

**А. В. Бурченя\*, С. О. Івахненко, В. В. Лисаковський,  
Т. В. Коваленко, О. В. Савіцький, В. Ю. Клочок**  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України, м. Київ, Україна  
\*burcheniaav@gmail.com

## **Використання диференційного методу визначення квазігдростатичних тисків в комірках шестипуансонних пресів**

*Описано методичні підходи до вимірювання високих квазігдростатичних тисків в комірках шестипуансонних пресів з врахуванням впливу високих температур до 1400 °С та побудована комбінована характеристика навантаження  $p = f(Q)$ , де  $p$  – значення тиску в квазігдростатичній комірці,  $Q$  – зусилля плунжерної системи. Вимірювання тиску в осередку стиснення базується на визначенні різниці температур поліморфних перетворень у  $Fe(\alpha \rightarrow \gamma)$  і  $Co(\alpha \rightarrow \beta)$  та визначенні різниці температур плавлення між  $Cu$  та  $Ag$  з використанням резистометрії за тисків 4–7 ГПа і температур 500–700 °С для датчиків  $Fe-Co$  та 1150–1400 °С для датчиків  $Cu-Ag$ . Для визначення високих температур в характеристичних точках ростових комірок шестипуансонних пресів розроблено методику виготовлення термопарних блоків з використанням хлористого цезію в якості електроізоляційного середовища та термопар  $Pt/PtRh_{10}$  і  $PtRh_6/PtRh_{30}$ ; сформульовано базові вимоги до їх виготовлення, що забезпечують надійну електроізоляцію термопарних дротів та дозволяють проводити безперервний контроль температури протягом часу циклів вирошування до 200 год та більше. Проведено оцінку впливу паразитних ТЕРС на показання термопар, що виникають в результаті впливу високих тисків та використання додаткового контакту через твердосплавні пуансони; побудовано калібровочні криві, які дозволяють підвищити точність вимірювання. Використання запропонованих підходів до визначення тисків і температур в ростових комірках шестипуансонних кубічних АВТ є особливо корисними при вирошуванні крупних монокристалів алмаза масою понад 10 каратів.*

**Ключові слова:** апарат високого тиску, монокристали алмазу, високий тиск, висока температура, термопара, резистивний датчики тиску, комбінована характеристика навантаження.

### **ВСТУП**

Отримання надтвердих матеріалів (моно- та шліфпорошки алмазу, cBN) в лабораторних умовах виконується в умовах високих тисків (4–20 ГПа) та температур (1300–2000 °С). Створення необхідних  $p, T$ -умов синтезу відбувається за рахунок використання апаратів високого тиску (АВТ) різноманітної конструкції (белт, БАРС, тороїд, кубічні АВТ) [1–4].

Найбільш перспективними з точки зору експлуатаційних та економічних показників є шестипуансонні кубічні апарати високого тиску китайського виробництва [5], які знайшли широке застосування у сфері отримання надтвердих матеріалів, зокрема в області отримання алмазу. Висока популяр-

ність АВТ такого типу обумовлена простотою експлуатації, значно більшими об'ємами камер високого тиску в порівнянні з іншими типами АВТ, високою продуктивністю та ін. Однак існують значні труднощі при виборі необхідних термодинамічних параметрів для отримання надтвердих матеріалів, пов'язані з відсутністю в літературних джерелах даних з дослідження характеристик навантаження з врахуванням впливу високих температур, що значно затрудняє їх експлуатацію. Це обумовлено особливістю навантаження шестипуансонних пресів та конструкцією камери високого тиску (стадії підвищення тиску в гідросистемах плунжерів та нагріву ростової комірки частково суміщаються), а також складністю прямого підключення датчиків тиску і температури до контрольно-виміральної апаратури.

Стандартна калібровка тиску в ростових комірках АВТ базується на визначенні точок поліморфних перетворень за кімнатних температур у вісмуті (Ві I–II –  $2,54 \pm 0,1$  ГПа, Ві III–V –  $7,7 \pm 0,3$  ГПа), талії (Тl II–III –  $3,67 \pm 0,3$  ГПа), барії (Ba I–II –  $5,5 \pm 1$  ГПа) [6], перетворень напівпровідник-метал у селеніді свинцю (PbSe –  $4,23 \pm 1$  ГПа) і телурид свинцю (PbTe –  $4,97 \pm 1$  ГПа) [7]. Використання такого підходу до визначення тисків має значний недолік, пов'язаний з відсутністю поправки впливу температури. Так, за температури  $1000\text{--}1400^\circ$  тиск в ростовій комірці може відрізнятись на 30–40 % [4].

