

**Т. В. Коваленко**, канд, техн. наук; **В. В. Лисаковський**, д-р техн. наук;  
**С. О. Гордєєв**, мол. наук. співр.; **С. О. Івахненко**, чл.-кор. НАН України;  
**О. О. Заневський**, канд. хім. наук; **О. В. Савіцький**, мол. наук. співр.;  
**А. В. Бурчєня**, **О. М. Супрун**, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074, м. Київ, e-mail: tetiana.v.kovalenko@gmail.com*

## ОСОБЛИВОСТІ НАПРАВЛЕНОГО РОСТУ МОНОКРИСТАЛІВ АЛМАЗУ В СИСТЕМІ Fe–Co–Mg–C

*Досліджено особливості вирощування монокристалів алмазу типу Ib в розчин-розплавній системі Fe–Co–Mg–C методом температурного градієнта в шестипуансонному апараті високого тиску CS-VII при тиску 6,0–6,2 ГПа та температурі 1500–1750 °C; визначено концентраційні інтервали утворення алмазу різних типів в залежності кількості добавки Mg; встановлено, що в межах 1,8–2,2; 2,2–3,5; 3,5–4,5 і 4,5–5,7 ат. % Mg відбувається зміна типу вирощених кристалів в послідовності Ib → Ib+IIa → Ib+ IIb → Ib, відповідно. Встановлено зростання масової швидкості росту монокристалів в 2 – 2,5 рази, в залежності від температури і часу вирощування.*

**Ключові слова:** монокристали алмазу, метод температурного градієнту, Fe–Co–Mg–C, дефектно-домішковий склад.

### Вступ

Основним методом вирощування кристалів алмазу є метод температурного градієнта [1, 2] при умові знаходження ростової системи в області термодинамічної стабільності алмазу. Як показали проведені раніше дослідження, монокристали алмазу, отримані таким способом (НТНР-кристали), можливо вирощувати з високим ступенем структурної досконалості та забезпеченням варіювання дефектно-домішкового складу в широких межах шляхом відповідного вибору умов проведення процесу – складу ростової системи, температури, тиску та їх розподілу в об'ємі кристалізації [3–5].

Раніше нами було вивчено особливості кристалізації алмазу в розчин-розплавній системі Fe–Mg–C та вперше встановлено, що розчинники на основі Fe–Mg є перспективними для отримання структурно досконалих монокристалів алмаза різних типів [6–8]. Головною перевагою використання таких сплавів є забезпечення високих швидкостей росту, що у декілька разів перевищують швидкості, характерні для вирощування монокристалів з використанням розчинників вуглецю Fe–Ni, Fe–Al та Fe–Co. Суттєвим недоліком системи Fe–Mg для її використання є досить високі значення тиску для початку кристалізації (~7 ГПа). Такий рівень тисків є занадто високим на сьогодні для функціонування шестипуансонних кубічних пресів з розробленими конструкціями контейнерів [9, 10]. В роботі представляло інтерес дослідити вплив кількості добавки Mg на особливості росту монокристалів алмазу типу Ib у розчин-розплавній системі Fe–Co–Mg–C.

### Матеріали та методи дослідження

Вирощування монокристалів алмазу в розчин-розплавній системі Fe–Co–Mg–C проводили в шестипуансонному апараті високого тиску CS-VII при тиску 6,0–6,2 ГПа та температурі 1500–1750 °C. Точність керування тиском та температурою становила  $\pm 0,1$ – $0,2$  ГПа і  $\pm 3$ – $5$  °C, відповідно. Для приготування сплавів-розчинників використовувались вихідні компоненти з чистотою не нижче 99,99 %.


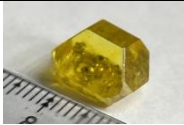

Дефектно-домішковий склад монокристалів алмазу було досліджено методом ІЧ-спектроскопії. Концентрації домішок азоту і бору в кристалах визначали за методом внутрішнього стандарту, згідно з яким в якості еталона приймають одну з смуг поглинання, які обумовлені коливаннями ґратки ( $2030 \text{ см}^{-1}$ ), для якої коефіцієнт поглинання відомий [11, 12]. Концентрацію парамагнітного азоту ( $N_C, \text{см}^{-3}$ ) у кристалі у вигляді одиночних атомів заміщення (центр С) розраховували по інтенсивності смуги  $1135 \text{ см}^{-1}$ :  $N_C = k \cdot 10^{18} \cdot \alpha_{1135}$ , де  $\alpha_{1135}$  – коефіцієнт поглинання в максимумі смуги  $1135 \text{ см}^{-1}$ ;  $k$  – коефіцієнт пропорційності [13–16]. Концентрацію некомпенсованих акцепторів бору ( $N_A - N_D, \text{см}^{-3}$ ) визначали за співвідношенням [12]:  $N_A - N_D = 0,7 \cdot 10^{16} \alpha_{2810}$ , де  $N_A - N_D$  – концентрація некомпенсованої домішки бору,  $\text{см}^{-3}$ ;  $\alpha_{2810}$  – коефіцієнт поглинання в максимумі смуги  $2810 \text{ см}^{-1}$ .

