



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ІМПУЛЬСНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ  
<http://www.iipt.com.ua>



Цикл наукових праць  
на здобуття премії Президента України  
для молодих вчених у 2020 році

**ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАНИХ  
ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ  
ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ПІДВИЩЕНИМИ  
ВЛАСТИВОСТЯМИ**

**Автори:**

к.т.н. Липян Євген Васильович, к.т.н. Присташ Микола Сергійович,  
к.т.н. Торпаков Андрій Сергійович



Цикл наукових праць присвячений розробці технології отримання матеріалів із високими фізико-механічними властивостями шляхом підготовки металевих порошків за допомогою високовольтного електричного розряду (ВЕР) та наступної консолідації методом іскро-плазмового спікання (ІПС). Представлені результати експериментальних та теоретичних досліджень електричних та гідродинамічних параметрів ВЕР та їх зв'язку з дисперсністю, фазовим складом отриманої шихти та властивостями консолідованих з обробленої шихти метало-матричних композитів (ММК), а також із властивостями модифікованих підготовленими порошками нікелевого сплаву СМ88У. Цикл наукових праць складається з 122 робіт, виконаних у 2010–2019 рр., з них 50 статей у реферованих журналах, з яких 11 опубліковано у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Web of Science та/або Scopus, 7 патентів на винаходи, 10 патентів на корисну модель), 55 тез доповідей міжнародних наукових конференцій. Згідно з базою даних Scopus загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, складає 11, h-індекс (за роботою) = 2; згідно з базою даних Google Scholar загальна кількість посилань - складає 67, h-індекс (за роботою) = 5. Також за тематикою циклу захищено 3 кандидатських дисертації.

**Метою даної роботи** є розробка фізико-технологічних засад створення методів модифікації та синтезу функціональних матеріалів шляхом високовольтної електричної обробки та іскрового плазмового спікання.

### **Завдання досліджень:**

- – провести аналіз сучасного стану методів підготовки порошкових сумішей для отримання металоматричних матеріалів з високою зносостійкістю;
- – теоретично проаналізувати умови диспергування та синтезу карбідних фаз при ВЕР в дисперсній системі «порошок-газ»;
- – експериментально дослідити закономірності зв'язку зміни дисперсності, фазового складу та фізико-механічних властивостей порошків Fe, Ti, їх сумішей та сумішей з додаванням B<sub>4</sub>C, а також суміші Al – Ti з параметрами ВЕР обробки в гасі;
- – дослідити структуроутворення металоматричних композитів (зокрема, карбідосталей та твердих сплавів) систем Fe – Ti – C – (B) та Al – Ti – C при їх консолідації методом ІПС та вивчити фізико-механічні та трибологічні властивості отриманого матеріалу;
- – з використанням встановлених закономірностей визначити зв'язок функціональних та фізико-механічних властивостей консолідованого матеріалу методом ІПС зі складом вихідної шихти, її дисперсністю, зміною питомого електричного опору при ВЕР обробці та режимом ІПС;
- – встановити вплив модифікування порошками, обробленими ВЕР, на зміну структури і фізико-механічних властивостей жароміцного сплаву СМ88У.

**Об'єкт дослідження** – елементарні порошки Fe, Ti, Al, їх суміші та суміші з додаванням  $V_4C$  до та після ВЕР обробки, фізико-механічні властивості, структура консолідованих матеріалів.

**Предмет дослідження** – процеси високовольтної електророзрядної обробки металевих порошків та їх іскро-плазмового спікання.

### Наукова новизна

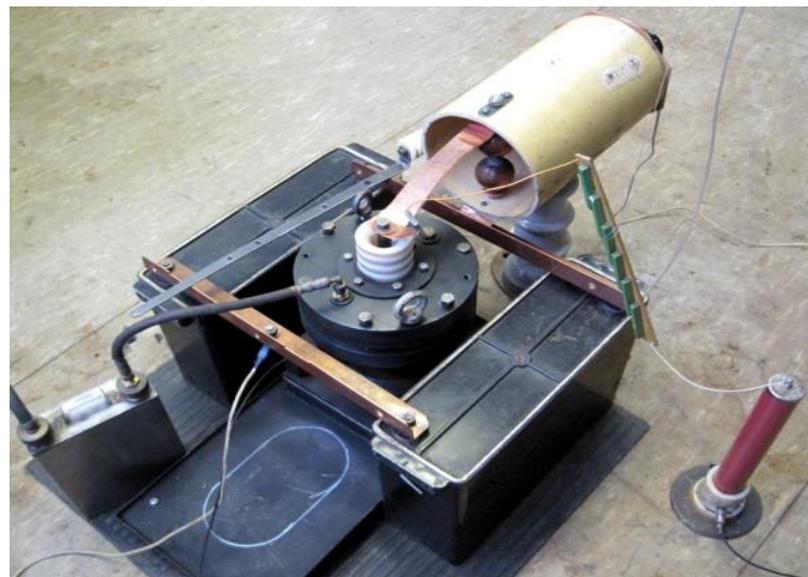
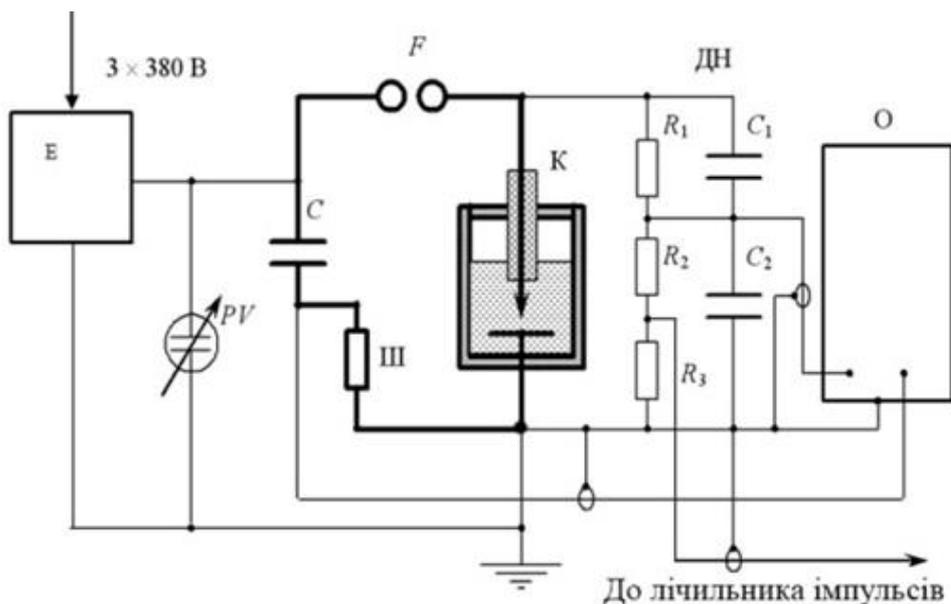
- Вперше встановлено основні закономірності диспергування порошків та синтезу твердих фаз при ВЕР обробці сумішей елементарних порошків системи Fe–Ti–C–(B) в газі. Показано, що найбільш ефективні режими синтезу карбідної (боридної) складової та диспергування порошків, реалізуються при швидкості зростання струму ( $di/dt$ ) від 13 до 24 ГА/с, що забезпечує тиск в каналі розряду від 0,8 до 1,2 ГПа та температурі від  $2 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^4$  К при густині струму в каналі розряду ( $j_c$ ) від 0,6 до 0,8 кА/мм<sup>2</sup>. При цьому робоча частота має обиратись згідно встановлених закономірностей седиментації частинок порошку залежно від хімічного складу оброблюваного порошку, його дисперсності та типу робочої рідини.
- Вперше методом термодинамічного аналізу обґрунтовані умови електророзрядного синтезу фаз інтерметалідів ( $Fe_2Ti$ ,  $FeTi$ ) та карбідів металів ( $TiC$ ,  $Fe_3C$ ) при циклічному потраплянні вихідних порошків металів системи Ti – Fe у навколоплазмову перехідну зону (температура у діапазоні від 298 до 3500 К та парціальний тиск парів елементів від  $10^3$  до  $10^7$  Па) при їх високовольтній електророзрядній обробці у газі.
- Обґрунтовано механізм високовольтного електророзрядного синтезу карбідних фаз у вуглеводневій рідині при ВЕР обробці металевих порошків, який включає піроліз вуглеводневих ланцюгів з утворенням активного нановуглецю різних алотропних модифікацій, атоми якого в умовах значних температур та тиску здатні до вкорінення в кристалічну ґратку металу, утворюючи карбідні сполуки.
- Встановлено вплив попередньої ВЕР обробки порошкових сумішей на особливості структуроутворення та основні фізико-механічні властивості металоматричних композитів систем Fe–Ti–C–(B) та Al–Ti–C, отриманих із застосуванням іскро-плазмового спікання. Показано, що ВЕР-обробка порошків системи Fe–Ti–C–(B) та їх наступна консолідація методом ІПС дозволяє досягнути високих показників щільності (з пористістю до 4 %) та підвищених механічних характеристик матеріалу твердість до 68 HRC та міцність на вигин до 1350 МПа). Отримані метало-матричні композити системи Al–Ti–C мають твердість за Віккерсом 8,3 ГПа та характеризуються високою зносостійкістю (відносна втрата маси складає 0,9 % на 5 км шляху).
- Встановлено, що зміна швидкості нагрівання з 10 °С/с до 20 °С/с при ІПС консолідації композитів системи Fe–Ti–C–B із введеною потужністю 4 кДж/с за рахунок інтенсифікації процесів боридоутворення дозволяє підвищити їх щільність до 98 % від теоретичної.
- Вперше встановлено значення іскрової постійної  $A_k \approx 10^6$  В<sup>2</sup>·с/м<sup>2</sup>, яка характеризує стан плазми у каналі високовольтного електричного розряду у дисперсних системах «газ – порошок металу», що дозволяє обирати режими електророзрядного впливу на порошки різних металів шляхом прогнозування електричних та гідродинамічних характеристик розряду.
- Вперше теоретично обґрунтовано циклічний вплив сили Лоренца при високовольтному електричному розряді у дисперсних системах «газ – порошок металу», яка сприяє пришвидшенню кристалізації частинок порошку, підвищенню щільності закристалізованої частинки, а подекуди деформації та деструкції частинок. Ефективність диспергування та ущільнення за рахунок впливу сили Лоренца залежить від густини струму, яка для досягнення помітного ефекту має перевищувати  $5,2 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Із збільшенням густини струму понад  $5,2 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> зменшення розмірів частинок та зростання їх щільності за рахунок дії електромагнітного тиску відбуваються згідно з експоненціальною залежністю.
- Вперше обґрунтовано зв'язок питомої енергії високовольтного електророзрядного синтезу шихти для одержання карбідотитанових твердих сплавів з кількістю карбиду титану в її складі. Питома енергія для обробки вихідних порошкових сумішей з вмістом титану  $C_{Ti} = 26...90$  % складає  $0,32 \cdot C_{Ti}$  МДж/кг, де  $C_{Ti}$ , % – кількість Ti, забезпечує повну карбідизацію титану. При цьому для забезпечення не менше 30 мас. % карбиду титану мінімально необхідною питомою енергією є 8,3 МДж/кг.
- Вперше розроблено принцип електророзрядного синтезу карбідотитанових твердих сплавів у дві стадії. На першій стадії синтез відбувається за рахунок підготовки поверхні порошків, синтезу нановуглецю різних алотропних модифікацій та синтезу карбиду титану при високовольтній електророзрядній обробці при питомій енергії обробки від 4,5 до 27 МДж/кг. На другій стадії при іскро-плазмовому спіканні при температурі від 1000 до 1100 °С при часі витримки до 20 хв. відбувається синтез карбідотитанового твердого сплаву з високими фізико-механічними характеристиками.

