

В. М. Колодніцький, канд. фіз.-мат. наук; **Н. І. Колодніцька**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,
04074 м. Київ, e-mail: stmj@ism.kiev.ua, e-mail: nik_library@ism.kiev.ua*

ВІД ВІДКРИТТЯ О. І. ЛЕЙПУНСЬКОГО ДО ДОСЯГНЕНЬ ТВОРЦІВ УКРАЇНСЬКИХ АЛМАЗІВ

Висвітлено історію синтезу алмазу та представлено основні досягнення Інституту надтвердих матеріалів (ІНМ) ім. В. М. Бакуля НАН України в області синтезу і спікання надтвердих матеріалів при екстремально високих температурах і тисках. Наведено наукові напрямки, за якими працює наукова школа ІНМ, основні наукові результати, отримані співробітниками інституту, і перспективи розвитку галузі з одержання нових надтвердих матеріалів на основі алмазу.

Ключові слова: алмаз, синтез, фазова діаграма, О. І. Лейпунський, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, надтверді матеріали

Алмаз – матеріал, відомий людству понад 3 тис. років. Дослідники, зокрема в другій половині ХІХ–на початку ХХ століть прикладали величезні зусилля для експериментального синтезу алмазу, але вони були марними, а досліди – безуспішними. За висловом французького фізико-хіміка Анрі Луї Ле Шатель'є в 1908 р.: «Синтез алмазу для сучасного хіміка на стільки ж заманлива ідея, як і одержання філософського каменю для алхіміка».

Вже давно було доведено, що алмаз складається з чистого вуглецю, як і графіт, і тому багато хто намагався отримати алмази штучним шляхом з графіту.

Цікавою і загадковою із тих історій, які супроводжували експерименти із синтезу алмазу, є історія, пов'язана з іменем шотландського вченого Джеймса Балладіна Хеннея (1855–1931). У період з 1878 по 1880 рр. Дж. Хенней провів серію відомих дослідів, в ході яких газоподібні вуглеводні нагрівалися під тиском в присутності одного із металів: літію, калію, натрію чи магнію. За задумом дослідника, водень повинен був з'єднуватися з металом, а вуглець – виділятися у вільному стані, кристалізуючись у вигляді алмазу. В ході багатомісячних експериментів і численних невдач в одній із трьох уцілілих з вісімдесяти сталевих труб, в яких здійснювався «синтез», було виявлено чорну вуглеподібну масу, яка містила більше десятка прозорих кристалічних зерен. Хенней Дж. був впевнений, що це алмази, однак наукова спільнота поставилася скептично до його результатів.

Найбільшу популярність здобули роботи і досліди французького хіміка Анрі Муассана, який намагався створити синтетичний алмаз з поширених на той час форм вуглецю з використанням тиску в електродуговій печі.

При спалюванні алмаз, дійсно, перетворювався на графіт, однак зворотний процес не відбувався навіть при максимально досяжних тоді температурах близько десяти тисяч градусів. Оскільки алмаз значно щільніший графіту, то для його отримання потрібна не тільки висока температура (T), що забезпечує рухливість атомів вуглецю, а й високий тиск (p), щоб змусити кристалізуватися вуглець не у вигляді досить крихкої решітки графіту, а у вигляді більш щільної кристалічної решітки алмазу.

Якщо для будь-якої речовини побудувати діаграму, на якій по одній осі координат відкладати температуру, а по іншій тиск, то кожній точці діаграми відповідатиме одне з трьох агрегатних станів – тверде тіло, рідина або газ. Така діаграма, яку називають фазовою, буде розділена на три області граничними лініями, які відповідають точкам переходу з одного стану в інший. До 1930-их рр. вчені вже почали розуміти, що спроби отримати алмаз з графіту не вдавалися, тому що всі значення температури і тиску, тобто точки фазової діаграми, в яких проводилися досліди, перебували в області стійкості графіту. Однак на той час ще не було можливості досягти тиску вище, ніж 50 кілобар при температурах понад 1500

К. Не було відомо і самої фазової діаграми для вуглецю в області таких високих p , T -параметрів – ні отриманої експериментально (через недосяжність), ні розрахованої теоретично.

У 1939 р. в радянському науковому журналі «Успехи химии» була опублікована велика стаття молодого співробітника Інституту хімічної фізики АН СРСР Овсія Ілліча Лейпунського з детальними розрахунками, графіками і таблицями, в якій були оприлюднені досить точні і надійні параметри синтезу алмазу [1].

