

10. Petasyuk, G.A. (2014). Ekstrapolyatsionno-affinnaya 3D model zerna poroshkov sverkhтвердыkh materialov i yeio inzheneriya [Extrapolation-affine 3D model of grain powders of superhard materials and its engineering]. *Sovremennyye problemy yestestvennykh nauk – Modern problems of natural sciences*, 1(2), 57–62.
11. Petasyuk, G. (2022). Determining the thickness coating of grinding powders of synthetic diamond based on a specific-surface approach and using an extrapolation-affine 3D model of grain. *Journal of Coating Science and Technology*, 9, 20-25.
12. Prikhna, T.O., Ilnytska, H.D., Lavrinenko, et al. (2022). Improvement of Physical and Mechanical Characteristics of Synthetic Diamond Powders Synthesized from Ferroalloys for Increasing the Wear Resistance of the Diamond Dressing Tool. *Journal of Superhard Materials*, 44(2), 139-150.
13. Prikha T.O., Ilnytska G.D., Loginova O.B., et al. (2022). Influence of Heat Treatment on the Mechanical Characteristics of Diamond Powders. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 60(9-10), 567-575.
14. Ilnytska H.D., Lavrinenko V.I., Loginova O.B., et al. (2024). Vplyv termokhimichnykh obrobok na fizyko-khimichni vlastyvoli shlifporoshkiv almazu [The influence of thermochemical treatments on the physicochemical properties of diamond grinding powders]. *Instrumentalne materialoznavstvo: – Instrumental materials science*. (26nd Issue, p. 164-170). INM im. V.M. Bakulia NAN Ukrainy [in Ukrainian].

УДК 004.942:621.921.34:62-987

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-182-190

**С.А. Івахненко**, член-кор. НАН України; **В.В. Лисаковський**, д-р техн. наук;  
**А.В. Бурчєня**, **Т.В. Ковалєнко**, кандидати технічних наук;  
**О.О. Занєвський**, канд. хім. наук; **С.М. Іванченко**, аспірант

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2,  
04047, М. Київ, e-mail: sioz@ismv13.kiev.ua*

## **ЗАСТОСУВАННЯ ШЕСТИПУАНСОННОЇ АПАРАТУРИ ВИСОКОГО ТИСКУ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ АЛМАЗУ ТИПУ ІВ З МЕТОЮ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАСТИН ПЛОЩЕЮ 80–100 мм<sup>2</sup>**

*Досліджено методи отримання структурно досконалих монокристалів алмазу, які за формою та розмірами дозволяють виготовлення алмазних пластин площею до 100 мм<sup>2</sup> та подальше використання як ініціюючих CVD-кристалізацію алмазних поверхонь.*

*Розроблено ростові комірки для отримання монокристалічних зразків великого об'єму шляхом НТНР-кристалізації в області термодинамічної стабільності; оптимізовані склади ростових систем для отримання кристалів типу Ів на базі розчинників Fe–Ni, Fe–Co та Fe–Co–Mg.*

*Розроблено методи для проведення операцій механічного розколювання, розпилювання та шліфування в залежності від габітусної форми кристалів, наявності та розташування дефектів структури; випробувано їх використання для виготовлення пластин необхідної форми та кристалографічної орієнтації з метою їх застосування як ініціюючих підкладок для проведення CVD-процесів кристалізації алмазу.*

*Результати досліджень, виконаних в результаті проведення роботи, мають бути застосовані для CVD-осадження вуглецю для отримання алмазних поверхонь з метою використання як ініціюючих кристалізацію при одержанні плівок.*

**Ключові слова:** алмаз, монокристал, швидкість росту, кінетика, кристалізація, домішки, дефекти, алмазні пластини, CVD-процеси.

### Вступ

Предметом дослідження було вивчення умов отримання зразків кристалів, які за формою та розмірами дозволяють виготовлення пластин площею 80–100 мм<sup>2</sup> та товщиною 0,5 мм з метою подальшого застосування як ініціюючих кристалізацію алмазних поверхонь.

