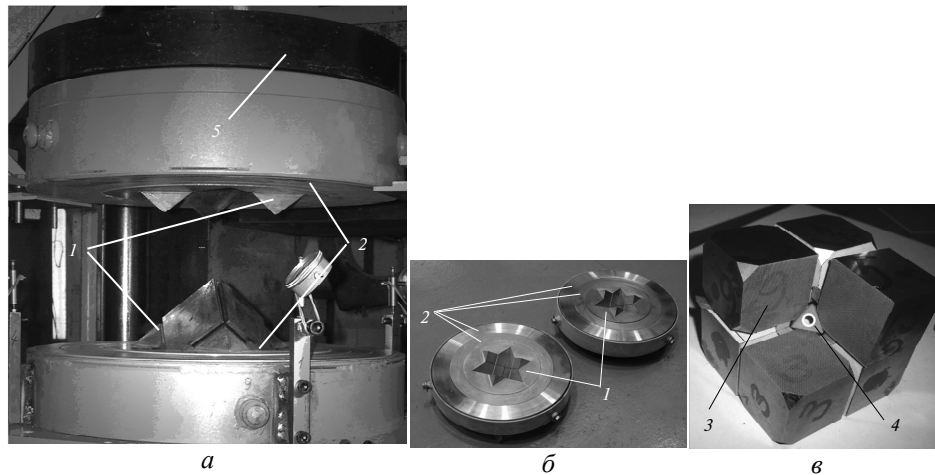


Рис. 1. Багатопуансонний двоступінчастий АВТ 6-8 в зборі (а) і його перша (б) та друга (в) ступені: 1 – пуанسونи першого ступеня; 2 – скріплюючі кільця; 3 – пуанسونи другого ступеня; 4 – октаедричний контейнер; 5 – опорна проміжна плита.

Перший ступінь двоступінчастого АВТ 6-8

Для визначення НДС елементів першого ступеня АВТ 6-8 методом скінченних елементів розв'язано ряд контактних задач пружнопластичності та одержано розподіл компонент тензору напружень, контактних та еквівалентних напружень у сталевих пуансонах, скріплюючих кільцях та опорній плиті. Розглянуто два режими – складання першого ступеня апарату (запресовування пуансонів в кільця) та навантаження першого ступеня зусиллям преса для створення в контейнері тиску 18 ГПа.

Фізико-механічні характеристики матеріалу основних деталей першого ступеня апарату, що використовували при розрахунках, наведено в табл. 1.

На рис. 2 наведено розрахункову схему для визначення НДС елементів першого ступеня АВТ 6-8.

При складанні першого ступеня АВТ 6-8 сталеві пуанسونи спочатку запресовують у внутрішнє кільце з радіальним натягом $\delta_1 = 0,12$ мм, потім внутрішнє кільце зі сталевими пуансонами запресовують в зовнішнє кільце з радіальним натягом $\delta_2 = 0,3$ мм. Після складання першого ступеня між внутрішнім кільцем та пуансонами створюється тиск 36,5 МПа. При цьому максимальний рівень інтенсивності напружень

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)},$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження) досягає 271 МПа, що значно менше за границю текучості матеріалу кілець.

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики матеріалу деталей першого ступеня АВТ 6-8 [22]

Деталь	Характеристика матеріалу			
	Твердість, HRC	Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	Границя текучості, ГПа
Пуансон – сталь 5ХНМ	52–56	210	0,28	1,4
Внутрішнє кільце – сталь 40ХН2МА	44–48	210	0,30	1,3
Зовнішнє кільце – сталь 40ХН2МА	40–44	210	0,30	1,0
Опорна плита – сталь 40ХН2МА	40–44	210	0,30	1,0

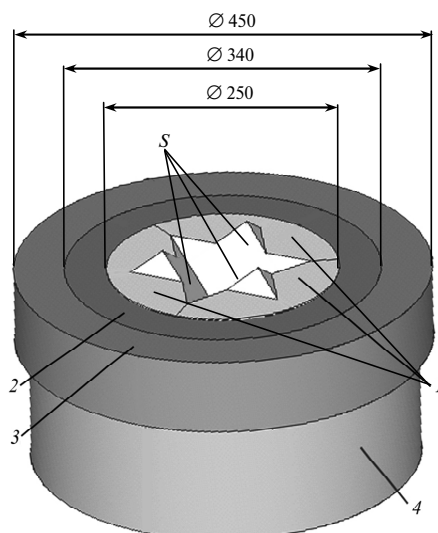


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення НДС елементів першого ступеня АВТ 6-8: 1 – сталевий пуансон; 2 – внутрішнє кільце; 3 – зовнішнє кільце; 4 – опорна плита; S – поверхні пуансонів першого ступеня, через які передається тиск p пуансонам другого ступеня.

Наступний етап розрахунку першого ступеня АВТ 6-8 – навантаження його за допомогою преса максимальним зусиллям 5 МН, в результаті чого між пуансонами першого та другого ступеней створюється тиск p . Розподіл еквівалентних напружень σ_i , які виникають в елементах першого ступеня апарату, представлено на рис. 3.