Температуру процесів отримання надтвердих матеріалів зазвичай визначають за допомогою платино-родієвих чи вольфрам-ренієвих термопар. Спай термопар розміщують в характеристичній точці ростової комірки; підключення термопари до контрольно-виміральної апаратури в переважній більшості випадків потребує створення додаткового контакту через елементи системи навантаження. При використанні такої схеми підключення термопарних дротів виникає необхідність врахування паразитних ТЕРС, що виникають в місцях додаткових контактів і можуть суттєво спотворювати показання термопар [8].

В зв'язку з вище вказаними особливостями вимірювання тисків та температур виникає необхідність розробки нових методичних підходів до проведення такого роду вимірювань, особливо при роботі з шестипуансонними апаратами високого тиску кубічного типу.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для проведення досліджень за тисків 4,5–7 ГПа та температур 800–1400 °С використовували шестипуансонний апарат високого тиску кубічного типу моделі CS-VII з діаметром плунжера 560 мм та зусиллям навантаження  $6 \times 28,5$  МН (рис. 1). Створення квазігідростатичних тисків відбувається за рахунок здавлювання пірофілітового контейнера твердосплавними пуансонами з розмірами нажимної площадки пуансона  $46 \times 46$  мм (рис. 2, а). Ростова комірка у формі куба з розмірами  $58 \times 58 \times 58$  мм оснащена циліндричним отвором діаметром 44 мм, де розміщували резистивну систему нагріву з ростовим шаром (рис. 2, б). Розігрів ростової комірки виконували шляхом пропускання електричного струму через верхній та нижній пуансони; бокові пуансони при цьому ізолювані від системи нагріву.

Керування зусиллям навантаження та температурою нагріву здійснювали за допомогою програмованого логічного контролера VIPA S300, до складу якого входили блоки PID стабілізації та керування тиском, потужністю нагріву, системою охолодження і блок вводу-виводу даних Weintek 8350 Xi. Система передбачає можливість задавання параметрів з використанням циклограм навантаження та нагріву і дозволяє функціонувати за даними електрич-

ного струму та напруги на вторинній обмотці силового трансформатора; точність стабілізації потужності складає  $\pm 0,1\%$  ( $\pm 5$  Вт).

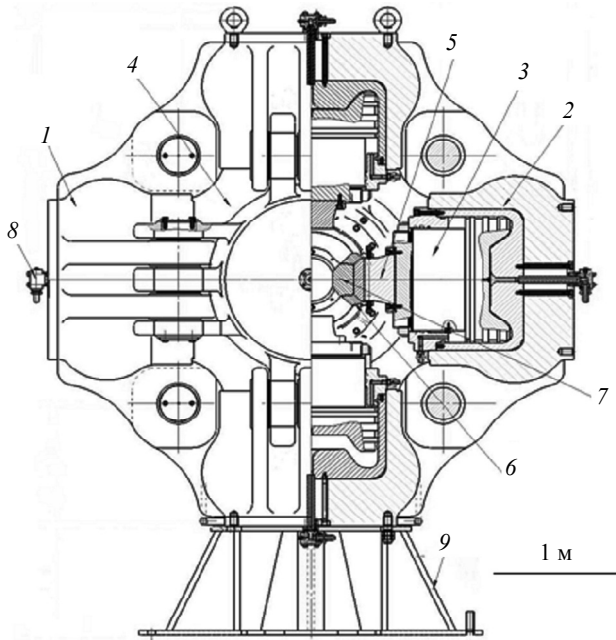


Рис. 1. Загальний вид та переріз шестипуансонного преса CS-VII: 1 – станина преса; 2 – циліндр високого тиску; 3 – плунжер; 4 – захисний екран; 5 – опорні плити; 6 – обойма охолоджуюча; 7 – пуансон; 8 – клапан для підводу масла та відведення повітря; 9 – опорна підставка.

