

Одержання, структура, властивості

УДК 621.9:621.928.4

**О. О. Шульженко, Т. О. Пріхна, Г. Д. Ільницька*,
В. І. Лавріненко**, О. І. Боримський, О. М. Соколов,
В. М. Ткач, В. В. Смоквина, І. М. Зайцева,
В. В. Тимошенко**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

*gil-ism@ukr.net

**lavrinenko@ism.kiev.ua

Порівняння розмірних, фізико-механічних та експлуатаційних характеристик порошків синтетичного алмазу марок АС6 і АС20, синтезованих в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C

Розглянуто розмірні, фізико-механічні та експлуатаційні характеристики порошків алмазу марок АС6 і АС20, синтезованого з використанням сплавів-розчинників Ni–Mn і Fe–Si. Показано, що порошки алмазу, отримані в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, принципово різняться між собою магнітними властивостями, а також за вмістом домішок і внутрішньокристалічних включень. Для порошків алмазу обох систем встановлено, що елементи сплаву-розчинника в домішках і включеннях переважають і становлять 89–67 % від загальної кількості наявних домішок і включень в порошках алмазу немагнітної фракції, а магнітної фракції – трохи вище, і становлять 93–90 %. Порошки алмазу магнітних і немагнітних фракцій, синтезовані в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, відрізняються між собою за значенням питомої магнітної сприйнятливості приблизно в 10 разів, за дефектністю поверхні – в 1,5 рази. Показник міцності зерен алмазу магнітних фракцій обох систем є трохи вищим в порівнянні з міцністю зерен алмазу немагнітних фракцій за рахунок більшого вмісту в них металевих домішок і включень: для порошків алмазу, синтезованих в системі Ni–Mn–C, зростає в 1,25 рази, а в системі Fe–Si–C – в 1,9 рази. Зносостійкість кругів з зернами алмазу магнітної фракції, синтезованими в системі Fe–Si–C, в 1,3 рази більше в порівнянні з кругами з зернами алмазу немагнітної фракції цієї ж системи, і в 2 рази більше в порівнянні з кругами з зернами алмазу, синтезованими в системі Ni–Mn–C.

Ключові слова: фізико-механічні характеристики, порошки синтетичного алмазу, магнітні властивості, сплави-розчинники, зносостійкість кругів.

© О. О. ШУЛЬЖЕНКО, Т. О. ПРІХНА, Г. Д. ІЛЬНИЦЬКА, В. І. ЛАВРІНЕНКО, О. І. БОРИМСЬКИЙ, О. М. СОКОЛОВ, В. М. ТКАЧ, В. В. СМОКВИНА, І. М. ЗАЙЦЕВА, В. В. ТИМОШЕНКО, 2021

ВСТУП

В машинобудуванні порошки синтетичного алмазу марок АС6–АС20 широко застосовуються в процесах механообробки [1], оскільки саме алмаз завдяки своїм унікальним фізичним властивостям, зокрема, високій твердості серед мінералів (і одночасно крихкості), і найбільш високій теплопровідності серед всіх твердих тіл з давніх часів має широке застосування, та часом є єдиним можливим робочим інструментом для обробки широкого сегменту важкооброблюваних матеріалів. Свого часу дослідниками було доведено, що алмаз і графіт є різними модифікаціями хімічного елемента – карбону, і було розпочато активні пошуки способів створення штучного алмазу. Науково обґрунтований шлях практичної реалізації цього завдання продемонстрував в 1939 році відомий фізик О. І. Лейпунський, виконавши термодинамічний розрахунок лінії рівноваги графіт–алмаз [2]. Ним же було доведено, що застосування відповідного середовища (розчинника) може знизити тиск і температуру процесу синтезу. Зокрема, було запропоновано використовувати в якості розчинника вуглецю розплав заліза. Цей розрахунок послужив основою розробки методів синтезу алмазу з суміші джерела вуглецю і металу-розчинника в апаратах високого тиску (АВТ) [3].

Нині синтез алмазу здійснюється в присутності різних за складом металічних розплавів, у які мають входити один або декілька елементів. Найчастіше використовують Ni, Fe, Mn, Co, а також досить часто – подвійні та потрійні системи: Fe–C, Ni–C, Mn–C і Fe–Ni–C, Mn–Ni–C. Використання сплавів сприяє збільшенню ступеню перетворення графіту в алмаз. Досягнутий ефект пояснюється лише зниженням температури плавлення сплаву у порівнянні з чистим металом [4–6].

До металів-розчинників пред'являються наступні вимоги – вони повинні утворювати твердий розчин з вуглецем і розчиняти вуглець в умовах високих тисків і температур в кількостях, достатніх для пересичення розплаву. У відносно широкому діапазоні температур має здійснюватися рівновага рідина–алмаз. Для кожного розчинника характерна певна p, T -область утворення алмазу [5]. Гранично важливе практичне значення має пошук ростових систем, що забезпечують ефективне промислове виробництво порошків алмазу, отриманих при мінімальних p, T -параметрах процесу. Використання таких систем в наявних конструкціях АВТ дозволяє значно розширити можливості отримання порошків з заданими функціональними характеристиками (підвищена абразивна здатність, регульована кількість включень ростового середовища та ін.).

При цьому ступінь перетворення вуглецю в алмаз у системах Ni–Mn–C та Fe–Si–C знаходиться в межах 30–36 %. В процесі синтезу при вмісті у сплаві Fe–Si кремнію від 2 до 17 % отримують порошки алмазу марок АС6–АС32 зернистостей від 250/200 до 50/40 [8].

Встановлено, що в ростових системах, які найчастіше використовують, зазначені параметри знижуються в ряду Co–Fe–C, Ni–Fe–C, Ni–Mn–C від $\sim 5,7$ ГПа і 1400 °С до $\sim 5,0$ ГПа і 1250 °С. Тому розробки технологій синтезу з використанням системи Ni–Mn–C є перспективними і економічно виправданими. Результатом цих робіт стало створення цілої гами шліфпорошків (АС2–АС50, АС50Т–АС132Т) і мікропорошків (АСМ, АСН, АСМК) синтетичного алмазу з широким діапазоном фізико-механічних і експлуатаційних властивостей [5].