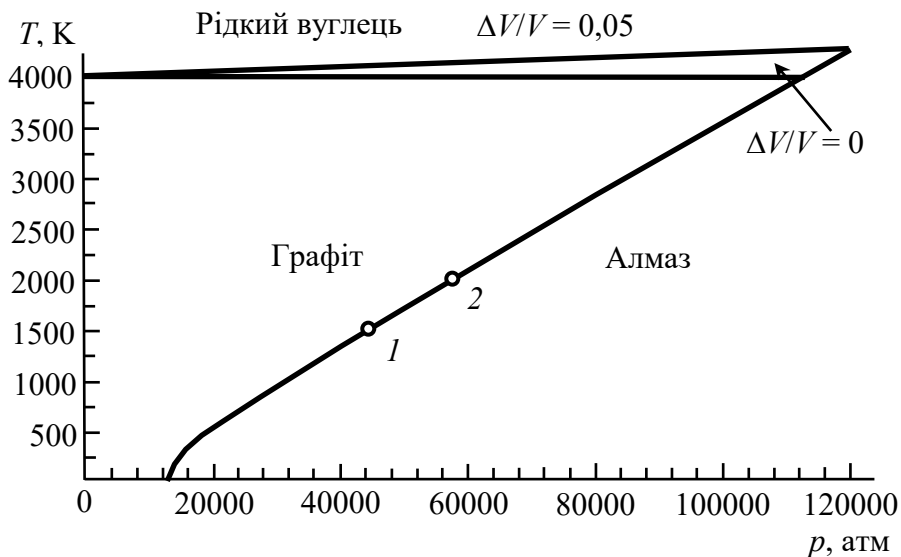
До цього в 1938 р. з'явилася стаття відомих фізико-хіміків Ф. Россіні і Р. Джессупа, що містила зведення термодинамічних потенціалів і констант для алмазу і графіту до температури 1400 К (тобто приблизно 1100 °С). Дослідники на підставі даних про теплоємність і теплоту згорання врахували різницю термодинамічного потенціалу графіту і алмазу при початковому тиску аж до 1400 К. Лейпунський О. І. вирішив продовжити розрахунки в області більш високих температур методом екстраполяції. Він хотів дістатися до області, в якій опинилася б стійкою алмазна і нестійкою графітова фаза.

Лейпунський О. І. провів екстраполяцію методом інтегрування термодинамічного потенціалу вуглецю при температурах від 1400 до 3400 К. При цьому він фізично обґрунтував допустимість нехтування стисливістю і розширенням графіту, а також справедливості наближеної рівності теплоємності алмазу і графіту, які входили в інтегралі як формально змінні величини. Виконавши термодинамічні розрахунки, О. І. Лейпунський в підсумку одержав формулу залежності температури плавлення графіту від тиску

$$T = T_0 e^{\pm \frac{0,05 pV}{Q}}, \quad (1)$$

де T_0 – «кінцева температура» в кельвінах, для якої відомі термодинамічні функції; p – тиск в кілобарах; V – об'єм; Q – прихована теплота плавлення графіту (за розрахунками Лейпунського 9000 кал); та знайшов наступний аналітичний вигляд рівняння лінії рівноваги на діаграмі алмаз–графіт в області температур вище 1400 К:

$$p \approx 5,5 + 26,4 \cdot 10^{-3} T. \quad (2)$$



Діаграма графіт–алмаз. Мінімальні p і T кристалізації алмазу із графіту: 1 – із залізного розчину; 2 – із твердого графіту

Лейпунський О. І. показав, що похибка цієї формули складає 10–12 %, що цілком прийнятно для практичних цілей синтезу алмазу. Тепер можна було вибирати точки фазової

діаграми, тобто пари значень p , T , при яких кристалізується саме алмаз, а графіт нестійкий. Але настала передвоєнна пора і довелося констатувати, що алмазами займатися не на часі.

Пізніше пророцтво О. І. Лейпунського збулося в точності, але тільки вже без його участі. Теорія була практично підтверджена отриманням через 15 років в ряді лабораторій алмазів в умовах, сформульованих Лейпунським.

Першими алмаз синтезували шведи. 16 лютого 1953 року це, нарешті, вдалося фахівцям фірми ASEA Е. Лундблату, Х. Лиандеру та Б. Платену. Шведи добре вивчили статтю О. І. Лейпунського від 1939 року і використали всі три необхідні умови: тиск, температуру і середовище-розчинник (залізо).

Два роки по тому, 31 грудня 1954 р., незалежно від шведів, в американській компанії «Дженерал Електрик» дослідники Т. Холл, Г. Стронг, Ф. Банді і Р. Венторф синтезували свої перші алмази, відразу зареєструвавши патент. В їхніх дослідах тиск досягав 86 тисяч атмосфер при температурі 1560 °С. Американцям вдалося отримати кристали розміром майже в міліметр. Промислове виробництво порошків синтетичних алмазів абразивної якості було розпочато в Детройті (США) в 1957 р., тобто через три роки після першого синтезу лабораторних зразків, а в листопаді 1957 р. відбувся перший продаж синтетичних алмазів для інструментального виробництва.