### Результати досліджень та їх обговорення


Вирощування монокристалів алмазу проводили в ростовій системі Fe–Co–Mg–C з вмістом магнію 1,8–5,7 ат. % методом температурного градієнта, згідно з яким при тиску та температурі, достатніх для того, щоб ростова система знаходилась в області термодинамічної стабільності алмазу, сплав-розчинник розміщується в зоні необхідного градієнта температури, щоб джерело вуглецю мало змогу розчинятися у більш розігрітій частині розчинника і кристалізуватись в зоні з меншою температурою. Рухомою силою процесу кристалізації та росту затравок служить різниця в розчинності вуглецю в залежності від значень температури в характеристичних точках розміщення затравки та джерела.

В цій системі експериментально було визначено концентраційні інтервали утворення алмаза типів *Ib*, *Ib+IIa* і *Ib+IIb*, табл. 1. При збільшенні концентрації магнію у розчиннику спостерігалось суттєве зростання, в 2–2,5 рази, масової швидкості монокристалів в залежності від температури впродовж часу вирощування до 200 годин. Приведені в табл. 1 значення вмісту магнію в ат. % відносяться до вихідної маси базового сплаву-розчинника Fe – 40 ат. % Co.

Таблиця 1. Експериментально визначені концентраційні інтервали утворення алмаза типів *Ib*, *Ib+IIa* і *Ib + IIb* та масові швидкості росту кристалів, в залежності від температури і вмісту Mg, у розчиннику на базі Fe – 40 ат. % Co;  $p = 6,0\text{--}6,2 \text{ ГПа}$

№ п/п	Вміст Mg у розчиннику, ат. %	Температурний діапазон, °C	Тип кристалу	Масова швидкість росту, мг/год	Вміст азоту, ppm	Вміст бору, ppm	Маса, карат	Фото кристалу
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,80–2,20	1500–1560	<i>Ib</i>	6,1–7,0	30–40	–	2,12	
2	2,20–3,50	1520–1600	<i>Ib+IIa</i>	6,8–7,4	5–10	–	8,14	
3	3,50–4,50	1560–1650	<i>Ib + IIb</i>	8,1–9,5	5–25	5–15	3,28	

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	4,50–5,70	1650–1750	Ib	10,3–13,5	30–35	–	3,93	

Отримані дані (табл. 1) демонструють мінімальний вміст домішки азоту від концентрації магнію в розчинниках (в межах 1,8–5,7 ат. %), що дорівнює 10–15 ppm  $N_{(x)}$ , для складу з 3,5 ат. % Mg; монокристали, одержані при температурах 1520–1600 °С, відносяться до типу Ib+IIa та мають яскраво жовтий колір (fancy yellow). Підвищення температури у ростовій системі такого ж складу на 100 – 120 °С, призводить до зміни типу монокристалів Ib+IIa → Ib+IIb. Слід підкреслити, що для розчинників з вмістом магнію 4,5 ат. % і більше не спостерігається утворення кристалів типу Ib+IIa. Експерименти показали, що для розчинника з вмістом 3,5 ат. % магнію при варіюванні температури від 1500 до 1650 °С можливе утворення двох змішаних типів монокристалів алмаза – Ib+IIa (при низьких температурах) та Ib+IIb (при більш високих температурах); цей результат можливо пояснити конкуруючим рівнем термодинамічної активності домішок, азоту і бору між собою, а також з вуглецем, на фронті кристалізації алмаза.

Вирощені монокристали алмазу мають кубооктаедричний або октаедричний габітус, табл. 1; ступінь розвитку габітусних граней мало змінюється при варіюванні кількості магнію

