

УДК 621.793:621.791

А.М. Степанчук, М.Б. Шевчук, С.В. Мазаєв

ОТРИМАННЯ І ВЛАСТИВОСТІ ГРАНУЛ З ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК ДЛЯ СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вступ

Тверді тугоплавкі сполуки (ТС) і їх сплави знаходять широке застосування в різноманітних галузях науки і техніки [1, 2]. Так, вони можуть використовуватись при створенні інструментальних матеріалів як вільні абразиви та для виготовлення шліфувального інструменту у вигляді кругів тощо [3]. Особливо ефективні ТС при створенні композиційних матеріалів і товстошарових покриттів багатофункціонального призначення [4–9]. Структурною складовою таких композиційних матеріалів і покриттів можуть бути гранули з тугоплавких сполук [5–12]. Наприклад, для створення зносостійких поверхонь застосовуються зерна (гранули) РЕЛІТу (плавленого карбіду вольфраму) [4–6] та вольфрамівмісних твердих сплавів [6–9]. Тим часом перспективними в цьому відношенні є також інші тверді тугоплавкі сполуки: карбіди, бориди, нітриди перехідних металів та їх сплави [10, 11]. Перевагою їх є те, що вони не містять вольфрам, який має високу вартість та є дефіцитним в Україні. Отже, на нашу думку, розробка нових матеріалів і оптимізація умов отримання гранул із них для створення композиційних матеріалів та покриттів за їх участю різними методами є досить актуальною задачею.

Постановка задачі

Виходячи з аналізу літературних даних, які вказують на актуальність створення зносостійких композиційних виробів і товстошарових покриттів багатофункціонального призначення з композиційних матеріалів за участю гранул із тугоплавких сполук та їх сплавів, ми ставимо задачу про дослідження та оптимізацію умов отримання з них гранул, а також задачу вивчення властивостей гранул, отриманих різними методами, з метою рекомендації їх для створення виробів та покриттів з наперед заданими властивостями.

Експериментальна частина

Нами було проведено дослідження впливу методу отримання гранул та зерен з деяких карбідів перехідних металів на їх властивості — структуру, топографію поверхні, щільність, коефіцієнт форми, міцність на роздавлювання тощо. Гранули отримувались грануляцією пластифікованих сумішей карбідів, плавленням за допомогою витратних електродів з карбідів у низькотемпературній плазмі з наступним подрібненням отриманих зливків, відцентровим розпилюванням електродів з карбідів, формуванням карбідів з наступним спіканням і подрібненням.

При отриманні гранул грануляцією пластифікованих сумішей тугоплавких сполук та їх сплавів (табл. 1) як вихідні використовувались їх порошки з розміром частинок, меншим за 100 мкм. Вони змішувались у шнековому змішувачі з 20 %-ним розчином крохмалю у воді в об'ємі 15 %. Змішування проводилось протягом 60–90 хв. Отримана суміш протиралась на протиральному ситі з розміром отворів 1,0 мм.

Таблиця 1. Щільність гранул, отриманих грануляцією

Матеріал	Густина матеріалу, г/см ³	Середня відносна щільність гранул, %	
		До спікання*	Після спікання
TiC	4,92	42,2	89,8
ZrC	6,66	48,0	85,4
VC	5,48	49,7	91,2
NbC	7,82	51,4	92,1
WC	15,77	62,4	94,9
TiC-WC	9,4	52,5	92,2
Суміш WC + 8 %Co (BK-8)	14,6	64,3	97,9
Суміш Cr ₃ C ₂ + 15 %Ni (KXH-15)	7,0	52,8	98,2

* — при часі грануляції 60 хв.

Попередньо гранульована суміш для отримання гранул з розміром частинок 1,5–2,5 мм гранулювалась у двоконусному барабанному грануляторі, з періодичним введенням у нього двовідсоткового розчину крохмалю у воді. Швидкість обертання барабана встановлювалась у межах, які забезпечували режим перекошування. Досліджувався вплив часу і швидкості обертання барабана гранулятора на отримуваний фракційний склад гранул. Результати наведені на рис. 1 і 2 та в табл. 1. Було встановлено, що збільшення часу грануляції, при інших однакових умовах, сприяє отриманню гранул з більшим середнім розміром, що може бути зумовлено більшим ступенем агломерації окремих частинок з часом.

