

УДК 62-987:621.921.34

**С. Б. Полотняк**, канд. техн. наук, **І. О. Боримський**, **В. М. Крикун**  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПУАНСОНІВ КУБІЧНОГО АПАРАТА НА ЇХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ ТА ГРАНИЧНИЙ СТАНИ ПРИ СТВОРЕННІ ВИСОКОГО ТИСКУ

Досліджено методом скінченних елементів вплив геометричних параметрів твердосплавних пуансонів кубічного апарата високого тиску на їх напружено-деформований та граничний стани при створенні тиску 15 ГПа. Показано доцільність таких досліджень для обґрунтування мінімальних розмірів пуансонів, за яких забезпечується працездатність пуансонів.

**Ключові слова:** кубічний апарат високого тиску, пуансон, композиційний матеріал, твердий сплав, алмаз, кубічний нітрид бору, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.

### Вступ

Високий тиск та високу температуру широко використовують у наукових дослідженнях та різних галузях виробництва. Виразний приклад ефективного використання екстремально високого тиску та високої температури – широкомасштабне промислове виробництво надтвердих матеріалів (алмазу, кубічного нітриду бору (КНБ) та композиційних матеріалів на їх основі), які зазвичай отримують за тиску 4–8 ГПа та температури 1300–2200 °С [1].

Зазначені тиск та температуру створюють за допомогою апаратів високого тиску (АВТ) різних конструкцій, серед яких найширше застосовують апарати типів «ковадла із

заглибленнями» та «белт», а також одноступінчасті багатопуансонні конструкції [1; 2].

У цілях досягнення тиску понад 10–15 ГПа та можливості отримання нових матеріалів з високими фізико-механічними властивостями [3; 4] використовують переважно дво- та триступінчасті багатопуансонні АВТ. Порожнина високого тиску цих АВТ має форму або куба (кубічні АВТ) – апарати систем 6–6 та 8–6 [5–8], або октаедра (октаедричні АВТ) – апарати системи 6–8 [9–11].

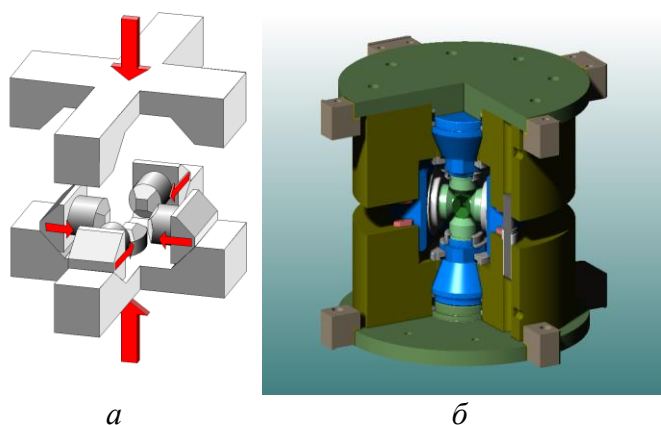


Рис. 1. Схема (а) і макет у розрізі (б) шестипуансонного АВТ системи 8–6 [5]

Кубічні АВТ включають шість пуансонів ступеня високого тиску (рис. 1), октаедричні – вісім (рис. 2).

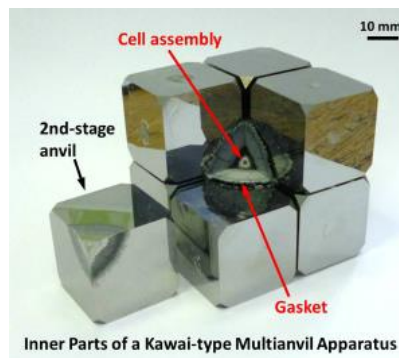
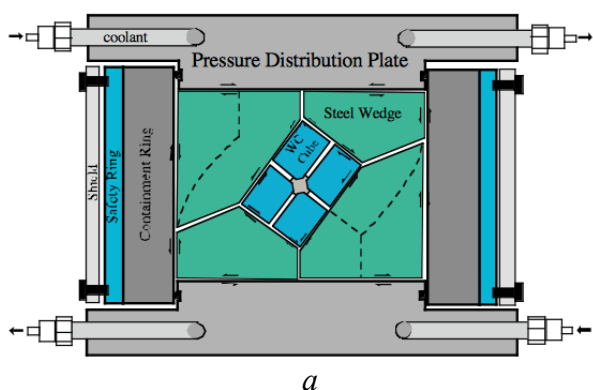


Рис. 2. Схема АВТ системи 6–8 (а) і загальний вигляд пуансонів другого ступеня АВТ (б) [11]

Слід зауважити, що граничний тиск, якого досягають в АВТ, обмежений фізико-механічними властивостями найнавантажених елементів апаратів – пуансонів високого тиску (далі – пуансонів). Тому для виготовлення пуансонів використовують найміцніші на цей час конструкційні матеріали – високоякісні тверді сплави марок Toshiba Grade F (“Toshiba Tungaloy Co., Ltd.”, Японія), Kennametal K313 (“Kennametal Inc.”, США), FC-3M (“Federal Carbide Company”, США), N6F (“Sandvik Coromant”, Швеція) [12], а також композиційні матеріали на основі алмазу та КНБ.

