

2. Nikitin, Yu. I., Uman, S. M., Kobernichenko, L. V., & Martynova L. M. (1992). *Poroshki i pasty iz sinteticheskikhalmazov [Powders and pastes made of synthetic diamonds]*. Naukova dumka [in Russian].
3. Rudenko, A. P., Kulakova, I. I., Skvorzova, V. L., et al. (1984). Vliianie katalizatorov na vzaimodeistviealmazov s gazovymi i zhydkimi sredami. [Influence of catalysts on the interaction of diamonds with gaseous and liquid media]. *Vzaimodeistviealmazov s gazovymi i zhydkimi sredami – Interaction of diamonds with gaseous and liquid media*. (p. 58–74). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
4. Sizonenko, O. N., Oleinik, N. A., Petasyuk, G. A., et al. (2013). Vliianie elektrorozriadnoi obrabotkialmaznykh poroshkov na izmenenie ich fiziko-mechanicheskikh charakteristik [Influence of electrodischarge treatment of diamond powders on changes in their physical and mechanical characteristics]. *Porochkovaia metallurgiiia – Powder metallurgy*, 7/8, 3–8. [in Russian].
5. *Poroshkialmazni syntetychni.Zahalni tekhnichni umovy.[Synthetic diamond powders. General technical conditions]*. (DSTU 3292-95).(1997). Kyiv: Derzhstandart of Ukraine. [in Ukrainian].
6. Gregg, S., & Sing, K. (1984). *Adsorbziia, udelnaia poverchnost, poristocst [Adsorption, surface area, porosity]*. Mir [in Russian].

УДК 62-987:621.921.34

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-196-206

**А.В. Бурчєня**, канд. техн. наук; **О.В. Савіцький**; **В.В. Лисаковський**, д-р. техн. наук;  
**С.О. Івахненко**, член-кор. НАН України; **Т.В. Коваленко**, канд. техн. наук;  
**С.М. Іванченко**, аспірант

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України  
вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, Україна; [Burcheniaav@gmail.com](mailto:Burcheniaav@gmail.com)*

## **РОЗВИТОК ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ШЕСТИПУАНСОННИХ АПАРАТІВ ВИСОКОГО ТИСКУ КУБІЧНОГО ТИПУ**

*Представлено короткий опис історії створення та розвитку багатопуансонних апаратів високого тиску (АВТ), починаючи з перших дослідно-лабораторних зразків і закінчуючи сучасними промисловими шестипуансонними установками з діаметром реакційного простору 80 мм. Описана проблематика виготовлення і обробки основних вузлів пресу. Проаналізовані основні недоліки і переваги різних конструкцій і моделей плунжерів. Розглянуті сучасні системи керування пресом і шляхи їх подальшого вдосконалення. Розглянуто перспективні напрямки досліджень вдосконалення конфігурації натискних пуансонів з метою збільшення тиску в контейнері шестипуансонного АВТ.*

**Ключові слова:** монокристал алмаза, шестипуансонний кубічний прес, апарат високого тиску.

Перші відомості про розробку робочої конструкції багатопуансонного апарату високого тиску (АВТ) та його застосування для отримання алмаза відносяться до 1953 р., коли вдалося створити камеру кубічного типу [1]. Конструкція Бальтазара фон Платена (В. С. von Platen) представляла собою АВТ, що складався з шести сталевих пуансонів з площадками у формі квадрату, які по зовнішній поверхні формували сферу з діаметром 520 мм. Максимальне зусилля такого преса складало  $\approx 13,2 \times 10^3$  т, а тиск в центрі сфери, згідно розрахунків, міг

досягати  $\approx 12$  ГПа. Однак, недоліком конструкції була складність підготовки АВТ до навантаження, пов'язана з особливостями збирання вузла високого тиску.