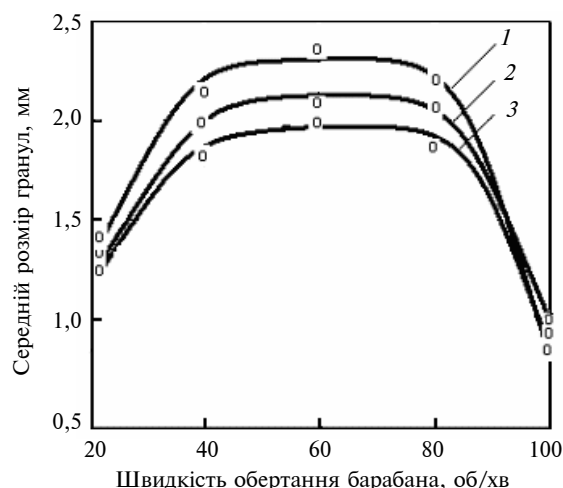


Рис. 1. Типова залежність середнього розміру гранул з карбідів від швидкості обертання барабана і часу грануляції: 1 – 90 хв; 2 – 60 хв; 3 – 30 хв

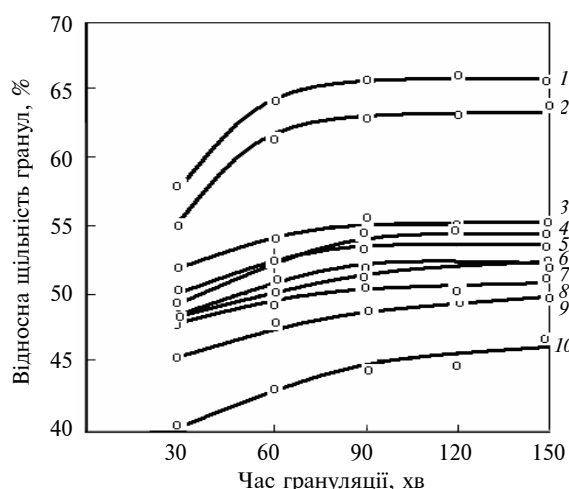


Рис. 2. Залежність відносної щільності гранул від часу грануляції для матеріалів: 1 – VK-8; 2 – WC; 3 – Mo_2C ; 4 – TiC-WC; 5 – KXH-15; 6 – NbC; 7 – Cr_3C_2 ; 8 – VC; 9 – ZrC; 10 – TiC

Залежність середнього розміру гранул від швидкості обертання барабана має екстремальний вигляд (див. рис. 1). Малий ступінь збільшення розміру гранул при малій швидкості обертання барабана може зумовлюватись відносним зменшенням часу агломерації. Зменшення середнього розміру гранул при швидкості обертання барабана 100 об/хв залежить, зокрема, від того, що рух гранул переходить у режим вільного падіння і, таким чином, відбувається їх руйнування (подрібнення).

Нами також вивчалась відносна щільність гранул залежно від густини матеріалу. Було встановлено (див. табл. 1), що із збільшенням густини матеріалу гранул збільшується і їх відносна щільність. Останнє можна пов'язувати з дією гравітаційних сил, збільшення яких із зростанням густини матеріалу сприяє більшому ущільненню гранул. Проводились дослідження впливу на щільність гранул часу грануляції. Отримані результати показали (див. рис. 2), що для більшості матеріалів спостерігається зростання відносної щільності гранул із збільшенням часу грануляції. Це може бути зумовлено збільшенням енергозатрат на процеси структурної деформації, які відбуваються при формуванні гранул.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що для отримання гранул з діаметром 1,5–2,5 мм необхідно процес грануляції проводити при швидкості обертання барабана гранулятора в межах 40–80 об/хв.

Відносну щільність гранул можна міняти, змінюючи час грануляції. Для отримання максимальної щільності необхідно грануляцію проводити протягом 70–100 хв.

Отримані таким чином гранули сушилися при температурі 90–100 °C у вакуумних сушильних шафах протягом 1,5–2 год. Після сушіння вони спікались у печі опору з графітним нагрівачем у середовищі водню за режимами, наведеними в табл. 2. Спикання гранул твердосплавних сумішей VK-8 і KXH-15 проводилось у муфельній печі в середовищі водню. Для того щоб гранули не злипались при спіканні, вони змішувались з роз'єднувачем. Як роз'єднувач брався порошок оксиду алюмінію з розміром частинок, меншим за 100 мкм. Після цього отримана шихта засипалась у графітні човники і спікалась. Далі човники проштовхувались через муфель печі, розігрітої до заданої температури. Після спікання гранули відділялись від порошку оксиду алюмінію просіюванням через сито з розміром отворів 160 мкм і визначались

їх щільність та морфологія поверхні. Щільність гранул з тугоплавких сполук після спікання наведено в табл. 1. Загальний вигляд гранул зображено на рис. 3, а. Отримані таким чином гранули мають сферичну або близьку до неї форму.

Таблиця 2. Режими спікання гранул із карбідів

Матеріал	Температура, °C	Час спікання, хв
TiC	2200	60
ZrC	2100	60
VC	2000	70
NbC	2100	75
Cr ₃ C ₂	1500	70
Mo ₂ C	2000	70
WC	2000	80
TiC-WC	2100	80
Суміш WC+ 8 %Co (BK-8)	1450	45
Суміш Cr ₃ C ₂ +15 %Ni (KXH-15)	1300	45

Отримання гранул з плавлених ТС, які, як зазначалось вище, є перспективними для створення композиційних матеріалів, відбувалось плавленням витратних електродів, виготовлених з вихідних порошків цих сполук. Плавлення проводилось у дуговій печі під тиском захисного газу в припущенні, що має місце пригнічення випаровування компонентів спо-