Після навантаження всі елементи першого ступеня апарату деформуються пружно, максимального значення у 877 МПа інтенсивність напружень досягає в сталевому пуансоні, але вона в 1,6 рази менше його границі текучості.

Рівень натягів δ_1 та δ_2 , як показали розрахунки, є достатнім для скріплення сталевих пуансонів – розкриття стиків між пуансонами при навантаженні не

відбувається. На внутрішній поверхні внутрішнього кільця виникають локалізовані зони незначних напружень розтягу, але в цілому кільце залишається стиснутим. Інтенсивність напружень на верхній поверхні опорної плити досягає 216 МПа, на внутрішній поверхні зовнішнього кільця – 356 МПа, на внутрішній поверхні внутрішнього кільця – 292 МПа, що значно менше границі текучості матеріалу кілець.

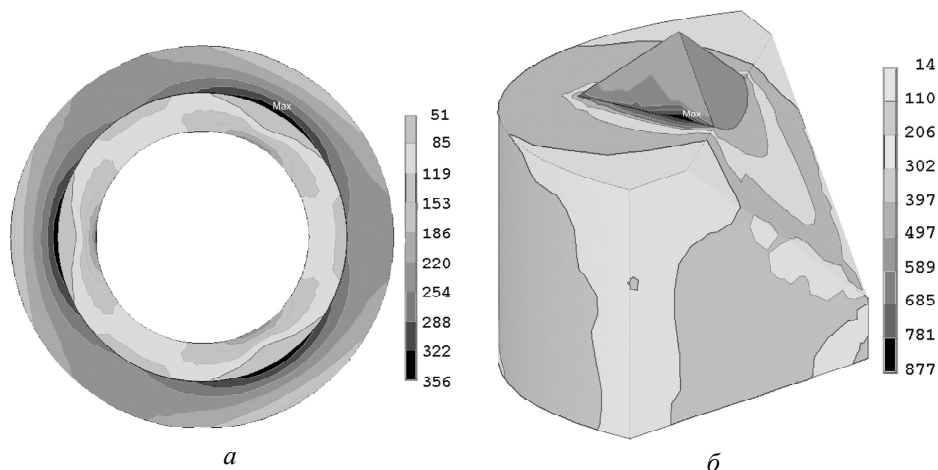


Рис. 3. Розподіл інтенсивності напружень σ_i (МПа) в елементах першого ступеня АВТ 6-8 після його навантаження зусиллям 5 МН: скріплючі кільця (а), пуансон (б).

Слід зазначити, що, як показали розрахунки, можливе використання тільки одного внутрішнього кільця для скріплення сталевих пуансонів, тому що і в цьому випадку, незважаючи на підвищення інтенсивності напружень σ_i у кільці до 722 МПа, воно деформується пружно. Використання двох кілець обґрунтовано необхідністю зменшити пружну деформацію конструкції при навантаженні з метою зменшення її негативного впливу на синхронність зближення пуансонів другого ступеня при створенні високого тиску.

Другий ступінь двоступінчастого АВТ 6-8

Рівень досяжного в АВТ тиску в значній мірі визначається рівнем напружень, що виникають в пуансонах другого ступеня. При цьому, з трьох етапів роботи АВТ – генерація високого тиску в контейнері, витримка під тиском та розвантаження від тиску, найбільш небезпечними є другий та третій етапи, коли внаслідок дії високого тиску в пуансонах виникають значні градієнти напружень, які зумовлюють руйнування пуансонів або внаслідок утворення та спонтанного поширення тріщин, або пластичного плину.

Тому при дослідженні напружено-деформованого та граничного станів пуансонів другого ступеня не розглядали весь складний етап пружнопластичного деформування контейнеру та деформованих прокладок/гаскеток, а вважали, що в апараті вже досягнуто максимальний тиск, стадія пластичної течії у деформованій прокладці завершилась та сформована її кінцева геометрія.

Внаслідок симетрії конструкції та умов навантаження другого ступеня АВТ, розрахункова схема включає (рис. 4) один пуансон та частину деформованої прокладки і ущільнення, виготовленого з гетинаксу, які контактують з пуансоном.

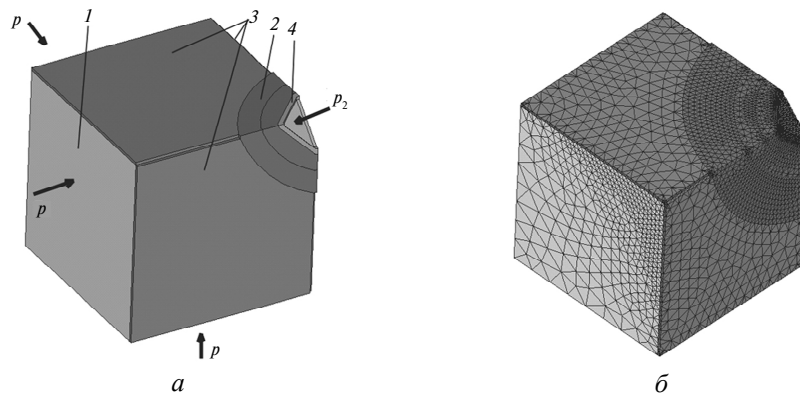


Рис. 4. Розрахункова схема (а) для визначення напружено-деформованого стану пуансона другого ступеня АВТ 6-8 та її скінченноелементна дискретизація (б): 1 – пуансон; 2 – прокладки з пірофіліту; 3 – пластини з гетинаксу; 4 – прокладки із MgO; p – тиск між пуансонами першого та другого ступенів; p_2 – робочий тиск в контейнері (18 ГПа).