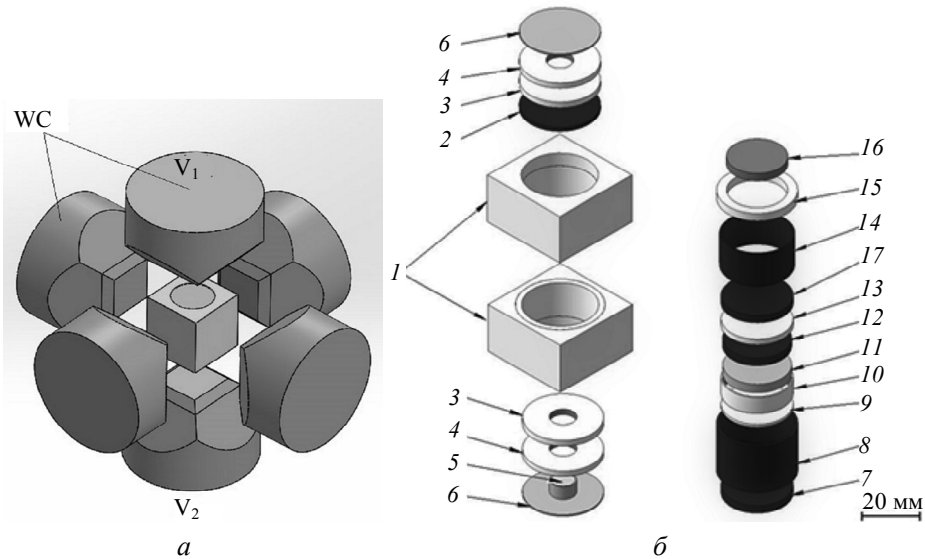


Рис. 2. Камера (а) та комірка (б) високого тиску: 1 – контейнер високого тиску, що складається з двох пірофілітових  $(\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{OH}_2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}))$  напівкубів зі сталевими струмопідводами (6), струморозподільчим диском (2) та теплоізоляторами, виготовленими у формі кілець (3), та дисків (5) з доломіту  $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$  та пірофіліту (4, 6), 7, 17 – графітовий струморозподільчий диск; 8 – втулка теплоізолююча на основі CsCl; 9, 13 – диски з CsCl; 10 – кільце з CsCl; 11 – сплав-розчинник; 12 – джерело вуглецю; 14 – циліндричний графітовий нагрівач; 15 – теплоізолююче кільце з CsCl-ZrO<sub>2</sub>; 16 – нагрівальний елемент з суміші графіту з ZrO<sub>2</sub>.

Для контролю температури в ростових комірках було використано термопари Pt/PtRh<sub>10</sub> та PtRh<sub>6</sub>/PtRh<sub>30</sub> з діаметром термоелектродів 0,3 мм; для утворення спаю дроти з'єднувались шляхом електрозварювання за спеціальною методикою. Перед використанням підготовлену термопару з визначеною довжиною термоелектродів запресовували в циліндр з CsCl, довжина якого становила 20 мм, а діаметр – 3 мм. Термопарний датчик розміщували у циліндрі таким чином, щоб спай був ізольований від площини циліндру прошарком з CsCl товщиною 0,1–0,15 мм; термоелектроди розміщували паралельно осі циліндру, їх було надійно заізовано хлористим цезієм як між собою, так і відносно циліндричної поверхні, товщина ізоляції складала 0,6–0,9 мм. Вимірювальні кінці термопарного датчика виходили з тіла циліндра через другу площину основи, а кінці термопари без ізоляції становили ~ 20 мм. У ростовій комірці термопарні блоки (запресовані у CsCl термопарні датчики) розміщували в отворах, які попередньо виготовляли шляхом засверлювання інструментом необхідного діаметра. Вимірювальний кінець термопарного блока зі спаєм через отвори в контейнері підводили до місця контакту з характеричною точкою, що розташована у ростовому об'ємі.

Кінці термопарних дротів виходять з термопарного блоку після розміщення в приготованих заздалегідь пазах таким чином, щоб забезпечити контакт з робочими поверхнями пуансонів. Через чотири бокові пуансони виводили сигнали ТЕРС термопари з камери високого тиску, а через компенсаційні дроти підводили до вимірювального приладу, тому в місцях контакту термопарних дротів з твердим сплавом, з якого виготовлено пуансони, а також в місцях контакту пуансонів з подовжуючими чи компенсаційними дротами виникають паразитні ТЕРС, що змінюють калібрувальні характеристики.

Резистивний контроль тиску при високих температурах проводили за лініями поліморфних перетворень  $\alpha \rightarrow \beta$ -Co і  $\alpha \rightarrow \gamma$ -Fe. Залежність  $\alpha \rightarrow \gamma$  переходу в залізі та кобальті від тиску достатньо точно визначено в [12–15].

Для визначення диференційних різниць  $\Delta T_d^{Cu-Ag}$  як функції тиску для кривих плавлення Ag і Cu було використано експериментальні дані з [16], які були отримані з використанням прецензійної апаратури типу поршень-циліндр.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### Вимірювання температур в комірці високого тиску

Для моделювання величин та приблизної оцінки впливу паразитних ТЕРС при атмосферному тиску було проведено вимірювання температури у лабораторній печі від 80–100°C до ~ 800 °C з використанням двох вимірювальних ланцюгів (рис. 3).