лук під час їх розкладання [3, 13]. Як захисний газ використовувався аргон. Швидкість охолодження від температури попереднього підігріву кристалізатора до 2500 °C регулювалась у межах 35–50 град/хв за рахунок її поступового зменшення. Тиск газу в робочій камері печі під час плавлення змінювався в межах від 1,0 до 9,0 МПа. На базі вивчення складу і структури отриманих плавлених ТТС було визначено оптимальні умови їх отримання, які наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Оптимальні режими отримання плавлених тугоплавких сполук

Сполука	Густина струму, А/см ²	Тиск газу в робочій камері, МПа	Швидкість охолодження розплаву, град/хв
TiC	120–130	5,5–6,0	35–40
ZrC	140–160	6,0–6,5	35–40
VC	160–180	6,0–7,0	40–50
NbC	190–200	7,0–8,0	40–50
TiC-WC	180–220	7,5–9,0	40–45
TiC-TiB ₂	180–220	7,5–8,0	40–45

В подальшому отримані зливки плавлених ТС подрібнювались у шоккових дробарках і ступах Абіха з виділенням необхідних фракцій зерен через просіювання на ситах з відповідним розміром отворів. Вивчались щільність, топографія отриманих зерен плавлених ТС та їх міцність. Результати досліджень наведено на рис. 3, б, в, г та в табл. 5–7.

У статті також було досліджено умови отримання сферичних гранул із плавлених тугоплавких сполук *відцентровим розпилюванням за допомогою обертового електрода*.

Як відомо [13, 14], одним із методів отримання гранул (порошків) із сферичною або близькою до неї формою може бути метод диспергування розплавів. Найбільш поширений цей метод при отриманні порошків металів та сплавів з температурою плавлення до 1600 °C у випадку використання як енергоносії газів, рідин або механічного диспергування. При отриманні гранул із матеріалів, які мають вищу температуру плавлення, доцільно використовувати відцентрове розпилю-

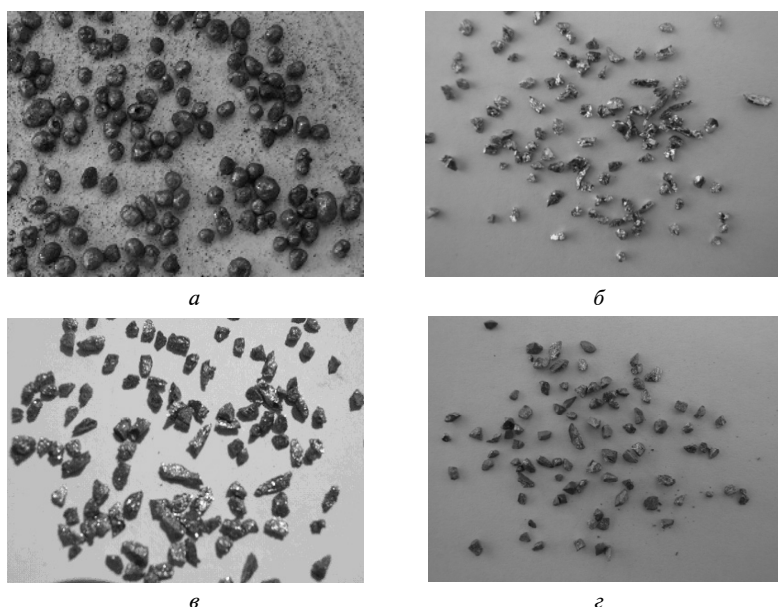


Рис. 3. Гранули з тугоплавких сполук, отримані грануляцією (а) і плавленням (б, в, г): а – Mo₂C (×5); б – TiC (×3); в – NbC (×5); г – TiC-WC (×3)

вання розплавів, одним із варіантів якого є розпилювання за допомогою електрода, що обертався [13].

Для розпилення використовувались електроди діаметром 20 мм і довжиною 120 мм, зроблені з вихідних порошків карбідів та їх сплавів за технологією виготовлення виробів із тугоплавких сполук методами порошкової металургії [2]. Для пресування заготовок електродів використовувались розбірні прес-форми з боковим затискачем. Спінання проводилось у печі Таммана в човниках із графіту і засипці з графітової крупки. Режимі спінання були подібні до наведених у табл. 2.

Електрод, що обертався, оплавлявся з торця за допомогою низькотемпературної плазми, яка виникала між електродом і водоохолоджуваним вольфрамовим катодом. Утворений розплав відцентровими силами диспергувався і охолоджувався у вільному польоті. При цьому для отримання гранул сферичної форми необхідно було створити такі умови, щоб час охолодження продуктів диспергування розплаву був більшим за час його сфероїдизації. При цьому діаметр гранул, які отримувались відцентровим розпилюванням, оцінювався за формулою [13]

$$d = \frac{A}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma_m}{D\gamma_m}},$$

де ω — кутова швидкість обертання електрода; D — діаметр електрода; γ_m — густина матеріалу електрода; σ_m — поверхневий натяг розплаву матеріалу; A — стала: $A = 3\text{--}3,5$.