В той же час в Інституті фізики високих тисків (ІФВТ) АН СРСР під керівництвом директора інституту доктора фізико-математичних наук, професора Леоніда Федоровича Верещагіна (1909–1977) – фізика і хіміка, якого Лейпунський посвятив ще перед війною в свій задум синтезу алмазів, форсовано здійснювалися серйозні теоретичні і експериментальні дослідження та конструкторські розробки зі створення апаратури, що забезпечує високі тиски (до 100 тис. атм.) при температурах більше 5000 °С для синтезу алмазу. Подолавши всі проблеми на шляху до розв'язання цієї задачі, група дослідників із ІФВТ в квітні 1960 р., незалежно від своїх колег з іноземних фірм, в лабораторії надвисоких тисків одержала перші зразки синтетичних алмазів, що достовірно підтвердили рентгенівські дослідження зразків [2]. Це був величезний успіх. Попереду мала відбутися велетенська робота з доведення лабораторного методу синтезу алмазу до їхнього промислового випуску.

Верещагін Л. Ф., ставши в 1961 р. членом-кореспондентом АН СРСР, активно проробляв різні можливості передачі своєї розробки тому підприємству, яке справиться з цією роботою.

Історія розпорядилася так, що вся подальша доля епохальної розробки радянських вчених стала нерозривно пов'язана зі створенням і розвитком Інституту надтвердих матеріалів, з включенням в розробки Л. Ф. Верещагіна колективу Центрального конструкторсько-технологічного бюро (ЦКТБ) твердосплавного і алмазного інструменту Держплану УРСР на чолі з Валентином Миколайовичем Бакулем.

За спогадами одного з творців вітчизняного промислового виробництва синтетичних алмазів, кандидата технічних наук Олексія Йосиповича Пріхні, тому, що результати розробок Л. Ф. Верещагіна попали в Київ, сприяв збіг двох обставин [3].

Обставина перша. Апарат високого тиску, який застосовувався в ІФВТ для синтезу алмазу, містив 1 кг твердого сплаву. За один цикл в ньому утворювалося 0,25 карату (50 мг) алмазу. Але при цьому обидві твердосплавні матриці (за термінологією ІФВТ – пуансони) руйнувалися. Тобто ключовою проблемою в подальшій роботі була розробка досить довговічного апарата високого тиску. Більш вдалої організації, здатної виконати цю задачу, ніж ЦКТБ і його Дослідного заводу на той час не було.

Обставина друга. Знайомство В. М. Бакуля з Л. Ф. Верещагіним під час свого відрядження до Москви в 1960 р. та зустріч Л. Ф. Верещагіна з В. М. Бакулем, яка невдовзі відбулася вже в Києві в ЦКТБ і на його Дослідному заводі.

На наступний день по приїзді до Києва В. М. Бакуль і Л. Ф. Верещагін були прийняті секретарем ЦК Компартії України Ольгою Іллівною Іващенко і начальником промислового відділу Шевченко.

На прийомі Леонід Федорович дуже натхненно, докладно і переконливо розповідав про важливість синтезу алмазу, про необхідність його подальшого розвитку і широкого виробництва синтетичних алмазів для промислового потенціалу країни. Валентин Миколайович вразив конструктивним підходом до справи, великою впевненістю і бажанням без зволікань взятися за роботу.

Після кількох коротких уточнюючих запитань і роз'яснень Леоніда Федоровича Ольга Іллівна задовільно кивнула, скинула над столом обидві руки, енергійно потерла долоні і вигукнула: «Гаразд, Леоніде Федоровичу, передавайте ваш метод синтезу в Україну, – будуть наші українські алмази!». Це визначення злегка збентежило Л. Ф. Верещагіна, але він швидко відкинув сумніви, заспокоївши своїх колег, сказавши, що головне в даний час – швидко організувати промислове виробництво алмазів. Таким чином, питання про організацію промислового виробництва синтетичних алмазів в Україні було практично вирішене [4].

У листопаді 1960 р ІФВД АН СРСР передав ЦКТБ Держплану УРСР (нині Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України) методику отримання синтетичних алмазів і унікальну апаратуру. На побудову матеріальної бази з промислового випуску синтетичних алмазів у Києві Уряд Української РСР виділив 50 млн. крб. бюджетного асигнування. У короткий термін (близько 9 місяців) під керівництвом директора В. М. Бакуля колективом ЦКТБ була вирішена широкомасштабна технічна задача – вдосконалено відому і створено нову апаратуру високого тиску, виготовлено нове високопродуктивне обладнання для промислового виробництва алмазу при недосяжних раніше у виробництві екстремальних параметрах по тиску і температурі нагріву (вище 5 ГПа і близько 2000 К). Перші досліді із синтезу алмазу з допомогою співробітників ІФВД були виконані в листопаді 1960 р. Олександром Олександровичем Шульженком, Василем Івановичем Житнецьким і Анатолієм Федоровичем Ляшенком. Наполеглива, самовіддана творча праця дозволила достроково виконати урядове завдання і отримати 2 тисячі каратів (400 грамів) синтетичних алмазів в кінці жовтня 1961 року. Спільна робота колективів інститутів з Москви і Києва увійшла у вітчизняну історію найважливіших науково-технічних досягнень другої половини ХХ століття.