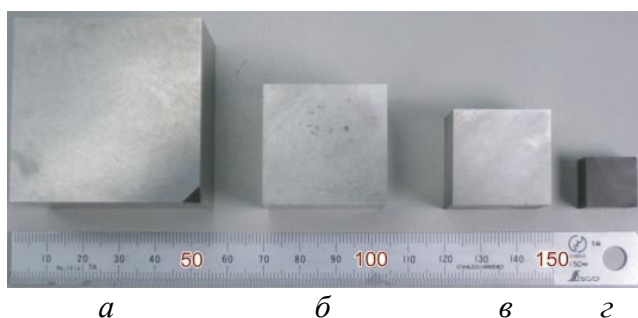


Рис. 3. Загальний вигляд пуансонів октаедричних АВТ, виготовлених з твердого сплаву з довжиною ребра 46 (а), 32 (б) і 26 мм (в) та з композиту на основі алмазу з довжиною ребра 14 мм (г) [13]

Максимальні розміри пуансонів із зазначених матеріалів зумовлені технологічними можливостями їх виготовлення та негативним впливом масштабного чинника на фізико-механічні властивості пуансонів.

Для виготовлення пуансонів з твердого сплаву октаедричних АВТ у формі куба зі зрізаною однією або кількома вершинами становить 20–46 мм, а у виготовлених з композитів на основі алмазу шляхом високотемпературного спікання під високим тиском в АВТ – не перевищує 14 мм (рис. 3) [13].



Рис. 4. Загальний вигляд пуансонів кубічного АВТ, виготовлених з композиту Versimax composites [14]

Для виготовлення пуансонів діаметром та висотою до 35 мм (габаритні розміри) кубічних АВТ так само використовують тверді сплави зазначених марок, композити на основі алмазу, наприклад Versimax composites компанії «Diamond Innovations Inc.», США, як показано на рис. 4 [14], та композити на основі КНБ діаметром до 30 і висотою до 25 мм

(габаритні розміри) [15]. Принагідно зауважимо, що пуанسونи з композитів отримують шляхом високотемпературного спікання в АВТ.

За результатами аналізу доходимо висновку про доцільність при розробленні нових конструкцій багатопуансонних АВТ використовувати пуанسونи з мінімальними геометричними параметрами, за яких забезпечується створення необхідного високого тиску.

Найперспективніший напрям мінімізації геометричних параметрів пуансонів – чисельне методом скінченних елементів (МСЕ) дослідження впливу геометричних параметрів пуансонів на їх напружено-деформований та граничний стани при створенні високого тиску.

Мета цієї роботи – дослідити методом скінченних елементів вплив геометричних параметрів твердосплавних пуансонів кубічного АВТ на їх напружено-деформований та граничний стани при створенні високого тиску, що необхідно для обґрунтування мінімальних розмірів пуансонів, за яких забезпечується працездатність пуансонів.

#### Об'єкт та методика його дослідження

Напружено-деформований та граничний стани системи пуансон – опорна плита (рис. 5, а) шестипуансонного АВТ досліджували для пуансонів діаметром 35 мм та висотою 50; 35; 20 мм з робочою поверхнею у формі квадрата з довжиною ребра 10 мм та опорної плити у формі циліндра діаметром 45 мм та висотою 50 мм.

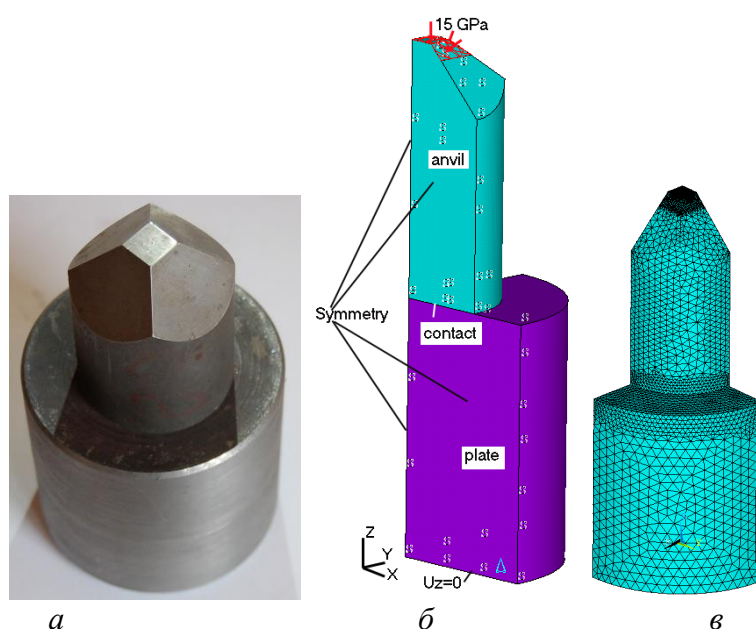


Рис. 5. Загальний вигляд дослідного зразка (а), розрахункова схема (б) та скінченно-елементна дискретизація (в) системи пуансон – опорна плита кубічного АВТ

Робочу поверхню та прилеглі до неї частини чотирьох бокових поверхонь пуансонів навантажували тиском 15 ГПа (рис. 5, б). Площу навантажених бокових поверхонь пуансона рівномірно розподіленим тиском розраховували так, щоб ефективність створення високого тиску в АВТ дорівнювала 50%.