У нашому випадку було встановлено, що сферичні гранули з середнім діаметром 1,5–2,0 мм можна отримувати, якщо використовувати технологічні параметри, наведені в табл. 4.

Таблиця 4. Технологічні параметри отримання гранул із тугоплавких сполук

Параметр	Значення
Діаметр електрода, мм	20
Швидкість обертання електрода, об/хв	4000–5000
Густина струму низькотемпературної плазми, А/см ²	120–220 (залежно від карбиду, табл. 2)
Температура навколишнього середовища, К	293–303

Вивчався гранулометричний склад отриманих гранул, їх форма та топографія поверхні. Результати наведені на рис. 4 і 5, а.

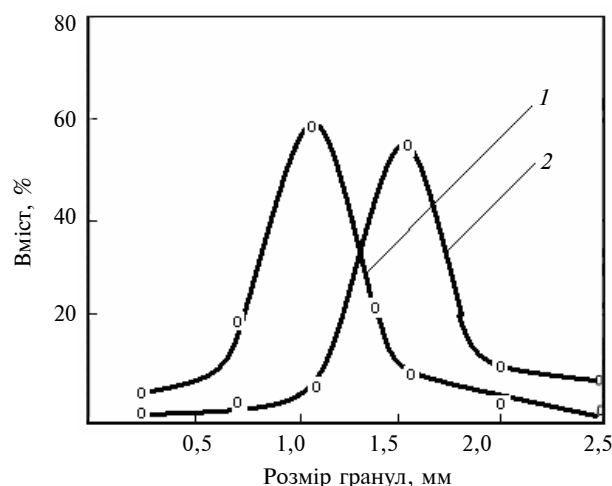


Рис. 4. Гранулометричний склад гранул із карбідів, отриманих відцентровим розпилюванням за допомогою обертового електрода: 1 — РЕЛІТ; 2 — TiC

Як видно з рис. 4, гранулометричний склад, при інших однакових умовах, залежить від щільності матеріалу. Так, більш висока щільність РЕЛІТу (13,4–13,8 г/см³) сприяє отриманню гранул з нього з меншим розміром гранул, ніж у гранул з карбиду титану (4,92 г/см³). Останнє узгоджується з виразом (1), який встановлює залежність діаметра гранул (частинки) від умов відцентрового диспергування розплавів за допомогою електрода, що обертається. Форма гранул переважно сферична (рис. 5, а).

Нами було також проведено вивчення умов отримання гранул *спінанням з наступним подрібненням*. Для отримання їх цим методом використовувалась традиційна технологія і технологічні режими отримання порошкових виробів із тугоплавких сполук [2]. Для цього вихідні порошки змішувались з пластифікатором (2 %-ний розчин полівінілового спирту у воді) та пресувались заготовки діаметром і висотою 30 мм, які сушилися і спікались за режимами, подібними до наведених у табл. 2. Гранули отримувались подрібненням спечених заготовок. Загальний вигляд одержаних таким чином гранул і їх властивості наведено на рис. 5 та в табл. 5–8.

Нами також вивчались властивості гранул, отриманих за різними методами, висвітленими вище. Досліджувались щільність і насипна щільність гранул, міцність на стиснення, коефіцієнт форми та структура (табл. 5–8). Щіль-

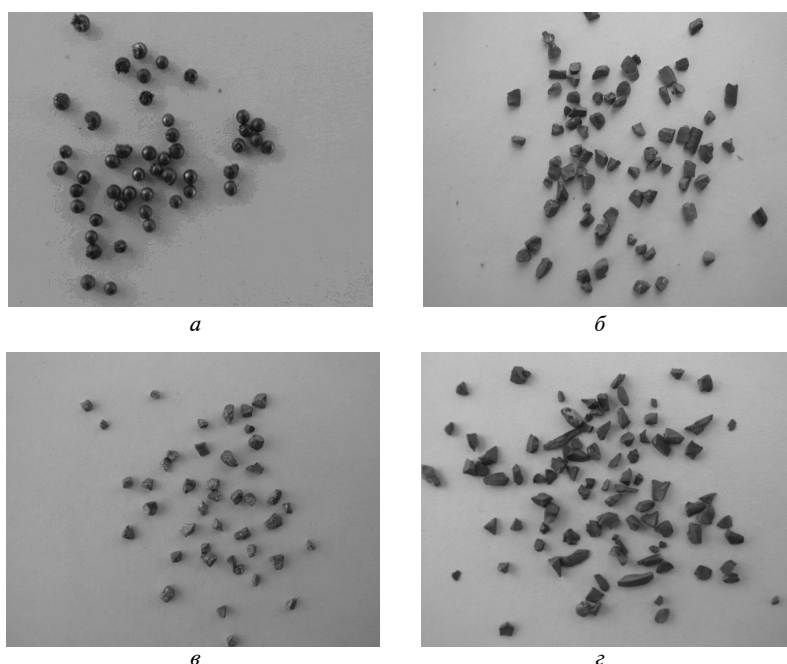


Рис. 5. Гранули, отримані відцентровим розпилюванням розплавів (а – TiC, РЕЛІТ) і пресуванням з наступним спіканням та подрібненням (б – ВК-8; в – КХН; г – ТНМ) із спечених сплавів на основі ($\times 3$)

ність гранул визначалась пікометричним методом [15]. Як рідина використовувався етиловий спирт. Для запобігання попадання рідини у відкриті пори гранул перед визначенням щільності вони просочувались розплавленим парафіном. Отримані значення щільності гранул наведено в табл. 5.