За п'ять місяців 1962 р. Інститутом було виготовлено 10 тисяч каратів (2 кг) синтетичних алмазів і повністю виконано урядове завдання, встановлене на цей рік.

Колектив за своєю ініціативою в короткий термін розробив, виготовив і освоїв високопродуктивну установку для синтезу алмазів продуктивністю 200 тисяч каратів на рік при двозмінній роботі.

Постанова Уряду зобов'язувала створити на базі Інституту потужності з виробництва 6 млн каратів (1,2 т) синтетичних алмазів на рік і забезпечити їхній випуск в 1962 році – 100 тис. каратів (випущено 137400 каратів) і в 1963 році – 3 млн каратів (випущено 3061630 каратів) [4].

Виробництво і застосування синтетичних алмазів у великих обсягах, їх широка доступність у порівнянні з природними стали реальним рушієм науково-технічного прогресу ХХ століття.

В 1968 р. Інститут уже виготовляв і поставляв інструмент із синтетичних алмазів 26 фірмам Австрії, Англії, Бельгії, Болгарії, Бразилії, Голландії, Греції, Італії, Канади, Мексики, США, Угорщини, Франції, Фінляндії, Швеції, Югославії.

Із спогадів О. Й. Пріхні [5]: «Розвиток зв'язків Інституту з підприємствами і організаціями країни базувався в основному на впровадженні розробок Інституту у виробництво. Потреба в розширенні цих зв'язків за межі країни була викликана необхідністю отримання інформації про рівень досягнень західних фірм в даній галузі. Для придбання зразків синтетичних алмазів та інструменту зарубіжного виробництва з них, а також для участі в міжнародних конференціях і семінарах, була необхідна валюта, якої в країні було мало.

Тому через Всесоюзне об'єднання «Верстатоїмпорт» Інститут розпочав експорт алмазного інструменту, виготовленого Дослідним заводом, спочатку в країні соціалістичного табору, а потім і за його межі. Частки валютної виручки, що належала Інституту за експортні поставки, вистачало не тільки на закупівлю зазначених зразків і на наукові закордонні відрядження співробітників, але і на закупівлю для Інституту складних приладів, що випускалися тільки передовими зарубіжними фірмами.

Однак розширення експорту синтетичних алмазів і виробів із них не обійшлося без конфлікту. Фірма «Дженерал Електрик» запатентувала синтез алмазу в усіх передових країнах. Тому, коли синтетичні алмази з Радянського Союзу почали експортувати в ФРН, фірма «Дженерал Електрик» направила в міжнародний суд в м. Гамбург позов до ВО «Верстатоекспорт» у зв'язку з порушенням її патентних прав. Цей позов був спрямований в наш Інститут.

І тоді в Інституті, вивчивши листування патентного відомства ФРН з заявником, що передувало видачі патенту, встановили наступне. Після опублікування у відкритій пресі змісту заявки «Дженерал Електрик» зі Швеції від фірми ASEA надійшло заперечення проти видачі патенту з посиланням на те, що метод синтезу, викладений в заявці, повторює метод, передбачений радянським фізиком О. І. Лейпунським, і опублікований в 1939 р. в журналі «Успехи химии».

Виник спір між стороною відповідача і заявником («Дженерал Електрик»), в якому заявник стверджував, що Лейпунський помилково визначив тиск, при якому можливе перетворення неалмазного вуглецю в алмаз, і помилкове його уявлення про роль заліза як розчинника вуглецю.

На час видачі патентів фірмі «Дженерал Електрик» (1963 г.) були виконані дослідження, які показали, що поліморфні перетворення в вісмуті, талії, барії і олові, за якими оцінювали високі тиски, відбуваються за тисків значно менших, ніж це було визначено раніше, тому Інститутом було прийнято рішення оскаржити правомірність видачі цих патентів, посилаючись на роботу О. І. Лейпунського. ВО «Верстатоїмпорт» був поданий зустрічний позов в той же суд з вимогою анулювати згадані патенти, як видані незаконно.

Після вивчення нашого листа, враховуючи підтримку шведських експертів, фірма «Дженерал Електрик» відмовилася від своїх претензій за умови, що радянська сторона не буде вимагати анулювання патентів. Позови були відкликані із суду обома сторонами в один і той же день (в червні 1970 р.)»

14–18 вересня 1971 р. в Києві відбулася масштабна Міжнародна конференція «Interdiamond-71» присвячена застосуванню синтетичних алмазів у промисловості. На конференції у своєму виступі В. М. Бакуль констатував існування на той час відомих трьох методів синтезу алмазу [6]:

в області термодинамічної стабільності алмазу впливом на вихідний вуглецевмісний матеріал високими статичним тиском і температурою протягом часу, що вимірюється, принаймні, кількома секундами;

в області термодинамічної стабільності алмазу впливом на вихідний вуглецевмісний матеріал високими динамічним тиском і температурою протягом часу, що вимірюється мікросекундами і частками мікросекунди;

в області термодинамічної стабільності графіту, здійснюваний при атмосферному і менших тисках і високій температурі епітаксійним нарощуванням алмазу на затравці.