## Практичне значення циклу наукових праць:

- Дослідження процесів електророзрядної обробки порошків в гасі та ІПС дозволило розробити ефективну технологічну схему та одержати вироби із високосносостійких ММК на основі заліза.
- Розроблені авторами нові матеріали та технологічні процеси пройшли дослідно-промислову апробацію на Експериментальному виробництві Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України:
  - металоматричний композит системи Fe–Ti–C–B, виготовлений за рекомендаціями, представленими в дисертаційній роботі, було використано в ролі пластин для різання полімерної ізоляції та пробійників титанової фольги на державному підприємстві. За результатами випробувань стійкість представленого композиту була на рівні інструментальної сталі Р6М5, але за рахунок того, що вартість матеріалу системи Fe–Ti–C–B менша, це дозволить значно збільшити прибуток виробництва з економічної точки зору.
  - карбідтитановий твердий сплав, виготовлений за рекомендаціями, представленими в роботі, було використано в якості вставок для фрезувальної голівки. За результатами випробувань стійкість представленого матеріалу була на рівні твердого сплаву марки ВК8, але за рахунок того, що вартість представленого безвольфрамового твердого сплаву у 4 рази менша, з економічної точки зору вартість деталі може бути знижена на 35–50 %, що дозволить значно збільшити прибуток підприємства.
- Результати роботи в частині досліджень впливу високовольтного електричного розряду на дисперсну систему «порошок-вуглеводнева рідина», та фізичних процесів при іскро-плазмовому спікання порошкових сумішей використовуються в навчальному процесі при викладанні курсу «Розрядно-імпульсні технології» на кафедрі імпульсних процесів і технологій Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова (м. Миколаїв), а також при викладанні курсів «Особливості виробництва порошкових матеріалів і композитів» та «Обладнання підприємств порошкової металургії» на кафедрі матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова (м. Миколаїв).
- На ДП НВКГ «Зоря» — «Машпроект» показано, що введення синтезованого (запропонованим авторами методом) модифікатора в розплав жароміцного сплаву СМ88У у кількості 0,01% дозволяє зменшити розмір зерна з 1-2 мм до 0,2-0,3 мм. При цьому довготривала міцність сплаву при навантаженні 280 МПа, температурі 900°C збільшилася на 10-15%, міцність на розрив при температурі 600°C склала 110-113 МПа. Міцність на розрив при температурі 900°C склала 65-69 МПа. Такий рівень властивостей отриманого сплаву дозволить ДП НВКГ «Зоря» — «Машпроект» відмовитись від імпорту жароміцного сплаву та замінити його сплавом власного виробництва.
- Порошкова шихта, підготовлена за допомогою високовольтного електричного розряду, на підставі встановлених фізико-технічних принципів була використана для одержання безвольфрамових карбідтитанових твердих сплавів методом electro-sinter-forging на підприємстві «EPoS s.r.l.» (м. Турін, Італія).

## Принципова електрична схема та фотографія стенду для ВЕР обробки

В якості робочого середовища при обробці використовували газ освітлювальний



Е – енергетична частина, PV – кіловольтметр, С – ємнісний накопичувач, Ш – коаксіальний шунт; К – робоча камера; О – запам'ятовуючий осцилограф; F – повітряний розрядник; ДН – дільник напруги;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – елементи дільника напруги

$$P_{\kappa} = P_a \cdot b_0(\eta_1),$$

де  $P_a$  – проміжний коефіцієнт тиску, Па, який визначається за формулою (2),  $b_0(\eta_1)$  – проміжна безрозмірна функція, що визначається за формулою (3)

$$P_a = \left( \frac{\rho_0 U^2}{L \cdot l_p} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

$$b_0(\eta_1) = \frac{\gamma - 1}{2\alpha_1 \gamma} \cdot \frac{\eta_1^{0,3} \cdot (1 - 0,85\eta_1) (1 + \eta_1^3)^{2\alpha_1}}{(0,37 + 0,6\eta_1^2)^{2\alpha_1 - 1,5}}, \quad (3)$$

де  $\rho_0$  – густина середовища,  $U$  – розрядна напруга,  $L$  – індуктивність розрядного контуру,  $l_p$  – розрядний проміжок,  $\eta$  – частка енергії, яка виділяється в першому напівперіоді,  $\alpha_1$  – безрозмірний коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$\alpha_1 = 0,73 + 1,22\eta_1^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-1,47\eta_1^3}, \quad (4)$$

Значення  $\gamma$  для газу приймалося рівним 1,3.

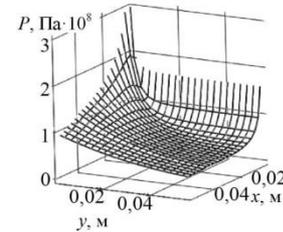
$$P_m(r_e) = P_a \cdot b_1(\eta) \cdot \begin{cases} \frac{r_e}{a_m}, & r_e \leq 2,5l \\ 1,3 \cdot \left( \frac{r_e}{a_m} \right)^{-0,5} \cdot \left( 1 - 0,1 \cdot \frac{r_e}{l} \right), & r_e > 2,5l, \end{cases} \quad (5)$$

$$b_1(\eta_1) = \eta_1^{0,3} \cdot \left( \frac{0,37 + 0,6\eta_1^2}{1 + \eta_1^3} \right)^{0,5\alpha_1} \cdot b_0(\eta_1), \quad (6)$$

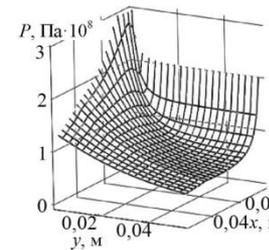
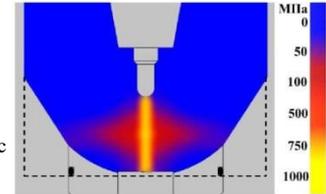
$$a_m = \left( \frac{U^2 C_n^2 L}{\rho \cdot l} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (7) \quad P_m(\varphi, r) = P_m(r) \cdot \left[ \frac{3,2}{\pi} |\phi| \cdot \left( \frac{|\phi|}{\pi} - 1 \right) + 1 \right], \quad (8)$$

## Просторовий розподіл пікових тисків хвилі стиснення в реакторі

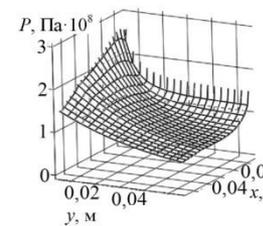
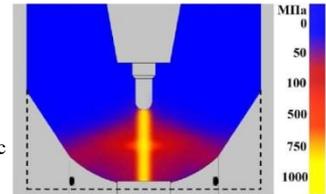
$U=50$  кВ,  $L=0,7$  мкГн,  $C$  від 0,2 до 0,8 мкФ



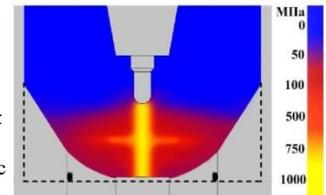
$C=0,2$  мкФ  
 $V=64$  мм<sup>3</sup>  
 $W_1=250$  Дж  
 $n \geq 8000$   
 $di/dt=13$  ГВ/с



$C=0,4$  мкФ  
 $V=380$  мм<sup>3</sup>  
 $W_1=500$  Дж  
 $n \geq 2000$   
 $di/dt=19$  ГВ/с

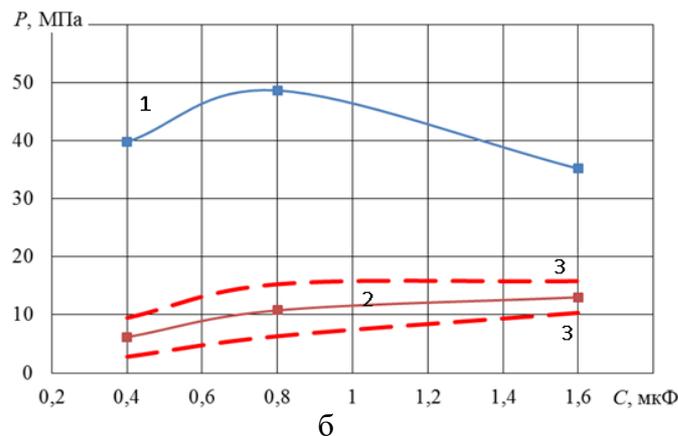
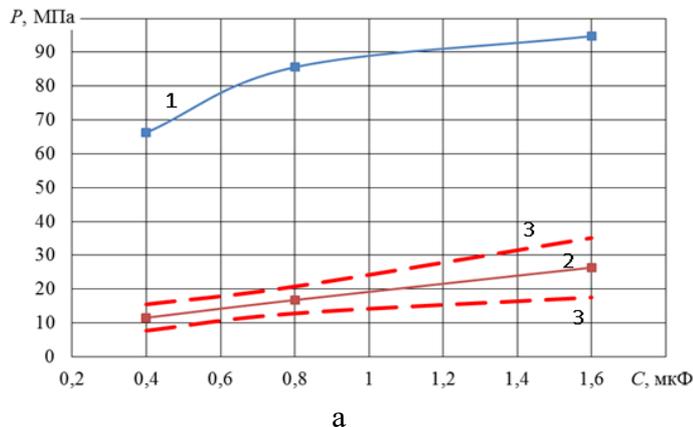