При дослідженні напружено-деформованого та граничного станів системи пуансон – опорна плита застосовували розроблені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України алгоритми та програмне забезпечення для чисельного, з використанням методу МСЕ, розв'язання контактних термопружнопластичних задач за скінченних деформацій [16–19].

По поверхні контакту пуансонів з опорною плитою прийнято виконання закону тертя Кулона.

Для визначення фізико-механічних властивостей матеріалу пуансонів, за яких у пуансонах не спостерігаються пластичні деформації при навантаженні високим тиском, розрахунки виконували для випадку пружного деформування пуансонів, у зв'язку з чим границю текучості матеріалу пуансонів прийняли 20 ГПа.

Фізико-механічні властивості матеріалу пуансонів (твердий сплав NF) та опорної плити (твердий сплав ВК6), які використовували в розрахунках, наведено в таблиці.

### Фізико-механічні характеристики матеріалу пуансонів та опорної плити

Матеріал – твердий сплав	Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт Пуассона	Границя текучості $R_{c0,2}$ , ГПа
ВК6 [20]	640	0,215	4,6
NF [21]	635	0,21	8,11

Задавали такі граничні умови розрахунків (рис. 5, б):

- на вільних поверхнях нормальні та дотичні напруження дорівнюють нулю;
- вздовж площин симетрії пуансона та плити – умови симетрії;
- по границі контакту пуансон – плита тертя визначають за законом Кулона (коефіцієнт тертя дорівнює 0,1);
- на навантажених поверхнях пуансона тиск дорівнює 15 ГПа;
- на нижній поверхні плити задавали відсутність переміщень у вертикальному напрямку. Граничний стан пуансону та опорної плити визначали за двома критеріями міцності:
- найбільших дотичних/зсувних напружень

$$\sigma_e^{III} = 2\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq 2[\tau] = R_{c0,2};$$

- питомої потенційної енергії формозміни

$$\sigma_e^{IV} = \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq R_{c0,2},$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень,  $\sigma_1 - \sigma_3$  – головні напруження,  $\sigma_T$  (або  $R_{c0,2}$ ) – границя текучості.

### Результати дослідження та їх обговорення

Одержані розрахунково розподіли осьових напружень  $\sigma_z$ , інтенсивності напружень  $\sigma_i$ , тиску  $\sigma_0$ , еквівалентних напружень  $\sigma_e^{III}$  та контактних зон і контактних напружень для пуансонів висотою 50; 35; 20 мм та опорної плити при навантаженні робочим тиском 15 ГПа показані на рисунках 6–9.

Результати дослідження показали, що зменшення висоти пуансона не впливає істотно на розподіл напружень в найнавантаженішій зоні поблизу його робочої поверхні. Так, максимальні еквівалентні напруження  $\sigma_i$  у зазначеній зоні при переході від висоти пуансона 50 мм до висоти 35 та 20 мм зменшуються відповідно на 0,1 та 5,8%.

Водночас, еквівалентні напруження в зоні поблизу поверхні контакту пуансон – опорна плита значно підвищуються – з 3,1 ГПа за висоти пуансона 50 мм до 3,3 та 7,5 ГПа за висоти пуансона відповідно 35 та 20 мм.

Змінюється також характер контакту між пуансоном та опорною плитою при переході від висоти пуансона 50 мм до висоти 20 мм – зі зчеплення до ковзання. При цьому контактні напруження збільшуються майже вдвічі – з 2,8 до 5,2 ГПа.