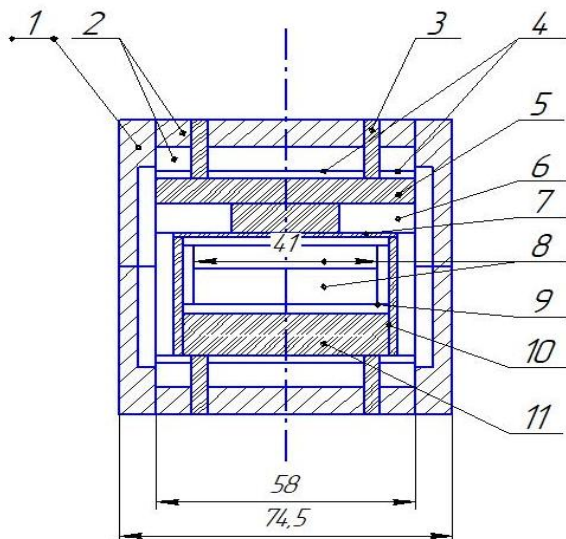


Рис. 1. Схематичне зображення кубічного контейнера шестипуансонного АВТ з діаметром пунжера 750 мм; 1 – пірофілітовий кубічний контейнер із циліндричним отвором і доломітовою вставкою; 2 – пірофілітові і доломітові ізоляційні шайби і диски тоководу; 3 – графітовий токовід; 4 – інфрачервоний екран тоководу; 5 – розподільчий графітовий диск; 6 – ізоляційна шайба з циліндричним нагрівачем; 7 – графітовий нагрівач; 8 – сплав-розчинник із джерелом вуглецю; 9 – ізоляція реакційного простору; 10 – трубчастий графітовий нагрівач; 11 – підкладний графітовий диск

Для вирощування монокристалів методом температурного градієнту розроблено ростову комірку для отримання монокристалічних зразків шляхом НТНР-вирощування монокристалів алмазу в області термодинамічної стабільності, схема якої приведена на рис. 1, та оптимізовані склади ростових систем для отримання кристалів на базі розчинників Fe–Ni, Fe–Co та Fe–Co–Mg.

Всі партії монокристалів, які застосовані для виготовлення пластин, були отримані в шестипуансонному пресовому апараті CS-XII з діаметром пунжера 750 мм [3]. Контроль тиску та температури в ростовій комірці під час проведення циклів вирощування здійснювався шляхом введення термопарних датчиків, розроблених раніше [4], з використанням платина – платина-родієвих термопарних дротів ППІ.

Дослідження проводили на зразках монокристалів алмазу типу Ib масою до 15 карат, вирощених в розчин-розплавних системах Fe–Ni–C, Fe–Co–C та Fe–Co–Mg–C відповідно, з використанням НТНР-методу вирощування [1].

Проведені дослідження показали, що використання ростових систем Fe–Co–Mg–C для розробки методів вирощування монокристалів алмазу великої маси перспективне для отримання пластин площею 10x10 мм<sup>2</sup> та більше. Виробництво таких пластин на сьогодні є безальтернативним методом отримання підкладок, що ініціюють гомоепітаксіальне вирощування алмазних пластин газозфазним осадженням вуглецю (CVD-метод) [2] для розробок у сучасних напрямках оптики, електроніки та обчислювальної техніки.

Проведені дослідження з вирощування монокристалів типу Ib дозволили визначити склад ростових систем та особливості проведення циклів вирощування для отримання заготовок необхідної форми. Вибір кристалів для виготовлення підкладок здійснювали зі зразків, вирощених в системах Fe–Ni–C, Fe–Co–C і Fe–Co–Mg–C попередньо визначеного складу.

### Матеріали та методи

Умови вирощування монокристалів алмазу було оптимізовано для визначення складів ростових систем та за значеннями параметрів електронагрівання комірок для одержання кристалів масою до 15 карат та більше. Забезпечення необхідної якості виготовлених зразків пластин виконували вибором напрямку розпилювання кристалів механічним способом; при необхідності заготовки кристалів піддавали розколюванню по площинах спайності, а також шліфували для видалення поверхневих дефектів на площинах, від яких ініціювався початок росту грані куба.

Розколювання алмазних кристалів проводили з використанням спеціального пристрою, що дозволяє встановлювати оправку зі зразком в свинцеву державку і фіксувати положення інструменту з визначеним напрямком та виконувати операції розколювання з можливістю збереження отриманих частин. Пристрій розколювання був оснащений комплектом ножів з різною товщиною леза, наборами оправок та алмазними різцями. Кріплення різців здійснювали з використанням спеціальних цементних сумішей або клею на базі розчину дрібнозернистого кварцового піску у лужному розчині.