Коефіцієнт форми визначався фотографічним методом як відношення довгої діагоналі контура гранули на знімку до короткої за формулою

$$K_{\phi} = d_1/d_2,$$

де d_1 – довжина довгої діагоналі;
 d_2 – довжина короткої діагоналі.

Міцність на стиснення визначалась за методикою, викладеною в статті [17].

Вивчення форми і топографії поверхні гранул проводилось фотографуванням їх загального вигляду цифровим фотоапаратом. Результати наведено на рис. 3, 5. Як видно з цих рисунків, форма і топографія поверхні залежать від методу їх отримання. Гранули, отримані грануляцією, мають округлу форму з коефіцієнтом форми, який змінюється від 0,81 до 0,96 (табл. 8). При цьому слід зазначити, що він зменшується із збільшенням щільності матеріалу (ТС), яке може бути зумовлене деформацією гранул при їх отриманні під впливом гравітаційних сил, що зростають при збільшенні щільності матеріалу. Поверхня гранул має незначну шорсткість (рис. 3, а).

Для гранул, отриманих відцентровим розпилюванням, характерна форма, близька до сферичної з коефіцієнтом форми 0,96–1,0. Поверхня гранул гладка (рис. 5, а). Сферична форма зумовлена тим, що вона формується з частинки розплаву під дією поверхневого натягу при виконанні умови, що час її охолодження більший за час її сфероїдизації [13, 14].

Гранули, отримані з плавлених тугоплавких сполук, мають скальчасту форму з коефіцієнтом форми, що змінюється в межах 0,71–0,92 (рис. 3, б, в, г). При цьому спостерігається

Таблиця 5. Відносна щільність гранул, отриманих різними методами, %

Матеріал	Метод отримання			
	Грануляція	Відцентрове розпилювання	Плавлення	Метод ПМ
TiC	86,8	99,1	99,7	89,3
ZrC	85,4	98,2	99,6	86,2
VC	81,2	—	99,9	86,4
NbC	82,1	98,9	100,0	92,3
Cr ₃ C ₂	84,9	—	—	94,6
Mo ₂ C	89,2	—	98,9	95,5
WC	87,9	—	98,7	94,3
TiC-WC	88,2	98,4	99,9	96,4
Суміш WC + 8 % Co (BK-8)	94,8	—	—	99,5
Суміш Cr ₃ C ₂ + 15 % Ni (KXH-15)	95,4	—	—	99,8

чітка залежність форми гранул від кристалографічної будови ТС та структури вихідних зливків. Гранули більш рівновісні з ТС, яка має кубічну ґратку. Для гранул з ТС з гексагональною ґраткою форма менш рівновісна (коефіцієнт форми зменшується). Структура таких плавлених ТС теж не рівновісна, зерна більш видовжені (див. рис. 6, з).

Гранули, отримані подрібненням спечених ТС, характеризуються коефіцієнтом форми, який змінюється в межах 0,84–0,94. При цьому він збільшується із збільшенням пружних характеристик матеріалу (модуля пружності), як це має місце для гранул з твердих сплавів марок ВК і КХН порівняно з чистими карбідами.

Таблиця 6. Насипна (г/см³)/відносна насипна (%) щільність гранул, отриманих різними методами

Матеріал	Метод отримання			
	Грануляція	Відцентрове розпилювання	Плавлення	Метод ПМ
TiC	2,73/55,5	2,65/53,86	2,96/60,16	2,81/57,14
ZrC	3,64/54,6	3,92/58,85	4,11/61,71	3,67/55,17
VC	2,85/51,96	—	3,42/62,77	3,03/55,29
NbC	4,11/52,54	4,95/63,29	5,01/64,06	4,62/59,07
Cr ₃ C ₂	3,66/54,33	—	—	4,08/60,5
Mo ₂ C	5,23/57,09	—	5,62/61,35	5,59/61,12
WC	8,87/56,25	—	11,21/71,08	9,51/60,30
TiC-WC	6,88/56,39	6,86/56,23	7,04/57,70	7,52/61,63
Суміш WC + 8 % Co (BK-8)	10,35/70,8	—	—	12,7/86,9
Суміш Cr ₃ C ₂ + 15 % Ni (KXH-15)	4,75/67,8	—	—	6,02/86,00

Таблиця 7. Міцність на стиснення гранул, отриманих різними методами, (Н/зерно) × 10⁻²