Пуансон являє собою куб з розмірами $32 \times 32 \times 32$ мм зі зрізаною вершиною для утворення робочої поверхні у формі рівнобічного трикутника із стороною 8 мм, яка навантажена робочим тиском $p_2 = 18$ ГПа.

Матеріали пуансону, які розглядалися при розрахунках – вольфрамкобальтові тверді сплави [23, 26] WC-Co (3–6 % (за масою) Co) та полікристалічний кубічний нітрид бору – кіборит [24].

На трьох бічних поверхнях пуансона, які прилягають до робочої поверхні, встановлено прокладки з пірофіліту та ущільнення з гетинаксу, які забезпечують бічну підтримку пуансону й герметизацію робочої зони.

В процесі стиснення незначна частина матеріалу контейнера, виготовленого з MgO, видавлюється в зазор між пуансонами і, таким чином, деформована прокладка складається з MgO довжиною близько 1 мм та пірофіліту.

При розрахунках на зовнішніх поверхнях гетинаксових пластин та деформованої прокладки (пірофіліт + MgO) задано умови симетрії, на поверхнях контакту гетинакс–пуансон, гетинакс–деформована прокладка – умови абсолютного зчеплення, а на поверхнях деформована прокладка–пуансон – умови контактної взаємодії з коефіцієнтом тертя 0,3.

На поверхнях контакту пуансона другого ступеня з пуансонами першого ступеня апарату задано тиск p .

Фізико-механічні властивості матеріалів, що використовували при моделюванні, наведено в табл. 2. При розрахунках не враховували вплив тиску на пружні властивості пуансону з твердого сплаву, тому що він був незначним.

Аналіз експериментальних даних показує, що превалюючим механізмом руйнування пуансонів другого ступеня АВТ при експлуатації є виникнення в них під дією напружень зсуву дефектів типу тріщин та подальший їх спонтанний розвиток. На рис. 5 представлено знімок зруйнованого пуансона другого ступеня АВТ 6-8.

Враховуючи вказане, при визначенні граничного стану пуансону було використано:

– третю класичну теорію міцності – критерій найбільших дотичних/зсувних напружень, згідно якої граничний стан настає тоді, коли найбільше дотичне напруження τ_{\max} досягає граничного значення

$$\sigma_e^{\text{III}} = \tau_{\max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) \leq [\tau] = 0,5R_{\tau 0,2};$$

– критерій Мора $\sigma_e^{\text{Mohr}} = \sigma_1 - \chi\sigma_3 \leq R_m$, згідно якому міцність матеріалу залежить в основному від значення і знака найбільшого і найменшого головних напружень);

– критерій міцності Писаренка-Лебедева (настання граничного стану обумовлено здатністю матеріалу чинити опір як дотичним, так і нормальним напруженням)

$$\sigma_e^{\text{PL}} = \chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 \leq R_m, \chi = \frac{R_m}{R_{cm}},$$

де $[\tau]$ – границя міцності при зсуві; $R_{c0,2}$ – границя текучості; R_m – границя міцності на розтяг; R_{cm} – границя міцності на стиск.

Таблиця 2. Фізико-механічні характеристики матеріалів елементів другого ступеня АВТ 6-8

Матеріал	Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	Границя текучості $R_{c0,2}$, ГПа	Границя міцності, ГПа	
				на розтяг R_m	на стиск R_{cm}
Твердий сплав ВК3 [23]	685	0,215	5	0,6	4,6
Твердий сплав ВК6 [23]	640	0,215	4,6	0,7	4,75
Твердий сплав NF [26]	635	0,21	8,11	1,00	7,50
Кіборит [24]	880	0,16	6,87	0,37	3,2
Гетинакс [22]	8	0,3	–	–	–
Пірофіліт [4]	35	0,3	0,52	–	–
MgO [25], тиск 0/10/20 ГПа	290/340/400	0,19/0,21/0,24	1,1	–	–



Рис. 5. Зруйнований пуансон другого ступеня АВТ 6-8.

В [27] показано, що для деталей АВТ, виготовлених із вольфрамкобальтових твердих сплавів, які працюють в умовах тривимірного напруженого стану, найбільш обґрунтованим при розрахунках НДС є використання критерію Писаренка-Лебедева.

Розподіл інтенсивності напружень, тиску та головних напружень, в пуансоні з твердого сплаву ВКЗ при навантаженні робочим тиском 18 ГПа, наведено на рис. 6.