Механічне розпилювання для виготовлення алмазних пластин з підготовлених та розмічених монокристалів алмазу проводили спеціальним інструментом – мідними дисками з нанесеною алмазною пастою на базі мікропорошку алмазу і спеціальної оливи на його ріжучу поверхню [5]. Орієнтацію кристалу визначали за допомогою гоніометра або використовували візуальну розмітку для випадків, коли не потрібно було досягнення форми пластини з великою точністю.

Після проведення операцій розкрою та різання поверхня пластин була оброблена попередньо шляхом механічного шліфування, а потім з використанням плазмо-хімічного травлення з метою досягнення чистоти шорсткості поверхні на рівні  $\leq 10$  нм. Такої чистоти поверхні досягали завдяки застосуванню технології, яка для оброблення поверхні використовує дію плазми алмазу в атмосфері кисню або водню [6].

Отримані пластини проходили випробування як ініціюючі поверхні росту алмазних шарів в процесах гомоепітаксialного осадження вуглецю методом CVD [7]. Випробування проводили в промислових умовах компанії «SAIMPEX» (м. Сурат, Індія), яка має на своєму виробництві 20 повністю автоматизованих CVD-установок MPCVD ZF-206, що дозволяють випускати 10000 карат алмазів на місяць.



Рис. 2. Загальний вигляд зразків монокристалів алмазу, вирощених на затравках в системі Fe–Ni–C: а – кубооктаедричний габітус, тривалість циклу вирощування 210 год, маса 9,87, 8,05, 7,53, 7,64 та 3,89 карат; б – кубічний габітус, тривалість циклу вирощування 238 год, маса 8,11, 7,36, 7,45, 5,07, 5,39 та 5,21 карат

при значеннях осевого та радіального температурних градієнтів  $\approx 2-8^\circ\text{C}$  та  $\approx 0,4-0,5^\circ\text{C}$  відповідно. Кристалізація алмаза за вказаних умов дозволяє отримувати зразки монокристалів високої структурної досконалості кубооктаедричного габітусу з рівномірним розвитком граней кубу та октаедру у співвідношенні куб/октаедр 30/70 % – 10/90 % (рис. 2). Середня швидкість росту таких кристалів складає 6–7 мг/год. Найбільш розвиненими є грані [111] та

#### Результати досліджень

Усі експерименти були виконані при значеннях тиску в комірці 5,8 – 6,2 ГПа, температуру вирощування варіювали в залежності від використовуваного сплаву-розчинника – 1350–1400, 1280–1320 і 1480–1580 °С для Fe–Ni–C, Fe–Co–C і Fe–Co–Mg–C відповідно.

#### Сплав-розчинник Fe–Ni.

Вирощування монокристалів алмаза з використанням сплаву-розчинника Fe<sub>36</sub>Ni [8] проводили

[100], грані [110] розвинуті слабо, а їх загальна площа не перевищує 8 %, тоді як грані [101] практично відсутні.

Максимально досягнута швидкість росту в системі Fe–Ni–C становить 7,8 мг/год; для цього випадку характерне вирощування кристалів, на яких на завершальних стадіях росту спостерігається значний розвиток скелетних форм поблизу ребер та вершин, а також захоплення огранених включень, що прилягають до площин октаедра і куба. Подальші спроби збільшення швидкості росту шляхом підвищення значень температури та її градієнтів призводять до стрімкого погіршення якості отриманих монокристалів алмазу.

**Сплав-розчинник Fe–Co.** Особливістю вирощування монокристалів алмаза з використанням сплаву-розчинника Fe<sub>40</sub>Co [9] є нижчий температурний діапазон вирощування в порівнянні зі сплавом-розчинником Fe<sub>36</sub>Ni. Більш значну роль в таких сплавах-розчинниках стосовно структурної досконалості та габітуса відіграють величини осевого градієнта температури.



Рис. 3. Загальний вигляд зразків монокристалів алмазу кубооктаедричного габітуса, вирощених на затравках в системі Fe–Co–C: а – тривалість циклу вирощування 126 год, маса 4,28, 3,42, 3,13 та 3,92 карат; б – тривалість циклу вирощування 131 год: маса 5,43, 3,19, 3,44 та 5,27 карат

Монокристали алмаза, вирощені в температурному діапазоні 1300–1320 °C ± 2 °C за величини осевого градієнта температури 4–6 °C/мм мають кубооктаедричний габітус (рис. 3), де співвідношення площинного розвитку граней куб/октаедр в середньому складає 40/60 – 50/50 %. При цьому, на відміну від монокристалів, отриманих в ростовій системі Fe–Ni–C, в таких монокристалах достатньо добре розвинуті грані [110] та [101], площа

яких знаходиться в межах 5–10 % та 4–8 % відповідно від загальної. Швидкість росту таких кристалів складає 6–8 мг/год.