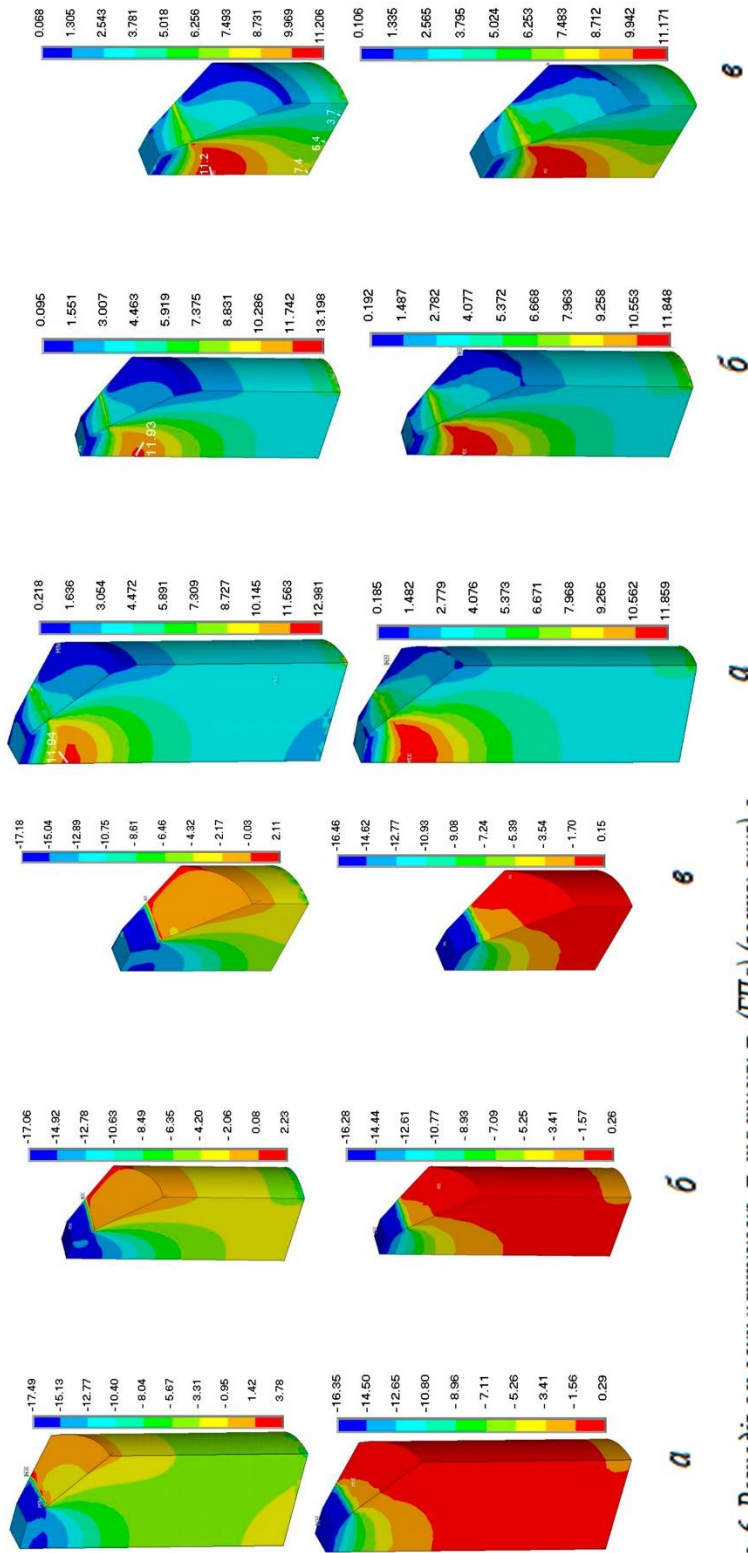


Рис. 6. Розподіл осьових напружень  $\sigma_z$  та тиску  $\sigma_0$  (ГПа) (зверху вниз) в пунсонах висотою 20 мм (а), 35 мм (б) після навантаження тиском 15 ГПа

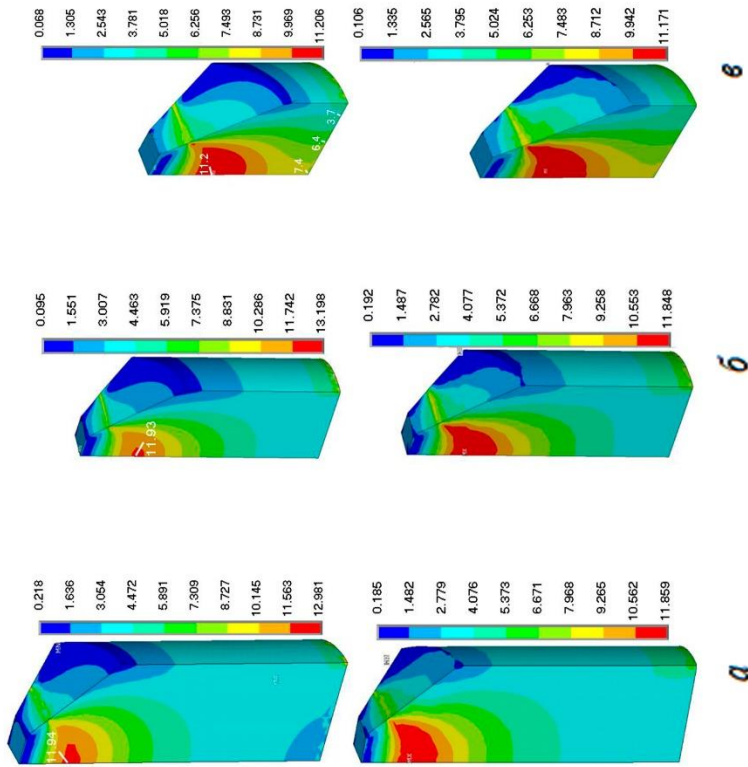


Рис. 7. Розподіл напружень  $\sigma_z$  та  $\sigma_x$  (ГПа) (зверху вниз) в пунсонах висотою 20 мм (а), 35 мм (б) та 20 мм (в) після навантаження тиском 15 ГПа