$C=0,8$  мкФ  
 $V=940$  мм<sup>3</sup>  
 $W_1=1000$  Дж  
 $n \geq 1000$   
 $di/dt=24$  ГВ/с



$$P_m(x, y) = P_m(x) \cdot \left[ \frac{3,2}{\pi} \left| \arctg \left( \frac{y}{x} \right) \right| \cdot \left( \frac{\left| \arctg \left( \frac{y}{x} \right) \right|}{\pi} - 1 \right) + 1 \right] \cdot (9)$$

# Фізичне і математичне моделювання особливостей ВЕР обробки

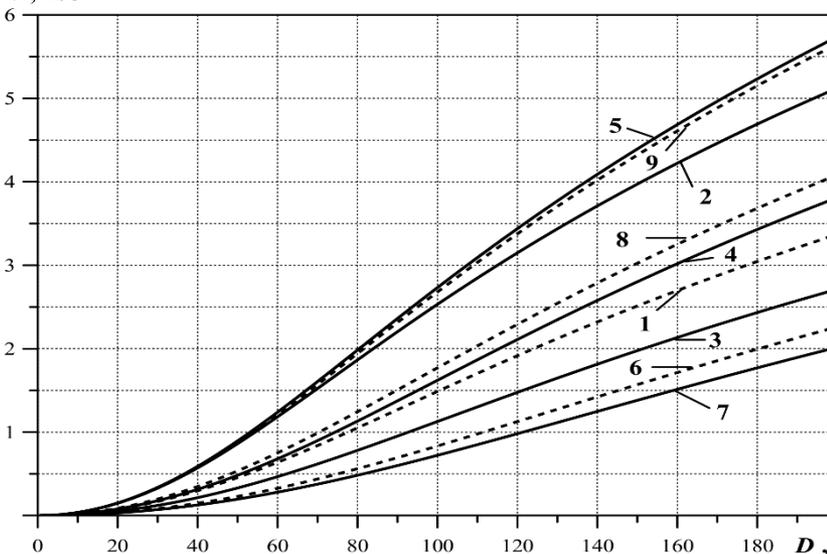


а – ВЕР у газі; б – ВЕР у газі з додаванням порошку Ті, співвідношення Т:Р 1/18

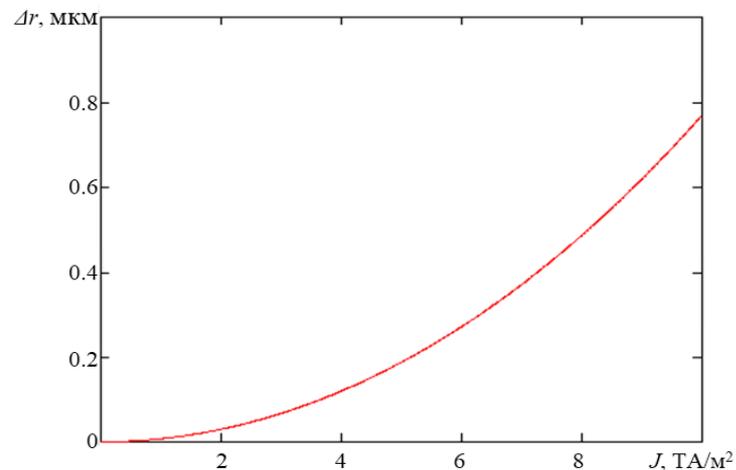
1 – розрахункова амплітуда хвилі стиснення; 2 – експериментально зареєстрована амплітуда хвилі стиснення; 3 – стандартне відхилення експериментальної вибірки

**Амплітуда тиску хвилі стиснення при ВЕР у газі та у газі з додаванням порошку Ті, досліджена за допомогою хвилеводного датчику тиску**

$v, \text{ м/с}$



1 – титан у воді;  
2 – залізо у воді;  
3 – алмаз у воді;  
4 – титан у газі;  
5 – залізо у газі;  
6 –  $\text{V}_4\text{C}$  у газі;  
7 – графіт у газі;  
8 –  $\text{TiC}$  у газі;  
9 –  $\text{Fe}_3\text{C}$  у газі  
**Залежності швидкості осідання частинок порошку від їх діаметру**

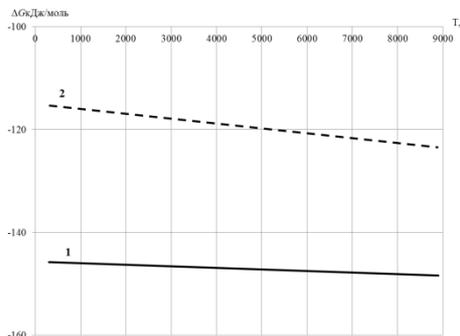


Залежність зміни радіусу частинки Fe початковим діаметром 25 мкм від густини розрядного струму

# Термодинамічний аналіз можливих хімічних реакцій в системі Fe-Ti-B-C

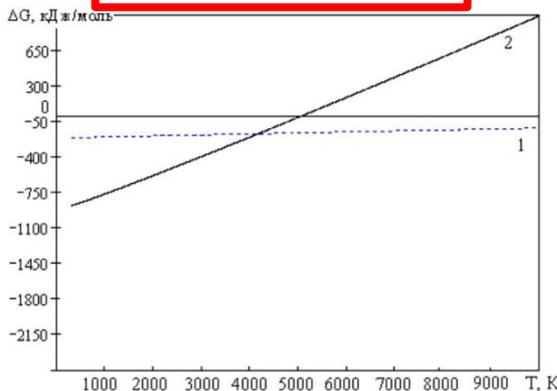
$$\Delta G^0_{x.p.} = \Delta H^0_{x.p.} - \Delta S^0_{x.p.} T - \Delta C^0_{p.x.p.} M_0 T.$$

де  $\Delta G^0_{x.p.}$  – прирощення енергії Гіббса хімічної реакції,  $\Delta H^0_{x.p.}$  – прирощення ентальпії системи в результаті хімічної реакції,  $\Delta S^0_{x.p.}$  та  $\Delta C^0_{p.x.p.}$  – відповідно збільшення ентропії і ізобарної теплоємності системи в результаті хімічної реакції,  $M_0$  – коефіцієнт Уліха, що враховує зміну теплоємності від температури.

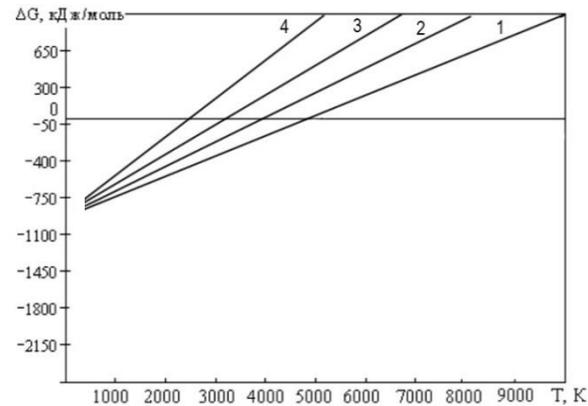


1 – (FeTi+C=TiC+Fe);  
2 – (Fe<sub>2</sub>Ti+C=TiC+2Fe)

$$\mu_i = \Delta G^0_i + RT \ln p_i$$

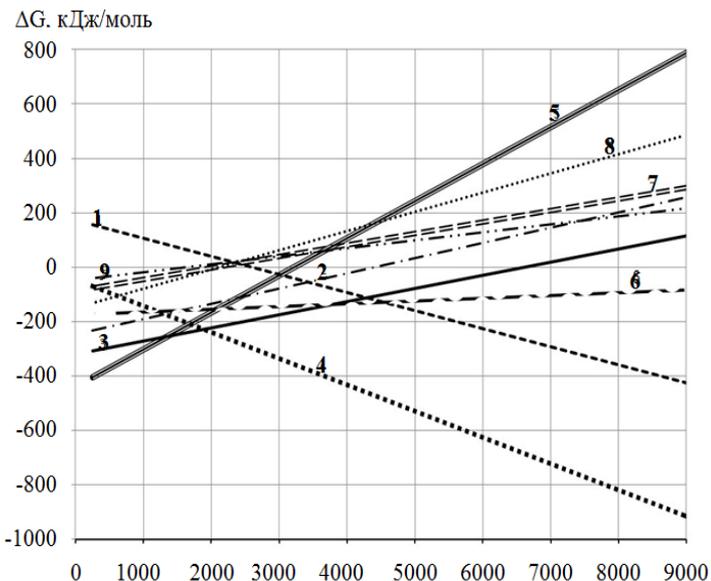


Залежність зміни енергії Гіббса від температури в ході реакції утворення TiC порошку титана з вуглецем в газовій та твердій фазі

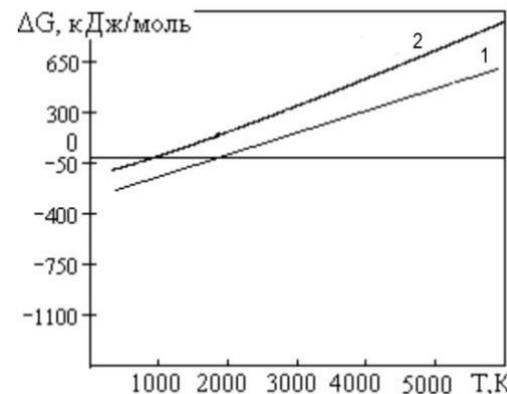


1–10<sup>5</sup>Па, 2–10Па, 3–10<sup>-2</sup>Па, 4–10<sup>-5</sup>Па

Залежності зміни енергії Гіббса від температури в ході реакції порошку титана з газоподібним вуглецем при зміні його парціального тиску