Промислове виробництво порошків синтетичного алмазу найчастіше здійснюють з використанням сплавів-розчинників, що містять нікель або кобальт,

вартість яких на порядок перевищує номінальну вартість заліза. Тому варто дослідити можливості використання в якості розчинників вуглецю сплавів заліза і, зокрема, сплаву Fe–Si. Як було показано в [5], при застосуванні при синтезі алмазу сплаву Fe–Si вплив кремнію подібний до впливу нікелю у сплавах Ni–Mn і Fe–Ni, а саме, цементитний ліквідус виклинується і з'являється аустенітно-вуглецева евтектика, що дозволяє знизити термодинамічні параметри процесу отримання алмазу.

Слід зазначити, що сплав Ni–Mn, що використовується як середовище кристалізації, в початковому стані має невисокі магнітні властивості (його питома магнітна сприйнятливість приблизно $\chi = 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$), але після дії тиску і особливо температури, його магнітні властивості змінюються і χ підвищується на один або два порядки [7].

Синтез алмазу в системі Fe–Si–C здійснюється при тиску 5 ГПа і температурі 1200–1300 °С із використанням сплаву-розчинника Fe–Si з високими магнітними властивостями. Питома магнітна сприйнятливість χ сплаву Fe–Si, що використовується в якості сплаву-розчинника вуглецю, складає $\sim 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ [7]. При цьому ступінь перетворення вуглецю в алмаз у системі Fe–Si–C знаходиться в межах 30–36 %.

Кожен спосіб вирощування алмазу з розчинів у розплаві, стикається з включенням материнського середовища у вирощуваних алмазних зернах. Зазвичай вони присутні у вигляді своєрідних “ниткоподібних” включень, що є скупченнями і відповідають за складом металу-каталізатора [8].

Дослідженнями встановлено [9–10], що розміри кристалів алмазу, кількість включень в них, і міцність багато в чому залежать від швидкості збільшення розмірів кристалів. Як правило, в робочому об'ємі АВТ неможливо забезпечити однакові умови для збільшення розмірів всіх кристалів внаслідок неоднорідності температури і тиску, що призводить до різних властивостей зерен алмазу. З огляду на це синтезовані алмазні порошки є сировиною, з якої за допомогою класифікації і сортування можна отримати шліфпорошки необхідної зернистості і міцності.

Метою даної роботи було дослідження та порівняння розмірних, фізико-механічних і експлуатаційних (в шліфувальних кругах на металевій зв'язці) характеристик порошків синтетичного алмазу, синтезованих в системах із застосуванням найбільш поширених сплавів-розчинників вуглецю Ni–Mn і Fe–Si.

ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Дослідження проводили на порошках алмазу, синтезованих з використанням в якості сплавів-розчинників вуглецю Ni–Mn і Fe–Si. Синтез проводили за технологією отримання порошків алмазу марок AC15-AC50. При синтезі утворюються кристали алмазу різного розміру, форми і якості, тому отриману при синтезі алмазну сировину піддавали ряду операцій для отримання порошків алмазу необхідних марок і зернистостей [11]. Спочатку застосовували дроблення для усунення двійників, друз, слабких дефектних зерен. Дроблену алмазну сировину хімічно обробляли для розчинення металевих домішок і залишків графіту, після чого ретельно відмивали від залишків хімічних реагентів і висушували в повітряному середовищі. Потім її класифікували за розмірами зерен (на окремі зернистості) на віброситі із застосуванням стандартного набору сит від 630 мкм до 40 мкм і піддону. Кожну зернистість розділяли за формою зерен на кілька продуктів з відділенням пластинчастих і витягнутих зерен.

Фракції порошку з фіксованим коефіцієнтом форми і вмістом основної фракції, розділяли в поліградієнтному магнітному полі з урахуванням різниці магнітних властивостей кристалів. Для розділення в магнітному полі використовували магнітний сепаратор 138-Т і класичну схему розділення [12], що передбачає стадійне збільшення межі розділення шляхом зміни напруженості магнітного поля від 0 до 2 Т.

В порошках алмазу – вихідному і продуктах розділення, визначали показники міцності алмазних зерен: руйнівні навантаження при їх статичному стисненні при кімнатній температурі (P) і при 1100 °С ($P_{т.о.}$), вміст основної фракції (ОФ), коефіцієнт форми (K_f) за ДСТУ 3292 [11], однорідність за міцністю ($K_{одн.міц.}$) [13, 14], коефіцієнт однорідності за лінійними розмірами ($K_{одн.л.р.}$) [15], вимір питомої магнітної сприйнятливості (χ) [7, 16], дефектність поверхні за коефіцієнтом поверхневої активності (K_a) [17, 18]. Елементний склад домішок і включень в порошках алмазу визначали рентгенофлуоресцентним інтегральним аналізом за допомогою растрового електронного мікроскопа BS-340 і енергодисперсного аналізатора рентгенівських спектрів Link-860.

Отримані після поділу шліфпорошки різних фракцій (вихідна, магнітна і немагнітна) було використано для виготовлення шліфувальних кругів типу розміру 12A2-45° 125×5×3×32 на полімерній зв'язці В2-08. Дослідження експлуатаційних характеристик порошоків алмазу в таких шліфувальних кругах проводили при шліфуванні без охолодження твердого сплаву Т15К6 на режимах обробки: швидкість шліфування – 15 м/с, поперечна подача круга (глибина шліфування) – 0,05 мм на подвійний хід стола верстату (мм/пдв. хід). Відносні витрати зерен алмазу в крузі при шліфуванні визначали при продуктивності шліфування 200 мм³/хв (відносні витрати зерен алмазу були критерієм зносостійкості кругів – чим меншими є такі витрати, тим зносостійкість круга є більшою).