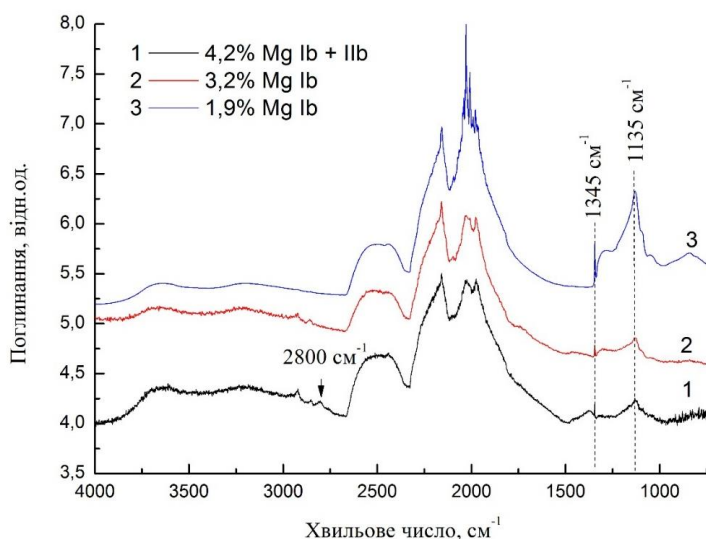


Рис. 1. ІЧ-спектри монокристалів алмазу, вирощеного в системі Fe–Co–Mg–C при вмісті Mg 4,2; 3,2; 1,9 ат. %

в ростовій системі і температурах 1500–1650 °С; площа розвитку граней октаедра значно збільшується при підвищенні температури понад 1650 °С.

Додавання до розчинника вуглецю Fe–Co магнію в межах 2,20 – 3,50 ат. % дещо знижує концентрацію парамагнітного азоту в кристалах (до 30–35 ppm). ІЧ-спектри таких кристалів – це типові спектри кристалів типу Ib; спостерігається зниження інтенсивності піків 1345, 1135 $\text{cm}^{-1}$  (рис. 1, крива 2).

Легування розчинника вуглецю Fe–Co магнієм в межах 1,80–2,20 ат. % суттєво не впливає на характер змінення дефектно-домішкового складу і тип монокристалів алмазу. На ІЧ-спектрах таких кристалів в однофоновій області спостерігаються піки 1345, 1135 $\text{cm}^{-1}$  (рис. 1, крива 3). Такі кристали містять домішку азоту в кількості 30–50 ppm, що дозволяє віднести їх до типу Ib згідно фізичної класифікації.

При вирощуванні монокристалів алмазу в ростовій системі з додаванням магнію в межах 2,20–3,50 та 3,50–4,60 ат. % відбувається утворення змішаних типів кристалів Ib+IIa та Ib+IIb, відповідно.

Вперше встановлено, що легування розчинника вуглецю Fe–Co магнієм в межах 1,8–5,7 ат. % дозволяє в 2 рази та більше підвищити масову швидкість росту монокристалів типу Ib (рис. 2).

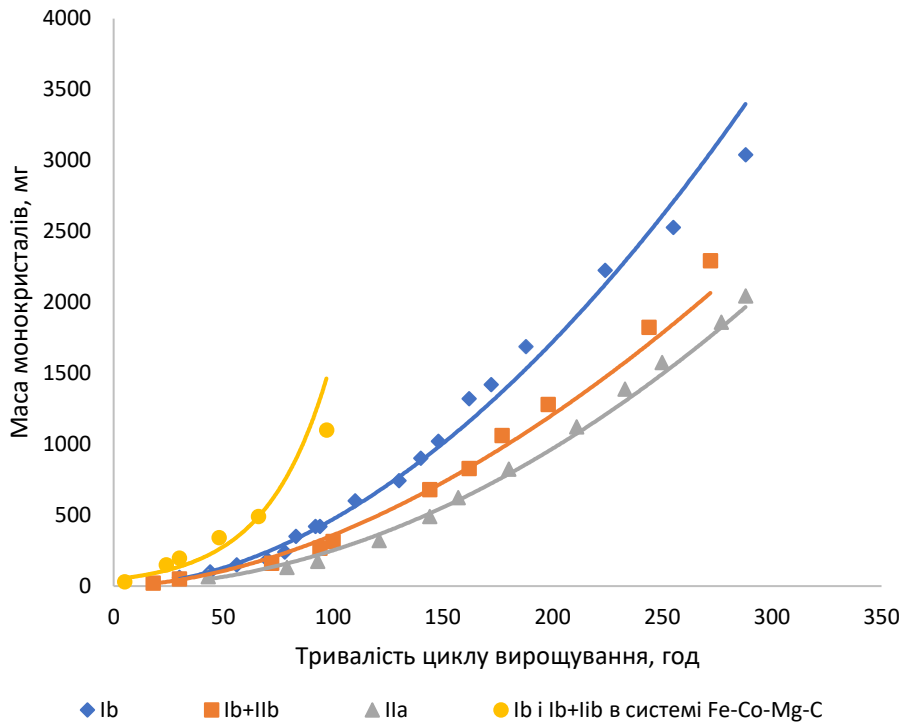


Рис. 2. Узагальнені кінетичні залежності маси монокристалів алмазу від тривалості циклу вирощування, отриманих при використанні сплаву-розчинника на основі Fe–Co із додаванням Ti, Zr і Mg