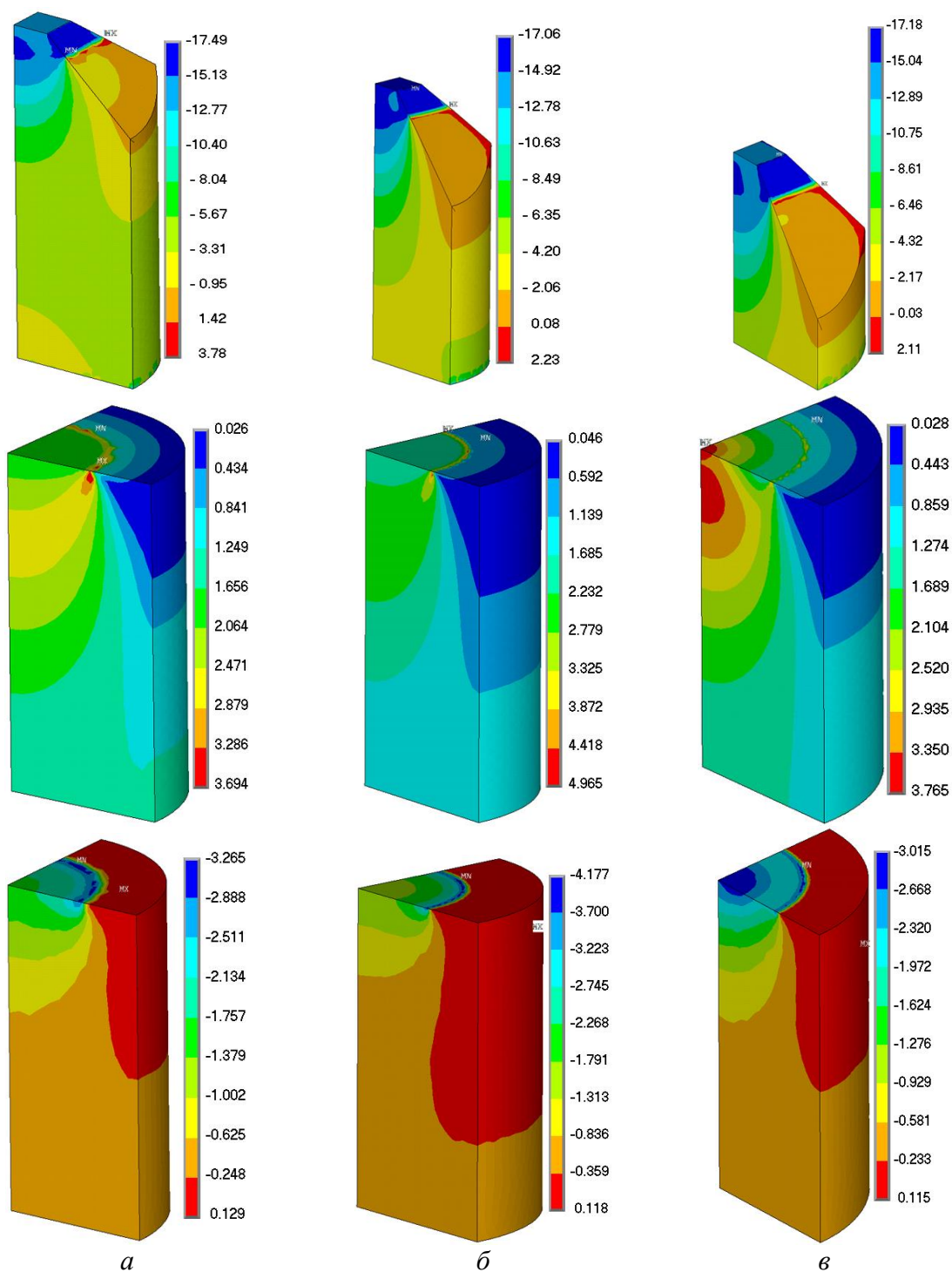


Рис. 8. Розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_i$  та тиску  $\sigma_0$  (ГПа) (зверху вниз) в опорній плиті після навантаження тиском 15 ГПа в разі висоти пуансона 50 мм (а), 35 мм (б) та 20 мм (в)