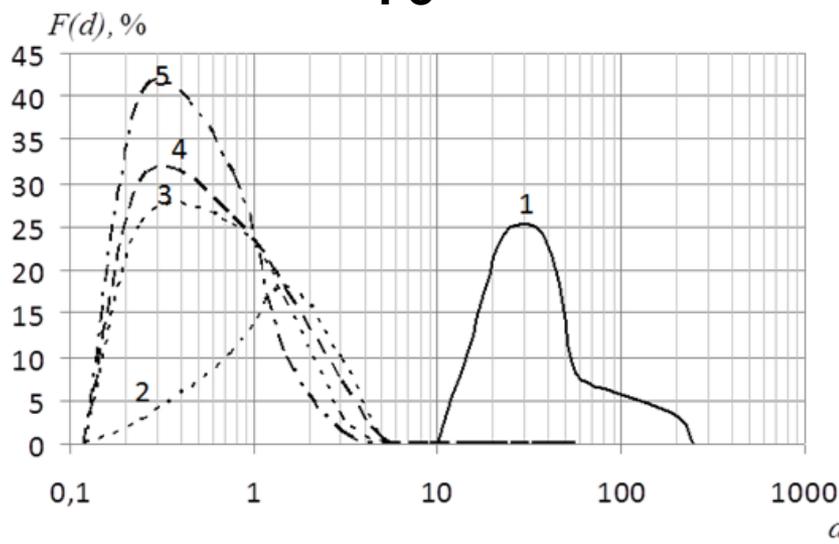
1 – (B<sub>4</sub>C=4B+C); 2 – (Ti+B=TiB);  
3 – (Ti+2B=TiB<sub>2</sub>); 4 – (4Fe+B<sub>4</sub>C=4FeB+C);  
5 – (8Fe+B<sub>4</sub>C=4Fe<sub>2</sub>B+C); 6 – (Ti+C=TiC);  
7 – (Fe+Ti=FeTi); 8 – (2Fe+Ti=Fe<sub>2</sub>Ti);  
9 – (Fe+C=Fe<sub>3</sub>C).



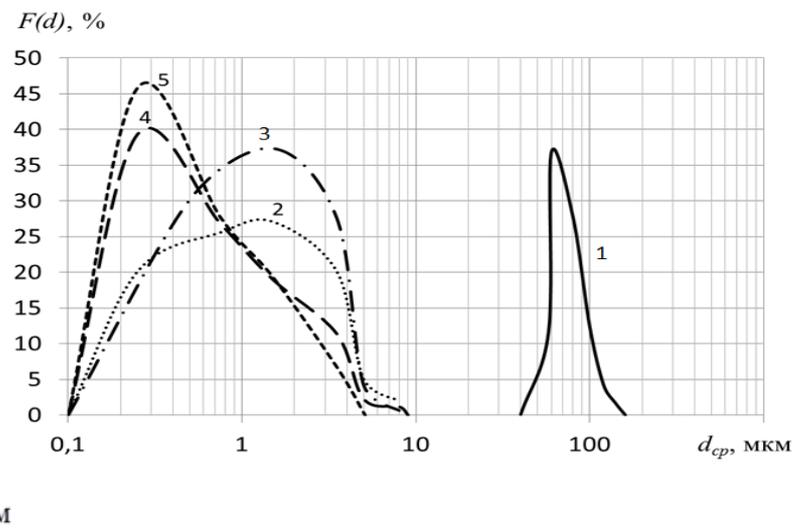
1–1/2Ti + H=1/2TiH<sub>2</sub>;  
2–Ti + H<sub>2</sub>=TiH<sub>2</sub>

# Вплив ВЕР на порошки Fe та Ti при $W_1 = 1$ кДж із змінною $W_{\text{пит}}$

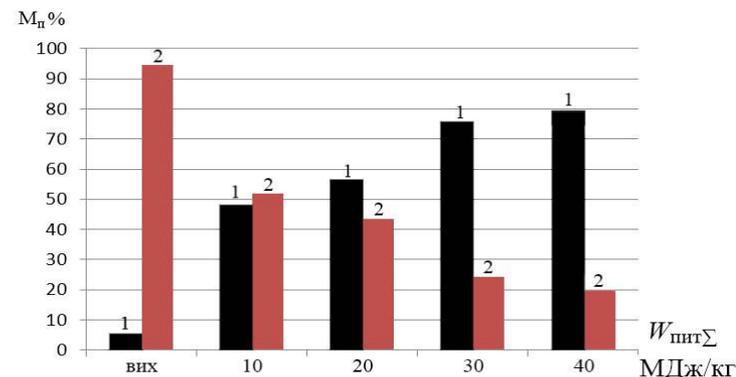
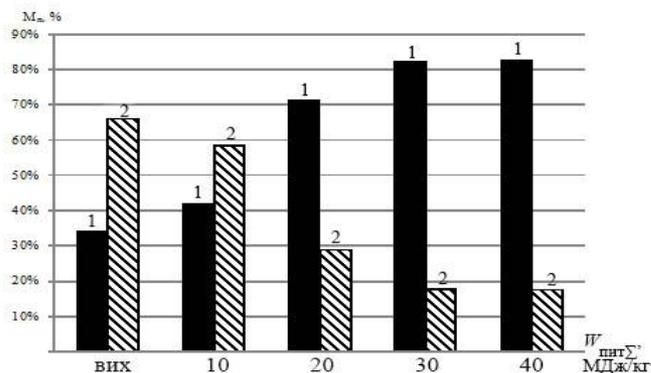
Fe



Ti



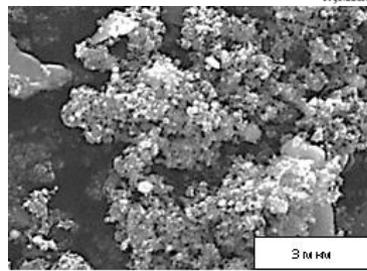
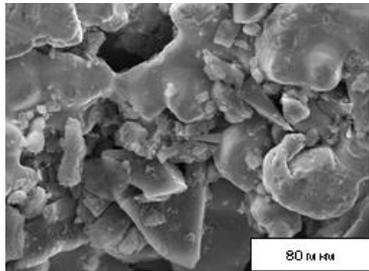
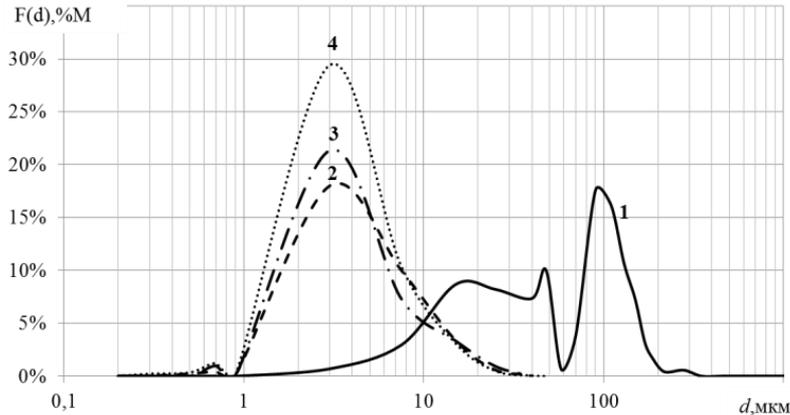
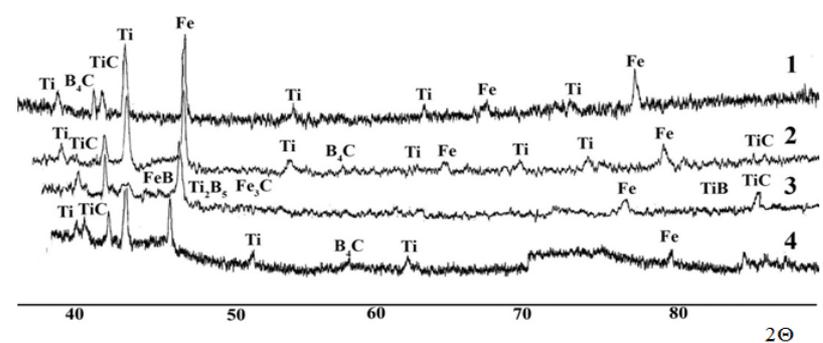
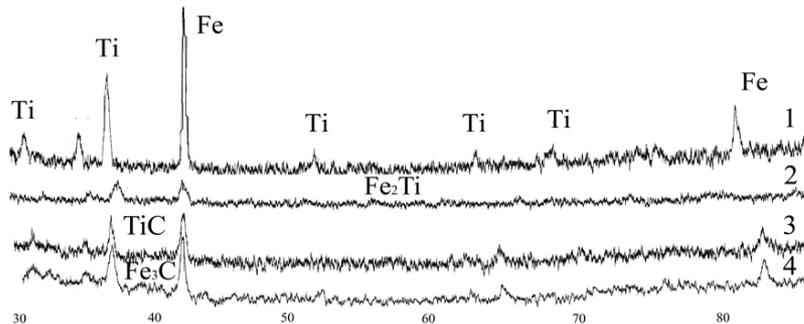
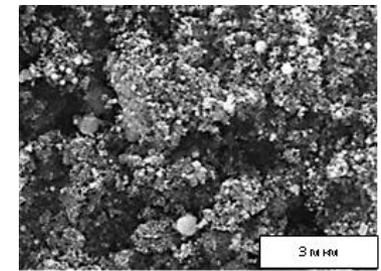
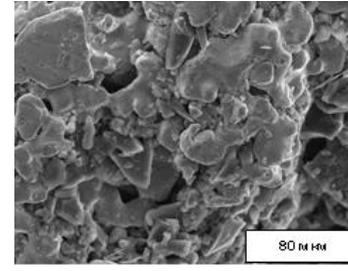
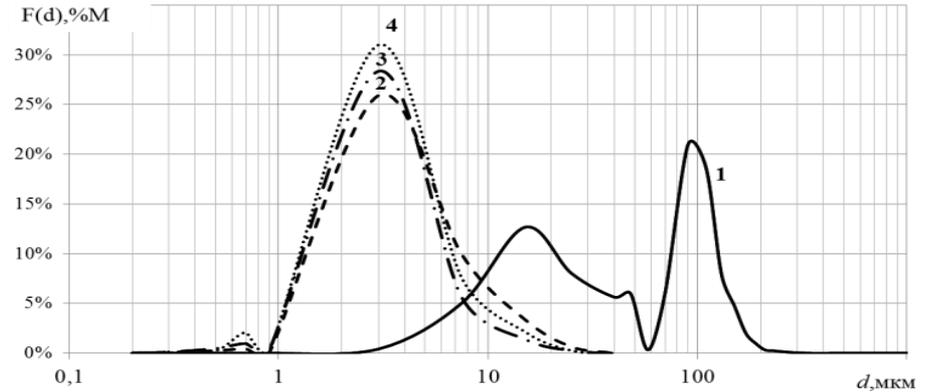
1-вихідний порошок, 2-10МДж/кг, 3 - 20МДж/кг, 4 - 30МДж/кг, 5 - 40МДж/кг