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Було проведено дослідження впливу вмісту основних елементів сплавів-розчинників вуглецю на характеристики алмазних зерен, одержаних при синтезі в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C. Низкою досліджень [4–6, 19] було показано, що вирощування кристалів синтетичного алмазу в системі Ni–Mn–C при оптимальних p , T -умовах відповідає наступному складу сплаву Ni–Mn – 60 % (ат.) Ni та 40 % (ат.) Mn. Вибір співвідношення між нікелем і манганом обумовлений найнижчою температурою плавлення в системі, що дає суттєві переваги для проведення процесу кристалізації алмазу та отримання алмазної сировини з зернами різного розміру. Численні роботи по вивченню процесу синтезу алмазу із застосуванням дорогих сплавів-розчинників систем Ni–Mn, Fe–Ni, Fe–Co і дослідження властивостей отриманих алмазних порошоків дозволили розробити ряд технологій створення шліфпорошків алмазу широкою гамою марок [11]. В останні роки зростає інтерес до використання при синтезі більш дешевого сплаву-розчинника Fe–Si [5].

У роботі досліджено властивості порошоків алмазу, синтезованого в системі Fe–Si–C. Насамперед досліджували вплив вмісту кремнію в сплавах-розчинниках вуглецю з вмістом кремнію від 2 до 17 % (за масою) на властивості порошоків алмазу, одержаного в системі Fe–Si–C. Фракційний склад алмазної сировини, отриманої при синтезі із застосуванням як розчинника вуглецю сплавів Fe–Si з вмістом кремнію від 2 до 17 % (за масою), представлено на рис. 1, *a–г*.

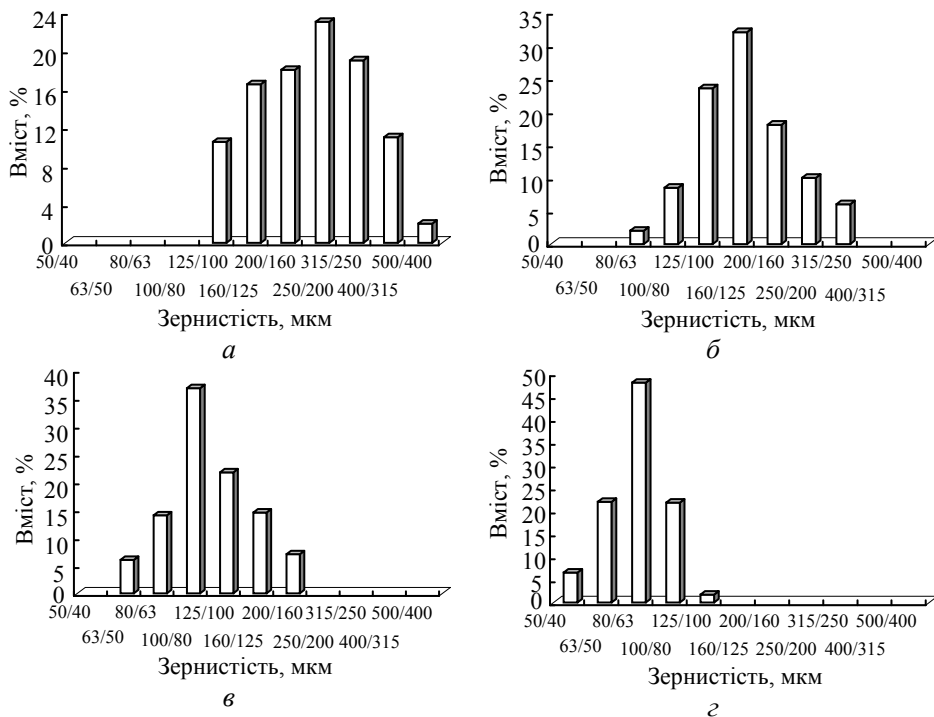


Рис. 1. Вміст порошоків алмазу різної зернистості в алмазній сировині, отриманій при синтезі з використанням сплаву Fe–Si з вмістом кремнію 2 (а), 7 (б), 12 (в) і 17 (г) % (за масою).

Як випливає з рис. 1, збільшення вмісту кремнію в сплаві-розчиннику приводить до зміщення максимуму на графіках розподілу порошоків алмазу в сировині за зернистостями в область більш дрібних зернистостей. При цьому середній розмір одержаних зерен алмазу зменшується, а склад порошку стає все більш однорідним за розмірами зерен. Так, при 17 % кремнію в сплаві вміст порошоків зернистостей 63/50, 80/63 і 100/80 досягає 90,8 % від загальної маси кристалів.

Згідно з отриманими даними, зростання концентрації кремнію в сплаві супроводжується зменшенням середнього розміру одержаних зерен алмазу і звуженням діапазону їх розмірів, що пов'язано, напевно, з одного боку, з полегшенням створення зародків критичного розміру (алмаз і кремній є ізоелектронними), а з іншого – пересичення розплаву вуглецем досягається при меншому вмісті вуглецю в розплаві, тому що з ростом вмісту кремнію в розчиннику вміст вуглецю в евтектиці, що утворюється при високому тиску, плавно зменшується, так само як і значення коефіцієнта дифузії вуглецю в розплаві [8]. Всі подальші дослідження проводили на порошках алмазу, отриманих в системі Fe–Si–C при вмісті в сплаві Fe–Si оптимального вмісту кремнію 7 % (за масою).

На рис. 2 представлено розподіл порошоків алмазу в алмазній сировині, отриманій в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, за зернистостями. З рис. 2 випливає, що зерна алмазу, синтезованого в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, переважно концентруються в порошках зернистостей 160/125–63/50. При цьому алмазна сировина, синтезована із застосуванням сплаву-розчинника вуглецю Ni–Mn, дрібніша. Максимальний вихід при використанні цього сплаву-

розчинника становлять порошки алмазу, що мають зернистість 100/80, а при використанні сплаву-розчинника Fe–Si–C – 160/125.