Було сказано, що основна маса синтетичних алмазів виробляється в усьому світі за першим методом, тобто при високих статичних тисках, теорію синтезу яких була вперше розроблено О. І. Лейпунським. Сформульоване О. І. Лейпунським раціональне поєднання трьох умов, необхідних для синтезу алмазу (значення температури, тиску і наявність певного середовища), лежать в основі методів виробництва синтетичних алмазів при високому тиску, що використовуються в СРСР, США, Англії, Швеції, Японії, ПАР та інших країнах.

У 1972 р. Інститут надтвердих матеріалів ввійшов до складу Національної академії наук України і працює в цьому статусі вже 47 років. За цей час Інститут склався як колектив вчених, інженерів-виробничників, що вирішує на фундаментальних фізико-хімічних основах актуальні завдання створення і застосування алмазних та алмазоподібних матеріалів, необхідних для виготовлення інструментів, в електроніці, машино- і приладобудуванні [7–9]. Їхнє різноманітне багатоцільове використання для точіння, свердління, фрезерування, шліфування, деформуючої обробки, для виготовлення функціональних конструктивних елементів визначає успіх високих технологій виготовлення прецизійних виробів для інформаційної техніки, оптичних елементів, особливо відповідальних вузлів приладо- та машинобудування. Промислове застосування таких розробок визначає ефективність, а іноді навіть пряму можливість здійснення технологічних процесів двигуно- і турбобудування та виробництва атомної техніки. Вони сприяють прогресу оборонної техніки і ракетобудування, виготовленню крупних лазерних дзеркал, підвищенню якості екранів телевізорів і мобільних телефонів, одержанню приладів нічного бачення і багатьох інших важливих елементів сучасної техніки.

За період своєї діяльності в системі НАН України в Інституті було створено наукову школу в галузі матеріалознавства синтетичних надтвердих матеріалів, одержаних при високих температурах і тисках, і впровадження їх у виробництво [10]. Це колектив висококваліфікованих спеціалістів різних поколінь, об'єднаних спільними підходами до розв'язання проблем, стилем роботи й мислення, оригінальністю ідей і методів їх реалізації, який сформував і нині розвиває три основні напрями науково-дослідної роботи:

- вивчення впливу високих тисків на матеріали, технологічне використання високих тисків у виробничих процесах;

- дослідження фізико-хімічних процесів одержання монокристалічних дисперсних, плівкових, композитних структурованих надтвердих матеріалів в широкому діапазоні температур і тисків, створення нових технологій одержання функціонально орієнтованих матеріалів і виробів на їх основі;

- розвиток наукових основ створення новітніх високих технологій обробки металів і неметалів інструментом із надтвердих матеріалів, розробка методів і технологій застосування функціонально орієнтованих матеріалів в базових галузях промисловості.

Головним, з досвіду Інституту, є опанування організації системної роботи – від інформаційно спрямованого пошуку і фундаментального дослідження до створення і широкого використання нових надтвердих матеріалів, запровадження нових процесів виробництва, нестандартного технологічного обладнання і приладів в різних індустріальних процесах.

Науковим та інженерно-технічним колективом Інституту створено більше сотні нових надтвердих моно-, полікристалічних і композиційних матеріалів, знайдено ефективне застосування інструментів і конструкційних виробів з них. Учені Інституту отримали значні наукові результати в галузі синтезу та спікання надтвердих матеріалів і здобули міжнародний авторитет та загальне визнання [9].

Колектив Інституту за час своєї діяльності в академічному статусі створив цілий ряд нових надтвердих матеріалів на основі алмазу різного функціонального призначення і розробив промислові технології їх виготовлення [11].

На сьогодні активно розвивається новий напрям створення надтвердих матеріалів – полікристалічних надтвердих композиційних матеріалів з гібридною алмазною основою (торгова марка «гібридайт») [12]. Реалізується поєднання унікальних фізико-механічних і теплофізичних характеристик CVD-алмазу з високою твердістю, міцністю і термостійкістю полікристалічної алмазної оболонки із алмазного композиційного термостійкого матеріалу (АКТМ), що забезпечує високу зносостійкість доліт у важких умовах при бурінні глибоких свердловин на газ і нафту.

Випробування циліндричних породоруйнуючих елементів з гібридайта на зносостійкість при точінні на токарно-гвинторізному верстаті (моделі ДПП-200) коростишівського графіту XI категорії за буримістю показали, що в процесі їх роботи присутній очевидний ефект

«самозаточування», тобто при зношуванні з'являється рівномірна конусність на їх робочому торці при вершині армуючої вставки з CVD-алмазу. Випробуваннями також встановлено, що зносостійкість породоруйнівних елементів, виготовлених з гібридаїта, в 5,25–14,0 разів перевищує зносостійкість, виготовлених з неармуючого АКТМ [11].