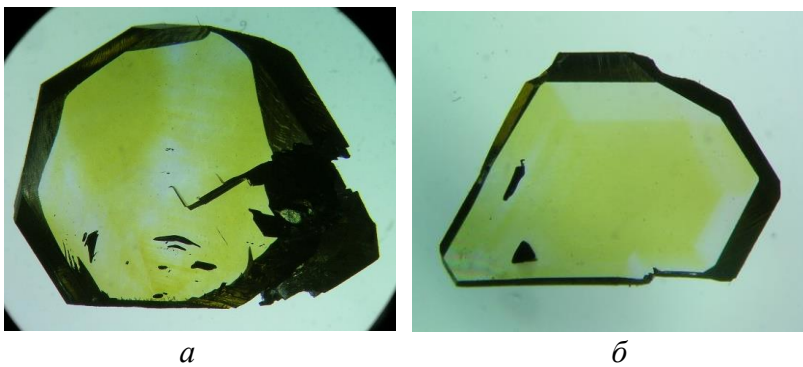


Рис. 3. Пластини монокристалів алмазу, вирощених в ростовій системі Fe–Co–Mg–C: а – при вмісті Mg 2,90 ат. %, з орієнтацією в напрямку  $\langle 111 \rangle$ , товщина 1 мм; б – при вмісті Mg 1,80 ат. %, зорієнтована в напрямку  $\langle 110 \rangle$ , товщина 0,3 мм

Для середньої маси отриманих кристалів  $\approx 5,0$  каратів швидкості росту становлять 11,6 мг/год; для порівняння, середня масова швидкість росту кристалів до 5 каратів в системах Fe–Co і Fe–Ni складає 6,4 і 5,6 мг/год, відповідно. Як свідчать дані, отримані з використанням термопар, температура кристалізації алмазу в розчинниках Fe–Co при легуванні Mg підвищується на 150–200 °C ( $p = 5,7\text{--}6,0$  ГПа). Це є, скоріш за все, причиною зростання величин

дифузії, як об'ємної, так і поверхневої, а також швидкостей просування ступенів росту на гранях кристалу.

Для встановлення природи утворення змішаних типів з кристалів, вирощених при легуванні сплаву-розчинника Fe–Co магнієм в межах 2,20–3,50 ат. %, було виготовлено плоскопаралельні пластини, зорієнтовані в напрямку  $\langle 111 \rangle$  та  $\langle 110 \rangle$  (рис. 3, а та рис. 3, б, відповідно).

Відповідно до проведених спектроскопічних досліджень, обидва кристали належать до типу *Ib* з характерними смугами і лініями поглинання; спостерігаються перегини при  $850\text{ см}^{-1}$  і  $1110\text{ см}^{-1}$ , що пов'язані між собою. Інтенсивність вказаних смуг і ліній в секторах росту граней октаедра (жовті області пластинок) на декілька порядків вища, ніж у секторах росту граней куба (світлі області пластинок) (рис. 4, 5).