1 – частинки < 56 мкм, 2 – частинки > 56 мкм

# Експериментальні дослідження впливу ВЕР на суміші порошоків Fe, Ti та B<sub>4</sub>C

75%Fe-25%Ti

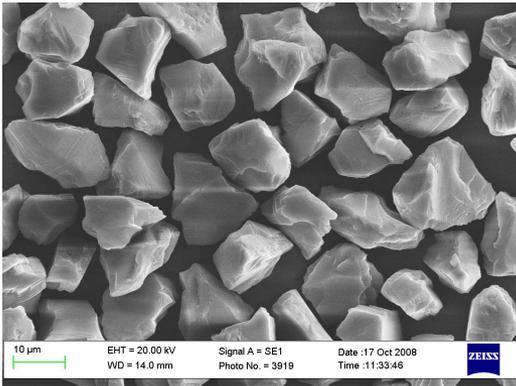
75%Fe-20%Ti-5%B<sub>4</sub>C

2θ

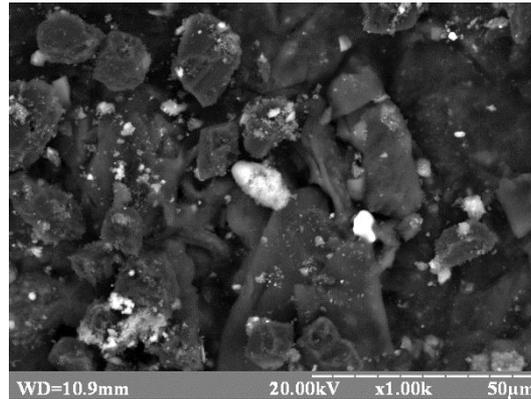
2θ

1 – вихідна суміш; 2 –  $di/dt=13$  ГА/с ( $j_k=0,6$  кА/мм<sup>2</sup>); 3 –  $di/dt=19$  ГА/с ( $j_k=0,8$  кА/мм<sup>2</sup>); 4 –  $di/dt=24$  ГА/с ( $j_k=0,4$  кА/мм<sup>2</sup>)

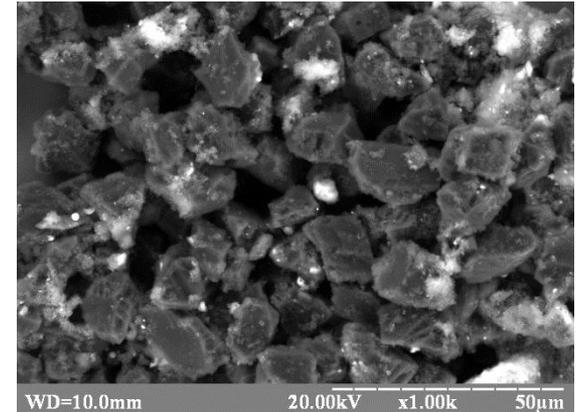
## на мікропорошки алмазу



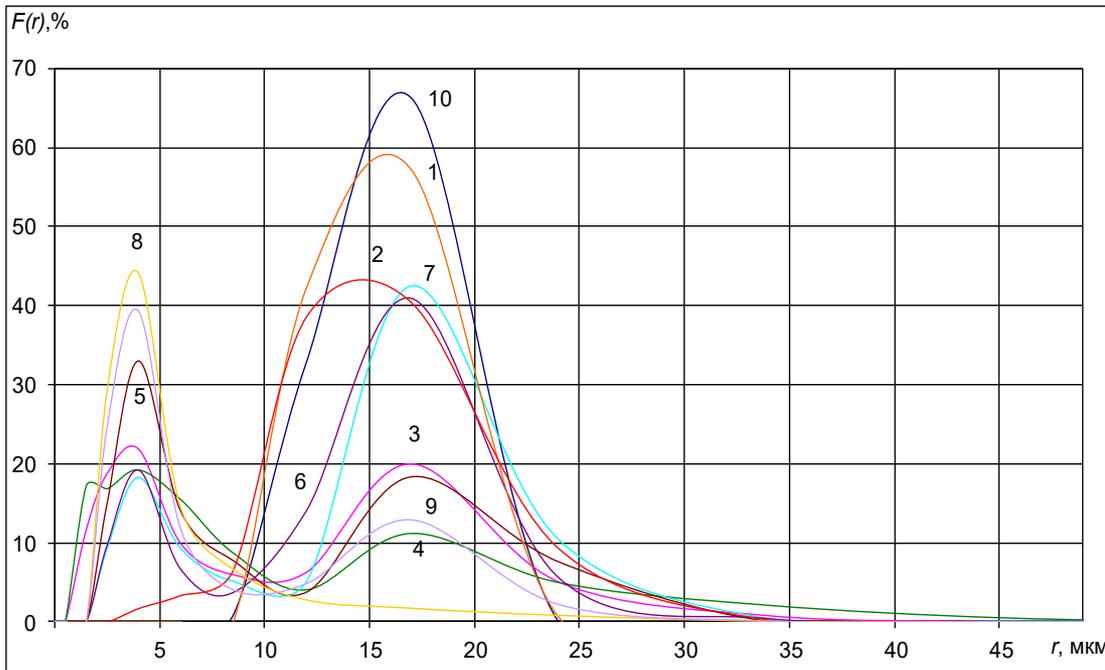
вихідний мікропорошок ACM 20/14



АСМ 20/14 після ВЕР-обробки із  $W_{\text{пит}} = 10$  МДж/кг



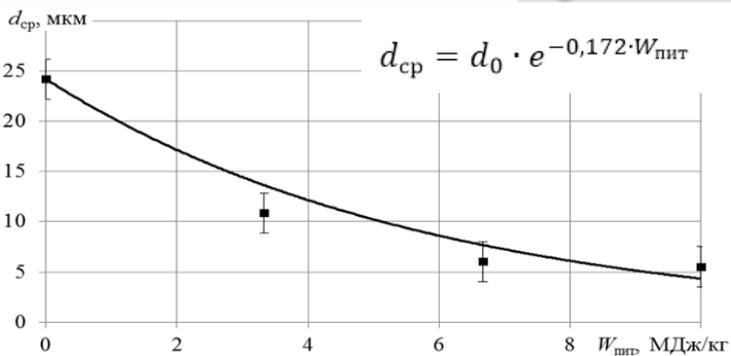
АСМ 20/14 після ВЕР-обробки із  $W_{\text{пит}} = 20$  МДж/кг



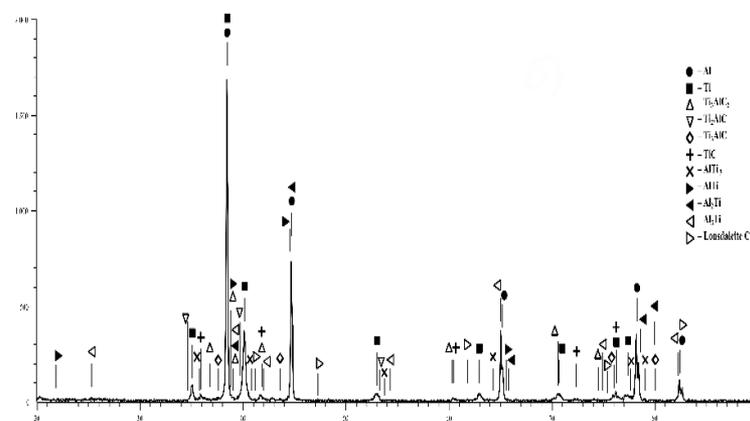
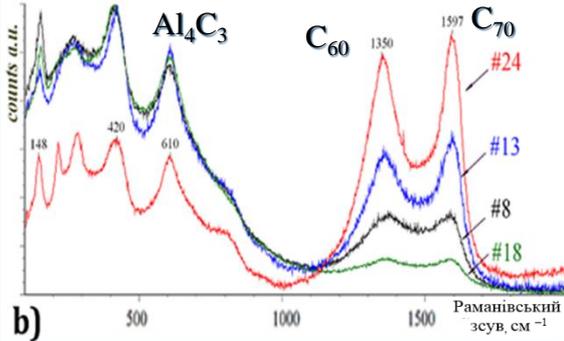
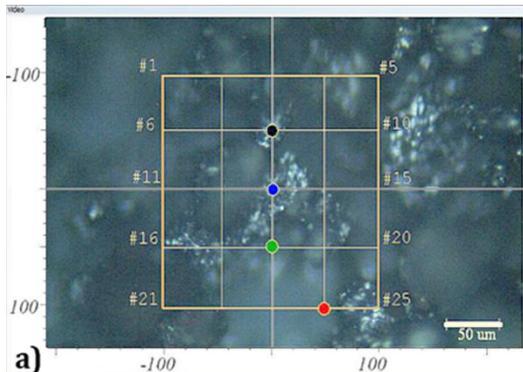
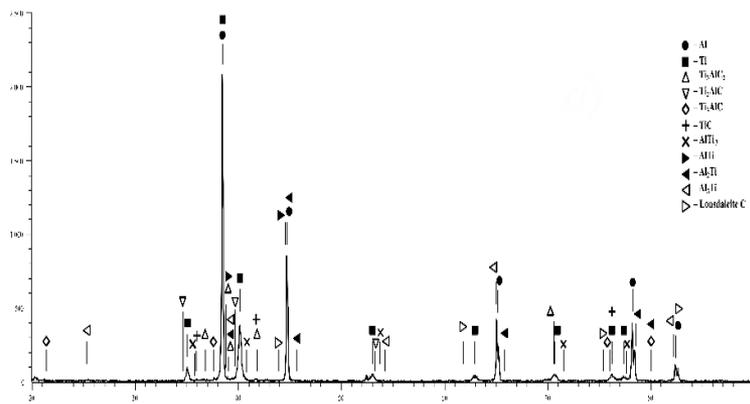
Розподіл частинок мікропорошку АСМ 20/14 за розмірами:

- 1 – після ВЕР-обробки у воді із  $W_1=2$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 10$  МДж/кг;
- 2 – після ВЕР-обробки у розчині поверхнево-активної рідини (ПАР) із  $W_1=2$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 10$  МДж/кг;
- 3 – після ВЕР-обробки у воді із  $W_1=0,5$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 10$  МДж/кг;
- 4 – після ВЕР-обробки у воді із  $W_1=1$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 10$  МДж/кг;
- 5 – після ВЕР-обробки у розчині ПАР із  $W_1=1$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 10$  МДж/кг;
- 6 – після ВЕР-обробки у воді із  $W_1=0,5$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 5$  МДж/кг;
- 7 – після ВЕР-обробки у розчині ПАР із  $W_1=0,5$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 5$  МДж/кг;
- 8 – після ВЕР-обробки у воді із  $W_1=1$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 20$  МДж/кг;
- 9 – після ВЕР-обробки у розчині ПАР із  $W_1=1$  кДж,  $W_{\text{пит}} = 20$  МДж/кг;
- 10 – вихідний порошок

## сумішей порошків системи Al-Ti



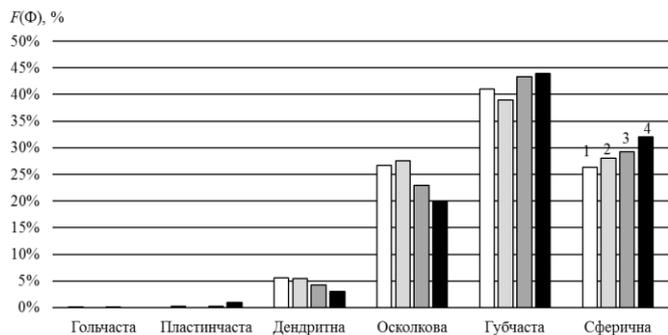
Залежність зміни середнього діаметру частинок суміші порошків складу 50 % Al + 50 % Ti від питомої енергії ВЕР-обробки



а) – точки зняття спектрів на поверхні порошку; б) – Раманівські спектри, отримані у вказаних точках

Раманівська спектроскопія частинок суміші порошків початкового складу 50 % Ti + 50 % Al після ВЕР-обробки

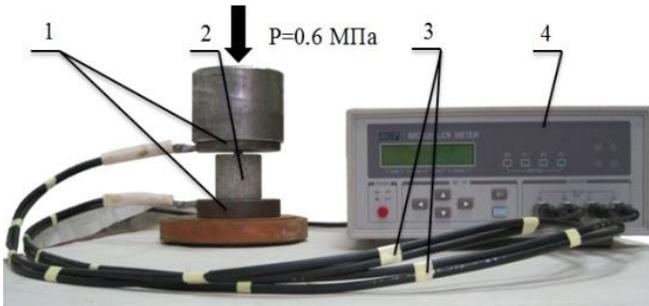
а) –  $W_{пит}=3,33$  МДж/кг; б) –  $W_{пит}=6,67$  МДж/кг  
Рентгенограми суміші 50 % Ti + 50 % Al після ВЕР-обробки



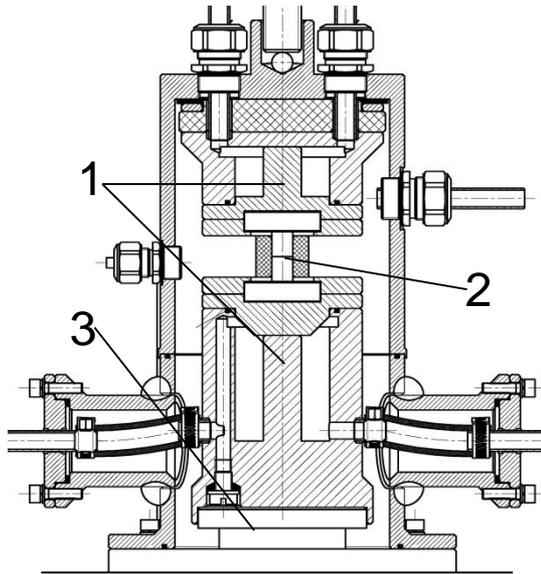
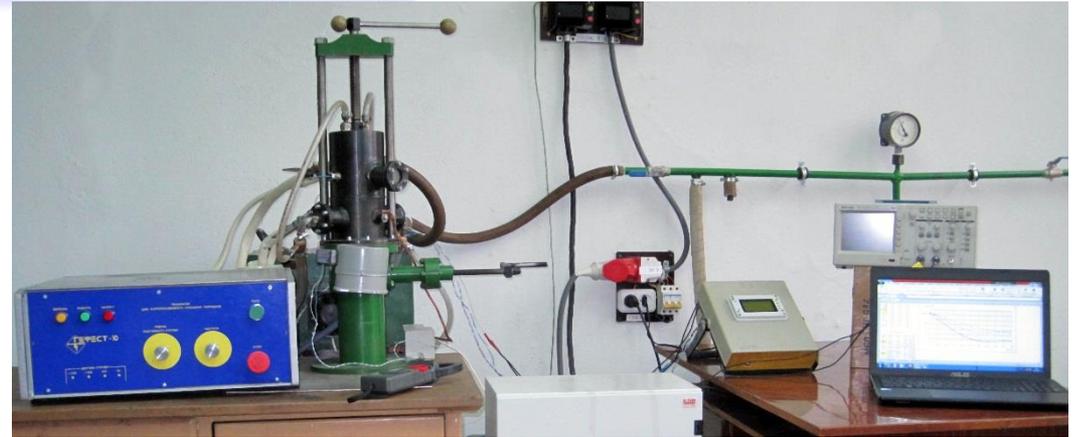
Розподіл частинок суміші 50 % Al + 50 % Ti за фактором форми :  
 1 – вихідна суміш; 2 – після ВЕР обробки із  $W_{пит}=3,33$  МДж/кг;  
 3 – після ВЕР обробки в режимі із  $W_{пит}=6,67$  МДж/кг;  
 4 – після ВЕР обробки в режимі із  $W_{пит}=10$  МДж/кг

# Опір шихти та параметри консолідації на установці

## «ГЕФЕСТ-10»

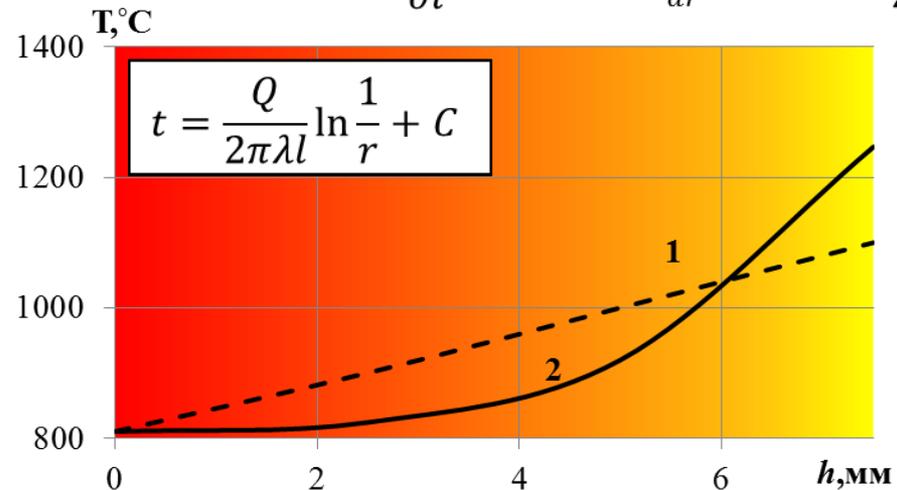


1 – пуансон-контакти; 2 – діелектрична комірка; 3 – комутаційні кабелі; 4 – прилад МСР «BR2820» LCR METER



1- радіатор-струмоводи;  
2 – матриця; 3 – поршень пресу.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad \text{grad } t = l_0 \frac{\partial t}{\partial l}; \quad q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr}; \quad dt = -\frac{Q}{2\pi\lambda l} \cdot \frac{dr}{r}$$

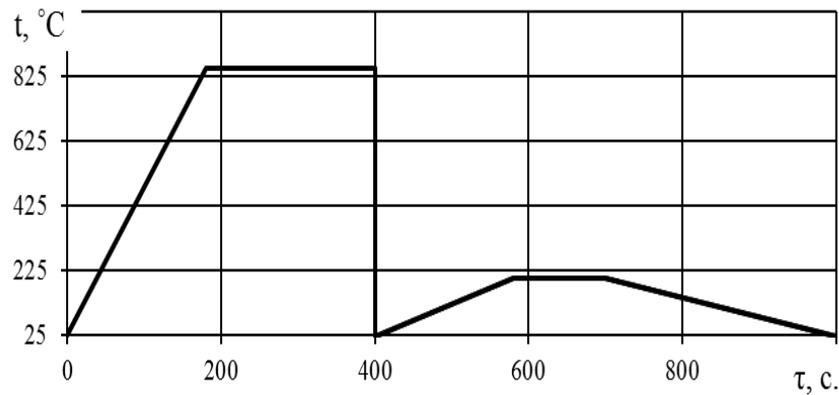


Тиск	Р, МПа	Температура Т, °С	Час витримки τ, с	dT/dτ, С/с
від 50 до 60		від 800 до 820	120	1,65