Останнім часом увагу матеріалознавців привертає графен – одна з алотропних форм вуглецю. Завдяки своїм унікальним властивостям, графені різної будови і розмірів активно використовують як компонент, здатний формувати позитивні властивості матеріалів, зокрема, підвищувати їх експлуатаційні характеристики. В результаті добавки графена в шихту для спікання алмазних полікристалів, отримано новий алмазний композиційний полікристалічний матеріал, який не містить вільного кремнію, з міцністю на 35 % і зносостійкістю в 7 разів вище, ніж у зразків, отриманих без добавки графена [13].

Відомо, що підриг потужних вибухових речовин з негативним кисневим балансом дозволяє отримувати в умовах вибуху такі температури і тиски, які на фазовій діаграмі вуглецю відповідають області термодинамічної стабільності алмазу.

Нанокристалічні алмазні порошки зі середнім розміром частинок 4 нм отримують за допомогою ударно-хвильової обробки сумішей графіту з металами або вибуху органічних речовин з високим вмістом вуглецю і відносно низьким вмістом кисню.

В Інституті розв'язано проблеми формування полікристалічних матеріалів з високим рівнем фізико-механічних властивостей методом спікання алмазних нанопорошків в умовах високого тиску. Одержано наноккомпозит алмаз–карбід вольфраму, який пройшов успішне випробування під час буріння анкерних шпурів по породах міцністю до 168 МПа й абразивністю до 45 мг [14].

Проведені останнім часом дослідження дозволили отримати важливі фундаментальні результати для вивчення закономірностей фазових перетворень елементів і багатокомпонентних систем, що застосовуються для вирощування монокристалів алмазу при високому тиску. Аналіз цих результатів показав, що в світі виникла потреба в структурно досконалих монокристалах алмазу типів *Ib*, *IIa* и *IIb* для застосування в високих технологіях і вона може бути вирішена тільки із застосуванням апаратів високого тиску великого обсягу, що мають високий рівень функціональних характеристик. Отримані результати стали основою технології виробництва алмазної продукції для використання в електроніці, лазерній техніці, прецизійній механічній обробці, буровому інструменті [15].

Використання шестипуансонної техніки високих тисків великого об'єму дозволило вирощувати кристали з більшою продуктивністю. Згідно з оцінками, використання такої апаратури високого тиску дає можливість випускати не менше 1 млн. карат на рік структурно досконалих монокристалів необхідного типу для різноманітного застосування.

Минуло 80 років з часу встановлення О. І. Лейпунским лінії рівноваги графіт–вуглець. Він вперше передбачив, що в присутності розплавів металів, зокрема VIII групи Періодичної системи, мінімальний тиск утворення алмазу повинен суттєво знижуватися порівняно з тиском, необхідним для прямого перетворення графітової структури в алмазну. Це передбачення стало пророчим і було використано для розробки промислових технологій одержання синтетичних алмазів.

Експерт з Франції, видатний інженер з обладнання для високих тисків Борис Водар, який дав висновок, сприятливий для американців, що, мовляв, за даними зі статті О. І. Лейпунського неможливо отримати алмази, через роки по тому відвідав у Києві Інститут надтвердих матеріалів. Йому показали прес, який працював в точності за діаграмою Лейпунського. На цьому пресі отримували дві тисячі карат алмазів в день. А над пресом висів портрет О. І. Лейпунського. Очевидці згадують, що Водар був збентежений...

Отражена история синтеза алмаза и представлены основные достижения Института сверхтвердых материалов (ИСМ) им. В. Н. Бакуля НАН Украины в области синтеза и спекания сверхтвердых материалов при экстремально высоких температурах и давлениях. Приведены научные направления, по которым работает научная школа ИСМ, основные научные результаты,

полученные сотрудниками института, и перспективы развития отрасли по получению новых сверхтвердых материалов на основе алмаза.

Ключевые слова: алмаз, синтез, фазовая диаграмма, О. И. Лейпунский, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, сверхтвердые материалы

V. M. Kolodnitskyi, N. I. Kolodnitska

V. N. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine

**FROM THE DISCOVERY OF O. I. LEIPUNSKY TO THE ACHIEVEMENTS
OF THE CREATORS OF UKRAINIAN DIAMONDS**

The history of diamond synthesis is highlighted and the basic achievements of the Bakul Institute for Superhard Materials (ISM) of NAS of Ukraine in the field of synthesis and sintering of superhard materials at extreme high temperatures and pressures are presented. The scientific directions, on which the scientific school of the ISM operates, the basic scientific results received by the Institute's staff, and prospects of the industry for obtaining new superhard materials on the basis of diamond are given.