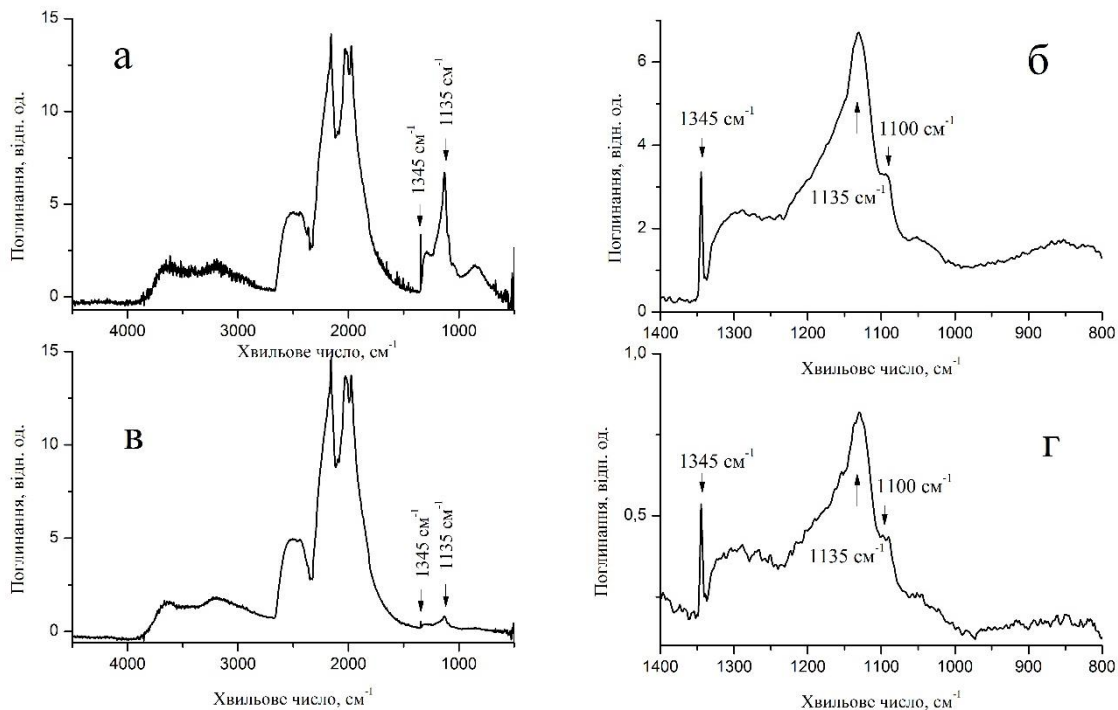


Рис. 4. ІЧ-спектри пластини монокристала алмазу змішаного типу *Ib+IIa* (рис. 3, а), вирощеного в системі *Fe-Co-Mg-C* при вмісті *Mg* 2,90 ат. %, зорієнтованої в напрямку  $\langle 111 \rangle$ : область з жовтим забарвленням (а, б), безбарвна область (в, г); б, г - однофоновна область ІЧ-спектрів

На рис. 4 зображені ІЧ-спектри поглинання в різних секторах росту монокристалу алмазу, вирощеного в системі *Fe-Co-Mg-C*, досліджувались сектори росту куба і октаедра. Із таких спектрів видно, що інтенсивність поглинання в секторах росту куба значно менша і наближається до нуля, причому настільки знижується, що піки  $1135\text{ см}^{-1}$  і  $1345\text{ см}^{-1}$  проявляються на рівні шумів і становить 0,6 і 0,7 відносних одиниць (рис. 4, в). Тому такі сектори росту нами були класифіковані як тип *IIa*.

На рис. 4, б, г ретельно розглянуті однофоновні області ІЧ-спектрів для різних секторів росту в пластині, вирізаній в напрямку  $\langle 111 \rangle$ , з яких чітко видно, що основним дефектним центром в таких кристалах є С-центри, тобто дефекти типу заміщення, а саме парамагнітний азот в заміщуючому положенні атома вуглецю, про що свідчить наявність піків поглинання на лінії  $1135\text{ см}^{-1}$ .

Аналогічна картина розподілу азоту в секторах росту спостерігається для пластини, вирізаної в напрямку  $\langle 110 \rangle$ , рис. 5. Однак, відносна інтенсивність піків поглинання в кубічних секторах росту також незначна, але вона вдвічі більша в порівнянні з інтенсивністю для пластини, вирізаної в напрямку  $\langle 110 \rangle$ ; такий кристал був класифікований як тип *Ib*.