Матеріал	Метод отримання			
	Грануляція	Відцентрове розпилювання	Плавлення	Метод ПМ
TiC	1600	4900	5800	2940
ZrC	1570	3890	5040	2100
NbC	1100	4650	4900	2600
Cr ₃ C ₂	950	—	—	1670
Mo ₂ C	860	—	4100	1850
WC	1990	—	6050	3600
TiC-WC	2010	6050	6100	4100
Суміш WC + 8 % Co (BK-8)	5600	—	—	7900
Суміш Cr ₃ C ₂ + 15 % Ni (KXH-15)	5250	—	—	7250

Таблиця 8. Коефіцієнт форми гранул, отриманих різними методами

Матеріал	Метод отримання			
	Грануляція	Відцентрове розпилювання	Плавлення	Метод ПМ
TiC	0,90–0,98	0,98–1,0	0,89–0,92	0,84–0,89
ZrC	0,91–0,98	0,95–0,99	0,84–0,90	0,89–0,92
NbC	0,86–0,92	0,97–0,99	0,82–0,89	0,86–0,92
Cr ₃ C ₂	0,91–0,97	—	—	0,88–0,90
Mo ₂ C	0,85–0,89	—	0,76–0,80	0,89–0,91
WC	0,81–0,84	—	0,71–0,84	0,84–0,89
TiC-WC	0,84–0,89	—	0,79–0,86	0,88–0,91
Суміш WC + 8 % Co (BK-8)	0,91–0,96	—	—	0,89–0,94
Суміш Cr ₃ C ₂ + 15 % Ni (KXH-15)	0,92–0,94	—	—	0,88–0,92

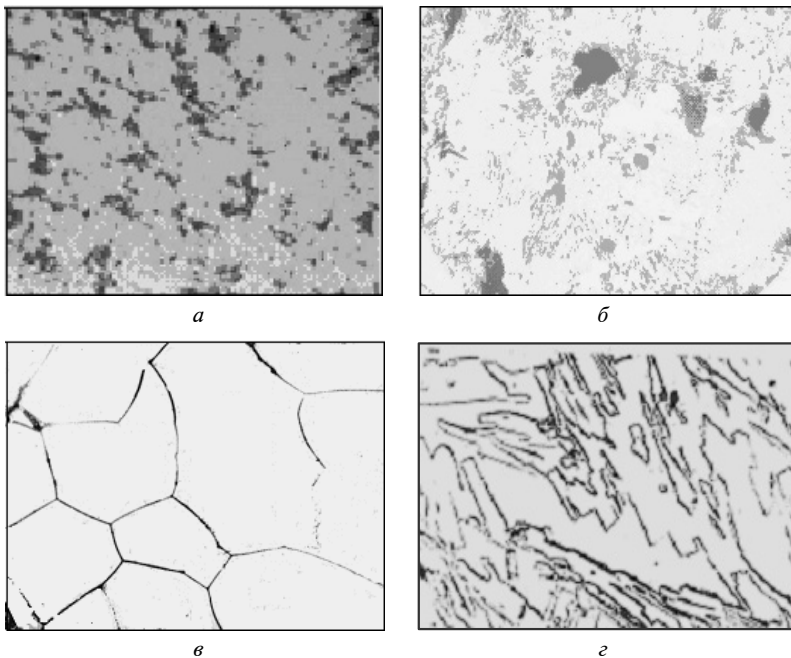


Рис. 6. Типові структури гранул, отриманих різними методами ($\times 360$): *a* – гранульовані, спечені; *б* – відцентрове розпилювання; *в* – плавлені (TiC, NbC, ZrC); *г* – плавлений Mo_2C

Вивчення структури проводилось за традиційною методикою, згідно з якою готувались шліфи, які досліджувались на металографічному мікроскопі “NEOFOT”. Встановлено, що гранули, отримані грануляцією і подрібненням спечених заготовок, мають пористість, більшу, ніж у гранул, отриманих грануляцією (рис. 6, *a*). У гранул, отриманих відцентровим розпилюванням, наявна несистематична пористість, яка має газовий характер (рис. 6, *б*). Структура таких гранул дрібнозерниста. У гранул, отриманих подрібненням зливків з ТС, пористості нема (див. рис. 6, *в*, *г*). Структура характеризується великим розміром зерен. При цьому для карбідів перехідних металів IV–V підгрупи періодичної таблиці Д.І. Менделєєва форма зерен переважно рівновісна (рис. 6, *в*), а для карбідів перехідних металів VI підгрупи вона видовжена (рис. 6, *г*).

Обговорення результатів

Як було встановлено нами при дослідженні умов отримання гранул для створення композиційних матеріалів, їх характеристики залежать від методу отримання та технологічних режимів. Так, гранулометричний склад гранул, отримуваних грануляцією, залежить від швидкості обертання барабана (рис. 1). Відомо, що сферичні тіла, розміщені в барабані, який обер-

тається, можуть рухатись за трьома режимами: ковзання, перекочування та вільного падіння залежно від швидкості обертання барабана, як це має місце в кульових млинах для куль при розмелюванні матеріалів [8].