Рис. 4. Загальний вигляд зразків монокристалів алмазу кубооктаедричного габітуса, вирощених на затравках в системі розчинник Fe–Co–Mg–C: а – тривалість циклу вирощування 178 год, один кристал зруйнувався в процесі витравлювання з розчинника; маса зразків 8,13, 8,71, 8,67, 7,98; 7,25 (зруйнований) та 6,66 карат; б – тривалість циклу вирощування 155 год; маса 7,12, 6,82, 6,88 та 6,97 карат

**Сплав-розчинник Fe–Co–Mg.** Монокристали алмаза, отримані в ростових системах Fe–40Co з додаванням Mg, характеризуються найвищими із вказаних ростових систем температурними умовами вирощування, що складають 1480–1580 °C ± 2 °C [10]. На рис. 4 представлено монокристали алмаза кубооктаедричного габітуса, отримані з використанням сплаву-розчинника Fe<sub>40</sub>Co<sub>5</sub>Mg за температури в зоні ініціації росту 1430 °C ± 2 °C та величини

осевого градієнта 8 °C /мм. Співвідношення розвитку граней куб/октаедр складає 50/50 % – 60/40 %, грані {110} та {101} розвинуті дуже (слабко?) та практично відсутні. Швидкість росту кристалів складає 8–10 мг/год.

Для системи Fe–Co з додаванням Mg вперше встановлено, що легування магнієм в межах 2–15 ат. % дозволяє значно, в ~1,5 рази, підвищити масову швидкість росту монокристалів типу Ib. Значення контрольної маси,  $M_k = 5,8$  каратів, для таких ростових систем відповідає середній швидкості росту  $\nu = 11,6$  мг/год. Як свідчать дані, отримані за допомогою термодинамічних вимірювань, температура кристалізації алмазу в розчинниках Fe–Co при легуванні їх Mg підвищується на 150–200 °C ( $p = 5,8 - 6,0$  ГПа). Це є причиною зростання величин дифузії (як об'ємної, так і поверхневої), а також швидкостей просування ступенів росту на гранях кристалу.

Вирощені монокристали алмазу, умови одержання яких було оптимізовано за складом ростових систем та значенням параметрів для забезпечення необхідної якості для виготовлення зразків пластин, розпилювали механічним способом; при необхідності заготовки кристалів піддавали розколюванню по площинах спайності, а також алмазному шліфуванню поверхневих дефектів (зазвичай по площинах, які ініціювали початок росту). Всього було виготовлено понад 60 зразків з розмірами від 4,0×3,9 до 10,6×10,8 мм, товщиною від 2,0 до 6,0 мм, типовий вигляд яких представлено на рис. 5–7.

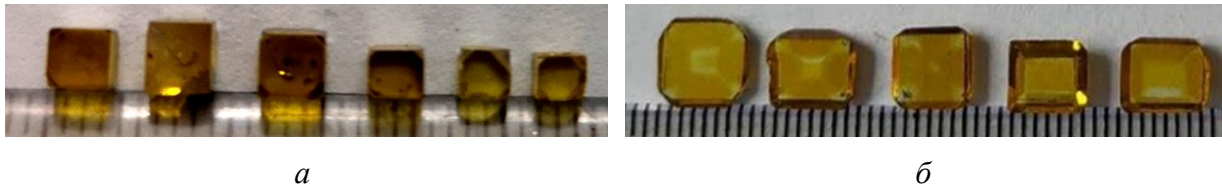


Рис. 5. Загальний вигляд пластин після первинної обробки з використанням операцій розколювання, розпилювання, алмазного шліфування та хімічного травлення монокристалів, отриманих в ростовій системі Fe–Ni–C, орієнтація пластин  $\langle 001 \rangle$ , розміри визначені як довжини сторін квадрата підготовленої поверхні пластин: а – 4×4, 4×5, 4×4, 3×3, 3×3, 3×2 мм; б – 7×7, 7×6, 7×5, 6×6, 6×7 мм