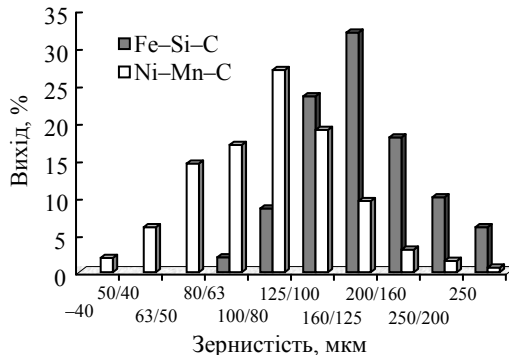


Рис. 2. Розподіл за зернистістями порошків алмазу в алмазній сировині, синтезованій в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C.

В порошках алмазу, отриманих в обох ростових системах, для кожної зернистості визначали показник міцності P як руйнівне навантаження при статичному руйнуванні зерен алмазу за ДСТУ 3292-95 [14], і питому магнітну сприйнятливості χ [19] (табл. 1).

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики порошків алмазу, синтезованих в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C

Зернистість	Порошки алмазу системи			
	Ni–Mn–C		Fe–Si–C	
	P, H	$\chi \cdot 10^{-8}, M^3/kg$	P, H	$\chi \cdot 10^{-8}, M^3/kg$
250/200	19,51	31,1	21,88	630,0
200/160	20,77	27,3	19,32	418,0
160/125	18,53	22,3	18,87	342,0
125/100	17,12	18,7	17,34	268,0
100/80	10,17	16,8	15,11	244,0
80/63	9,31	15,3	10,63	187,0
63/50	8,22	11,5	8,12	125,0
50/40	6,63	6,5	7,23	89,0

Як впливає з табл. 1, зерна алмазу обох систем різних зернистостей за міцністю відносяться до марок AC15, AC20 згідно ДСТУ 3292–95 [11]. Порошки алмазу, синтезовані з використанням сплаву-розчинника вуглецю Fe–Si, мають більш високі магнітні властивості.

На рис. 3 показано зміну питомої магнітної сприйнятливості алмазних порошків у залежності від крупності зерен алмазу, синтезованих в системах Ni–Mn–C (а) і Fe–Si–C (б).

Характер кривих на рис. 3 є монотонно зростаючим і обумовлений тим, що зі збільшенням швидкості росту кристалів зростає вміст внутрішньокристалічних металевих включень, захоплених зростаючими кристалами з середини кристалізації. Криві на рис. 3 показують стійку тенденцію до підвищення питомої магнітної сприйнятливості зі збільшенням зернистості порошків алмазу, синтезованих в обох системах.

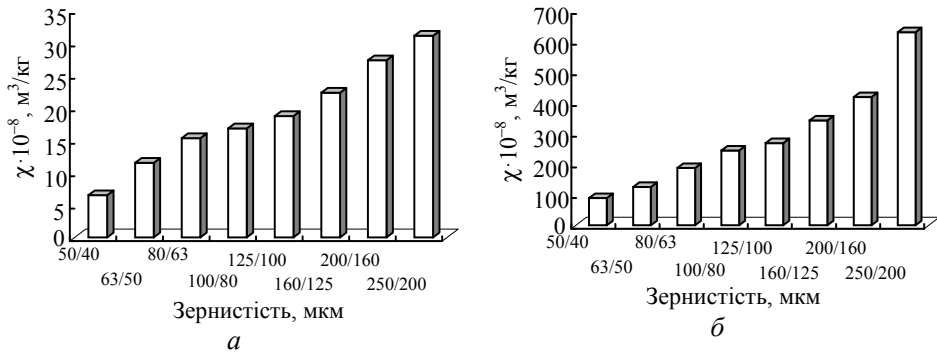


Рис. 3. Питома магнітна сприйнятливості порошків алмазу, синтезованого із застосуванням різних сплавів-розчинників вуглецю: Ni-Mn (а) і Fe-Si (б).

Було проведено оцінку зміни питомої магнітної сприйнятливості порошків алмазу, отриманих в системі Fe-Si-C, від вмісту кремнію в сплав-розчиннику вуглецю, при їх зернистості 100/80, 125/100, 160/125 і 200/160 (рис. 4) і показано, що питома магнітна сприйнятливості порошків алмазу зростає з підвищенням вмісту кремнію в сплаві. Те, що сплави заліза з кремнієм мають високу магнітну сприйнятливості, яка зростає з підвищенням вмісту кремнію, відомо давно [20].

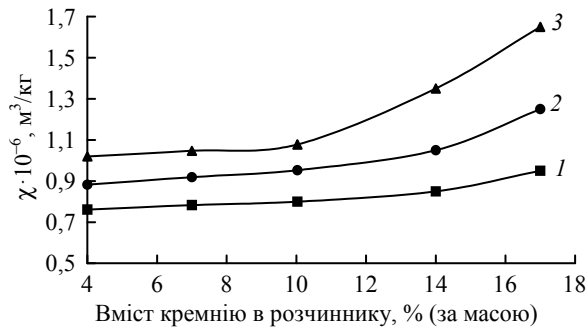


Рис. 4. Залежність питомої магнітної сприйнятливості шліфпорошків алмазу, отриманих в системі Fe-Si-C, від вмісту кремнію в сплав-розчиннику вуглецю Fe-Si при їх зернистості 100/80 (1), 125/100 (2), 160/125 (3).

Посилення магнітних властивостей порошків алмазу, синтезованого в системі Fe-Si-C, з підвищенням вмісту кремнію в сплаві, ймовірно, має таку ж тенденцію до збільшення з ростом вмісту кремнію у внутрішньокристалічних металевих включеннях в зернах алмазу (табл. 2).