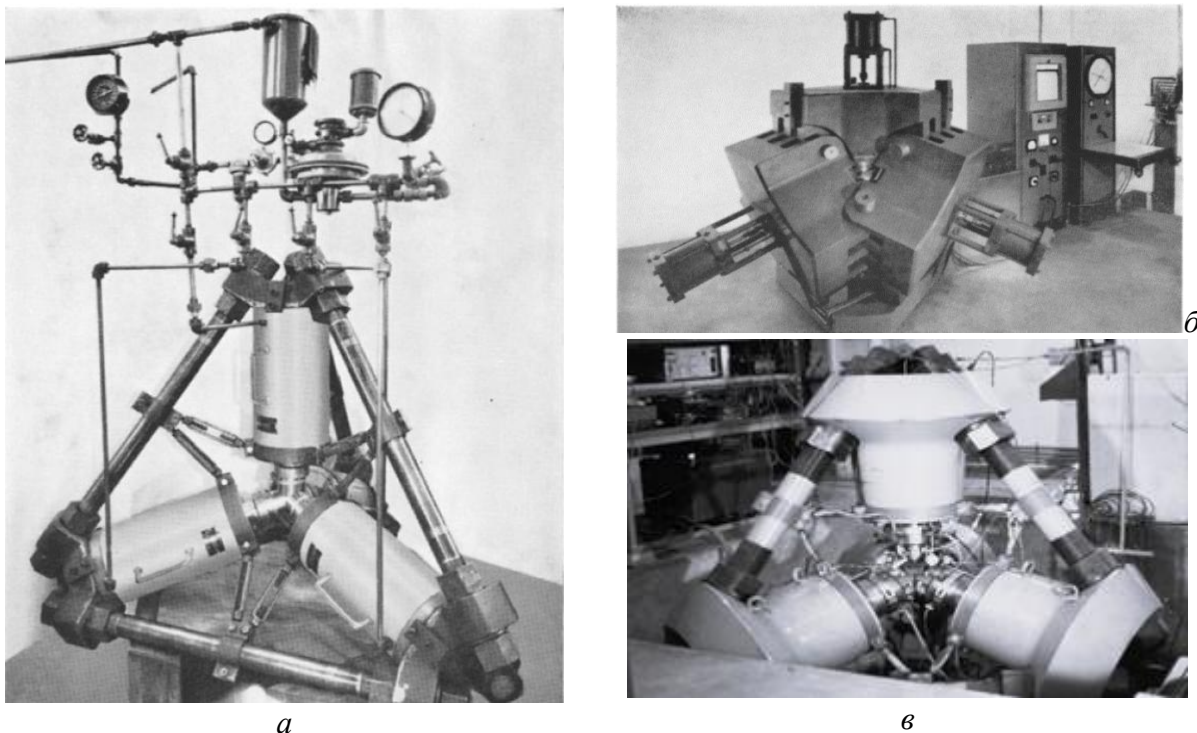


Рис. 1. АВТ тетраедричного типу: а – перша експериментальна конструкція, розроблена Т. Холлом (1958 р.) з діаметром плунжера 5 см та зусиллям навантаження  $\approx 100$  т [3]; б – конструкція виробництва U.S. Steel Corporation, США (1965 р.), що використовувався для промислового виробництва алмазів з діаметром плунжера 30 см та зусиллям навантаження  $\approx 1000$  т [4]; в – конструкція виробництва Mitsubishi Heavy Industry в Інституті фізики твердого тіла, Токіо, Японія (1966 р.), з діаметром плунжера 40 см та зусиллям навантаження  $\approx 2000$  т [5].

Створення високих тисків відбувалось за рахунок стискання мідної оболонки натискними площадками пуансонів, виготовлених із гартованої сталі, які не мали бокової підтримки; при створенні високих тисків в пуансонах виникали значні напруження, що значно перевищували границю плинності, та обумовлювали їх руйнування і потребували заміни після кожного проведеного циклу навантаження.

У 1958 р. Т. Холл (Н.Т. Hall) розробив експериментальну конструкцію АВТ тетраедричного типу рис. 1, а, що складалася з чотирьох гідравлічних циліндрів, розміщених по напрямкам осей третього порядку, з поршнями, до яких кріпились твердосплавні пуанسونи з площадкою у формі трикутника [2].

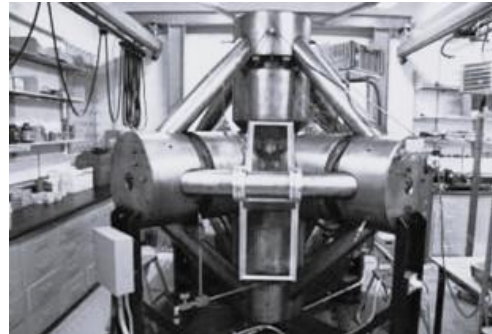
Генерація високого тиску відбувалась шляхом передачі зусилля, прикладеного на кожну з чотирьох поверхонь контейнер тетраедричної форми, виготовленого з пірофіліту — матеріалу, що забезпечував квазігідростатичне стискання в реакційному об'ємі циліндричної форми. Кожна з чотирьох сторін контейнера мала дещо більшу площу у порівнянні з нажимною площадкою твердосплавних пуансонів. По мірі збільшення прикладеного зусилля контейнер деформувалася з витіканням у простір між твердосплавними ковадлами та утворював прокладку стиснення. Конструкція була оснащена пристроєм синхронізації руху поршнів шляхом використання спеціальних направляючих та синхронізаційних пластин [3]. Запропонована конструкція могла розвивати тиски до 10 ГПа в камерах об'ємом  $\approx 0,5$  см<sup>3</sup> [3]. Пізніше, на базі експериментального АВТ тетраедричного типу, були розроблені збільшені

копії, які широко застосовувались для дослідження впливу високих тисків на властивості матеріалів та для отримання алмазних порошоків в промислових умовах (рис. 1, б, в). Основними недоліками такої конструкції були складність її виготовлення та досить висока вартість, оскільки гідравлічні циліндри з твердосплавними пуансонами необхідно було орієнтувати під точно визначеними кутами один до одного.

У 1967 р. Т. Холл, на основі попередніх дослідів з АВТ тетраедричного типу, розробив версію кубічного АВТ [6] (рис. 2, а), на основі якої в UWO (University of Western Ontario) було сконструйовано пресову установку з зусиллям навантаження 1000 тон (рис. 2, б). Пресова установка складалась з трьох пар співвісних осей четвертого порядку циліндрів з поршнями, розташованих один напроти одного, де до внутрішніх сторін кріпились пуанسونи з нажимною площадкою у формі квадрата, які при сходженні утворювали кубічну порожнину, в якій розміщували контейнер з робочою коміркою. В більш пізніх версіях пресова установка кубічного типу отримала декілька варіантів виконання з двома основними способами закріплення циліндрів для забезпечення жорсткості конструкції преса при навантаженні: кубічно-каркасна та консольно-шарнірна [7]. Перший з цих варіантів представлено на рис.2. Він є результатом особистої розробки Т. Холла (рис.2, а) і був реалізований на практиці шляхом конструювання кубічних конструкцій, жорсткість складання яких забезпечувалась різними способами кріплення плунжерів при умові заданого їх просторового розташування (рис. 2, б-г).