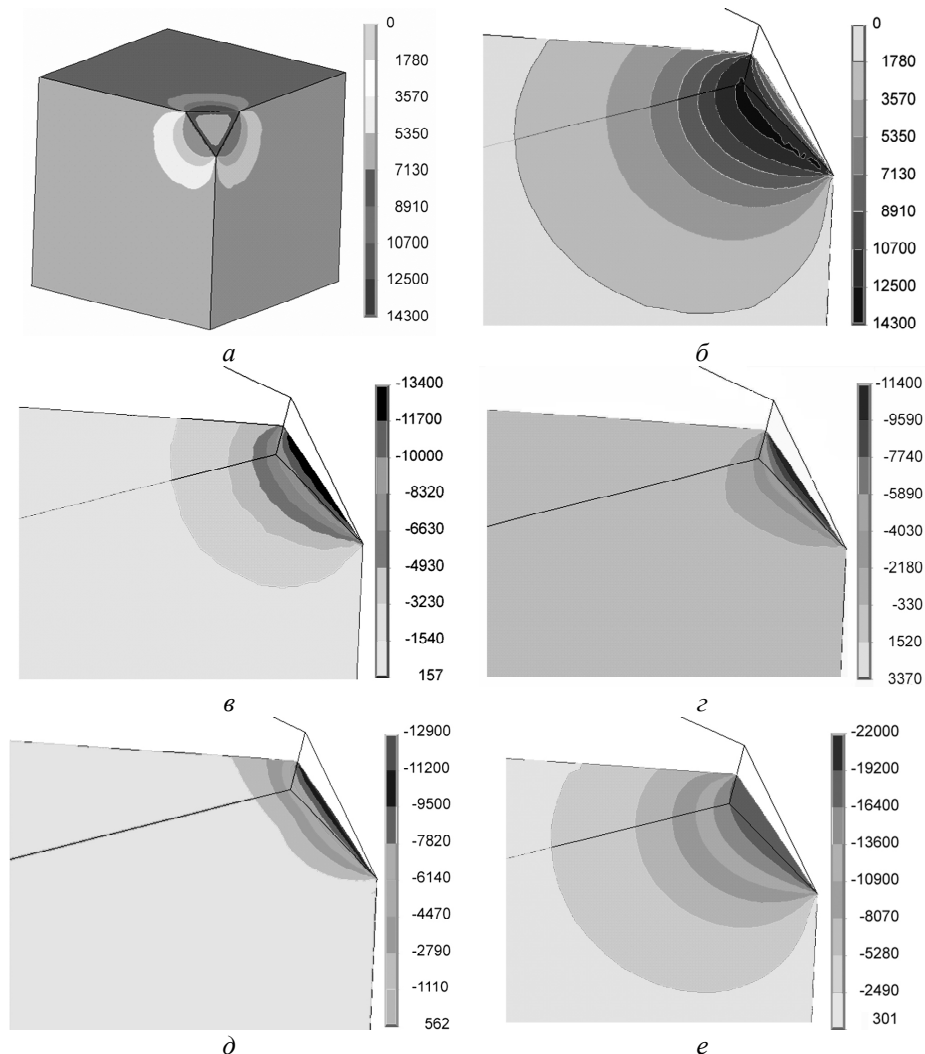


Рис. 6. Розподіл інтенсивності напружень σ_i (а, б), тиску σ_0 (в) та головних напружень σ_1 (г), σ_2 (д), σ_3 (е) (МПа) в пуансоні з твердого сплаву ВКЗ при навантаженні робочим тиском 18 ГПа.

Розрахунки показали, що в матеріалі пуансона при навантаженні виникає складний об'ємний напружений стан. В області поблизу робочої поверхні матеріал знаходиться в стані всебічного нерівномірного стискання. Спостерігається значний градієнт напружень поблизу робочої поверхні – з максимальних значень напруження зменшуються майже в 10–15 разів при віддаленні від цієї поверхні всього на 2–4 мм.

Відомо, що значний вплив на розподіл напружень в пуансонах при навантаженні має тиск бічної підтримки, який забезпечує деформована прокладка, тому було проведено серії чисельних експериментів, націлених на дослідження впливу на граничний стан пуансона як геометричних параметрів (товщина й довжина), так і пружних властивостей матеріалу прокладки.

На рис. 7–9 наведено розподіл еквівалентних напружень в пуансонах, виготовлених зі сплавів ВК3 та ВК6, які були розраховані за трьома критеріями міцності, поданими вище, при навантаженні робочим тиском 18 ГПа. Розрахунки проводили для прокладок товщиною 0,5, 1,0 і 1,5 мм при їх довжині 4, 8 і 16 мм. У всіх випадках довжина частини прокладки з MgO складала 1 мм, решта – пірофіліт.