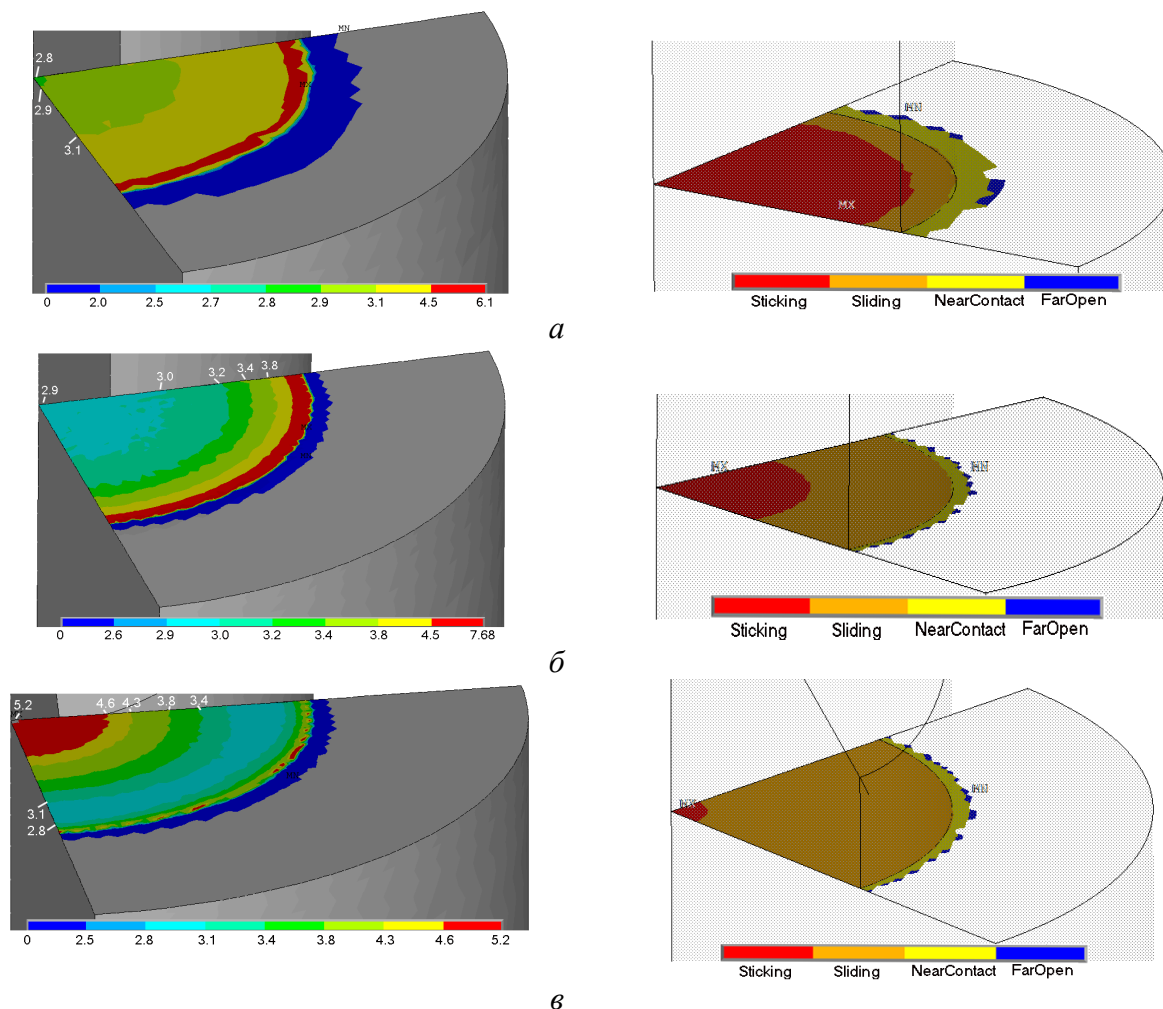


Рис. 9. Розподіл контактних напружень (ГПа) та контактних зон (*sticking* – зчеплення, *sliding* – ковзання) по поверхні контакту пуансон – опорна плита після навантаження тиском 15 ГПа в разі висоти пуансона 50 мм (а), 35 мм (б) та 20 мм (в)

Слід зазначити, що матеріал пуансона перебуває в умовах всебічного стискання, тому при оцінюванні його міцності потрібно враховувати вплив гідростатичного тиску на границі міцності та текучості твердих сплавів. За даними досліджень [22; 23], для сплавів із вмістом кобальту 3–6 мас. % залежності границь міцності на стискання та текучості від тиску мають вигляд:

$$R_{cm}(p) = R_{cm}^0 + R'_{cm} p, \quad R_{c0.2}(p) = R_{c0.2}^0 + R'_{c0.2} p,$$

де  $R_{cm}^0$ ,  $R_{c0.2}^0$  – границі міцності на стискання та текучості за нормального тиску,  $R'_{cm}$ ,  $R'_{c0.2}$  – їх похідні за тиску. Для матеріалу пуансона  $R'_{cm} = 3\text{--}4$  ГПа, а  $R'_{c0.2} = 0,08\text{--}0,12$  ГПа.