#### Ланцюг 1.

Термопару Pt/PtRh<sub>10</sub> чи PtRh<sub>6</sub>/PtRh<sub>30</sub>, яка мала спай, розміщений у ізотермічній зоні печі, під'єднували безпосередньо до вимірювального приладу кінцями необхідної полярності.

#### Ланцюг 2.

Вимірювальну термопару з'єднували з твердим сплавом ВК6, який моделював твердосплавні пуансони преса, шляхом механічного кріплення при умові варіювання температур цих контактів в межах 100–350 °C (рис. 3); при цьому твердосплавні моделі пуансонів знаходилися при кімнатній температурі в місцях з'єднання компенсаційних дротів, які було підключено до вимірювального приладу.

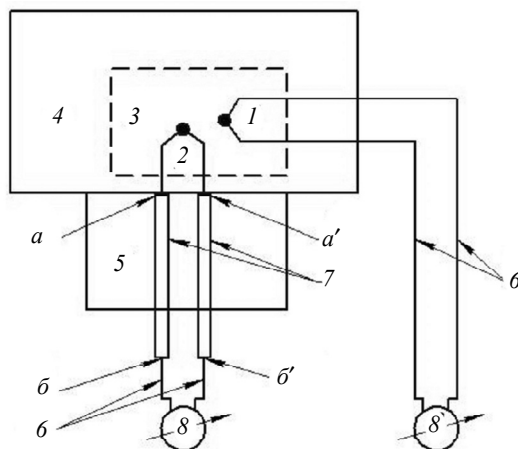


Рис 3. Схема вимірювання температури з використанням термопар  $Pt/PtRh_{10}$  та  $PtRh_6/PtRh_{30}$  з безпосереднім підключенням до приладів контролю та з подовженням через твердосплавні деталі використаної моделі і компенсаційні подовжуючі дроти: 1, 2 – спаї термопар; 3 – ізотермічна зона в печі нагріву; 4 – основна піч нагрівання; 5 – окрема піч для розміщення елементів з ВК6 та їх з'єднання з термопарними дротами; 6 – твердосплавні циліндри (діаметр – 4 мм, довжина – 200 мм); 7 – компенсаційні подовжуючі дроти  $Cu$  (діаметр – 0,3 мм, довжина – 600–800 мм); 8 – прилади вимірювання (мультиметр цифровий М3500А);  $a, a'$  – місця механічного з'єднання термопарних дротів з “моделями” пуансонів;  $b, b'$  – місця механічного з'єднання “моделей” пуансонів компенсаційними подовжуючими дротами при кімнатній температурі.

Спаї обох термопар знаходилися в ізотермічній зоні печі при однаковій температурі і тому, порівнюючи показники вимірювальних приладів від сигналів обох термопар, можна було оцінити значення паразитних ТЕРС, що виникають у ланцюгу 2 (рис. 3) і похибку вимірювання реальної температури. Результати вимірювань з використанням термопар  $Pt/PtRh_{10}$  та  $PtRh_6/PtRh_{30}$  представлено на рис. 4 і 5. Отримані експериментальні дані вимірювання з використанням термопар  $Pt/PtRh_{10}$  і  $PtRh_6/PtRh_{30}$  показують, що для значення температури  $800\text{ }^{\circ}C$  в ізотермічній зоні печі похибки досягають 160 і 80 град відповідно.

Для термопар  $Pt/PtRh_{10}$  було вивчено вплив тисків  $p \leq 5$  ГПа на ТЕРС [9]; використання цих даних дозволяє підвищити точність вимірювань на  $30\text{--}40\text{ }^{\circ}C$  (рис. 4).

Для термопар  $PtRh_6/PtRh_{30}$  вплив високих тисків приведено на рис. 5. Враховуючи також те, що чутливість цієї термопарі приблизно в 1,5 рази менша ніж чутливість  $Pt/PtRh_{10}$ , а також ту обставину, що дифузія при високих температурах компонентів термоелектродів один в одного більша, ніж для платино-платинородієвого датчика [10], можна зробити висновки, що для вимірювання температур в ростових комірках шестипуансонних пресових установках термопара  $Pt/PtRh_{10}$  забезпечує значно вищу точність.

Одержані експериментальні дані та їх обробка з урахуванням впливу високого тиску на ТЕРС та паразитних ТЕРС, що виникають за рахунок подовження дротів термопар  $Pt/PtRh_{10}$ , було використано для проведення вимірювань температури в діапазоні  $1000\text{--}1400\text{ }^{\circ}C$  і тиску  $4\text{--}6$  ГПа.