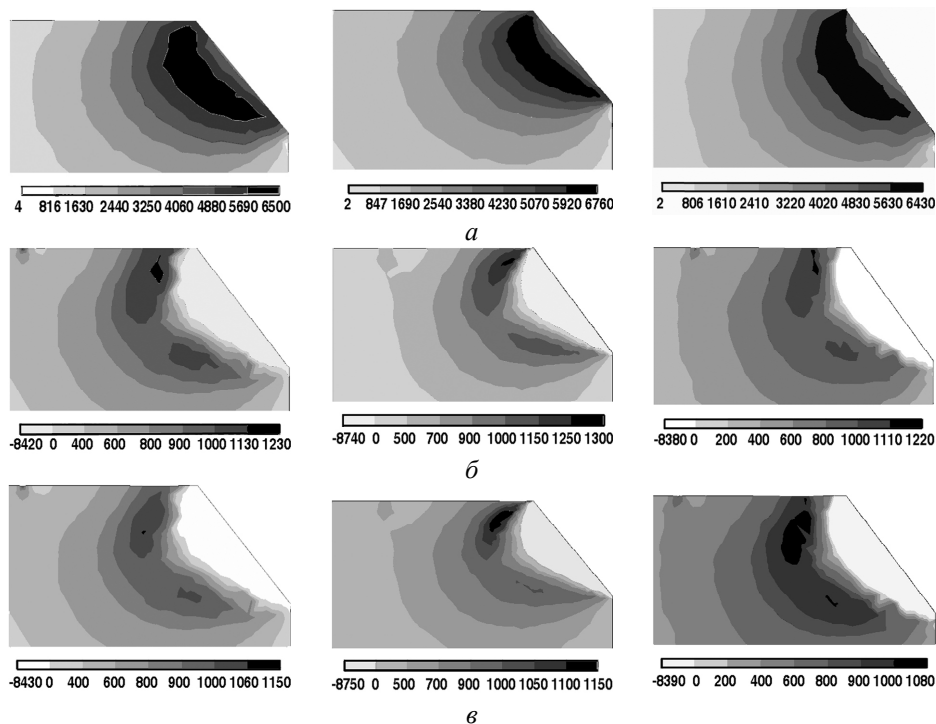


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень за критеріями найбільших дотичних напружень (МПа) σ_e^{III} (а), Мора σ_e^{Mohr} (б) та Писаренка-Лебедева σ_e^{PL} (в) в пуансоні зі сплаву ВК3 при використанні прокладок довжиною 8 мм та товщиною (зліва направо) 0,5, 1,0 і 1,5 мм.

Використання прокладок товщиною 0,5 і 1,5 мм (див. рис. 7) призводить до збільшення (у порівнянні з прокладкою товщиною 1 мм) в розмірах області з найбільшими еквівалентними напруженнями при незначному (на 5–7 %) зменшенні їх максимальних значень, зменшення градієнту тиску бічної підтримки та появи ще однієї зони ймовірного руйнування – на бічній поверхні пуансона в області, де прокладка закінчується. Тому найбільш доцільним буде використання прокладок з кінцевою товщиною 1,0–1,2 мм. Крім того, при застосуванні тонких прокладок (в нашому випадку 0,5 мм) збільшується ймовірність втрати бічної підтримки поверхонь пуансонів.

З даних рис. 8 видно, що властивості матеріалу деформованої прокладки суттєво впливають на граничний стан пуансона. При використанні в якості деформованої прокладки більш твердого матеріалу (MgO) на бічних поверхнях пуансона з'являється, як і у випадку тонкої прокладки, область в якій значення еквівалентних напружень майже вдвічі перевищує ті, що мають місце в області поблизу робочої поверхні. У випадку прокладки пірофіліт + MgO (7 + 1 = 8), порівняно з пірофілітовою, градієнт зменшення тиску на перших двох міліметрах на 8–10 відсотків менший і, таким чином, ефективність бічної підтримки вища ніж у чисто пірофілітової.

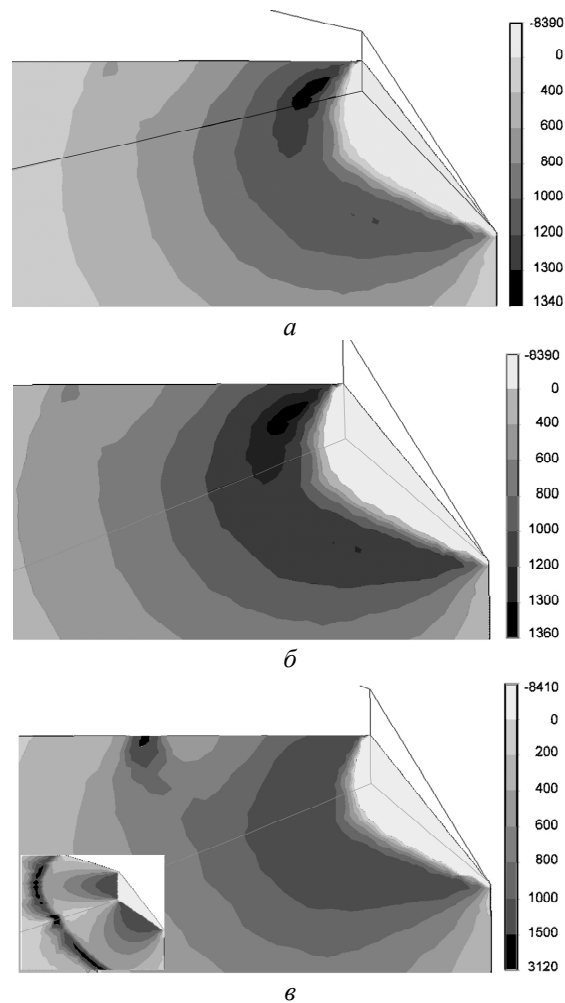


Рис. 8. Розподіл еквівалентних напружень (МПа) за критерієм Писаренка-Лебедева в пуансоні зі сплаву ВК6 при використанні прокладок товщиною 1 мм та довжиною 8 мм, виготовлених із пірофіліту (а), пірофіліту + MgO (7 + 1 = 8 мм) (б), MgO (в).