Оскільки в найнавантаженішій зоні пуансонів гідростатичний тиск досягає 9 ГПа – для границі текучості матеріалу пуансонів маємо

$$R_{c0.2} = 8,11 + 0,10 \cdot 9 \approx 9,0 \text{ ГПа.}$$

Таким чином, максимальний тиск, якого можна досягти в АВТ при роботі пуансонів у пружному режимі з урахуванням їх зміцнення, становить 12 ГПа.

На основі досліджень для кубічного АВТ обґрунтовано використовувати пуансони висотою 20 мм.

## Висновки

1. Показано, що один з напрямів підвищення працездатності високонавантажених пуансонів багатопуансонних АВТ при створенні високого тиску полягає в мінімізації їх геометричних параметрів з метою зменшення негативного впливу масштабного чинника на механічні характеристики матеріалу пуансонів та спрощення технології їх виготовлення у разі високотемпературного спікання під високим тиском.

2. Досліджено методом МСЕ вплив геометричних параметрів пуансона шестипуансонного АВТ на його напружено-деформований та граничний стани при створенні тиску 15 ГПа та встановлено, що зменшення висоти пуансона в дослідженому діапазоні значень істотно не впливає на розподіл напружень у найвантаженишій області (напруження зменшуються), у той час як еквівалентні напруження в зоні поблизу поверхні контакту пуансон – опорна плита підвищуються істотно, що необхідно враховувати при виборі матеріалу опорної плити.

3. Згідно з дослідженнями впливу геометричних параметрів пуансонів багатопуансонних АВТ на їх напружено-деформований та граничний стани при створенні високого тиску можливо отримати необхідні дані для обґрунтування мінімальних розмірів пуансонів, за яких забезпечується працездатність пуансонів.

*Исследовано методом конечных элементов влияние геометрических параметров твердосплавных пуансонов кубического аппарата высокого давления на их напряженно-деформированное и предельное состояния при создании давления 15 ГПа. Показана целесообразность подобных исследований в целях обоснования минимальных размеров пуансонов, при которых обеспечивается работоспособность пуансонов.*

**Ключевые слова:** кубический аппарат высокого давления, пуансон, композиционный материал, твердый сплав, алмаз, кубический нитрид бора, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

## THE INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF PUNCHES OF CUBIC HIGH-PRESSURE APPARATUS ON THEIR STRESS-STRAIN AND LIMITING STATE AT HIGH PRESSURE CREATION

*The influence of geometrical parameters of hard-alloy punches of cube high-pressure apparatus on their stress-strain and limiting state at creation of 15 GPa pressure was investigated by the finite element method. The expediency of such studies for justification of minimal sizes of punches at which their efficiency is provided was shown.*

**Key words:** cubic high-pressure apparatus, punch, composite material, hard alloy, diamond, cubic boron nitride, finite element method, stress-strain state.

## Література

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 т. – Т. 1. Синтез алмаза и подобных материалов / Отв. ред. А. А. Шульженко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украина, 2003. – 320 с.
2. Чепуров А. И., Федоров И. И., Сонин В. М. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования / РАН, Сиб. отделение, Объед. институт геологии, геофизики и минералогии, КТИ монокристаллов; науч. ред. А. И. Чепуров, А. Г. Кирдяшкин. – Новосибирск: Издательство СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 196 с.
3. Sumiya H. Novel development of high-pressure synthetic diamond // Ultra-hard nonopolycrystalline diamond, SEI Technical Rev. – 2012. – 74. – P. 15–30.
4. Sumiya H., Uesaka S., Satoh S. Mechanical properties of high purity polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering method // J. Mater. Sci. – 2000. – 35. – P. 1181–1186.