Таблиця 2. Вміст кремнію і заліза у внутрішньокристалічних домішках і включеннях в зернах алмазу, синтезованих в системі Fe-Si-C з різною концентрацією кремнію в складі сплаву-розчинника Fe-Si

Зернистість	Вміст металевих включень, % (за масою), при концентрації кремнію в розчиннику, % (за масою)					
	2		7		17	
	Si	Fe	Si	Fe	Si	Fe
160/125	0,18	0,48	0,21	0,39	0,24	0,37

Вміст кремнію і заліза у внутрішньокристалічних домішках і включеннях в зернах алмазу зернистості 160/125 оцінювали за допомогою рентгенофлуоресцентного інтегрального аналізу [21].

При виготовленні шліфувального інструменту більш поширено використовують порошки алмазу зернистостей 160/125, 125/100 і 100/80, але різних марок з діапазону АС6–АС20. Тому в даній роботі отримані авторами порошки алмазу вказаних зернистостей додатково було розділено за формою зерен на вібростолі з виділенням фракції зерен алмазу, що відповідають за характеристиками показнику міцності марці АС20. Для підвищення однорідності за лінійними розмірами зерна алмазу додатково розділяли на ситах R-20 [22] з виділенням вузьких зернистостей. У вихідних порошках і в продуктах розділення визначали вміст основної фракції (ОФ), коефіцієнт форми K_f , руйнівне навантаження P при статичному стисненні за ДСТУ 3292 [11], коефіцієнти однорідності за міцністю ($K_{\text{одн.міц.}}$) [14] і за лінійними розмірами ($K_{\text{одн.л.р.}}$) [15] (табл. 3).

Таблиця 3. Характеристики порошків алмазу різних зернистостей, синтезованих в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C

Зернистість	Характеристика					
	ОФ, %	$K_{\text{одн.л.р.}}$, %	K_f , ум. од.	P , Н	$K_{\text{одн.міц.}}$, %	Марка [11]
Ni–Mn–C						
160/125 (вихідний)	71,1	18,2	1,57	7,63	16,1	АС6
160/150	80,5	30,4	1,34	21,5	29,5	АС20
125/100 (вихідний)	72,5	19,1	1,61	7,12	16,7	АС6
125/115	83,4	31,4	1,29	19,4	27,9	АС20
100/80 (вихідний)	74,1	17,9	1,41	6,17	15,9	АС6
100/90	83,5	29,7	1,21	16,2	26,5	АС20
Fe–Si–C						
160/125 (вихідний)	70,6	17,5	1,67	8,67	15,6	АС6
160/150	81,5	29,8	1,38	25,4	28,4	АС20
125/100 (вихідний)	72,1	20,1	1,72	8,34	16,1	АС6
125/115	83,4	34,5	1,32	24,1	26,8	АС20
100/80 (вихідний)	72,9	17,7	1,35	7,11	14,7	АС6
100/90	82,1	30,8	1,21	17,8	24,1	АС20

Як впливає з табл. 3, розділення вихідних алмазних порошків зернистостей 160/125, 125/100 і 100/80 марки АС6 як системи Ni–Mn–C, так і Fe–Si–C за формою зерен дозволило відокремити пластинчасті і витягнуті зерна і виділити зі складу вихідних порошки алмазу більш округлої форми і з більшим руйнівним навантаженням при статичному стисненні, що відповідають марці АС20. В алмазних порошках, після розділення за формою їх зерен, збільшується коефіцієнт однорідності за характеристиками міцності алмазних зерен більше ніж у 1,5 рази. Підвищення на ~ 10 % вмісту основної фракції в складі порошків вузьких зернистостей з алмазу, отриманого в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, сприяє збільшенню коефіцієнта однорідності за лінійними розмірами не менше ніж у 1,7 рази.

Шліфпорошки алмазу вузької зернистості 160/150, 125/115 і 100/90 марки АС20, отриманого в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C розділяли в магнітному полі різної інтенсивності з отриманням чотирьох фракцій, що розрізняються між собою за значенням питомої магнітної сприйнятливості. В порошках після розділення в магнітному полі вимірювали питому магнітну сприйнятливості χ [16], руйнівне навантаження P при статичному стисненні при кімнатній температурі і після термічної обробки в інертному середовищі при 1100 °C [11], оцінювали термостійкість зерен алмазу за зміною коефіцієнта термостабільності K_{TC} [23], визначали дефектність поверхні за коефіцієнтом поверхневої активності K_a [17, 18].

На рис. 5 показано зміну питомої магнітної сприйнятливості порошоків алмазу зернистості 125/115, отриманого в обох системах синтезу, після розділення в магнітному полі на чотири фракції, що розрізняються за магнітними властивостями.

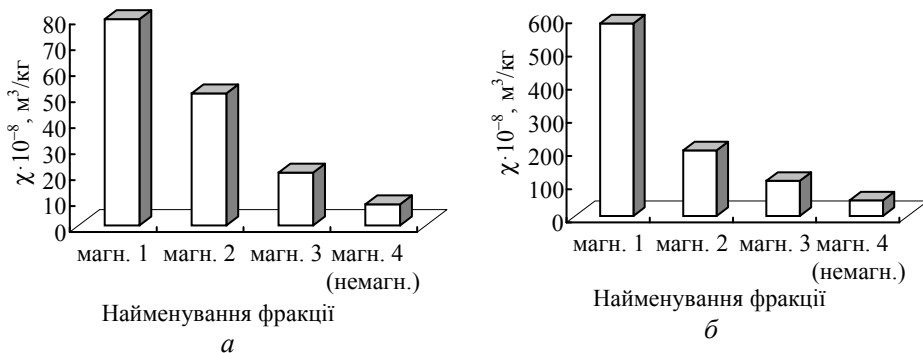


Рис. 5. Питома магнітна сприйнятливості порошоків алмазу зернистості 125/115 різних продуктів розділення, синтезованого в системах Ni–Mn–C (а) і Fe–Si–C (б).