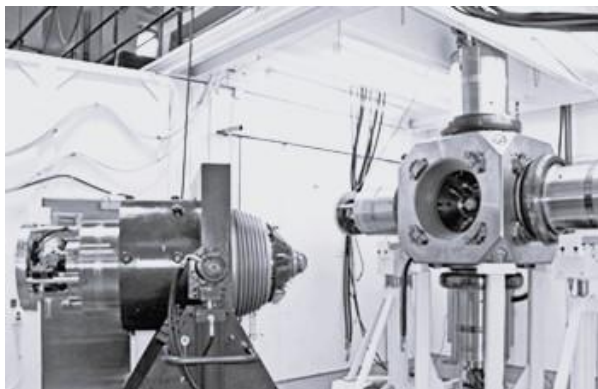
а



б



в



г

Рис. 2. АВТ кубічно-каркасного типу: а – оригінальна конструкція Т. Холла, представлена ним у 1967 р. [8]; б – варіант, виготовлений для дослідницьких цілей та розміщений в UWO, 1969 р., зусиллям навантаження 1000 т [8]; в – промислова версія, що використовувалась компанією US Synthetic Corporation для виробництва алмазних порошоків з зусиллям навантаження 6х28 МН [8]; г – варіант з використанням кубічної станини (Novatek): справа – корпус преса (станина) у формі куба (довжина ребра 1,2 м), виготовлена з високолегованої сталі з трьома різьбовими взаємно перпендикулярними отворами для розміщення шести плунжерів зусиллям 30 МН, які мають конічне різьбове кріплення, зліва – пристрій для монтажу/демонтажу плунжерів при необхідності заміни твердосплавних пуансонів [9]

Кубічно-каркасні АВТ (рис.2, з), створені у 90-х роках минулого сторіччя, дуже добре себе зарекомендували у сфері виготовлення полікристалів алмаза та кубічного нітриду бора і особливо для проведення процесу термобаричної обробки монокристалів алмазу з метою зміни їх кольору та якості ювелірної продукції з них. Ця конструкція дозволяє значно спростити процес виготовлення установки та зменшити її вагу, однак вона потребує використання більш якісних матеріалів для виготовлення частин пресу та твердосплавних пуансонів, а також застосування спеціальних методів механічної обробки внутрішніх частин пресової установки.

Перші відомості про виготовлення шестипуансонних пресів шарнірного типу китайського зразка з діаметром плунжера 180-230 мм та діаметром реакційної порожнини 10 мм (18 мм при більш пізніх модернізаціях) відносяться до 1965 р. і виконані групою вчених під керівництвом професора G. Zou в Jilin University [10]. Була використана ідеологія конструкції розташування пуансонів з попередніх досліджень Т. Холла, для якої камера стиснення створювалась шляхом зближення шести твердосплавних наковادل до її центру та утворення пружно-пластичної прокладки при витіканні матеріалу контейнера.

Оригінальність конструкції шарнірного кубічного АВТ полягала в тому, що в ній не використовувалась прив'язка направляючих елементів переміщення пуансонів плунжерів до станини; він складався з шести однакових складових частин і не має станини. Кожна складова частина являла собою сегмент корпусу, у яких розміщувався плунжер з прикріпленням до нього наковадлом. Складові частини скріплювалися між собою стрижнями по типу шарнірного з'єднання (рис. 3).

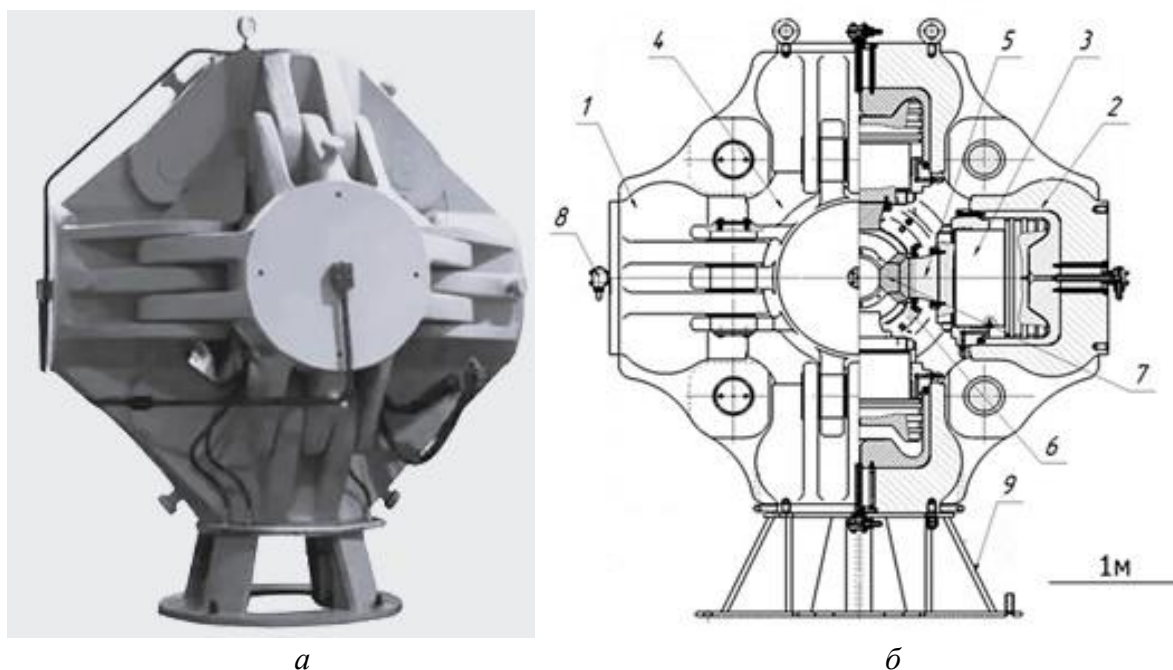
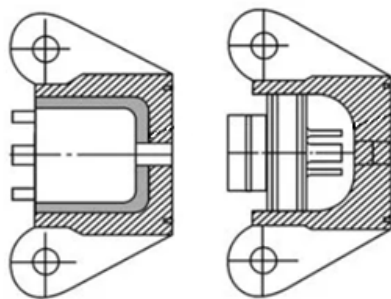