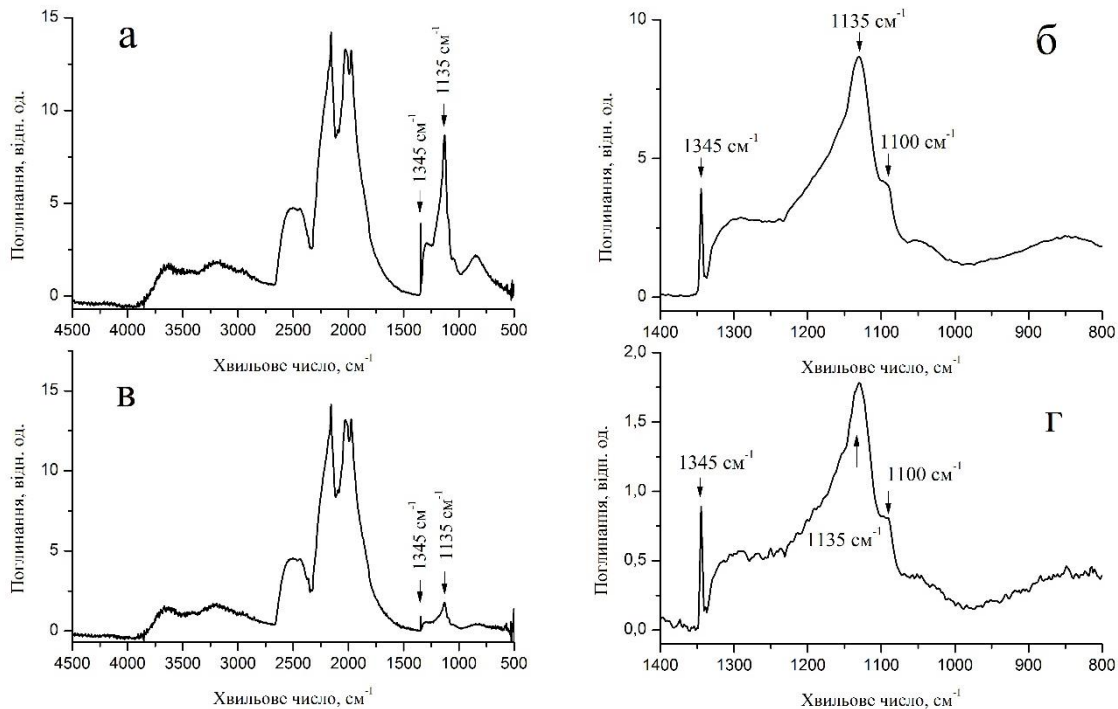


Рис. 5. ІЧ-спектри пластини монокристала алмазу змішаного типу Ів+ІІа (рис. 3, б), вирощеного в системі Fe–Co–Mg–C при вмісті Mg 1,80 ат. %, зорієнтованої в напрямку  $\langle 110 \rangle$ : область з жовтим забарвленням (а, б), безбарвна область (в, г); б, г - однофоновна область ІЧ-спектрів

## Висновки

1. Отримані результати по вирощуванню монокристалів алмазу в розчиннику на базі Fe–Co з добавкою магнію у кількості до 5,7 ат. % і при температурах 1500–1650 °C показують, що існує мінімум вмісту азоту в отриманих кристалах (~ 5–10 ppm) при кількості добавки магнію, що дорівнює ~ 3,5 ат. %; подальше збільшення кількості вмісту азоту в 2–3 рази у кристалах, вирощених в системі Fe–Co–Mg–C такого складу, можливо досягти за рахунок підвищення температури вирощування до 1700–1750 °C.

2. Використання розчин–розплавних систем Fe–Co–Mg–C для направленої кристалізації алмазу в області термодинамічної стабільності дозволяє підвищити швидкості росту монокристалів алмазу типу Ів і Ів+ІІа практично в 2 рази, в порівнянні з раніше використаними системами Fe–Co–Ti(Zr)–C.

3. Вперше досліджено вплив легування Mg розчинника вуглецю Fe–Co на особливості росту і дефектно–домішковий склад отриманих монокристалів алмазу та встановлено, що в межах 1,8–2,2, 2,2–3,5, 3,5–4,5 і 4,5–5,7 ат. % Mg відбувається зміна типу вирощених кристалів в послідовності Ів → Ів+ІІа → Ів+ ІІв → Ів, відповідно.

*Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт № 2020.02/0160 «Розробка нових складів розчинників вуглецю для вирощування монокристалів алмазу в області термодинамічної стабільності з контрольованим вмістом домішок азоту і бору з метою створення концепційних конструкцій електронних приладів».*

**T. V. Kovalenko, V. V. Lysakovskiy, S. O. Gordieiev, S. O. Ivakhnenko, O. O. Zanevskyy,  
O. V. Savitskiy, A. V. Burchenia, O. M. Suprun**

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

### **FEATURES OF DIRECTED GROWTH OF DIAMOND SINGLE CRYSTALS IN THE Fe–Co–Mg–C SYSTEM**

*The features of growing type Ib diamond single crystals in the Fe–Co–Mg–C solution-melt system by the temperature gradient method in a six-punch high-pressure apparatus CS-VII at a pressure of 6,0–6,2 GPa and a temperature of 1500–1750 °C have been investigated; the concentration intervals of the formation of diamonds of different types are determined depending on the amount of Mg addition; it was found that within 1,8–2,2; 2,2–3,5; 3,5–4,5 and 4,5–5,7 at. % Mg, the type of grown crystals changes in the sequence Ib → Ib + IIa → Ib + IIb → Ib, respectively. An increase in the mass growth rate of single crystals was established by a factor of 2–2,5, depending on the temperature and growth time.*

**Key words:** *diamond single crystals, temperature gradient method, Fe–Co–Mg–C, defect-impurity state.*

**Т. В. Коваленко, В. В. Лысаковский, С. А. Гордеев, С. А. Ивахненко, О. А. Заневский,  
А. В. Савицкий, А. В. Бурчения, Е. М. Супрун**

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

### **ОСОБЕННОСТИ НАПРАВЛЕННОГО РОСТА МОНОКРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА В СИСТЕМЕ Fe–Co–Mg–C**

*Исследованы особенности выращивания монокристаллов алмаза типа Ib в раствор-расплавной системе Fe–Co–Mg–C методом температурного градиента в шестипуансонном аппарате высокого давления CS-VII при давлении 6,0–6,2 ГПа и температуре 1500–1750 °C; определены концентрационные интервалы образования алмазов разных типов в зависимости от количества добавки Mg; установлено, что в пределах 1,8–2,2; 2,2–3,5; 3,5–4,5 и 4,5–5,7 ат. % Mg происходит изменение типа выращенных кристаллов в последовательности Ib → Ib+IIa → Ib+ IIb → Ib, соответственно. Установлено возрастание массовой скорости роста монокристаллов в 2–2,5 раза, в зависимости от температуры и времени выращивания.*