Фізико-механічні характеристики шліфпорошків алмазу вузьких зернистостей 160/150, 125/115 і 100/90 марки АС20 після їх розділення в магнітному полі представлено в табл. 4.

Як випливає з даних табл. 4, порошки алмазу зернистостей 160/150, 125/115, 100/90 магнітних і немагнітних фракцій, синтезованого як в системі Ni–Mn–C, так і в системі Fe–Si–C, розрізняються між собою за магнітними властивостями. Зерна алмазу магнітних фракцій обох систем (магнітна і немагнітна) відрізняються між собою за значенням питомої магнітної сприйнятливості майже на порядок, за дефектністю поверхні – майже в 1,5 рази. Міцність магнітних фракцій для обох систем синтезу за рахунок більшого вмісту металевих включень трохи вище в порівнянні з міцністю немагнітних фракцій: для порошоків алмазу, синтезованого в системі Ni–Mn–C, зростає в 1,25 рази, а в системі Fe–Si–C – в 1,9 рази. Водночас термостійкість порошоків алмазу, синтезованого в системі Ni–Mn–C, магнітних фракцій у порівнянні з термостійкістю немагнітних фракцій знижується в $\sim 1,5$ рази, а порошоків алмазу, отриманого в системі Fe–Si–C, магнітних і немагнітних фракцій не менше ніж у 2 рази.

Для одержання більшій інформації при вивченні включень і домішок широко застосовуються магнітні методи. Як правило, чистий бездомішковий кристал алмазу є діелектриком з практично постійною питомою магнітною сприйнятливостю ($\chi = -0,62 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), а застосовувані при синтезі сплавирозчинники вуглецю мають сильно виражені магнітні властивості, тому все

розмаїття магнітних властивостей кристалів алмазу пов'язано з кількістю і магнітним станом металу, або сплаву металів, присутніх в кристалі алмазу у вигляді включень і домішок.

Таблиця 4. Фізико-механічні характеристики порошків алмазу зернистості 100/90 марки AC20, синтезованого в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, після розділення в магнітному полі

Зернистість	Фракція розділення	Характеристика			
		$\chi \cdot 10^{-8}$, м ³ /кг	K_a , %	P , Н	K_{TC} , %
Ni–Mn–C					
160/150	магнітна	88,9	1,87	23,2	46
	немагнітна	9,7	1,23	18,6	71
	вихідна	22,3	–	21,5	65
125/115	магнітна	79,4	1,76	20,4	48
	немагнітна	8,1	1,34	16,1	69
	вихідна	18,7	–	19,4	51
100/90	магнітна	69,1	1,78	16,8	44
	немагнітна	7,3	1,11	13,5	68
	вихідна	16,8	–	16,2	53
Fe–Si–C					
160/150	магнітна	618,0	1,97	33,8	23
	немагнітна	60,5	1,34	17,7	54
	вихідна	342,0	–	25,4	45
125/115	магнітна	580,5	1,89	32,1	20
	немагнітна	47,2	1,32	16,9	48
	вихідна	268,0	–	24,1	39
100/90	магнітна	523,4	1,81	23,7	22
	немагнітна	42,1	1,22	12,5	44
	вихідна	244,0	–	17,8	38

Після розділення порошків алмазу вузьких зернистостей 160/150, 125/115, 100/90 в магнітному полі для магнітних і немагнітних фракцій визначали загальний і елементний склад внутрішньокристалічних включень і домішок [21]. За отриманими даними вираховували вміст елементів сплаву-розчинника, які присутні в складі внутрішньокристалічних включень зерен алмазу, отриманого в обох ростових системах (табл. 5).

Сума всіх виявлених елементів відповідає загальному вмісту включень і домішок в зернах алмазу, а сума елементів сплаву-розчинника дає можливість оцінити їх вміст в порошку алмазу. За розробленою раніше методикою зроблено розрахунок магнітної сприйнятливості включень і домішок для порошків алмазу вузьких зернистостей 160/150, 125/115, 100/90 магнітних і немагнітних фракцій, синтезованого із застосуванням сплавів-розчинника вуглецю Ni–Mn і Fe–Si. Виконані вимірювання і визначення елементного складу включень і домішок дозволяють розрахувати їх питому магнітну сприйнятливості [7] (табл. 5).

З табл. 5 випливає, що для порошків алмазу обох систем синтезу елементи сплаву-розчинника у включеннях переважають і становлять 89–67 % від за-

гальної кількості наявних включень в порошках алмазу немагнітної фракції, а в магнітній фракції трохи вище і становлять 93–90 %.

Таблиця 5. Характеристики магнітних властивостей шліфпорошків алмазу марки AC20 вузьких зернистостей, синтезованого в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C

Зернистість	Фракція розділення	Вміст, % (за масою), включень і домішок		Питома магнітна сприйнятливості $\chi \cdot 10^{-8}$, $\text{м}^3/\text{кг}$	
		загальний	елементів сплаву-розчинника	алмазу	включень
Ni–Mn–C					
160/150	магнітна	2,984	2,656	88,9	2979
	немагнітна	1,123	0,842	9,7	864
	вихідна	–	–	22,3	–
125/115	магнітна	2,588	2,3292	59,4	2295
	немагнітна	0,993	0,715	8,1	815
	вихідна	–	–	18,7	–
100/90	магнітна	1,905	1,715	39,1	2052
	немагнітна	0,765	0,497	5,3	693
	вихідна	–	–	16,8	–
Fe–Si–C					
160/150	магнітна	4,568	4,248	618,0	13529
	немагнітна	2,231	1,986	60,5	2712
	вихідна	3,515	–	342,0	–
125/115	магнітна	3,786	3,445	480,5	12705
	немагнітна	1,978	1,503	47,2	2386

Таким чином, під впливом магнітного поля шліфпорошки алмазу, синтезованого із застосуванням сплаву-розчинника вуглецю, як Ni–Mn, так і Fe–Si, в основному розділяються, за вмістом в них включень сплаву-розчинника.