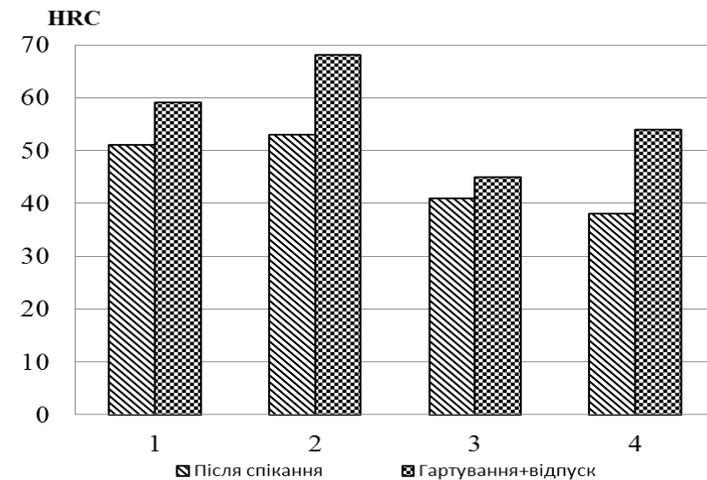
## Консолідовані зразки та їх властивості

№ з/п.	Склад матеріалу	Параметри ВЕР			Властивості матеріалу		
		$j_k$	$W_{\text{питΣ}}$	$di/dt$	$\rho_{\text{зр}}$	$\rho_{\text{теор.}}$	П
		кА/мм <sup>2</sup>	МДж/кг	ГА/с	г/см <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	%
1	Fe-Ti-B-C	0,6	25	14	6,68	6,96	4,0%
2	Fe-Ti-B-C	0,8	25	16	6,89	6,96	1,0%
3	Fe-Ti-C	0,65	25	11	6,95	7,08	1,8%
4	Fe-Ti-C	0,75	25	13	7	7,08	1,1%

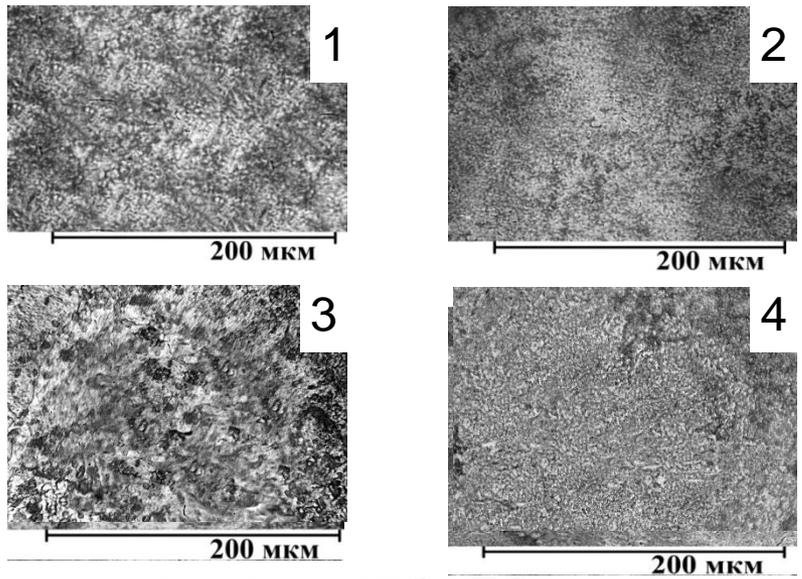
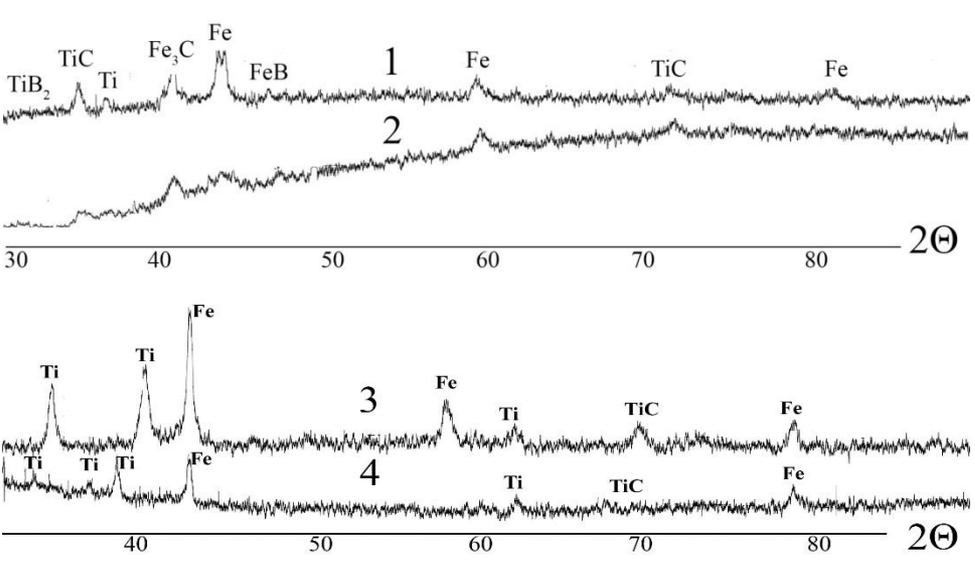
### Схема ТО отриманих зразків



### Твердість отриманих зразків

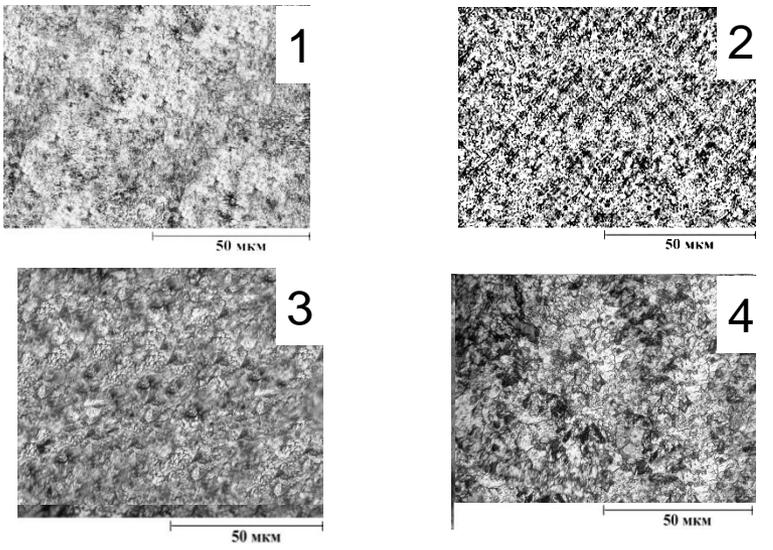
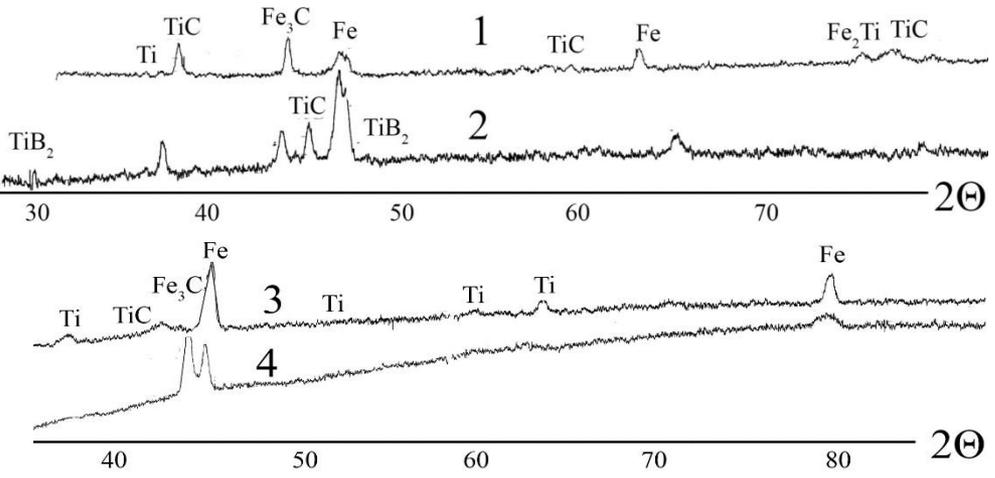


## Структури та фазовий склад зразків після ІПС



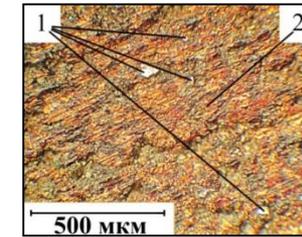
## Структури та фазовий склад зразків після ІПС+ТО

*Hv* (після гартування зразки №1,2): світло-сіра фаза – 16,48 ГПа; темно-сіра – 9,27 ГПа (мартенсит)  
*Hv* (після гартування зразки №3,4): світло-сіра фаза – 12,83 ГПа; темно-сіра – 2,86 ГПа

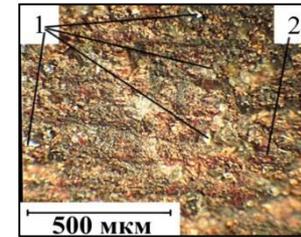


# Міцність та зносостійкість отриманих матеріалів

№ з/п.	Склад матеріалу	Параметри ВЕР		
		$j_k$	$W_{\text{пит}\Sigma}$	$di/dt$
		кА/мм <sup>2</sup>	МДж/кг	ГА/с
1	Fe-Ti-B-C	0,6	25	14
2	Fe-Ti-B-C	0,8	25	16
3	Fe-Ti-C	0,65	25	11
4	Fe-Ti-C	0,75	25	13