### Вимірювання тиску в шестипуансонних пресах

Як показує вивчення проблеми вимірювання тисків в шестипуансонних АВТ, визначення залежності тиску від зусилля плунжерної системи потребує

побудови комбінованої характеристики навантаження – частково при кімнатній температурі, частково при підвищеній температурі контейнера.

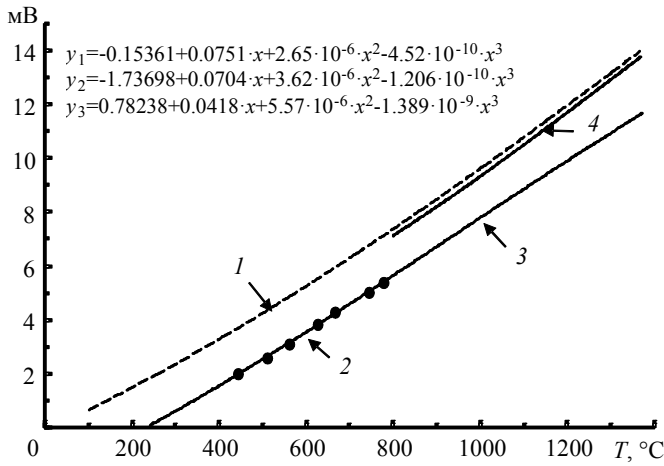


Рис. 4. Результати вимірювання ТЕРС термопари Pt/PtRh<sub>10</sub>, яку з'єднують з приладом шляхом контакту через моделі пуансонів та компенсаційні подовжуючі дроти відповідно до схеми рис. 3: 1 – стандартне калібрування [11]; 2 – експериментальні дані, одержані за допомогою схеми вимірювання при атмосферному тиску згідно з рис. 3 при 300 °С; 3 – їх інтерполяція у вигляді полінома третього ступеня в діапазоні 250–1400 °С; 4 – зміна стандартного калібрування в результаті впливу високих тисків на ТЕРС термопари Pt/PtRh<sub>10</sub> ( $p = 5$  ГПа) [9]; • – експериментальні точки.

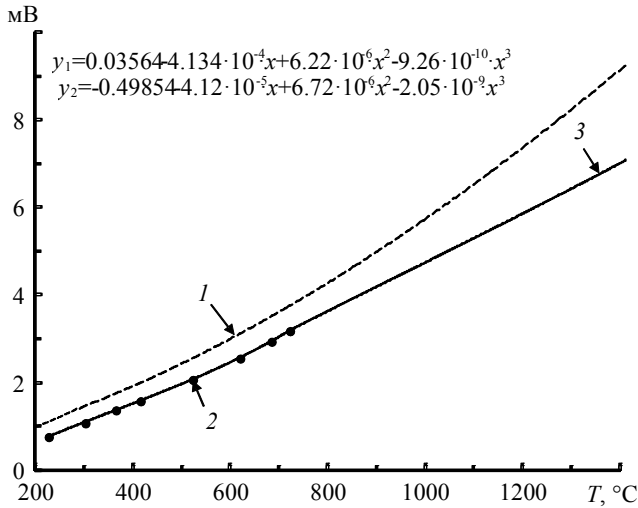


Рис. 5. Результати вимірювання ТЕРС термопари PtRh<sub>6</sub>/PtRh<sub>30</sub>, яка підключається до приладу шляхом контакту через моделі пуансонів та компенсаційні подовжуючі дроти відповідно до схеми рис. 3: 1 – стандартна калібровка [11]; 2 – експериментальні дані, одержані за допомогою схеми вимірювання при атмосферному тиску згідно з рис. 3 при 300 °С; 3 – їх інтерполяція у вигляді полінома третього ступеня в діапазоні 250–1400 °С при атмосферному тиску; • – експериментальні точки.

При кімнатній температурі було використано фіксовані точки вісмуту Ві І–ІІ (2,54 ГПа) та талію Тl ІІ–ІІІ (3,67 ГПа). Для високих температур до 1300–1400 °С було використано диференційний метод за різницями  $\Delta T_d$  між температурами фазових перетворень  $T_{\alpha-\beta}^{\text{Co}} - T_{\alpha-\gamma}^{\text{Fe}}$  [12, 13] і  $\Delta T_{\text{пл}}^{\text{Cu-Ag}}$  [13], вихідні

дані для яких було раніше визначено експериментально [14]. Різницю  $\Delta T_d$  вимірювали за допомогою резистометрії двокінцевим методом. Для таких вимірювань було сконструйовано спеціальні датчики, схему яких приведено на рис. 6, 7. Датчик Co–Fe (рис. 6) представляв собою з'єднані послідовно шляхом механічного скріплення дротів кобальту та заліза ( $\varnothing 0,2$  мм,  $l = 12$ – $15$  мм, чистота 99,99 %), які виводили з комірки за допомогою мідних дротів ( $\varnothing 0,5$  мм, чистота 99,999 %) та приєднували до пуансонів з мінімальним перетіканнями контейнера.