Key words: diamond, synthesis, phase diagram, V. M. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, superhard materials

Література

1. Лейпунский О. И. Об искусственных алмазах // Успехи химии. – 1939. – Т. VIII, вып. 10. – С. 1519–1534.
2. Верещагин Л. Ф. Синтетические алмазы и гидроэкструзия: Избр. труды. – М.: Наука, 1982. – 328 с.
3. Исследования, разработки в области производства алмаза (воспоминания А. И. Прихны) // Тетяна Олексіївна Пріхна : біобібліографія. – Київ, 2017. – С. 23–37.
4. Алмаз Украины: Пятидесятилетие работы Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля (1961–2011 гг.). – К. : «Азимут-Украина», 2011. – 448 с.
5. Спор с «Дженерал Электрик» // Тетяна Олексіївна Пріхна : біобібліографія. – Київ, 2017. – С. 37–40.
6. Бакуль В. Н. Сверхтвердые инструментальные материалы / Синтетические алмазы в промышленности : сб. докл. – Киев : Наук. думка, 1974. – С. 7–11.
7. Новиков Н. В., Шульженко А. А., Ивахненко С. А., Боримский А. И. Основные достижения Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины в области синтеза и спекания сверхтвердых материалов // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов : сб. науч. тр. / отв. ред. Н. В. Новиков, А. А. Шульженко; НАН Украины, Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – К., 2011. – С. 6–13.
8. Новиков Н. В. О достижениях Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины в области синтеза и спекания сверхтвердых материалов за 50 лет деятельности // Сверхтв. материалы. – 2011. – № 3. – С. 3–8.
9. Туркевич В. З., Колодницький В. М. Про досягнення Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля в галузі синтезу і спікання надтвердих матеріалів за період діяльності в складі НАН України // Сверхтв. материалы. – 2018. – № 5. – С. 3–9.
10. Научная школа Института сверхтвердых материалов / редкол.: гл. ред. Н. В. Новиков и др.; сост. Н. И. Колодницкая; НАН Украины, Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – К., 2017. – 592 с.
11. Шульженко А. А., Соколов А. Н., Гаргин В. Г. Новые сверхтвердые материалы на основе алмаза: получение, свойства. Обзор // Сверхтв. материалы. – 2018. – № 5. – С. 10–24.
12. Свідоцтво України на знак для товарів і послуг 158183. – Гібридайт. – Опубл. 10.07.12. – Бюл. № 13.
13. Шульженко А. А., Яворска Л., Соколов А. Н. и др. Новый износостойкий сверхтвердый алмазный композиционный поликристаллический материал // Сверхтв. материалы. – 2018. – № 1. – С. 3–11.

14. Бочечка О. О. Одержання полікристалічних матеріалів спіканням нанодисперсних алмазних порошків за високого тиску. Огляд // Сверхтв. материалы. – 2018. – № 5. – С. 38–50.
15. Лысаковский В. В., Новиков Н. В., Ивахненко С. А., Заневский О. А., Коваленко Т. В. Выращивание структурно совершенных монокристаллов алмаза при высоких давлениях и температурах. Обзор // Сверхтв. материалы. – 2018. – № 5. – С. 25–37.

Надійшла 10.07.19

References

1. Leypunskiy, O. I. (1939). Ob iskustvennykh almazakh [About artificial diamonds]. *Uspekhi khimii – Advances of Chemistry*. Vol. VIII, 10. 1519–1534 [in Russian].
2. Vereshchagin, L.F. (1982). *Sintetichskie almazy i gidroekstruziya [Synthetic diamonds and hydrostatic extrusion]*. Moscow: Nauka [in Russian].
3. Research, development in the field of diamond production (memories of A. I. Prikhna). *Tetyana Oleksiivna Prikhna: Biobibliography*. Institut nadtverdych materialiv im. V. M. Bakulya, Kyiv, 2017 [in Russian].
4. *Almaz Ukrainy. Pyanidesyatiletie raboty Instituta sverchtverdych materialov im. V. N. Bakulya (1961–2011 gg.) [Diamond of Ukraine. The fiftieth anniversary of the V. N. Bakul Institute for Superhard Materials (1961–2011 years)]*. Kiev: «Azimut-Ukraina», 2011.
5. Dispute with General Electric. *Tetyana Oleksiivna Prikhna: Biobibliography*. Institut nadtverdych materialiv im. V. M. Bakulya, Kyiv, 2017 [in Russian].
6. Bakul, V. N. (1974). Sverkhtverdye instrumental'nye materialy [Superhard instrumental materials]. *Synthetic diamonds in industry*. Kiev: Naukova Dumka.
7. Novikov, N. V., Shul'zhenko, A. A., Ivachenko, S. A., & Borimskiy, A. I. Osnovnye dostizhenia Instituta sverchtverdych materialov im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy v oblasti sintezha i spekania sverchtverdych materialov [The main achievements of the V. N. Bakul Institute of Superhard Materials of the NAS of Ukraine in the field of synthesis and sintering of superhard materials]. *Proceedings: Sintez, spekanie i svoystva sverchtverdych materialov – Synthesis, sintering and properties of superhard materials*. (pp. 6–13). Kiev, 2011. [in Russian].
8. Novikov, N. V. (2011). On the achievements of Bakul Institute for superhard materials, national academy of sciences of Ukraine, in the field of synthesis and sintering of superhard materials over the past 50 years of the Institute's activities. *J. Superhard Materials, Vol. 33, N 3*, 147–150.
9. Turkevych, V. Z. & Kolodnitskyi, V. M. (2018). On the Achievements of the Bakul Institute for Superhard Materials in the Field of Synthesis and Sintering of Superhard Materials for the Period of the Activity in the Composition of the National Academy of Science of Ukraine. *J. Superhard Materials, Vol. 40, N 5*, 299–303.
10. *Nauchnaya shkola Instituta sverchtverdych materialov [Scientific school of the Institute for Superhard Materials]*. Kiev, 2017
11. Shul'zhenko, A. A., Sokolov, A. N., & Gargin V. G. (2018). New Diamond-Based Superhard Materials. Production and Properties. Review. *J. Superhard Materials, Vol. 40, N 5*, 304–314.
12. *Hybridite. Ukraine Trademark Certificate No. 158 183*, Byul., 2012, no. 13.
13. Shul'zhenko, A. A., Jaworska, L., Sokolov, A. N., et al. (2018). Novel Wear-Resistant Superhard Diamond Composite Polycrystalline Material. *J. Superhard Materials, Vol. 40, N 1*, 1–7.