Рис. 3. Шарнірні АВТ кубічного типу китайського виробництва, що складаються з шести однакових плунжерних деталей корпусу, які забезпечують переміщення пуансонів в трьох взаємоперпендикулярних напрямках: а – загальний вигляд; б – схема монтажу та половинний переріз: 1 – одна з шести складальних частин пресу, в якій розміщувався плунжер; 2 – циліндр для створення високого тиску робочої рідини (технічна олива); 3 – поршень; 4 – захисний екран робочого простору; 5 – опорні плити; 6 – охолоджувальні канали робочих пуансонів; 7 – твердосплавний пуансон; 8 – клапан для подачі оливи; 9 – опорна стійка.

У 1976 р. на базі попередньо створеного шарнірного кубічного АВТ вдалося збільшити діаметр плунжерів до 320 мм, що теоретично давало можливість значно збільшити діаметр реакційного об'єму, однак на практиці вдалось досягти стабільного результату при збільшенні діаметру лише до 20 мм. Незначний приріст показників величини реакційного об'єму на даному етапі розвитку був пов'язаний не стільки з недосконалістю конструкції пресових установок, а більше з якістю твердого сплаву та з недосконалістю конфігурації натискних пуансонів. Тому подальший розвиток кубічних АВТ розділився на дві частини: дослідження, пов'язані зі збільшенням об'єму реакційної комірки та підвищення якості виготовлення твердого сплаву для наковادل більшого розміру. Дослідження в обох напрямках дозволили поступово збільшувати значення діаметру плунжера та діаметру реакційних комірок; до 2006 р. вдалось створити стабільні конструкції АВТ з діаметрами плунжера 340-360-400-420-450-480-500-520-560-600-620-650 мм та діаметром реакційного об'єму до 40 мм [11]. Загальні відомості про час випуску пресових установок з різними діаметрами плунжера одним з найбільших заводів КНР представлені в таблиці.

#### Хронологія еволюції збільшення діаметру плунжера для персів виробництва компанії Guilin Guiye Machinery Co. Ltd [12]

Рік	Модель	Діаметр плунжера, мм	Навантаження, МН	Діаметр отвору реакційної порожнини, мм
1994	GY320	320	6×8	22
1998	GY400	400	6×13	30
2000	GY460	460	6×18	34
2001.03	GY420	420	6×14	33
2001.10	GY500	500	6×20	40
2006	GY560	560	6×27	41
2007	GY650	650	6×36,5	50
2010	GY700	700	6×42	53
2011	GY750	750	6×48,5	55
2012	GY850	850	6×62	60



а б

Рис. 4. Схематичне зображення перерізу однієї з шести складових частин кубічного АВТ китайського виробництва з різними конструкціями плунжеру: а – комбінована конструкція з наявністю «стакана»; б – інтегрована конструкція типу «циліндр-поршень» [12]

складових частин преса. В комбінованій версії плунжера гідравлічна порожнина у корпусі

Після розробки та успішного промислового впровадження перших китайських шестипуансонних пресових установок з діаметром плунжера 320 мм відбулося додаткове розділення їх конструкцій в залежності від того, який тип плунжера використовувався: інтегрований чи комбінований. В інтегрованій конструкції порожнина гідравлічного циліндра плунжера формується шляхом механічної обробки корпусу кожної з шести

зміцнюється за допомогою додаткових бокових та нижніх проставок, які у зібраному стані утворюють «стакан». Схематичне зображення двох конструкцій представлено на рис. 4. Кожний тип конструкції плунжеру, зі «стаканом» чи без нього, має свої окремі переваги та недоліки.

Великий ряд розроблених пресових установок шарнірного типу з різними діаметрами плунжерів був обумовлений високою вимогливістю до міцнісних властивостей твердосплавних пуансонів, що визначають їх циклічну стійкість. Тільки після чіткого визначення цієї характеристики відкривається можливість створення нової, більш потужної модифікації пресової конструкції. Більшість моделей пресових установок не набули широкого розповсюдження при впровадженні в промисловості та існували лише у вигляді обмеженої кількості зразків, а вибір значення діаметрів плунжера залежав від очікуваної економічної ефективності пресової установки. По мірі зростання виробництва алмазних порошоків, стандартизація розмірів плунжера відбувалась під впливом реальних кількісних показників

виробництва продукції, що автоматично виключало неоптимальні характеристики відносно діаметрів плунжерів і розмірів пуансонів.