Довжина прокладки, або розмір області дії тиску бічної підтримки, також має значний вплив на граничний стан пуансона (див. рис. 9). У випадку короткої (4 мм) прокладки тиск бічної підтримки недостатній і на бічній поверхні пуансона виникають додаткові, порівняно з більш довгими прокладками, області можливого руйнування зі значною концентрацією напружень. Найдовша (16 мм) прокладка також не є прийнятною, бо тиск бічної підтримки падає до майже нульових значень на довжині 7–8 мм, тож доцільним буде використання прокладок довжиною ~ 8 мм.

Аналогічні чисельні експерименти було проведено для пуансонів, виготовлених із твердого сплаву ВК6, NF та кібориту, результати яких представлено в табл. 3.

Слід зазначити, що матеріал пуансона знаходиться в умовах всебічного стискання, тому при оцінці його міцності потрібно враховувати вплив гідростатичного тиску на характеристики міцності та текучості твердих сплавів. За даними [27, 28], для вольфрам-кобальтових твердих сплавів з вмістом кобальту 3–6 % залежності границь міцності на стиск та текучості від тиску (тоб-

то – зміцнення) мають наступний вигляд: $R_{cm}(p) = R_{cm}^0 + R'_{cm} p$, $R_{c0,2}(p) = R_{c0,2}^0 + R'_{c0,2} p$, де R_{cm}^0 , $R_{c0,2}^0$ – відповідно границі міцності на стиск та текучості за умов нормального тиску, R'_{cm} , $R'_{c0,2}$ – відповідно їх похідні по тиску. Для вказаних сплавів $R'_{cm} = 3-4$, $R'_{c0,2} = 0,08-0,12$.

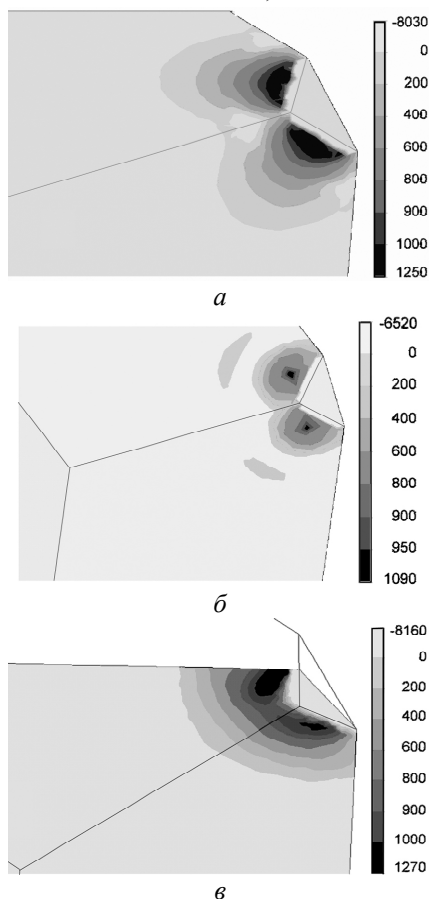


Рис. 9. Розподіл еквівалентних напружень (МПа) за критерієм Мора в пуансоні із сплаву ВКЗ для прокладок товщиною 1 мм та довжиною 4 (1 + 3) (а), 8 (1 + 7) (б) та 16 (1 + 15) (в) мм, виготовлених із пірофіліту + MgO.

Таблиця 3. Еквівалентні напруження, розраховані за критеріями найбільших дотичних напружень σ_e^{III} , Мора σ_e^{Mohr} та Писаренка-Лебедева σ_e^{PL} , в пуансоні при використанні деформованої прокладки товщиною 1 мм ($p = 0,705$ ГПа, $p_2 = 18$ ГПа) при довжині $l = 4, 8$ і 16 мм

Матеріал пуансона	σ_e^{III} , ГПа			σ_e^{Mohr} , ГПа			σ_e^{PL} , ГПа		
	$l = 4$	$l = 8$	$l = 16$	$l = 4$	$l = 8$	$l = 16$	$l = 4$	$l = 8$	$l = 16$
ВКЗ	6,64	6,36	6,65	1,25	1,09	1,27	1,12	1,00	1,12
ВК6	6,64	6,36	6,65	1,47	1,32	1,46	1,32	1,20	1,31
NF	6,63	6,35	6,65	1,24	1,10	1,26	1,12	0,99	1,10
Кіборит	6,68	6,42	6,71	1,10	0,95	1,13	0,99	0,85	0,995