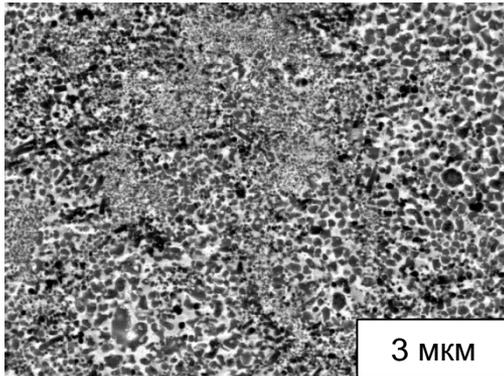


Круг АС63/80 До випробувань

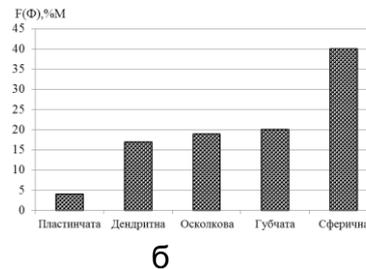
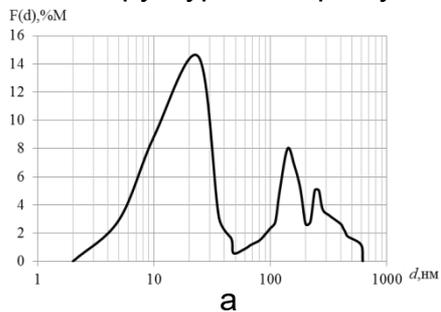
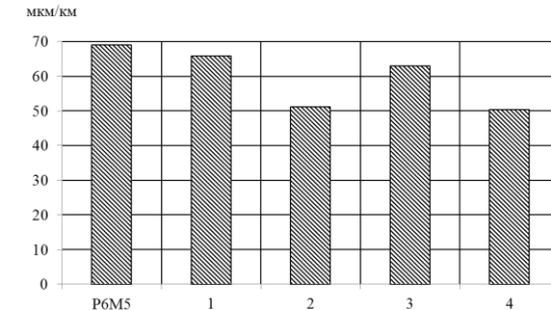
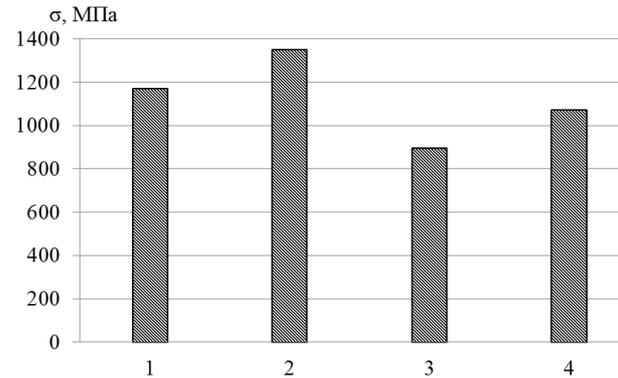


Круг АС63/80 Після випробувань

1 – частинки алмазу; 2 – органічне зв'язуюче



Структура матеріалу Fe-Ti-B-C



Морфологія зміцнюючих фаз в матеріалі Fe-Ti-B-C, а – розподіл за розміром, б – за фактором форми

Додавання вихідного порошку мікроалмазу АСМ 40/28 до шихти системи Fe-Ti-C приводить до зростання твердості на 17,5 %, а також до зменшення втрати маси при абразивному зношуванні майже в 2 рази – з 38 до 19 мг/км. Додавання порошку порошку мікроалмазу АСМ 40/28 після ВЕР обробки до шихти системи Fe-Ti-C приводить до зростання твердості на 35 % – з 40 до 54 HRC, а втрата ваги при абразивному зношуванні при цьому зменшується в 2 рази – з 38 до 18,5 мг.

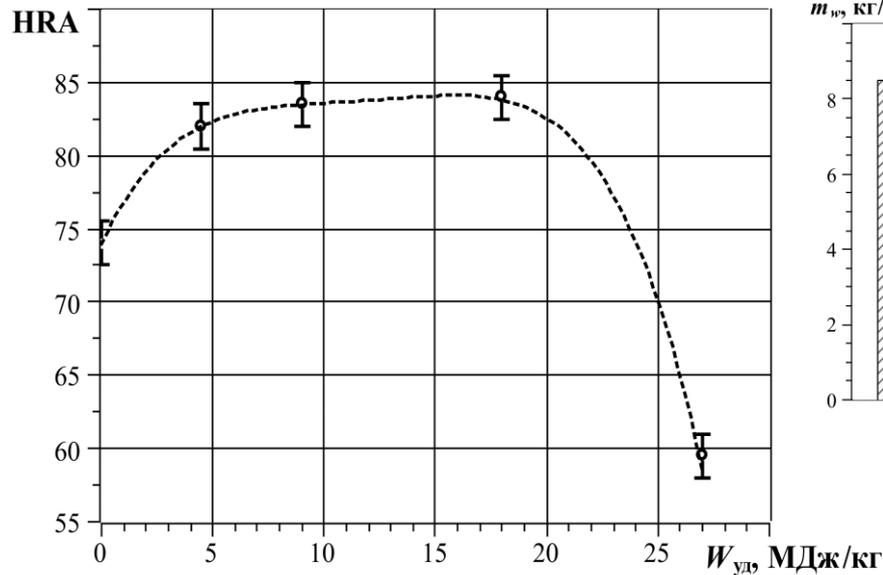
Подальше збільшення рівня властивостей отриманих зразків карбідосталей можливе за рахунок дослідження оптимального режиму ІПС.

Оптимальним режимом консолідації ММК системи Fe – Ti – C є встановлення швидкості нагрівання у 10 ° C/с, так як збільшення цього параметру призводить до зниження твердості отриманого матеріалу.

Оптимальний режим консолідації зразків системи Fe – Ti – C – (В) – швидкість нагрівання у 20 ° C/с та час ізотермічної витримки у 180 с. Це дозволяє створити карбідосталі із твердістю у 70 HRC, зносостійкість яких у 7 раз перевищує показники швидкорізальної сталі Р6М5.

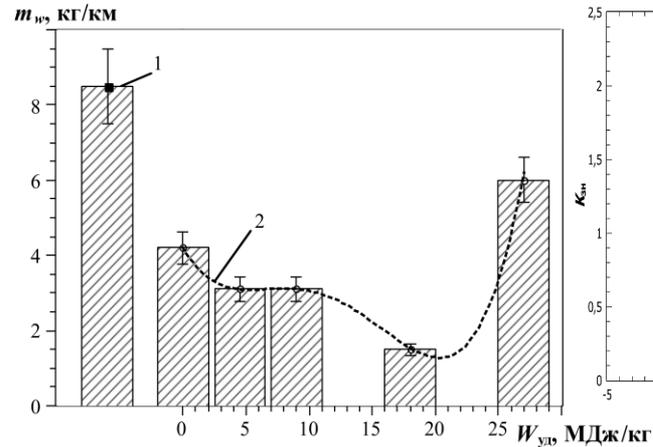
# Властивості отриманих безвольфрамових твердих сплавів

Твердість спечених зразків твердих сплавів в залежності від питомої енергії обробки шихти



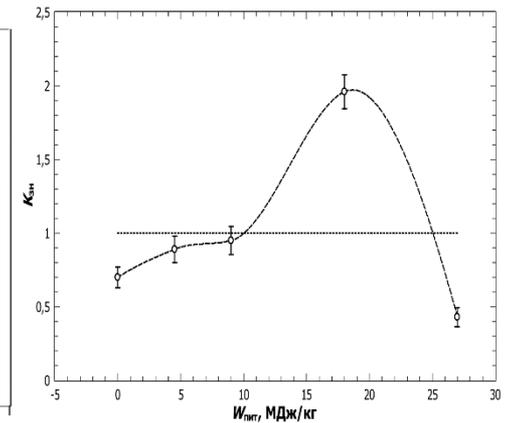
У відповідності до стандарту «ГОСТ 17359–82. Порошкова металургія. Термины и определения» **порошковий твердий сплав** – матеріал на основі металоподібних твердих сполук з металевою зв'язкою, що має твердість вищу, ніж **80 HRA**.

Втрата маси зразків при абразивному зносі



**1** – зразки ТС марки ВК8;  
**2** – зразки, що спечені з отриманої шихти.

Відносна зносостійкість



Всі одержані матеріали мають невелику щільність ( $\sim 4,8$  г/см<sup>3</sup>) порівняно із традиційними ТС за «ГОСТ 3882–74. Сплавы твердые спеченные. Марки» (ISO 513–75) вольфрамової (от 13,4 до 15,3 г/см<sup>3</sup>), титановольфрамової (от 9,5 до 13,1 г/см<sup>3</sup>) та титанотанталовольфрамової (от 12,0 до 13,8 г/см<sup>3</sup>) груп.



## Властивості матеріалів та схеми їх отримання

Склад карбідосталей	Метод консолідації	Твердість, HRC	Міцність на вигин, МПа
70X17H2-30Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Спінання в печі	40-45	600-960
70X17H2-30Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	ГШ	56-67	800-1400
Fe-Ti-B-C (ВЕР)	ІПС	60-68	1100-1350
Fe-Ti-B-C (ВЕР)	Спінання в печі	48-54	650-900
75Fe-20Ti-5B <sub>4</sub> C (шихта отримана реакційним спіканням)	ГШ	62-68	1050-1300



Матриці для виготовлення ріжучого інструменту



Пластини виготовлені з шихти системи Fe – Ti – C

75% Fe+20% Ti+5% B<sub>4</sub>C



ВЕР ( $W_{num\Sigma}=25$  МДж/кг,  
 $di/dt \geq 16$  ГА/с



Центрифугування + сушка (70°C)



Формування+ІПС



ТО (Гартування+відпуск)



Шліфування виробу



75% Fe+25% Ti



ВЕР ( $W_{num\Sigma}=25$  МДж/кг,  
 $di/dt \geq 13$  ГА/с



Центрифугування + сушка (70°C)



Формування+ІПС



ТО (Гартування+відпуск)



Шліфування виробу



# Економічна ефективність запропонованого методу

Запропонований матеріал	Вартість 1 деталі з ПДВ, грн	Існуючий аналог	Вартість 1 деталі з ПДВ, грн	Економічний ефект
Карбідосталь початкового складу 75 % Fe + 25 % Ti	32,47	Різець автоматний 4x18x120 (2131-4207) P6M5 цільний (заточений), виробник ТОВ «Інструмент-Сервіс»	69,60	37,13 грн/од (53 %)
Твердий сплав початкового складу 80 % Ti + 20 % Fe	36,41	Пластина твердосплавна 01111-160412 ВOK60, виробник ТОВ «Інструмент-Сервіс»	50,40	13,99 грн/од (28 %)
Алюмоматричний композит початкового складу 85 % Ti + 15 % Al	114	Вставка ельборова 8x18 м. (кут 45 ° x 45 °), виробник ТОВ «Інструмент-Сервіс» [73]	37,09	76,91 грн/од (67,5 %)