В період 2006-2012 рр. величини діаметра плунжера досягли значень в 800 мм з діаметром реакційної порожнини до 54 мм. У 2012 р. проводяться роботи над створенням пресових установок з діаметром плунжера 850 мм, і вона продемонструвала найбільш оптимальну економічну ефективність серед конструкцій пресових установок шарнірного типу. На рис. 5 приведено загальний вигляд блоку як готової до монтажу складової частини

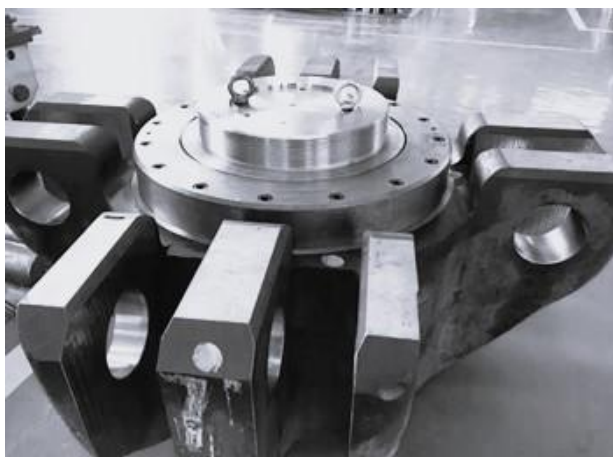


Рис. 5. Загальний вигляд готової до збирання частини пресу, оснащеної плунжерною парою

шестипуансонного пресу після її механічної обробки з закріпленням плунжером.

АВТ з діаметром до 1000 мм та більше масового промислового впровадження не здобули, хоча частково такі установки використовуються для отримання алмазно-абразивних порошоків. Обмеженість використання АВТ з діаметром понад 850 мм пов'язана зі складністю створення та підтримки стабільного тиску впродовж тривалого часу та високою вартістю твердосплавних пуансонів, що в промислових умовах робить їх використання комерційно не вигідним. Тому такі АВТ використовуються в основному для проведення лабораторних досліджень. Станом на 2025 р. найбільшими виробниками кубічних АВТ в КНР є «Henan Botai StSarah Engineering Co. Ltd.» [13], «Luoyang Qiming Superhard Materials Co., LTD.» [14] та «Guilin Guiye Machinery Co. Ltd.» [12]

Технологічний триумф у виробництві алмазних абразивів і полікристалічних матеріалів для ріжучого інструменту у Китаї було забезпечено створенням раціональної конструкції шестипуансонної пресової установки і використання новітніх способів отримання твердих сплавів на базі WC-Co. Ще однією важливою складовою частиною стало створення унікальних методів виробництва шарнірних складових плунжерних блоків, поєднання яких у єдину пресову конструкцію дозволило мінімізувати вартість виготовлення та їх механічної обробки при виробництві шестипуансонних АВТ. Це було досягнуто за рахунок використання новітніх ливарних методів одержання таких блоків, починаючи з оптимізації їх складу та термічної обробки для досягнення максимальних значень міцності, а також розробки спеціальних способів механічної обробки. Виробництво ливарним способом заготовок блоків, їх зміцнення і підвищення твердості шляхом гартування або/та кування, високоефективна обробка отворів

і їх поверхонь дозволили забезпечити комерційну вартість шестипуансонних АВТ зі значенням величини навантаження 6x68МН на рівні 300 тис. USD.

Промислове використання АВТ кубічного типу китайського зразка, розпочато в кінці 80-х років минулого століття, здійснило революцію в сфері отримання синтетичних алмазних абразивів. За рахунок відносної простоти конструкції, простоти обслуговування, надійності, значно більших величин реакційного об'єму та масового промислового використання вони забезпечили домінування технологій виробництва на базі шестипуансонних АВТ на світовому ринку. Згідно з міжнародним звітом ринку алмазних порошків, станом на 2020 р., 6 з 10 найбільших у світі підприємств з виготовлення алмазних порошків знаходяться в КНР; їх загальне виробництво складає більше 80 % від світового виробництва [15].

По мірі розвитку технологічного рівня отримання надтвердих матеріалів, використання кубічних апаратів високого тиску шарнірного типу максимально розширилося та почалися пошуки нових сфер застосування такої апаратури.

Значна увага приділяється застосуванню таких пресових установок в процесах вирощування структурно-досконалих монокристалів алмаза на затравці методом TGM [16, 17]. Принциповою відмінністю в методах отримання алмазних порошків та вирощування монокристалів алмаза розмірами більш 1-2 мм є тривалість процесу синтезу. Так, в промислових циклах синтезу алмазних порошків середня тривалість одного циклу складає від 10 до 40 хв. На відміну від цього, для отримання крупних монокристалів алмаза масою ~1 карат методом TGM необхідно від 24 год та більше. Необхідність використання довготривалих циклів вирощування потребує забезпечення стабільних умов нагрівання ростових комірок. Раніше цій умові не приділялось значної уваги, а коливання електричної потужності нагрівання комірки на рівні 1-2% вважалось достатньою умовою для забезпечення отримання алмазних шліфпорошків високої якості [18]. Також, в силу збільшення тривалості циклу синтезу виникла необхідність постійного відслідковування ростових параметрів, що дуже складно без застосування автоматизованих систем керування.