5. Durham William B., Getting Ivan C., Weidner Donald J. The deformation-DIA: A new apparatus for high temperature triaxial deformation to pressures up to 15 GPa // *Rev. of sci. instruments.* – 2003. – 74, N 6. – P. 3002–3011.
6. Takaaki Kawazoe, Ikuya Yamada. High pressure synthesis at 10 GPa and 1400 K using a small cubic anvil apparatus with a multi-anvil 6–6 system // *High Pres. Res.* – 2012. – 32, N 3. – P. 347–353.
7. Development of the Multi-anvil Assembly 6–6 for DIA and D–DIA type high-pressure apparatuses / Norimasa Nishiyama, Yanbin Wang, Takeshi Sanehira et al. // *High Pres. Res.* – 2008. – 28, N 3. – P. 307–314.
8. Двухступенчатый аппарат для создания давлений мегабарного диапазона и высоких температур / А. И. Боримский, А. А. Лещук, В. Н. Крикун и др. // *Тр. 5-й междунар. Самсоновск. конф. «Материаловедение тугоплавких соединений»*, г. Киев, 24–25 мая 2016 г.: – К.: ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины, 2016. – С. 32.
9. A new large-volume multianvil system / D.J. Frost, B. T. Poe, R. G. Tronnes et al. // *Phys. of the Earth and Planet. Int.* – 2004. – 143 – 144. – P. 507–514.
10. Tetsuo Irifune, Futoshi Isobe, Toru Shinmei. A novel large-volume Kawai-type apparatus and its application to the synthesis of sintered bodies of nano-polycrystalline diamond // *Phys. of the Earth and Planet. Int.* – 2014. – 228. – P. 255–261.
11. Walker D., Carpenter M.A., Hitch C.M.. Some simplifications to multianvil devices for high pressure experiments // *Amer. Mineralog.* – 1990. – 75. – N 9 – 10. – P. 1020–1028.
12. Materials and supplies for multi-anvil research [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://multianvil.asu.edu/Materials%20and%20Supplies/MaterialsAndSupplies.html>
13. Shuangmeng Zhai, Eiji Ito. Recent advances of high-pressure generation in a multianvil apparatus using sintered diamond anvils // *Geosci. Front.* – 2011. 2, N 1. – P. 101–106.
14. Versimax Composite for high pressure research anvils [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.hyperion.sandvik.com/Documents/Product%20Literature/Versimax%20Composite%20\(inc%20wire%20dies\)/Versimax%20composite%20anvil%20case%20study.pdf](http://www.hyperion.sandvik.com/Documents/Product%20Literature/Versimax%20Composite%20(inc%20wire%20dies)/Versimax%20composite%20anvil%20case%20study.pdf).
15. Поликристаллические материалы на основе кубического нитрида бора / Н. В. Новиков, А. А. Шульженко, Н. П. Беженар и др. // *Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: сб. науч. тр.; – Отв. ред. Н. В. Новиков.* – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2005. – С. 122–128.
16. Полотняк С. Б. Методика чисельного моделювання процесів мартенситних фазових перетворень у малих обсягах матеріалів при деформуванні на алмазних ковадлах // *Сверхтвердые матер.* – 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. 4-th Conf. Numeric. Methods in Mech. 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. Полотняк С. Б., Боримський О. І. Чисельне моделювання механічного стану багатопуансонного двоступінчастого апарату високого тиску // *Сверхтвердые матер.* – 2016. – № 2. – С. 26–39.
20. Кифер Р., Бенезовский Ф. Твердые сплавы. – М.: Металлургия, 1971. – 392 с.
21. Tungaloy Company [Электронный ресурс] – <http://www.tungaloy.co.jp/ttj/english/index.html>.
22. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984. – 328 с.

23. 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 23.05.17

УДК 621.921:661.65

**І. О. Боримський**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ*

### **СИНТЕЗ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ЗЕРЕН НА ОСНОВІ ЩІЛЬНИХ МОДИФІКАЦІЙ НІТРИДУ БОРУ**

*Досліджено вплив на процес синтезу кубічного нітриду бору складу додатково введених до реакційної шихти зерен щільних модифікацій на основі нітриду бору. Встановлено склад зерен, за якого можливо отримати двошарові компакти, які складаються із внутрішньої вкритої шаром з кубічного нітриду бору полікристалічної частини, та склади зерен, за яких збільшується вміст у продукті синтезу зерен дрібних фракцій.*

**Ключові слова:** *кубічний нітрид бору, зерно, додатковий центр кристалізації, полікристал, апарат високого тиску.*

#### **Вступ**

Синтез кубічного нітриду бору (сBN) здійснюють при високому тиску і високій температурі в області його термодинамічної стабільності [1]. Як компоненти реакційної шихти при синтезі кристалів сBN використовують різні бор- і азотвмісні сполуки (зазвичай гексагональний нітрид бору – hBN), а також різні за складом ініціатори і модифікатори перетворення hBN→сBN. Для синтезу сBN застосовують апарати високого тиску (АВТ) різних конструкцій [2]. Отримані в результаті синтезу зерна сBN мають різні форми, широкий діапазон розмірів і різні фізико-механічними характеристиками.

До перспективних напрямів синтезу сBN належить введення до складу вихідної реакційної шихти додаткових центрів кристалізації (д.ц.к.) [3; 4]. Використання д.ц.к. збільшує як вміст у продукті синтезу великих зерен сBN, так і ступінь перетворення hBN→сBN.

Нині як д.ц.к. при синтезі сBN використовують здебільшого порошки сBN переважно у вигляді монокристалів різної зернистості [4].

Принципову можливість використання при синтезі сBN як д.ц.к. зерен щільних полікристалічних модифікацій на основі нітриду бору показано в [5].

У даній роботі подано результати розширених досліджень у зазначеному напрямі.

#### **Методика досліджень**

У дослідженнях як д.ц.к. використовували зерна щільних модифікацій на основі нітриду бору, отримані дробленням таких компактів, як гексаніт-А (у подальшому – гексаніт) [6], у досліджуваних зразках якого вміст вюрцитної модифікації нітриду бору (wBN) становив 20% мас.; кіборит-1 (у подальшому – кіборит) [7]; компакти, отримані спіканням при тиску ~7 ГПа мікропорошків КМ14/10, КМ3/1 і КМ0,5/0; компакт, отриманий прямим фазовим перетворенням піролітичного нітриду бору на його кубічну модифікацію.