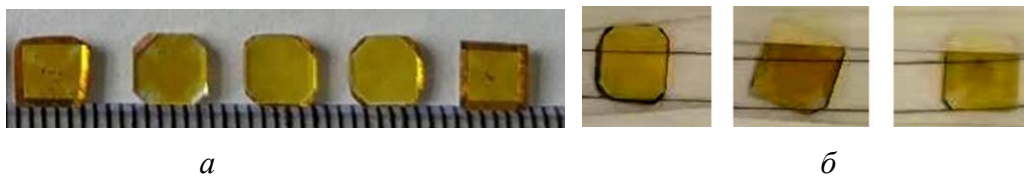


Рис. 6. Загальний вигляд пластин після первинної обробки з використанням операцій розколювання, розпилювання, алмазного шліфування та хімічного травлення монокристалів, отриманих в ростовій системі Fe–Co–C, орієнтація пластин  $\langle 001 \rangle$ , розміри визначені як довжини сторін квадрата підготовленої поверхні пластини: а – чотири пластини 5×5 і одна 6×5 мм; б – 8×8 мм – три пластини

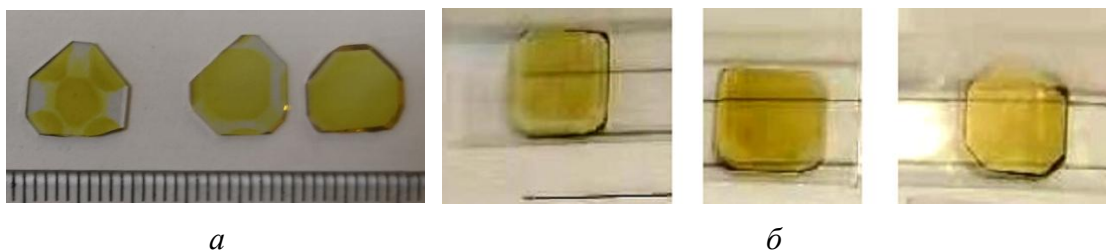


Рис. 7. Загальний вигляд пластин після первинної обробки з використанням операцій розколювання, розпилювання, алмазного шліфування та хімічного травлення монокристалів, отриманих в ростовій системі Fe–Co–Mg–C, розміри визначені як довжини сторін квадрата граней куба відповідних граней куба підготовленої поверхні пластини а – дві пластини 10×10 і одна 9×9 мм; б – 8×8 мм – три пластини

Вихідна товщина при виготовленні пластин (рис. 5–7) в залежності від габітусу і морфологічних особливостей отриманих кристалів може бути досить великою. Для зразків з розвинутою формою куба вона може досягати 5 – 6 мм і тому діапазон товщин таких пластин може складати від 0,5 до 5 мм та більше. Такі кристали були випробувані як додаткові теплостоки для охолодження реакційного столику CVD-реактора. Розташовуючи їх під затравочними пластинами в певній послідовності та збільшуючи їх висоту у напрямку від краю столика до його центру, можливо коригувати величину радіальних градієнтів температури на підкладці. Як показали експерименти, при цьому сферична форма плазмового утворення змінює розміри в горизонтальному і вертикальному напрямках, набуваючи форми еліпсоїда. Завдяки цьому ефекту розподіл градієнтів температури на підкладці стає більш рівномірним.

Для зменшення значень радіального градієнта температур було розроблено схему розміщення алмазних тепловідводів різної товщини на столику, які використовуються для здійснення процесу осадження вуглецю. Експериментальним шляхом було встановлено наступне. Якщо осаджувану поверхню 100 мм<sup>2</sup> розбити від центру до країв на концентричні зони з діаметрами 30, 50, 70 і 100 мм та збільшувати висоту алмазних теплостоків від 2 мм (у центрі) до 5 мм відповідно до збільшення діаметра зон, то такі умови осадження мають на поверхні підкладки значно менші градієнти температури, які забезпечують оптимальні умови CVD-осадження. При такому підході якість осадження алмазної фази значно поліпшується.

Результат використання таких теплостоків наведено на рис. 8.