У нашому випадку, при малих швидкостях обертання (менше за 40 об/хв), реалізується режим ковзання, що не сприяє грануляції. Тому гранули мають малий розмір. Збільшення швидкості обертання до 40–80 об/хв, мабуть, сприяє виникненню режиму перекочування і, як наслідок, отриманню гранул більшого розміру. При швидкостях, більших за 80 об/хв, під дією відцентрових сил матеріал притискується до стінок барабана і процес грануляції не відбувається. При цьому можливе руйнування утворених гранул при вільному падінні.

Як зазначалось вище, відносна щільність гранул, отриманих грануляцією, при інших однакових умовах, збільшується з часом грануляції, що може бути зумовлено збільшенням роботи сил, переважно гравітаційних, яка витрачається на структурну деформацію, що має місце при формуванні щільності гранул. Збільшення відносної щільності гранул із збільшенням щільності матеріалу вихідного порошку ТС слід пов'язувати з дією гравітаційних сил.

Більша щільність гранул, отриманих пресуванням пластифікованих сумішей ТС з наступним їх спіканням, зумовлена тим, що при ущільненні відбувається більш повна структурна деформація вихідної шихти за рахунок сил, прикладених зовні.

Як видно з отриманих результатів, форма гранул залежить від методу їх отримання. При цьому близька до сферичної форма гранул, отриманих грануляцією, зумовлена коловим рухом вихідних агломератів. У той же час сферична форма гранул, отриманих відцентровим розпилюванням, зумовлена процесами, які відбуваються при охолодженні краплини розплаву. Процес формоутворення треба пов'язувати з часом охолодження продуктів диспергування розплаву і часом їх сфероїдизації. Якщо час сфероїдизації $\tau_{\text{сф}}$ менший за час охолодження $\tau_{\text{охол}}$, то продукти диспергування встигають

набути форми кулі. Якщо ж $\tau_{\text{сф}}$ більший за $\tau_{\text{охол}}$, то частинка розплаву зберігає деформовану форму, тобто частинки порошку будуть неправильної форми. Час охолодження краплі розплаву, протягом якого можлива її сфероїдизація, матиме вигляд

$$\tau_{\text{охол}} = \tau' + \tau'',$$

де τ' — час охолодження краплі розплаву до температури початку кристалізації, який можна визначити за формулою

$$\tau' = \frac{c\gamma d}{6\alpha_k} \ln \frac{t_m - t_r}{t_k - t_r},$$

де c — теплоємність розплаву; γ — густина розплаву; d — діаметр краплини; α_k — коефіцієнт тепловіддачі; t_m, t_k — відповідно початкова температура розплаву, температура початку кристалізації; t_r — температура навколишнього газового середовища; τ'' — час кристалізації, тобто час виділення прихованої теплоти кристалізації:

$$\tau'' = \frac{Qm}{Sq},$$

де Q — питома теплота кристалізації; m — маса краплі; S — поверхня краплі; q — питомий тепловий потік:

$$q = \alpha_k(t_k - t_r).$$

Час сфероїдизації краплі розплаву, згідно з О.С. Нечипоренком і Ю.І. Найдю [13], можна визначити за формулою

$$\tau_{\text{сф}} = \frac{3\pi\eta_p}{\sigma}(R - r),$$

де η_p — в'язкість розплаву; R — радіус утвореної кулеподібної частинки; r — радіус вихідної прядки.

Для аналізу умов, що сприяють сфероїдизації крапель, користувались спрощеною нерівністю

$$\frac{3\pi\eta_p}{\sigma}(R - r) \leq \frac{c\gamma d}{6\alpha_k} \ln \frac{t_m - t_r}{t_k - t_r}. \quad (1)$$

Виконання нерівності в наведеному вигляді буде сприяти сфероїдизації крапель розплаву.

Встановлені нами в статті оптимальні режими отримання гранул сферичної форми свідчать про те, що вони задовольняють нерівність (1).

Отримані результати показують, що більш високу щільність мають гранули, отримані відцентровим розпилюванням та подрібненням зливків з ТС. Останнє зумовлено тим, що формування щільності відбувається з розплавів. Дещо нижчу щільність у гранул, отриманих відцентровим розпилюванням, можна пояснити тим, що при плавленні ТС відбувається їх дисоціація з наступним випаровуванням продуктів дисоціації в газоподібному вигляді [13]. Останнє призводить до формування в гранулах газової пористості. Відсутність такої пористості в гранулах з плавлених тугоплавких сполук зумовлена тим, що процес плавлення відбувався під тиском газу, який попереджував випаровування газоподібних продуктів дисоціації [16].

Результати з дослідження міцності на стиснення гранул, отриманих різними методами, свідчать про те, що вона найбільша у гранул із плавлених ТС. Це зумовлюється їх високою щільністю та досконалістю ґратки. Наявність у гранулах пористості зменшує їх міцність, і вона найменша в гранул, отриманих грануляцією, в яких пористість найвища.