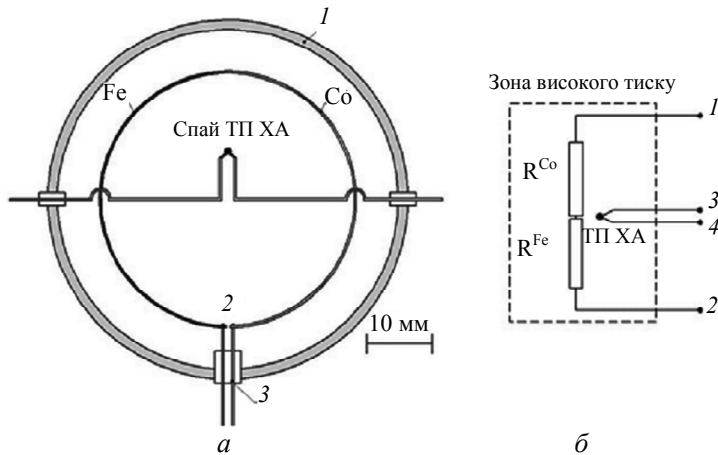


Рис. 6. Схема вимірювання  $\Delta T_d$  методом резистометрії з використанням твердофазових (поліморфних) переходів в Co і Fe: а – переріз нагрівача з ростовою коміркою: 1 – нагрівач; 2 – з'єднання Co і Fe з мідними електропідводами; 3 – ізоляція електропідводів від нагрівача; б – принципова електрична схема з'єднань для проведення вимірювань; 1, 2 – підключення датчика Co–Fe до пуансонів; 3, 4 – виводи до пуансонів терморпарних дротів.

Спай термопары хромель-алюмель був розташований в одній площині з дротами з Co та Fe, термопарні проводи виводили через графітовий нагрівач за допомогою трубчатої ізоляції і мали безпосередній контакт з пуансонами. Принципову електричну схему датчика Co–Fe наведено на рис. 6, б. Датчик Cu–Ag (рис. 7) представляв собою два паралельно з'єднані через графітовий перехідник дроти з міді та срібла ( $\varnothing 0,2$  мм,  $l = 15$  мм, чистота 99,999 %), які за допомогою графітового перехідника мали механічний контакт з платиновим дротом ( $\varnothing 0,3$  мм, чистотою 99,999 %) для підключення з пуансонами преса. Принципову електричну схему наведено на рис. 7, б.

Використання графітового перехідника обумовлено необхідністю запобігання дифузії та сплавленню Cu, Ag та Pt між собою при високих ( $\sim 1400$  °C) температурах. Датчики Co–Fe та Cu–Ag розміщували між двома дисками з CsCl, які у такому випадку разом з датчиком тиску займали місце між деталями 9 і 13 у комірці (див. рис. 2).

Побудову комбінованої характеристики проводили при кімнатній температурі до 48 МПа та при високих температурах 500–700 °C ( $\Delta T_d^{Co-Fe}$ ) і 1150–1400 °C ( $\Delta T_d^{Cu-Ag}$ ). Фіксовані точки 2,54 ГПа і 3,67 ГПа визначали чотирьохкінцевим методом за допомогою резистометрії при швидкості навантаження 1,1 МПа/хв; максимальні значення зусиль преса та тиску в гідросистемах плунжерів склали 28,5 МН та 750 МПа відповідно [15].

За результатами вимірювань з використанням датчиків запропонованої конструкції було побудовано комбіновану характеристику навантаження

шестипуансонного кубічного преса мод. CS-VII з врахуванням впливу високих (до 1400 °С) температур (рис. 8).