З даних табл. 4 і 5 випливає, що порошки алмазу магнітної фракції, синтезованого в системі Fe–Si–C, мають суттєво більші показники міцності, ніж аналогічні порошки, синтезовані в системі Ni–Mn–C, а відтак і очікувано будуть більш зносостійкими в шліфувальному інструменті. В свою чергу, порошки алмазу немагнітної фракції обох систем синтезу мають майже однакові показники міцності, але кристали алмазу, синтезованого в системі Fe–Si–C, мають фактично вдвічі більшу кількість домішок, що може покращити їх утримання у зв'язці, а відтак і збільшити зносостійкість кругів. Для перевірки таких припущень з отриманих шліфпорошків алмазу марки AC20 160/125 магнітної і немагнітної фракцій, синтезованого в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, були виготовлені шліфувальні круги форми 12A2-45° 125×5×3×32 на металевій зв'язці M1-10. Продуктивність обробки становила 200 $\text{мм}^3/\text{хв}$. Випробування проводили на базі модернізованого універсально-заточувального верстата моделі 3В642. Шліфували зразки з твердого сплаву ВК8 розміром 63×15×7. Оцінку зносостійкості інструменту оцінювали за відносними витратами q_p зерен алмазу у крузі при шліфуванні.

Результати випробувань (рис. 6) засвідчили, що зносостійкість кругів з зернами алмазу магнітної фракції, синтезованого в системі Fe–Si–C в 1,3 рази більше в порівнянні з зернами алмазу немагнітної фракції цієї ж системи синтезу, і в 2 рази більше в порівнянні з магнітними зернами алмазу, синтезованого в системі Ni–Mn–C.

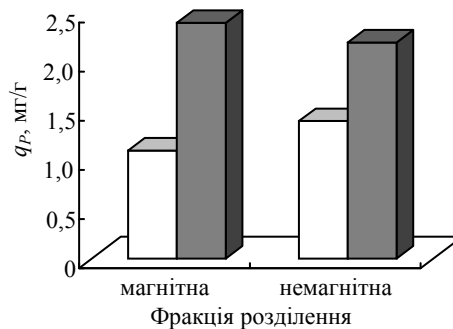


Рис. 6. Зносостійкість шліфувальних кругів з зернами алмазу, синтезованого в ростових системах Ni–Mn–C (■) і Fe–Si–C (□).

ВИСНОВКИ

Шліфпорошки алмазу, синтезованого із застосуванням сплавів-розчинників вуглецю Ni–Mn та Fe–Si, розрізняються між собою за магнітними властивостями. Порошки алмазу, синтезованого з використанням сплаву-розчинника вуглецю Fe–Si, мають високі магнітні властивості.

Збільшення вмісту кремнію в сплав-розчиннику вуглецю Fe–Si призводить до зміщення кривої розподілу порошоків в алмазній сировині за зернистостями в область більш дрібних зернистостей. Середній розмір одержуваних кристалів алмазу зменшується, а склад порошку стає все більш однорідним за розмірами кристалів. Так, при 17 % кремнію в сплав, вміст 2–3 зернистостей досягає 90 % від загальної маси кристалів.

Підвищення вмісту основної фракції в складі порошоків вузьких зернистостей 160/150, 125/115 і 100/90, отриманих в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, на ~ 10 % сприяє збільшенню коефіцієнта однорідності за лінійними розмірами не менше ніж 1,7 рази.

Шліфпорошки алмазу магнітних і немагнітних фракцій, синтезованого в системах Ni–Mn–C і Fe–Si–C, відрізняються між собою за значенням питомої магнітної сприйнятливості в ~ 10 разів, за дефектністю поверхні – в 1,5 рази. Показник міцності зерен алмазу магнітних фракцій обох систем за рахунок більшого вмісту в них металевих домішок і включень трохи вище в порівнянні з показником міцності немагнітних фракцій: для порошоків алмазу, синтезованого в системі Ni–Mn–C, зростає в 1,25 рази, а в системі Fe–Si–C – в 1,9 рази.

Термостійкість порошоків алмазу, синтезованих в системі Ni–Mn–C, магнітних фракцій у порівнянні з термостійкістю немагнітних фракцій, знижується приблизно в 1,5 рази, а порошоків алмазу магнітних і немагнітних фракцій, отриманого в системі Fe–Si–C, не менше 2 разів.

Для порошоків алмазу обох систем Ni–Mn–C і Fe–Si–C елементи сплаву-розчинника в домішках і включеннях переважають і становлять 89–67 % від загальної кількості наявних домішок і включень в порошках алмазу немагнітної фракції, а в магнітній фракції є трохи вищими і становлять 93–90 %.

Зносостійкість шліфувальних кругів з порошків алмазу магнітної фракції, синтезованого в системі Fe–Si–C, в 1,3 рази більша у порівнянні з порошками немагнітної фракції тієї ж системи, і в 2 рази більша у порівнянні з порошками алмазу, синтезованого в системі Ni–Mn–C.

Перед застосуванням порошків синтетичного алмазу в шліфувальному інструменті слід попередньо вивчити склад їх домішок і магнітні властивості, систему, у якій вони були синтезовані, адже саме це дозволить визначити ефективні умови їх застосування у шліфувальному інструменті.