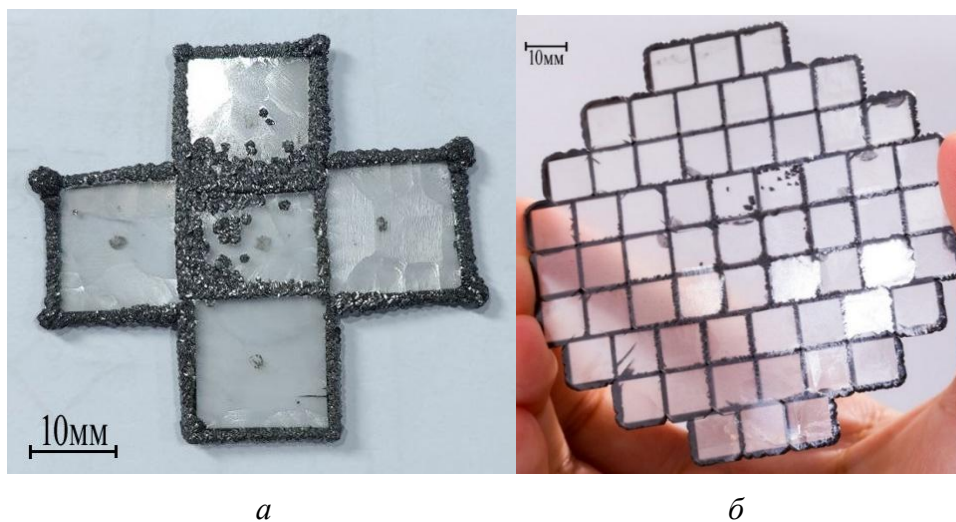


Рис. 8. Монокристалічні зразки після проведення циклу CVD-вирощування протягом 150 год без використання тепловідводів і системи охолодження (а), з використанням додаткових алмазних тепловідводів (б), цикл вирощування 300 годин, розміри одиної алмазної підкладки 10×10 мм

Проведені дослідження показали, що використання алмазних пластин різної товщини для охолодження реакційного столика діаметром 100–120 мм дозволяє зменшити радіальний градієнт температури з 2,0 °С/мм до 0,5–0,7 °С/мм, при цьому виникає зміна сферичної форми плазми на еліпсоїдальну (сплюснення вздовж вертикальної осі).

В першому випадку представлено 5 пластин розмірами 10×10 мм (рис. 8, а), які вирощувались на звичайному столику діаметром 130 мм без використання системи охолодження і без використання алмазних теплостоків. Тривалість циклу вирощування становила 150 годин; висота утвореної алмазної поверхні затравочних пластин не перевищувала 2 мм. Незважаючи на те, що цикл вирощування був відносно коротким і маса

вирощеного алмазного прошарку відносно невелика, спостерігається формування досить щільних і великих утворень полікристалічного алмазу на контактних поверхнях затравочних кристалів, які фіксуються практично з початкового моменту циклу вирощування; наприкінці циклу полікристалічний прошарок досягає розмірів понад 2 мм. Також спостерігалось спонтанне точкове формування полікристалічних центрів у центральній частині всіх 5 кристалів, що унеможливило їх подальше використання в будь-якій галузі промисловості, окрім ріжучого і правлячого інструменту.

Результати вирощування монокристалічних шарів з використанням додаткових теплостоків та їх розміщенням за запропонованим алгоритмом представлено на рис. 8, б. У цьому випадку формування прошарків полікристалічного алмазу на гранях та в центрі нарощеного шару практично не спостерігається. Всі вирощені зразки мали зростання у вертикальному напрямку від 4 до 5 мм, а колір нарощеного прошарку алмазу був безбарвний.

### **Висновки**

В результаті проведених досліджень встановлено, що використання оптимізованого складу розчинників на базі заліза, нікелю та кобальту для проведення процесів НРНТ-кристалізації алмазу в шестипуансонних апаратах зусиллям 48,5 МН дозволяє отримувати структурно досконалі монокристали алмазу типу Ib масою до 15 карат та більше.

Вивчено особливості ростових процесів при кристалізації алмазів типу Ib на затравці методом температурного градієнта, розроблено методи керування процесами росту та контролю параметрів нагрівання, що дозволило вирощувати кристали із забезпеченням оптимальних швидкостей росту, контрольованою формуванню габітуса та дефектно-домішковим складом.

Розроблено критерії відбору вирощених кристалів кубічного та кубооктаєдричного габітусів, отриманих із використанням оптимізованих складів сплавів-каталізаторів Fe–Ni, Fe–Co та Fe–Co–Mg та відповідних параметрів кристалізації для виготовлення заготовок пластин-підкладок.