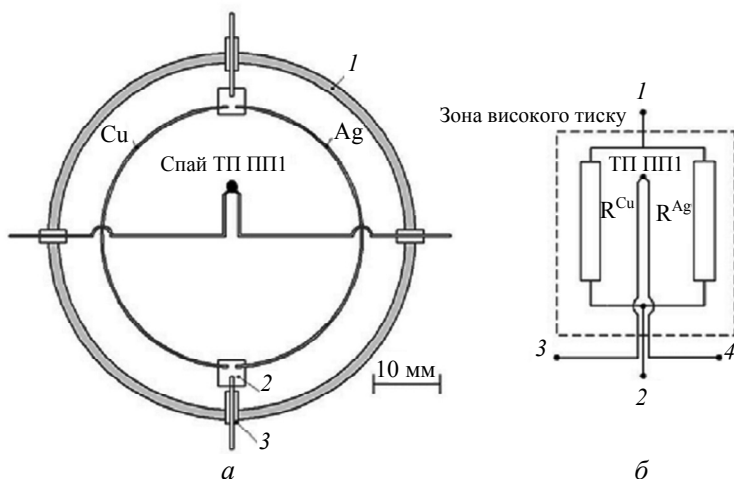


Рис. 7. Схема вимірювання  $\Delta T_d$  методом резистометрії з використанням кривих плавлення Cu і Ag: *a* – переріз нагрівача з ростовою коміркою; 1 – нагрівач; 2 – контактор з графіту, до якого приєднані механічно дроти Cu, Ag та Pt; 3 – електроконтакт з Pt для з’єднання з пуансоном; *б* – принципова електрична схема з’єднань, для проведення вимірювань; 1, 2 – підключення датчика Cu–Ag до пуансонів; 3, 4 – виводи до пуансонів термопарних дровтів.

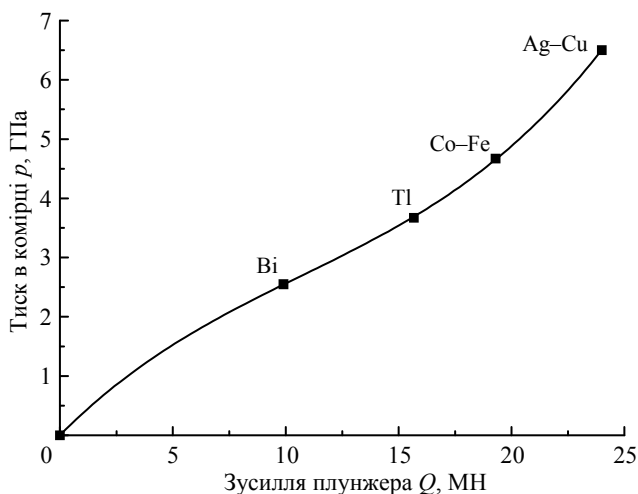


Рис. 8. Характеристика навантаження шестипуансонного преса при використанні фіксованих точок фазових перетворень в Bi і Tl при кімнатній температурі та диференційних різниць температур  $\text{Fe}^{\alpha-\gamma}-\text{Co}^{\alpha-\beta}$ ,  $\text{Ag}^{\text{пл}}-\text{Cu}^{\text{пл}}$ :  $\Delta T_d^{\text{Co-Fe}} = 118$  °С,  $p = 4,61$  ГПа;  $\Delta T_d^{\text{Cu-Ag}} = 33$  °С,  $p = 5,42$  ГПа.

## ВИСНОВКИ

Для вимірювання температури при вирощуванні монокристалів алмазу в ростовій комірці шестипуансонного преса CS-VII з використанням термопари сформульовано наступні вимоги для розміщення спаю термопари: товщина шару теплоізоляції між спаєм термопари і металом розчинником не повинна перевищувати 0,2 мм; характеристична точка локалізації спаю повинна зна-



ходиться у безпосередній близькості від зони початку кристалізації на затравках; однорідність температурного поля повинна змінюватись не більш ніж на 1–2 % у площині контакту затравочних поверхонь з розчинником.

Використання запропонованих датчиків в ході проведення циклів вирощування дозволяє проводити безперервний контроль тиску та температури протягом всього часу циклів вирощування.

Запропоновані методичні підходи до визначення тисків та температур в ростових комірка шестипуансонних кубічних АВТ є особливо корисними при вирощуванні крупних монокристалів алмазу масою понад 10 каратів.

## ФІНАНСУВАННЯ

Дана робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт № 2020.02/0160 “Розробка нових розчинників вуглецю для вирощування монокристалів алмаза в області термодинамічної стабільності з контрольованим вмістом домішок азоту та бору з ціллю створення концептуальних конструкцій електронних приладів”.