Оскільки в небезпечній області пуансона значення тиску дорівнює ~ 10 ГПа, то для границь міцності на стиск та текучості з врахуванням зміцнення пуансона під дією тиску маємо:

$$\text{BK3: } R_{c0,2} \approx 6 \text{ ГПа; } R_{cm} \approx 8,1 \text{ ГПа;}$$

$$\text{BK6: } R_{c0,2} \approx 5,6 \text{ ГПа; } R_{cm} \approx 8,25 \text{ ГПа;}$$

$$\text{NF: } R_{c0,2} \approx 9,11 \text{ ГПа; } R_{cm} \approx 11 \text{ ГПа,}$$

де $R_{c0,2}$ – границя текучості; R_m – границя міцності на розтяг; R_{cm} – границя міцності на стиск.

В табл. 4 наведено розрахункові значення максимального тиску, що може бути досягнутий в АВТ 6-8 з врахуванням зміцнення пуансонів другого ступеня під дією тиску вразі використання прокладок товщиною 1 мм та довжиною 8 мм (1 + 7 мм).

Таблиця 4. Максимальний тиск, що може бути досягнутий в АВТ 6-8 з врахуванням зміцнення пуансонів другого ступеня під дією тиску

Матеріал пуансона	Тиск, ГПа, за критерієм		
	σ_e^{III}	σ_e^{Mohr}	σ_e^{PL}
БК3	8,5	10	11
БК6	8	9,5	10,5
Кіборит	10	7	8
NF	13	16,5	18

ВИСНОВКИ

В результаті чисельного МСЕ моделювання механічного стану багатопуансонного двоступінчастого АВТ 6-8 визначено напружено-деформований і граничний стан елементів першого та другого ступенів апарату при створенні тиску 18 ГПа та досліджено вплив на граничний стан пуансонів другого ступеня геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей деформованої прокладки, зокрема:

- досліджено розподіл контактних та еквівалентних напружень у елементах першого ступеня АВТ та обґрунтовано доцільність використання двох кілець для скріплення сталевих пуансонів першого ступеня з метою зменшення негативного впливу пружної деформації конструкції на синхронність зближення пуансонів другого ступеня;

- встановлено, що значний вплив на міцність пуансонів другого ступеня мають геометричні параметри (товщина і довжина) деформованої прокладки та фізико-механічні властивості її матеріалу (або розмір області дії тиску бічної підтримки). Найбільш доцільним буде використання прокладок з кінцевими товщиною та довжиною 1–1,2 і 7–8 мм відповідно;

- рівень максимального тиску, що може бути досягнутий в багатопуансонному двоступінчастому АВТ 6-8 значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу пуансонів другого ступеня. Так для пуансонів з твердих сплавів БК3, БК6 та NF він складає 11, 10,5 та 18 ГПа відповідно.

Розроблені розрахункові схеми та алгоритми чисельного моделювання механічного стану АВТ та одержані результати використовуються в ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України при створенні аналогічних конструкцій багатопуансонних АВТ.

Разработаны расчетные схемы и алгоритмы для численного моделирования методом конечных элементов механического состояния многопуансонного двухступенчатого аппарата высокого давления (АВД). Получено распределение компонент тензора напряжений, контактных и эквивалентных напряжений в элементах первой и второй ступеней АВД при создании в контейнере давления 18 ГПа. Исследовано влияние геометрических параметров и физико-механических свойств деформированной прокладки и пуансонов второй степени, изготовленных из вольфрам-кобальтового твердого сплава различных марок и поликристаллического нитрида бора, на предельное состояние пуансонов второй степени и уровень давлений, достижимых в АВД.

Ключевые слова: высокое давление, аппарат высокого давления, Kawai-типе аппарат, пуансон, напряженное состояние, прочность, метод конечных элементов.

The computational schemes and algorithms for numerical simulation (by FEM) of the mechanical state of the two-stage multi-anvil high pressure apparatus (HPA) were developed. The stress-strain and limit states of the HPA's elements (at pressure of 18 GPa into the sample) have been studied. Was shown that the geometrical parameters and elastic properties of the gasket material, as well as the strength properties of the anvils, have a significant influence on the limit state of high pressure stage's anvils. The levels of maximum achievable pressure in HPA depending on anvil material (brands of tungsten carbide, polycrystalline boron nitride) have been calculated.

Keywords: high pressure, high-pressure apparatus, Kawai-type apparatus, anvil, stress state, strength, finite element method.

1. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 1. Синтез алмаза и подобных материалов / Под ред. А. А. Шульженко. – Киев, 2003. – 320 с.*
2. *Sumiya H. Novel development of high-pressure synthetic diamond “Ultra-hard nanopolycrystalline diamond” // SEI Tech. Rev. – 2012. – 74. – P. 15–23.*
3. *Dubrovinskaia N., Solozhenko V. L., Miyajima N. et al. Superhard nanocomposite of dense polymorphs of boron nitride: Noncarbon material has reached diamond hardness // Appl. Phys. Lett. – 2007. – 90, art. 101912.*
4. *Sherman W. F., Stadtmuller A. A. Experimental Techniques in High Pressure Research. – London: John Wiley & Sons Ltd, 1987. – 471 p.*
5. *Onodera A. Octahedral-anvil high-pressure devices // High Temp. High Press. – 1987. – 19. – P. 579–609.*
6. *Walker D., Carpenter M. A., Hitch C. M. Some simplifications to multianvil devices for high pressure experiments // Am. Mineral. – 1990. – 75. – P. 1020–1028.*
7. *Frost D. J., Poe B. T., Tronnes R. G. et al. A new large-volume multianvil system // Phys. Earth Planet. Inter. – 2004. – 143–144. – P. 507–514.*
8. *Irifune T., Kurio A., Sakamoto S. et al. Formation of pure polycrystalline diamond by direct conversion of graphite at high pressure and high temperature // Ibid. – 143–144. – P. 593–600.*
9. *Боримский А. И. Многопуансонные аппараты для создания давлений мегабарного диапазона // II междунар. науч.-техн. конф. “Функциональные и конструкционные материалы”, Донецк, 15–16 нояб. 2011 г.: Тез. докл. – Донецк: Науч.-технол. центр НАН Украины “Реактивэлектрон”, 2011. – С. 77.*
10. *Kawazoe T., Ohtani E. Reaction between liquid iron and (Mg,Fe)SiO₃-perovskite and solubilities of Si and O in molten iron at 27 GPa // Phys. Chem. Minerals. – 2006. – 33, N 3. – P. 227–234.*
11. *Yamazaki D., Ito E., Yoshino T., Tsujino N. et al. Over 1 Mbar generation in the Kawai-type multianvil apparatus and its application to compression of (Mg_{0.92}Fe_{0.08})SiO₃ perovskite and stishovite // Phys. Earth Planet. Inter. – 2014. – 228. – P. 262–267.*
12. *Новиков Н. В., Левитас В. И., Полотняк С. Б., Шведов Л. К. Исследование поведения материалов в аппаратах высокого давления с алмазными наковальнями // Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 2. Структура и свойства СТМ, методы исследования / Под ред. В. М. Перевертайло – Киев, 2004. – С. 13–40.*

13. Новіков М. В., Боримський О. І., Лециук О. О. та ін. Моделювання термомеханічного стану елементів апарата високого тиску для синтезу алмазів з розвинутою питомою поверхнею // *Сверхтв. матеріали*. – 2004. – № 4. – С. 3–15.
14. Li R., Ma H. A., Han Q. G., Liang Z. Z. et al. Simulation of pressure distribution in a pyrophyllite high-pressure cell by finite-element analysis // *High Pressure Res.* – 2007. – 27, N 2. – P. 249–257.
15. Qi-Gang Hana, Xiao-Peng Jiaa, Jie-Ming Qinb et al. Finite-element analysis on performance and shear stress of cemented tungsten carbide anvils used in the China-type cubic-anvil high-pressure apparatus // *Ibid.* – 2009. – 29, N 3. – P. 457–465.
16. Полотняк С. Б. Методика чисельного моделювання процесів мартенситних фазових перетворень у малих обсягах матеріалів при деформуванні на алмазних ковадлах // *Сверхтв. матеріали*. – 2008. – № 2. – С. 13–28.
17. Lavrykov S. A. FEM Tools software system for finite element simulation of 3D mechanical and technology processes on PC // *Proc. 4th Conf. Numerical Methods in Mechanics of Continua*, 1992.
18. Idesman A. V., Levitas V. I. Finite element procedure for solving contact thermoplastic problems at large strain, normal and high pressures // *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* – 1995. – 126. – P. 39–66.
19. Polotnyak S. B., Idesman A. V. Numerical modelling of the mechanical state of deformable gaskets in diamond anvil cell // *J. Mater. Process. Technol.* – 60. – 1996. – P. 685–690.
20. Левитас В. И., Полотняк С. Б., Идесман А. В. Большие упруго-пластические деформации и напряженное состояние деформируемой прокладки аппарата высокого давления с алмазными наковальнями // *Пробл. прочности*. – 1996. – № 3. – С. 78–88.
21. Новіков Н. В., Левитас В. И. О возможных механизмах перехода материала из пластического состояния в упругое при сжатии в аппарате высокого давления // *Физ. и техн. высоких давлений*. – 1984. – № 17. – С. 88–91.
22. Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др. Конструкционные материалы: Справ. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
23. Кифер Р., Бензевский Ф. Твердые сплавы. – М.: Металлургия, 1971. – 392 с.
24. Беженар Н. П. Получение, структура и свойства поликристаллических и композиционных материалов на основе кубического нитрида бора // *Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля*. – Т. 1. Синтез алмаза и подобных материалов / Под ред. А. А. Шульженко. – Киев, 2003. – С. 234–258.
25. Karki B. B., Stixrude L., Clark S. J. et al. Structure and elasticity of MgO at high pressure // *Am. Mineral.* – 1997. – 82, N 1–2. – P. 51–60.
26. <http://www.tungaloy.co.jp/tj/english/index.html>
27. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984. – 328 с.
28. 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.

Надійшла 08.05.15