Отримано монокристалічні затравочні пластини товщиною 0,5 мм та розмірами 4,0×3,9÷10,6×10,7 мм, оброблені механічним шляхом та плазмохімічним травленням до шорсткості  $\leq 10$  нм.

Шляхом оптимізації умов кристалізації вирощені монокристали алмазу кубічного габітуса, з яких отримані пластини товщиною до 5–6 мм; застосування таких пластин із заданим зменшенням висоти у напрямку від центру до периферії на поверхні столика для осадження дозволило підвищити якість CVD-кристалів та отримати високі результати за швидкістю росту. Встановлено, що варіювання розмірами, товщиною та способом розташування тепловідвідних елементів дозволяє коригувати розподіл температури поверхні осадження алмазу та величини її градієнтів.

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

*N.V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

### **APPLICATION OF SIX-PUNCH HIGH-PRESSURE APPARATUS FOR GROWTH IB TYPE DIAMOND SINGLE CRYSTALS FOR THE PURPOSE OF MANUFACTURING PLATES WITH AN AREA OF 80–100 MM<sup>2</sup>**

*Methods for obtaining structurally perfect diamond single crystals, which in shape and size allow the manufacture of diamond plates with an area of up to 100 mm<sup>2</sup> and their further use as initiators of CVD crystallization of diamond surfaces, have been investigated.*

Growth cells have been developed to obtain large-volume single-crystal samples by HTNR crystallization in the thermodynamic stability region; the compositions of growth systems have been optimized to obtain type Ib crystals based on Fe–Ni, Fe–Co, and Fe–Co–Mg solvents.

Methods have been developed for performing mechanical splitting, sawing, and grinding operations depending on the crystal habit shape, the presence and location of structural defects; their use was tested for the manufacture of plates of the required shape and crystallographic orientation with the aim of using them as initiating substrates for CVD processes of diamond crystallization.

The results of the research carried out as a result of the work should be applied to CVD carbon deposition to obtain diamond surfaces for use as crystallization initiators in the production of films.

**Key words:** diamond, single crystal, growth rate, kinetics, crystallization, impurities, defects, diamond plates, CVD processes.

### Література

1. Sumiya H., Toda N., Satoh S. Development of high-quality large-size synthetic diamond crystals. *J. Sei. Tech. Review*. 2005. Vol. 60. P. 10–15.
2. Koizumi S., Nebel C., Nesladek M. *Physics and Applications of CVD Diamond*. Wiley, 2008. 362 p.
3. Engineering the Future: Built to Last, Designed to Impress. *Guilin Guiye Machinery Co., Ltd.* URL: <https://www.glyjx.com>.
4. Ivakhnenko S., Lysakovskiy V., Savitskiy O., Burchenia A. Determining high quasihydrostatic pressure up to 7 GPa at temperature to 1400 using resistive sensors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, N 5(99). P. 13–20.
5. Синкенкес Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней. М.: Мир, 1989. 420 с.
6. Handbook of semiconductor manufacture technology / R. Doering, Y. Nishi (Eds.). *CRC Press*, 2017. 1720 p.
7. Chena L., Miao X., He X., Guo L., Fang S., Wang Y., Wang Z., Fang C., Ma H., Jia X. P. Effects of Fe–Ni solvent with different Fe contents on the boron concentration in colorless diamonds. *Journal of Crystal Growth*. 2018. Vol. 498. P. 67–70.
8. Deng F., Chen X., Huang L., Bing X., Xing X., Zhang L., Guo Z., Gu M., Cai Q., Sun J. HPHT synthesis and characterization of 5–8 mm diamond large crystals by Fe–Co alloy catalyst. *Journal of Crystal Growth*. 2023. Vol. 618. P. 127217.
9. Kovalenko T.V., Lysakovskiy V.V., Kvasnitsya V.M., Ivakhnenko S.O., Suprun O.M., Burchenia A.V. Morphology of diamond single crystals grown in the Fe–Co–Mg–C system. *J. Crystal Growth*. 2019. Vol. 507. P. 327–331.