14. Bochechka, O. O. (2018). Production of Polycrystalline Materials by Sintering of Nanodispersed Diamond Nanopowders at High Pressure. Review. *J. Superhard Materials, Vol. 40, N 5, 325–334.*
15. Lysakovskiy, V. V., Novikov, N. V., Ivakhnenko, S. A., et al. (2018). Growth of Structurally Perfect Diamond Single Crystals at High Pressures and Temperatures. Review. *J. Superhard Materials, Vol. 40, N 5, 315–324.*

УДК: 622.248.33

DOI: 10.33839/2223-3938-2019-22-1-12-24

А. К. Судаков, д-р техн. наук¹, **И. И. Мартыненко**², **Д. А. Судакова**, кандидаты технических наук

¹*Национальный технический университет «Днепро́вская политехника», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, 49005, Днепр, E-mail: sudakovu@ukr.net*

²*Государственная служба геологии и недр Украины, ул. Антона Цедика, 16, 03057, Киев, E-mail: martinenko@geomail.kiev.ua*

НАУЧНАЯ ШКОЛА Б.А.М. – ПОКОЛЕНИЯ УЧЕНИКОВ И ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Целью исследований является повышение эффективности изоляционных работ в буровых скважинах, достигаемое за счет применения и анализа нетрадиционных технологий тампонирувания поглощающих горизонтов, разработанных учениками А.М. Бражененко. Поставленные задачи решались комплексным методом исследования, включающим анализ и обобщение литературных и патентных источников, проведение аналитических, экспериментальных исследований. Сформирована научная школа, основоположником которой стал А. М. Бражененко. Тремя поколениями исследователей разработаны и обоснованы инновационные технологии изоляции поглощающих горизонтов термопластичными (легкоплавкими) материалами, для реализации которых необходимо выполнить: доставку термопластичных материалов на забой скважины, плавление (нагрев) термопластичных материалов и их задавливание в каналы поглощения. Для различных геолого-технических условий бурения на кафедре техники разведки месторождений полезных ископаемых, под руководством А. М. Бражененко, разработаны тампонажные термопластичные (легкоплавкие) материалы и технологии изоляции поглощающих горизонтов буровых скважин.

Ключевые слова: бурение скважин, поглощающий горизонт, изоляция, тампонажные материалы

Постановка проблемы. Украина имеет значительные запасы полезных ископаемых. Для вовлечения этих запасов в эксплуатацию необходимо значительное увеличение объемов разведочных и эксплуатационных скважин. Процесс бурения скважин связан с геологическими осложнениями. Наиболее распространенным осложнением является поглощение промывочной жидкости. На ликвидацию поглощений тратится значительная часть времени и средств от общих расходов на бурение скважин. Поглощение приводит к нарушению технологического режима бурения, целостности стенок скважины, провоцирует аварии [1].

Анализ последних исследований и определение нерешенной проблемы. Для ликвидации поглощения промывочной жидкости применяют тампонажные смеси на водной основе с использованием различных минераловязующих и синтетических веществ, которые достигли предела своей модернизации. В последние десятилетия работы по улучшению свойств тампонажных материалов сводятся к решению местных заданий, а не главному их недостатку - устранению чувствительности к разбавлению водой [2]. В связи с неизбежностью контакта тампонажной смеси с жидкостью в скважине и пласте такая смесь, растворяясь, теряет свои исходные свойства, растекаясь от скважины на значительные