Висновки

Властивості гранул залежать від методу і умов їх отримання. Змінюючи метод та умови отримання, можна одержувати гранули з наперед заданими властивостями залежно від вимог до них при створенні зносостійких товстошарових покриттів та виробів.

Найбільшу міцність мають гранули, отримані з плавлених тугоплавких сполук, що зумовлено їх стовідсотковою щільністю та монокристалічністю.

У подальшому доцільним є вивчення закономірностей отримання композиційних матеріалів та товстошарових покриттів із використанням гранул, отриманих за оптимальних умов, встановлених у статті.

А.Н. Степанчук, М.Б. Шевчук, С.В. Мазяев

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ГРАНУЛ С ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Установлены оптимальные условия получения гранул (зерен) из порошков тугоплавких соединений грануляцией их пластифицированных смесей, центробежным распылением с помощью вращающегося электрода, плавлением в низкотемпературной плазме с помощью расходующихся электродов, прессованием с последующим спеканием и дроблением.

A.M. Stepanchuk, M.B. Shevchuk, S.V. Mazaev

ON PROPERTIES AND OBTAINING OF GRANULES FROM REFRACTORY MATERIALS FOR PRODUCING COMPOSITE MATERIALS

The paper determines the conditions of obtaining granules from refractory materials by granulation of their plasticized stock, atomization by a spinning electrode, melting in the low-temperature plasma by a consumable electrode, compaction followed by sintering and crushing.

1. *Скоруход В.В.* Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений. — К.: Техніка, 1982. — 162 с.
2. *Степанчук А.Н., Билык И.И., Бойко П.А.* Технология порошковой металлургии. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 1989. — 416 с.
3. *Степанчук А.М.* Прочностные и абразивные свойства плавленных тугоплавких соединений и инструментальных материалов на их основе // Сб. науч. тр. "Современные спеченные твердые сплавы" / Под общ. ред. Н.В. Новикова. — К.: ИСМ им. Бакуля НАН Украины, 2008. — С. 269–280.
4. *Yan-pei Song, Hua Yu, Jun-guang He, Hui-gai Wang.* Elevated temperature sliding wear behavior of WCP-reinforced ferrous matrix composites // J. Mater Science. — Published online. — 2008. — N 10. — P. 7115–7120.
5. *Yan-pei Song, Hua Yu, Mao Xie-Min.* Wear behavior of WCP/Fe–C composites under high-speed dry Sliding // Ibid. — N 2. — P. 2686–2692.
6. *Bao J., Newkirk J.W., Bao S.* Wear-Resistant WC Composite Hard Coatings by Brazing // J. of Materials Engineering and Performance. — Published online. — 2004. — N 2. — P. 385–388.
7. *Savchenko N.L., Gnyusov S.F., Kul'kov S.N.* Features of High-Speed Wear of WC–Steel 11G13 Material in Contact with Cast Tool Steel // J. of Friction and Wear. — 2009. — 30, N 1. — P. 46–52.
8. *Xinhong Wang, Zengda Zou, Min Zhang, Shiyao Qu.* Microstructure and wear properties of WC–TiC–Co/CuZnNi composite surface coating // J. of Materials Processing Technology. — 2006. — P. 188–194.
9. *Lu Shan-Ping, Kwon Oh-Yang, Guo Yi.* Wear behavior of brazed WC/NiCrBSi(Co) composite coatings // Wear Published online. — 2003. — P. 421–428.
10. *Пирогов С.Я., Шеенко И.Н., Марков И.И. и др.* Исследование сплавов, наплавленных шихтой, содержащей тугоплавкие соединения // Порошковая металлургия. — 1984. — № 10. — С. 17–25.
11. *Прокорец В.С., Екимов В.В.* Увеличение работоспособности мельниц ударного действия с помощью твердых безвольфрамовых сплавов // Строительные материалы, оборудование, технология XXI века. — 2005. — № 7. — С. 50–51.
12. *Полищук В.С.* Интенсификация процессов получения карбидов, нитридов и композиционных материалов на их основе. — Севастополь: Вебер, 2003. — 328 с.
13. *Степанчук А.М.* Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів та тугоплавких сполук. — К.: НТУУ "КПІ", 2006. — 354 с.
14. *Терновой Ю.Ф., Баглюк Г.А., Кудиевский С.С.* Теоретические основы процессов распыления металлических расплавов. — Запорожье: Запорож. гос. инженерная академия, 2008. — 298 с.
15. *Степанчук А.М.* Основы отримання порошкових та композиційних матеріалів. Ч.1. Отримання порошків та їх властивості. — К.: НТУУ "КПІ", 2010. — 72 с.
16. *Степанчук А.М.* Про формування пористості в плавлених тугоплавких сполуках // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2004. — № 5. — С. 61–67.
17. *Адамовский А.А.* Исследование абразивных свойств и взаимодействия тугоплавких инструментальных материалов с обрабатываемой поверхностью: Дис. ... канд. техн. наук. — К.: ИПМ АН УССР, 1975. — 250 с.