**Ключевые слова:** *монокристаллы алмаза, метод температурного градиента, Fe–Co–Mg–C, дефектно-примесный состав.*

#### **Література**

1. Strong H. M., Wentorf R. H. The growth of large diamond crystals // J. Naturwissenschaften. – 1972. – Vol. 59, № 1. – P. 1–7.
2. Wentorf R. H. Some studies of diamond growth rates // J. Phys. Chem. – 1971. – Vol. 75, № 12. – P. 1833–1837.
3. Sumiya H., Satoh S. High-pressure synthesis of high-purity diamond crystal // J. Diamond and Related Materials. – 1996. – Vol. 5, № 11. – P. 1359–1365.
4. Sumiya H., Toda N., Nishibayashi Y., Satoh S. Crystalline perfection of high purity synthetic diamond crystal // J. Crystal Growth. – 1997. – Vol. 178, № 4. – P. 485–494.
5. Sumiya H., Satoh S., Yazu S. High-quality synthetic diamond crystals // Rev. High Press. Sci. Technol. – 1998. – Vol. 7. – P. 960–965.
6. Defect-and-impurity state of diamond single crystals grown in the Fe–Mg–Al–C system / T. V. Kovalenko, S. A. Ivakhnenko, V. V. Lysakovskiy, et al. // J. Superhard Mater. – 2017. – № 39. – С. 83–87.
7. Lysakovskiy V., Kovalenko T., Ivakhnenko S., Zanevskyy O. Change of the thermodynamic activity of growth system components as a factor determining the diamond crystals type at HPHT crystallization / The 26th International Conference on High Pressure

- Science & Technology (AIRAPT 26): Books of abstracts (August 18th - 23rd, 2017 Beijing, China), Beijing, 2017, – P. 269.
8. Коваленко Т. В., Ивахненко С. А., Катруша А. Н., Лысаковский В. В. Si–V центр в монокристаллах алмаза, выращенных в системах на основе магния // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения. – 2012. – Вып. 15. – С. 268-271.
  9. Ivakhnenko S., Lysakovskiy V., Savitskiy O., Burchenia A. Determining high quasi-hydrostatic pressure up to 7 GPa at temperature to 1400 °C using resistive sensors // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2019. – 3/5 (99). – P. 13–21.
  10. Використання диференційного методу визначення квазігідростатичних тисків в комірках шестипуансонних пресів / А. В. Бурчєня, С. О. Ивахненко, В. В. Лисаковський та ін. // Надтверді матеріали. – 2021. – № 2. – С. 15–24.
  11. High-Pressure, High-Temperature Processing of Low-Nitrogen Boron-Doped Diamond / A. I. Cherpurov, A. P. Yelisseyev, E. I. Zhimulev, et al. // Inorganic Materials. – 2008. – Vol. 4, № 4. – P. 377–381.
  12. Физические свойства алмаза : справочник / под ред. Н. В. Новикова. – К. : Наукова думка, 1987. – 191 с.
  13. Ключев Ю. А., Непша В. И., Безруков Г. Н. Инфракрасные спектры синтетических алмазов // Алмазы. – 1972. – Вып. 5. – С. 5–10.
  14. Спектроскопические исследования поликристаллов, спеченных из алмазных микропорошков / Т. А. Начальная, Г. А. Подзярей, А. И. Прихна и др. // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 3. – С. 23–27.
  15. О состоянии примесного азота в искусственном алмазе / Е. В. Соболев, Ю. А. Литвин, Н. Д. Самсоненко и др. // ФТТ.– 1968. – Вып. 10, № 7. – С. 2266–2268.
  16. Chrenko R. M., Strong H. M., Tuft R. E. Dispersed paramagnetic nitrogen content in large laboratory diamond // Phil. Mag. – 1971. – Vol. 23, № 182. – P. 313–318.