Починаючи з 2007 р. в КНР з'явилися перші системи керування процесом кристалізації алмазу в кубічних АВТ, побудовані на базі цифрових програмованих логічних контролерів (PLC) [19, 20]. Основними задачами таких систем керування було відслідковування потужності нагрівання в реальному часі з можливістю її автоматичного регулювання та стабілізації за допомогою методів PID-регулювання [21]. Такий підхід дозволив значно покращити стабільність процесів вирощування, однак все ще залишались недоліки, пов'язані з недостатніми операційними можливостями систем керування, у першу чергу невеликим обсягом операційної пам'яті, що обмежує кількість одночасно оброблюваних сигналів, а також, точність завдання необхідного рівня потужності, вимірювання вольт-амперних характеристик процесу нагрівання.

Застосування новітніх науково-технічних розробок для забезпечення процесів керування пресовими установками дозволило значно покращити їх характеристики; лідером по виробництву таких систем керування на сьогоднішній час є компанія «Zhengzhou Tianhong Automation Technology Co. Ltd.», КНР [22].

Але вперше така задача була вирішена нами для проведення довготривалих експериментів по вирощуванню алмазів на затравках в області термодинамічної стабільності. Для цього була створена оригінальна конструкція системи керування, яка потім також широк застосовувалась в промислових умовах [23]. Перевагою такої системи керування було досягнення точності стабілізації потужності нагріву до  $\pm 5$  Вт та реагування на виникнення реактивних напруг в електричних системах пресових установок, що особливо актуально на великих виробничих підприємствах, де постійність електричних параметрів є суттєвою проблемою. Слід відмітити 3 головних відмінностей оригінального вирішення проблеми керування:

- використання двоконтурної схеми стабілізації потужності нагрівання, для якої перший контур контролює миттєві змінення електричних параметрів (до  $\pm 1$  мс), а другий відповідає за постійність стабілізації на заданому рівні;
- контроль напруги на вторинній обмотці силового трансформатора здійснюється за допомогою RMS-датчика напруги [24];
- завдання робочої потужності нагріву в контурах зворотного зв'язку відбувається після перемноження складових сигналів змінного струму в їх відповідні значення як величин постійного струму, що і дозволяє враховувати величини коефіцієнту потужності ( $\cos \phi$ ).

Вказаний підхід на практиці дозволив підвищити точність вимірювання та стабілізації потужності нагрівання. Згодом до системи керування була підключена функція вимірювання та контролю температури до  $1700$  °С, що дозволило визначати температуру ростового середовища впродовж процесу вирощування кристалів алмазу з можливістю автоматичного регулювання потужності нагріву в залежності від значення температури по заданому алгоритму. Слід відмітити, що на сьогодні аналогів запропонованої нами процедури автоматичного регулювання потужності нагрівання ростових комірок в залежності від температури процесу кристалізації алмазу і керування пресовими установками впродовж циклу вирощування монокристалів не існує [25].

Досить суттєвою перевагою створеної нами системи керування стала її інтеграція з контрольним блоком охолодження і вимірювання температури твердосплавних натискних пуансонів. Зазвичай раніше рівень охолодження робочих пуансонів ніяк не контролювався і не регулювався. Запропонована спеціально спроектована система охолодження дозволяє вимірювати та підтримувати робочу температуру кожного з шести твердосплавних пуансонів шляхом керування кількістю об'ємних витрат охолоджувальної рідини. Контрольний блок охолодження робочих пуансонів, поєднаний з загальною системою керування процесом вирощування алмазу, на тепер є невід'ємною частиною пристроїв керування температурою процесу вирощування монокристалів алмаза [26].

Станом на сьогоднішній час, в результаті багатьох вдосконалень, системи керування процесів вирощування структурно досконалих монокристалів, розроблених різними компаніями є дуже схожими, мають практично ідентичний функціонал та дозволяють контролювати процес синтезу з досить великою точністю.

Поступовий розвиток та модернізація конструкції кубічних АВТ, вдосконалення конструкції твердосплавних натискних пуансонів та методів їх виготовлення, зробила їх беззаперечним лідером у сфері отримання надтвердих матеріалів та монокристалів алмазу. Однак, все ще існують технологічні проблеми, пов'язані з забезпеченням контролю величин тиску та розподілу в реакційному об'ємі впродовж тривалого часу (до 200 год та більше), особливо при вирощуванні монокристалів алмаза масою 20 карат та більше, оскільки по мірі протікання процесу перекристалізації графіту в алмаз об'єм ростової системи зменшується.

Важливою проблемою є також збільшення максимального рівня тиску в камері стиснення шестипуансонних апаратів, оскільки в силу конструкційних особливостей, сьогодні при промисловому використанні вони працюють в діапазоні тисків до  $\approx 6$  ГПа. Збільшення робочого рівня тиску потребує, в першу чергу розробки методів визначення змінення тисків під дією високих температур, оскільки це дуже важливо для формування прокладок стиснення, які деформуються разом з нагріванням ростової комірки.

Розробка нових конструкцій твердосплавних пуансонів та методів вимірювання тисків при високих температурах до  $1500$  °С та більше, в свою чергу, відкриває перспективу досягнення значень робочого тиску в реакційних камерах до рівня 8–9 ГПа та обумовлює нові можливості використання такої апаратури для отримання матеріалів різного призначення, дослідження нових ростових систем на основі вуглеводнів для отримання високочистої

алмазної сировини, розробку методів легування монокристалів електрично-активними домішками для використання в електронній техніці.