A. V. Burchenia, S. O. Ivakhnenko, V. V. Lysakovskiy,  
T. V. Kovalenko, O. V. Savitskiy, V. Yu. Klochok  
Bakul Institute for Superhard Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
Using the differential method for determining quasi-hydrostatic  
pressures in the cells of six-punch presses

*The methodical approaches of high quasi-hydrostatic pressure measuring in six-punch apparatus are described taking account the influence of high temperatures up to 1400 °; combined load characteristic  $p = f(Q)$  was constructed, where  $p$  – pressure value in quasi-hydrostatic cell,  $Q$  – plunger system force. The pressure measurement in the compression value based on temperature different determining of polymorphic transformation in Fe( $\alpha \rightarrow \gamma$ ) and Co( $\alpha \rightarrow \beta$ ) and melting temperature determining in Cu and Ag by resistivity using at pressure 4–7 GPa and temperature 500–700 °C for Fe–Co sensors and 1150–1400 °C for Cu–Ag sensors. To determine high temperature at the characteristic growth cell point of six-anvil apparatus, a manufacturing method of thermocouple was developed by using cesium chloride as an electrical insulation and Pt/PtRh<sub>10</sub> and PtRh<sub>6</sub>/PtRh<sub>30</sub> thermocouples. Basic requirement for their production are formulated, which provide reliable electrical thermocouple wires insulation and allow continuous temperature control during growing time up to 200 hours and more. Estimation of parasitic T.E.M.F. influence on the thermocouple readings was made that occur as a result of exposure to high pressure and use of additional contact through WC anvils; calibration curves are built, with allow to increase measurement accuracy. The use of proposed approaches of pressure and temperature determination on the six-anvil apparatus growth cell are especially useful in the field of large single diamond crystal growing weighing more than 10 carats.*

**Keywords:** high pressure apparatus, diamond single crystal, high pressure, high temperature, thermocouple, resistive pressure sensor, combined load characteristic.

1. Kawai N., Endo S. The generation of ultrahigh hydrostatic pressure by a split shape apparatus. *Rev. Sci. Instrum.* 1970. Vol. 41. P. 1178–1181.
2. Kawazoe T., Nishiyama N., Nishihara Y., Irifune T. Pressure generation to 25 GPa using a cubic anvil apparatus with a multi-anvil 6-6 assembly. *High Pres. Res.* 2010. Vol. 30, is. 1. P. 167–174.
3. Shtskiy A., Borzdov Yu.M., Litasov K.D., Ohtani E. Khokhryakov A.F., Pal'yanov Yu.N., Katsura T. Pressless split-share apparatus equipped with scaled-up Kawai-cell for mineralogical studies at 10–20 GPa. *Am. Mineral.* 2011. Vol. 96. P. 541–548.
4. Liebermann R.C. Multi-anvil, high-pressure apparatus: a half-century of development and progress. *High Pres. Res.* 2011. Vol. 31, is. 4. P. 493–532.

5. Guilin Guiye Machinery Co., Ltd Cubic Press Machine Catalog. Access point: <https://glguiye.en.made-in-china.com/Product-Catalogs>
6. Танков Е.Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. Москва: Наука, 1979. 192 с.
7. Литвин Ю.А., Ишбулатов Р.А. Давления при высоких температурах в твердофазовом аппарате “наковальня с лункой”. *Приборы и техника эксперимента*. 1975. № 4. С. 36–38.
8. Robert C. Liebermann Multi-anvil, high pressure apparatus: a half-century of development and progress. *High Pres. Res.* 2011. Vol. 31, no. 4. P. 493–532.
9. Масленко Ю.С., Мытник Ю.В., Педченко О.М., Янчук В.А., Янчук В.В. Стационарные погрешности измерения температуры в реакционной ячейке АДД. *Сверхтв. материалы*. 1985. № 3. С. 14–18.
10. Приборы и методы физического металловедения / под ред. Ф. Вейнберга. Москва: Мир, 1973. 427 с.
11. Дріт з платини та платинородієвих сплавів для термоелектричних перетворювачів. Технічні умови : ДСТУ 10821:2007. [Чинний від 01–01–2010].
12. Claussen W. F. High Pressure Measurement / A. A. Giardini, E. C. Lloyd [eds.]. Washington: Butterworths, 1963. 125 p.
13. Bundy F.P., Strong H.M. Behavior of metals at high temperature and pressures. *Solid State Phys.* 1962. Vol. 13. P. 81–146.
14. Ivakhnenko S., Lysakovskiy V., Savitskiy O., Burchenia A. Determining high quasihydrostatic pressure up to 7 GPa at temperature to 1400° using resistive sensors. *East.-Eur. J. Enterprise Technol.* 2019. Vol. 3, no. 5. P. 13–20.
15. Пат. на корисну модель 132612 Україна. Способ калибровки высокого давления до 6,5 ГПа в контейнерах с квазигидростатическими передающими средами шестипуансонных кубических прессов. С.А. Ивахненко, О.А. Заневский, В.В. Лысаковский, А.В Савицкий, В.А. Каленчук, А.В. Бурченя, И.В. Петров. Бюл. № 5 від 11.03.2019.

Надійшла до редакції 07.12.20

Після доопрацювання 07.12.20

Прийнята до опублікування 21.12.20