Надійшла 30.06.21

## References

1. Strong, H. M., Wentorf, R. H. (1972). The growth of large diamond crystals. *J. Naturwissenschaften*, 59, 1, 1–7.
2. Wentorf, R. H. (1971). Some studies of diamond growth rates. *J. Phys. Chem.*, 75, 12, 1833–1837.
3. Sumiya, H., Satoh, S. (1996). High-pressure synthesis of high-purity diamond crystal. *J. Diamond and Related Materials*, 5, 11, 1359–1365.
4. Sumiya, H., Toda, N., Nishibayashi, Y., Satoh, S. (1997). Crystalline perfection of high purity synthetic diamond crystal. *J. Crystal Growth*, 178, 4, 485–494.
5. Sumiya, H., Satoh, S., Yazu, S. (1998). *High-quality synthetic diamond crystals. Rev. High Press. Sci. Technol.*, 7, 960–965.
6. Kovalenko, T. V., Ivakhnenko, S. A., Lysakovskiy, V. V., et al. (2017). Defect-and-impurity state of diamond single crystals grown in the Fe–Mg–Al–C system. *J. Superhard Mater.*, 39, 83–87.
7. Lysakovskiy, V., Kovalenko, T., Ivakhnenko, S., Zanevskyy, O. (2017). Change of the thermodynamic activity of growth system components as a factor determining the diamond crystals type at HPHT crystallization. *The 26<sup>th</sup> International Conference on High Pressure Science & Technology (AIRAPT 26): Books of abstracts (p. 269.) August 18<sup>th</sup>–23<sup>rd</sup>, 2017 Beijing, China.*
8. Kovalenko, T. V., Ivakhnenko, S. O., Katrusha, A. N., Lysakovskiy, V. V. (2012). Si–V tsentr v monokristallakh almaza, vyraschennykh v sistemakh na osnove magniia [Si – V

- center in diamond single crystals grown in magnesium-based systems]. *Porodorazrushaushchii I metalloobrabatyvaushchii instrument – tekhnika I tekhnologiya ego izgotovleniia I primeneniia – Rock-cutting and metal-working tools - equipment and technology for their manufacture and use*, 15, 268–271 [in Russian].
9. Ivakhnenko, S., Lysakovskiy, V., Savitskiy, O., Burchenia, A. (2019). Determining high quasi-hydrostatic pressure up to 7 GPa at temperature to 1400 °C using resistive sensors. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 99, 3/5, 13–21.
  10. Burchenia, A. V., Ivakhnenko, S. O., Lysakovskiy, V. V. (2021). Vykorystannia dyferentsiinoho metodu vyznachennia kvazihidrostatychnykh tyskiv v komirkakh shestypuansonnnykh presiv [Using of the differential method for determining quasi-hydrostatic pressures in six-punch presses cells]. *Nadtverdi materialy – Superhard materials*, 2, 15–24 [in Ukrainian].
  11. Chepurov, A. I., Yelisseyev, A. P., Zhimulev, E. I., et al. (2008). High-Pressure, High-Temperature Processing of Low-Nitrogen Boron-Doped Diamond. *Inorganic Materials*, 4, 4, 377–381.
  12. Novikov N. V. (Eds.) (1987). *Physical properties of diamond: a reference*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
  13. Kluiev, Yu. A., Nepsha, V. I., Bezrukov, G. N. (1972). Infrakrasnye spektry sinteticheskikhalmazov [Infrared spectra of synthetic diamonds]. *Almazy – Diamonds*, 5, 5–10 [in Russian].
  14. Nachalnaya, T. A., Podzerei, G. A., Prikhna, A. I., et. al. (1981). Spektroskopicheskie issledovaniia polikristallov, spechennykh izalmaznykh mikroporoshkov [Spectroscopic studies of polycrystals sintered from diamond micropowders]. *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, 3, 23–27 [in Russian].
  15. Sobolev, E. V., Litvin, Yu. A., Samsonenko, N. D., et. al. (1971). O sostoianii primesnogo azota v iskusstvennom almaze [On the state of impurity nitrogen in artificial diamond]. *FTT – PhSS*, 10, 7, 2266–2268 [in Russian].
  16. Chrenko, R. M., Strong, H. M., Tuft, R. E. (1971). Dispersed paramagnetic nitrogen content in large laboratory diamond. *Phil. Mag.*, 23, 182, 313–318.

УДК 004.942:621.921.34:62-987

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-147-152

**В. В. Лисаковський**, д-р техн. наук; **С. О. Гордєєв**, м.н.с.; **С. О. Івахненко**, чл.-кор. НАН України; **О. О. Заневський**, канд. хім. наук; **О. В. Савіцький**, м.н.с.

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, 04074. м. Київ, e-mail: sioz@ismv13.kiev.ua

### НТНР-КРИСТАЛІЗАЦІЯ АЛМАЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАЛІЧНИХ РОЗЧИННИКІВ ВУГЛЕЦЮ, ОДЕРЖАНИХ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

У роботі досліджена можливість компактування заготовок вихідних зразків сплавів-розчинників при використанні принципів порошкової металургії для отримання циліндричних заготовок діаметром більше 30 і заввишки понад 16 мм. Застосування попереднього формування заготовок із суміші порошків Fe і Co, які в початковому стані мають певні співвідношення компонентів і значення розмірів зерен, і подальше термобаричне спікання при 4–4,5 ГПа і температурі, що складає 0,8 від температури плавлення сплаву при атмосферному тиску, дозволили отримати вихідні заготовки з пористістю менше 2 %.