Очевидним напрямком подальшого розвитку використання кубічних апаратів є збільшення об'єму стиснення шляхом модернізації конструкції твердосплавних пуансонів, що дозволить ще більше підвищити продуктивність виробничих процесів. Роботи в цьому напрямку інтенсивно проводяться і на сьогодні вдалося досягти збільшення діаметру реакційних комірок до 80 мм.

**A. V. Burchenia, O.V. Savitskyi, V. V. Lysakovskiy, S.O. Ivakhnenko,  
T. V. Kovalenko, S.M. Ivanchenko**

*V. Bakul Institute for Superhard Materials National Academy of Science of Ukraine*

#### **DEVELOPMENT AND PERSPECTIVITY OF SIX-PUNCH HIGH-PRESSURE CUBIC TYPE DEVICES USING**

*The paper presents a brief description of multi-anvil high pressure apparatus (HPA) design creation and development history starting from first experimental lab samples ending with modern six-anvils industrial construction with reaction volume up to 80 mm. Problems of manufacturing and processing the main press units are described. The main disadvantages and advantages of various designs and plunger models are analyzed. Promising research directions for improve anvils configuration to increase pressure level inside reaction volume are considered.*

**Keywords:** *diamond single crystal, six-anvil cubic press, high pressure apparatus.*

#### **Література**

1. Autoklav für Hochdruck: pat. 384552 Schweiz: Kl. 12 G 2/01; publ. 15.02.1965.
2. Hall H.T. Some high-pressure, high-temperature apparatus design considerations – Equipment for use at 100000 atmospheres and 3000°C, *Rev. Sci. Instrum.* 1958. Vol. 29, N 4. P. 267–275.
3. Hall H.T. Anvil guide device for multiple-anvil high pressure apparatus, *Rev. Sci. Instrum.* 1962. Vol. 33, N 11. P. 1278–1280.
4. Bradley C.C. High pressure methods in solid state research. London: Butterworth & Co. 1969. 176 p.
5. Takehiko Yagi. Earth Science. Geochemical Research Center (GCRC), University of Tokyo. 2015. 48 p.
6. Hall H.T. High pressure apparatus – Ram-in-tie-bar multianvil presses, *Rev. Phys. Chem. Jpn.* 1967. Vol. 37, N 2. P. 63–71.
7. Zeitlin A., Brayman J. Ultra-high-pressure calibration: Influence of cubic workpiece configuration in High Pressure Measurement. Washington: Butterworths, 1963. 420 p.
8. Liebermann R.C. Multi-anvil, high pressure apparatus: a half century of development and progress. 2011. *High Pressure Research.* Vol. 31, N 4. P. 493-532.
9. B. Rexroth. Supermaterial press improves effeciency with variable-speed pump drive. URL: <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/hydraulic-pumps-motors/article/21884954/supermaterial-press-improves-efficiency-with-variable-speed-pump-drive>.
10. Xiaohu F., Delong X., Ye W. Y. Present and future of my country's superhard material – commemorating 50 years of development of China's superhard materials. *Superhard Materials Engineering.* 2013. Vol. 1. P. 38–42.
11. Xiangren C., Xiaohu F., Ying X. Past, present and future of China's Superhard materials high pressure equipment: one of the development paths of China's Superhard materials industry. *Superhard Materials Engineering.* 2021. Vol. 33, N 2. P. 39-42.

12. Cubic Press Machine Catalog. *Guilin Guiye Machinery Co., Ltd.* URL: <https://www.glyjx.com>.
13. Cubic Press Machine Catalog. *Henan Botai StSarah Engineering Co. Ltd.* URL: <http://www.hn-btssl.com>.
14. Cubic Press Machine Catalog. *Luoyang Qiming Superhard Materials Co., LTD.* URL: <http://www.qmdiamond.com/product/5/>.
15. Global and Chinese synthetic diamond industry report 2020–2026. URL: <http://www.researchinchina.com/Htmls/Report/2020/31657.html>
16. Strong, N.M., Wentorf, R.N. The growth of large diamond crystals, *J. Naturwissenschaften*. 1972. Vol. 59, 1. P. 1–7.
17. Kovalenko T.V., Ivakhnenko S.O., Lysakovskiy V.V., Gordeev S.A., Burchenia A.V. Defect and impurity state of diamond single crystals growth in Fe-Mg-Al-c systems. *Journal of Superhard materials*. 2017. Vol. 39, N 2. P. 83–87.
18. Sun Y., Bi Y., Dong Y., Luo X., Ding L., Yang X. Configuration design for centralized control system of Hexa-orientation Press. *Chinese journal of high pressure physics*. 2003. Vol. 17, N 3. P. 235–240.
19. Guangjie R. Design and implementation of diamond press control system. *Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management*. 2019. P. 4–16.
20. Qin Z. Application of PLC in six top diamond press machines. *Journal of Shijiazhuang institute of railway technology*. 2015. Vol. 14, N 2. P. 16–22.
21. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2003. 250 с.
22. Control systems catalog. Zhengzhou Tianhong Automation Technology Co. Ltd. URL: <https://tianhongmachine.en.made-in-china.com/>.
23. Лисаковський В.В. Наукові засади високопродуктивного спрямованого вирощування структурно досконалих монокристалів алмазу типів Ib та IIa: дис... док. техн. наук: 05.02.01: Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, 2021, 334 с.
24. Manglik R. Mesurment, instrumentation and sensors. EduGorilla Publication, 2024. 1825 p.
25. Burchenia A.V., Ivakhnenko S.O., Lysakovskiy V.V., Savitsky O.V., Klochok V.Y. Application of a Differential Method for Determining the Quasi-Hydrostatic Pressures in the Cells of Six-Punch Presses. *Journal of Superhard Materials*. 2021. Vol. 43, N 2. P. 85–92.
26. Li Y., Wang F., Wang C., Chen L., Guo L., Fang C. The regulating effect of cooling water temperature on axial growth rate of large single crystals diamond under HPHT conditions. *Journal of Crystals Growth*. 2019. Vol. 522. P. 5–10.