Надійшла 25.08.25

### References

1. Sumiya, H., Toda, N., & Satoh, S. (2005). Development of high-quality large-size synthetic diamond crystals. *J. Sei. Tech. Review*, 60, 10–15.
2. Koizumi, S., Nebel, C., & Nesladek, M. (2008). *Physics and Applications of CVD Diamond*. Wiley.
3. *Engineering the Future: Built to Last, Designed to Impress*. (b. d.). Guilin Guiye Machinery Co., Ltd. <https://www.glyjx.com>.
4. Ivakhnenko, S., Lysakovskiy, V., Savitskiy, O., & Burchenia, A. (2019). Determining high quasihydrostatic pressure up to 7 GPa at temperature to 1400 using resistive sensors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5 (99)), 13–20.
5. Sinkenkes, J. (1989). *Rukovodstvo po obrabotke dragocennikh i podelochnikh kamnei* [Guide to the processing of precious and semi-precious stones]. Mir [in Russian].

6. Doering, R., Nishi Y. (Eds.). (2017). *Handbook of semiconductor manufacture technology*. CRC Press.
7. Chen, L., Miao, X., He, X., et al. (2018). Effects of Fe-Ni solvent with different Fe contents on the boron concentration in colorless diamonds. *Journal of Crystal Growth*, 498, 67–70.
8. Deng, F., Chen, X., Huang, L., et al. (2023). HPHT synthesis and characterization of 5–8 mm diamond large crystals by Fe–Co alloy catalyst. *Journal of Crystal Growth*, 618, 127217.
9. Kovalenko, T.V., Lysakovskiy, V.V., Kvasnitsya, V.M., et al. (2019). Morphology of diamond single crystals grown in the Fe-Co-Mg-C system. *J. Crystal Growth*, 507, 327–331.

УДК 539.893.621.317.451

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-190-196

**Н. О. Олійник, Г. Д. Ільницька**, кандидати технічних наук<sup>1</sup>;  
**О. М. Сизоненко**, д-р техн. наук<sup>2</sup>; **Г. А. Базалій**, наук. співр.<sup>1</sup>  
**С. Д. Заболотний**, заст. зав. від.<sup>1</sup>, **М. М. Циба**, наук. співробітник<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, 04074, м. Київ, Україна, e-mail: oleunik\_nonna@ukr.net

<sup>2</sup>Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України просп. Богоявленський, 43а, 54018, м. Миколаїв, Україна

<sup>3</sup>Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України, вул. Олега Мудрака, 13, Київ, 03164, Україна

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АДСОРБЦІЙНО-СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ, ВИХІДНИХ ТА ПІСЛЯ ЇХ МОДИФІКУВАННЯ**

Подаються результати дослідження адсорбційно-структурних характеристик поверхні мікро- та шліфпорошків синтетичного алмазу. Мета даної роботи – дослідження адсорбційно-структурних характеристик мікро- та шліфпорошків синтетичного алмазу, вихідних та після їх модифікування. Досліджували мікропорошки марки АСМ зернистістю 20/14, шліфпорошки марок АС20 зернистістю 100/80, АС6 зернистістю 125/100, АС100 зернистістю 400/315. Модифікування виконували хімічним обробленням шляхом рідкофазного окиснення різної концентрації та імпульсним обробленням високовольтними електричними розрядами у водному середовищі.

Адсорбційно-структурні характеристики: зокрема питому площу поверхні; питомий об'єм пор; середній радіус пор; сумарний об'єм пор, розподіл об'єму пор за їх розмірами визначали шляхом аналізу ізотерм низькотемпературної адсорбції-десорбції азоту із застосуванням газоадсорбційного аналізатора NOVA 2200 "Quantachrome" (США).

За результатами дослідження встановлено, що значення питомої площі поверхні вихідних мікропорошків і шліфпорошків має тенденцію до зниження при підвищенні зернистості і міцності порошків. Після модифікування порошків ця тенденція зберігається. Мікропорошки і шліфпорошки мають розвинену мезопористу структуру поверхні. Модифікування із застосуванням рідкофазного окиснення; імпульсного оброблення високовольтними електричними розрядами у водному середовищі вихідних мікро- та шліфпорошків синтетичного алмазу дозволяє змінювати адсорбційно-структурні характеристики порошків, зокрема питому площу поверхні; питомий об'єм пор; середній радіус пор; сумарний об'єм пор, розподіл об'єму пор за їх розмірами. Отримані результати можуть бути підґрунтям для подальшого розроблення бази даних формування оптимальних умов отримання адсорбційно-структурних характеристик порошків синтетичного алмазу широкого функціонального призначення.