A. A. Shulzhenko, T. O. Prikhna, H. D. Ilynska, V. I. Lavrynenko,
O. I. Borymskii, A. N. Sokolov, V. N. Tkach, V. V. Smokvyna,
I. N. Zaitseva, V. V. Tymoshenko
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Comparison of the dimensional, physical, mechanical
and operational characteristics of synthetic diamond powders
of grades AC6 and AC20 synthesized in Ni–Mn–C
and Fe–Si–C systems

The dimensional, physicomechanical and operational characteristics of diamond powders of grades AC6 and AC20 obtained from diamond raw synthesized using Ni–Mn and Fe–Si solvent alloys are considered. It has been shown that diamond powders obtained in the Ni–Mn–C and Fe–Si–C systems differ in magnetic properties, as well as in the content of impurities and intracrystalline inclusions. For diamond powders of both systems, it was found that the elements of the solvent-alloy in impurities and inclusions predominate and account for 89–67 % of the total amount of available impurities and inclusions in diamond powders of the non-magnetic fraction, and the magnetic fraction is slightly higher and amount to 93–90 %. Diamond powders of magnetic and non-magnetic fractions, synthesized in the systems Ni–Mn–C and Fe–Si–C, differ from each other in the value of the specific magnetic susceptibility by about 10 times, in terms of surface defects – by 1.5 times. The strength index of diamond grains of the magnetic fractions of both systems is slightly higher compared to the strength of diamond grains of non-magnetic fractions due to the higher content of metal impurities and inclusions in them: for diamond powders obtained from raw materials synthesized in the Ni–Mn–C system, it increases by 1, 25 times, and in the Fe–Si–C system – 1.9 times. The wear resistance of wheels with diamond grains of the magnetic fraction synthesized in the Fe–Si–C system is 1.3 times higher than that of wheels with diamond grains of the non-magnetic fraction of the same system, and 2 times higher than that of wheels with diamond grains synthesized in the Ni–Mn–C system.

Keywords: physical and mechanical characteristics, synthetic diamond powders, magnetic properties, solvent alloys, wear resistance of wheels.

1. Лаврінченко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
2. Лейпунский О.И. Об искусственных алмазах. *Успехи химии*. 1939. 8. № 10. С. 1519–1534.
3. Прихна А.И. Апарат для синтеза алмаза. *Сверхтв. материалы*. 2008. № 2. С. 29–37.
4. Новиков Н.В., Федосеев Д.В., Шульженко А.А., Богатырева Г.П. Синтез алмазов / под ред. Новикова Н. В. Київ: Наук. думка, 1987. 160 с.
5. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов / редкол.: Новиков Н. В. (отв. ред.) и др. Київ: Наук. думка, 1986. 280 с.
6. Shul'zhenko A.A. Synthesis of diamond crystals at high static pressures. *5th Int. Symposium High Purity Materials in Science and Technology: Dresden, GDR: May 5 9, 1980: Proc. 1. Dresden: Zentralinst. für Festkörperphysik und Werkstofforschung*, 1980. S. 122–128.
7. Физические свойства алмаза. Справ. Киев: Наук. думка, 1987. С. 85–89.

8. Боримский А.И., Делеви В.Г., Нагорный П.А. Кинетика образования и роста алмазов в системе Fe–Si–C. *Сверхтв. материалы*. 1999. № 3. С. 9–14.
9. Экспериментальные исследования кристаллизации алмаза в металлических системах. Сб. науч. тр. / редкол.: чл.-кор. Н. В. Соболев (отв. ред.) и др. Новосибирск: АН СССР, геологии и геофизики, 1983. 87 с.
10. Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. Новосибирск: Из-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1997. 196 с.
11. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Киев: Госстандарт Украины, 1995. 71 с.
12. Lavrinenko V.I., Ilitskaya G.D., Petasyuk G.A., Ishchenko E.V., Gaidai S.V., Pasichnyi O.O., Skryabin V.V., Shatokhin V.V., Zaitseva I.N., Kuz'menko E.F., Timoshenko V.V. A study of the potential of improving performance of AS20 diamond powders through altering their dimensional and physico-chemical characteristics. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, iss. 4. С. 229–235.
13. Новиков Н.В., Невструев Г.Ф., Ильницкая Г.Д., Куш В.И., Колодницкий В.Н. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. Часть 1. Теоретические основы метода оценки характеристик качества. *Сверхтв. материалы*. 2006. № 5. С. 74–83; Часть 2. Практическое применение нового метода оценки характеристик качества. *Сверхтв. материалы*. 2006. № 6. С. 58–67.
14. М 28.5-272:2008. Методика аналитической оценки прочностных характеристик шлифпорошков синтетического алмаза. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. 14 с.
15. М 28.5-271:2008. Методика аналитической оценки линейных размеров зерен порошков сверхтвердых материалов (СТМ). Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. 18 с.
16. М88 Украины 90.256–2004. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов (СТМ). Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2004. 9 с.
17. Пат. 65129 України, МКИ G01N 27/12. Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу / Г.Ф. Невструєв, Г.Д. Ільницька. Заявл. 05.06.2003; Опубл. 15.03.2004, Бюл. № 3.
18. М88 Украины 90.258-2004. Методика определения коэффициента поверхностной активности порошков сверхтвердых материалов. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2004. 10 с.
19. Roik O.S., Lisovenko S.O., Perevertailo V.M., Kazimirov V.P., Loginova O.B. Modeling and analysis of the structure of binary melts of the Ni–Mn system. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, iss. 2. С. 104–111.
20. Преображенский А.А. Теория магнетизма. Магнитные материалы и элементы. Москва: Высш. школа, 1972. 288 с.
21. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Ind. Diamond Rev.* 2006. № 1. P. 42–47.
22. Пат. 69947 А України, МКИ В3С7/00, В03С/00. Спосіб одержання шліфпорошків вузької зернистості / Г. Ф. Невструєв, Г. Д. Ільницька. Заявл. 16.12.2003; Опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9.
23. М 28.5-272:2008. Методика определения коэффициента термостабильности шлифпорошков синтетических алмазов. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2008. 6 с.

Надійшла до редакції 30.01.20

Після доопрацювання 02.06.20

Прийнята до опублікування 10.08.20