Надійшла 02.09.25

## References

1. Von Platen, B. C. (1965). *Schweiz Patent 384552. 12 G 2/01. Autoklav für Hochdruck.* (Schweiz Patent 384552).
2. Hall, H.T. (1958). Some high-pressure, high-temperature apparatus design considerations – Equipment for use at 100000 atmospheres and 3000°C. *Rev. Sci. Instrum.*, 29(4), 267–275.
3. Hall, H.T. (1962). Anvil guide device for multiple-anvil high pressure apparatus. *Rev. Sci. Instrum.*, 33(11), 1278–1280.
4. Bradley, C.C. (1969). *High pressure methods in solid state research.* Butterworth & Co.
5. Yagi, T. (2015). *Earth Science.* Geochemical Research Center (GCRC).
6. Hall, H.T. (1967). High pressure apparatus – Ram-in-tie-bar multianvil presses. *Rev. Phys. Chem. Jpn.*, 37(2), 63–71.

7. Zeitlin, A., Brayman, J. (1963). *Ultra-high-pressure calibration: Influence of cubic workpiece configuration in High Pressure Measurement*. Butterworths.
8. Liebermann, R.C. (2011). Multi-anvil, high pressure apparatus: a half century of development and progress. *High Pressure Research*, 31(4), 493–532.
9. Rexroth, B. *Supermaterial press improves efficiency with variable-speed pump drive*. <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/hydraulic-pumps-motors/article/21884954/supermaterial-press-improves-efficiency-with-variable-speed-pump-drive>.
10. Xiaohu, F., Delong, X., Ye, W. Y. (2013). Present and future of my country's superhard material – commemorating 50 years of development of China's superhard materials. *Superhard Materials Engineering*, 1, 38–42 [in Chinese].
11. Xiangren C., Xiaohu F., Ying X. (2021). Past, present and future of China's Superhard materials high pressure equipment: one of the development paths of China's. *Superhard materials industry. Superhard Materials Engineering*, 33(2), 39–42 [in Chinese].
12. *Cubic Press Machine Catalog*. (b. d.). Guilin Guiye Machinery Co., Ltd. <https://www.glyjyx.com>.
13. *Cubic Press Machine Catalog*. (b. d.). Henan Botai StSarah Engineering Co. Ltd. <http://www.hn-btssl.com>.
14. *Cubic Press Machine Catalog*. (b. d.). Luoyang Qiming Superhard Materials Co., LTD. <http://www.qmdiamond.com/product/5/>.
15. *Global and Chinese synthetic diamond industry report 2020–2026*. (b. d.). <http://www.researchinchina.com/Htmls/Report/2020/31657.html>.
16. Strong, N.M., & Wentorf, R.N. (1972). The growth of large diamond crystals. *J. Naturwissenschaften*, 59(1), P. 1–7.
17. Kovalenko, T.V., Ivakhnenko, S.O., Lysakovskiy, V.V., et al. (2017). Defect and impurity state of diamond single crystals growth in Fe-Mg-Al-C systems. *Journal of Superhard materials*, 39(2), 83–87.
18. Sun Y., Bi Y., Dong Y., et al. (2003). Configuration design for centralized control system of Hexa-orientation Press. *Chinese journal of high pressure physics*, 17(3), 235–240.
19. Guangjie, R. (2019). Design and implementation of diamond press control system. *Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management*, 4–16.
20. Qin, Z. (2015). Application of PLC in six top diamond press machines. *Journal of Shijiazhuang institute of railway technology*, 14(2), 16–22.
21. Ivanov, A.O. (2003). *Teoriia avtomatichnoho keruvannia [Automatic control theory]*. Nazionalnyi Hirnichyi universitet. [in Ukrainian]
22. *Control systems catalog*. (b. d.). Zhengzhou Tianhong Automation Technology Co. Ltd. <https://tianhongmachine.en.made-in-china.com/>
23. Lysakovskiy, V.V. (2021). *Naukovi zasady visokoproduktivnogo spryamovanogo virishchuvannya strukturno doskonalih monokristaliv almazu tipiv Ib ta IIa [Scientific principles of high-performance directed growth of structurally perfect diamond single crystals of types Ib and IIa]*. [Doctor's dissertation]. Kyiv [in Ukrainian].
24. Manglik, R. (2024). *Mesurment, instrumentation and sensors*. EduGorilla Publication.
25. Burchenia, A.V., Ivakhnenko, S.O., Lysakovskiy, V.V., et al. (2021). Application of a Differential Method for Determining the Quasi-Hydrostatic Pressures in the Cells of Six-Punch Presses. *Journal of Superhard Materials*, 43(2), 85–92.
26. Li Y., Wang F., Wang C., et al. (2019). The regulating effect of cooling water temperature on axial growth rate of large single crystals diamond under HPHT conditions. *Journal of Crystals Growth*, 522, 5–10.