

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Кравченко Володимир Петрович**

УДК 622.742(043.3)

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОГО ПОДРІБНЕННЯ  
ПРИ ПЕРЕРОБЦІ І ЗБАГАЧЕННІ ДОМЕННИХ ШЛАКІВ**

Спеціальність 05.15.08 - Збагачення корисних копалин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі збагачення корисних копалини у Національному гірничому університеті (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Горобець Лариса Жанівна,**  
ДВНЗ «Національний гірничий університет»  
Міністерства освіти і науки України  
(м. Дніпропетровськ), професор  
кафедри збагачення корисних копалин.

**Офіційні опоненти** – доктор технічних наук, професор  
**Надутьий Володимир Петрович,**  
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН  
України, завідувач відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини (м. Дніпропетровськ);

– кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Ніколаєнко Костянтин Вікторович,**  
Криворізький національний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
доцент кафедри збагачення корисних копалин.

Захист відбудеться " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2014 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.02 із захисту дисертацій при ДВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, проспект К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, проспект К. Маркса, 19.

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 08.080.02, к.т.н., доцент

В. В. Панченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Досвід світової і вітчизняної практики показує, що доменні шлаки, які є відходами металургійного виробництва (у відвалах накопичено понад 2 млрд. т), частково використовуються при виробництві шлакопортландцементів (ШПЦ). При цьому використовуються енергоємні технології, які негативно впливають на екологію навколишнього середовища і тому не знайшли широкого застосування. Крім того, сучасні технології переробки не розкривають потенційних можливостей доменних шлаків, як активних (в'язучих) матеріалів. Більш повне використання їх в якості в'язучих матеріалів ускладнювалось відсутністю досліджень впливу тонкодисперсного подрібнення на механізм і кінетику формування гранулометричного складу шлаку з максимальним показником поверхневої активності, що обумовлює актуальність теми дисертаційної роботи.

У зв'язку з цим в дисертаційній роботі вирішувалась **наукова задача**, яка полягає у встановленні залежності показника поверхневої активності від гранулометричних характеристик доменного шлаку і на цій основі розробити способи отримання заданого гранулометричного складу матеріалів шляхом тонкодисперсного струминного подрібнення шлаку в технологічних схемах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідними роботами Державного ВНЗ «Національний гірничий університет». Базовою для підготовки дисертаційної роботи, в якій автор приймав участь, як виконавець, була НДР «Технологічне рішення отримання мінеральних продуктів підвищеної чистоти з родовищ України» (ДП-453, ДР № 0112U000872).

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування параметрів тонкодисперсного подрібнення доменних шлаків на основі визначення залежності показника поверхневої активності від гранулометричних характеристик для отримання продукту з високою поверхневою активністю.

Для досягнення мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- 1) виконати аналіз відомих методів і обґрунтувати спосіб подрібнення доменних шлаків з отриманням тонкодисперсних фракцій;
- 2) зробити прогнозну оцінку подрібнюваності шлаку і клінкеру струминним способом шляхом визначення швидкісних характеристик частинок на розгінній ділянці подрібнювача;
- 3) встановити залежність між режимними параметрами роботи струминного подрібнювача і гранулометричними характеристиками подрібненого продукту;
- 4) визначити залежність показника поверхневої активності від гранулометричних характеристик подрібнених фракцій доменного шлаку;
- 5) встановити гранулометричний склад доменного шлаку, при якому в умовах струминного подрібнення досягаються максимальні показники поверхневої активності;
- 6) розробити технологічні схеми отримання активних матеріалів струминним подрібненням доменних шлаків.

**Ідея роботи** полягає у формуванні гранулометричного складу подрібненого доменного шлаку, при якому показник поверхневої активності частинок досягає найбільшого значення.

**Об'єктом дослідження** є процес подрібнення доменних шлаків.

**Предмет дослідження** – процес формування струминним подрібненням гранулометричного складу доменних шлаків з високим показником поверхневої активності.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач були використані такі методи: наукове узагальнення і систематизацію – для визначення сучасного рівня і шляхів механоактивації доменних шлаків; аналітичний – для визначення швидкостей частинок в потоці газосуспензії на розгінній ділянці струминного подрібнювача; експериментальний – для дослідження механізму формування гранулометричного складу і виміру розподілів класів крупності в початковому і подрібненому доменному шлаку, встановлення характеристик активності; математичну статистику – для обробки результатів експериментів; лабораторну і дослідницько-промислово апробацію – для перевірки розроблених технологічних рішень і визначення їх ефективності.

**Наукова новизна отриманих результатів**

**Наукові положення, які захищаються в роботі:**

1) показник активності, оцінюваний міцністю тонкодисперсних фракцій доменного шлаку, отриманих струминним подрібненням, знаходиться у регресійній залежності від середнього діаметра і питомої поверхні частинок фракцій, що дозволяє формувати необхідний гранулометричний склад продукту;

2) потенційно обумовлений хімічним складом доменного шлаку показник поверхневої активності величиною 30 МПа досягається струминним подрібненням до вмісту 90% фракції крупністю менше 20 мкм, а додатковим струминним подрібненням (активацією) шлаку до вмісту 90% фракції крупністю 6 – 12 мкм показник поверхневої активності підвищується до 40 МПа, що дозволяє використовувати його в якості самостійного в'язучого матеріалу.

**Наукова новизна роботи.**

1. Вперше встановлено, що за рівних технологічних умов на кінці розгінної трубки швидкість частинок шлаку на 11% вища ніж швидкість частинок клінкеру. Це дозволяє очікувати більш високий ефекту струминного подрібнення доменного шлаку відносно клінкеру.

2. Вперше встановлено лінійну регресійну залежність питомої поверхні частинок подрібнених доменних шлаків від режимного параметру роботи струминного подрібнювача (частоти обертання ротора класифікатора), що дозволяє прогнозувати питому поверхню подрібненого продукту.

3. Визначено лінійну регресійну залежність питомої поверхні від середнього діаметра частинок доменного шлаку, яка враховує крупність та форму частинок шлаку, що дозволяє прогнозувати невідомий показник дисперсноподрібненого продукту.

4. Вперше встановлено зв'язок між показником поверхневої активності та дисперсністю доменних шлаків, що дозволяє прогнозувати величину показника активності подрібненого шлаку.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю поставлених задач, застосуванням аналітичних методів їх рішення, задовільним збігом результатів теоретичних та експериментальних досліджень (відносна похибка менше 10%), а також даними практичного використання розроблених рекомендацій.

**Практичне значення роботи** полягає:

1) у визначенні числових значень параметрів роботи струминного подрібнювача (тиск енергоносія  $P = 0,4$  МПа, частота обертання ротора класифікатора  $n = 2500$  хв<sup>-1</sup>, початкова крупність шлаку – 3 мм) для отримання гранскладу із вмістом більше 90% частинок крупністю менше 20 мкм;

2) у розробці технологічної схеми селективної активації доменних шлаків для отримання заданої гранулометричної характеристики, що забезпечує отримання очікуваного показника поверхневої активності частинок і у зниженні на 46 % об'єму додаткового подрібнення;

3) у розробці на рівні винаходів (патенти України №№ 18575, 68838, 36035, 36034, 35336) технологічних способів отримання високоактивних матеріалів шляхом струминного подрібнення доменних шлаків.

**Впровадження результатів роботи.** Промислове впровадження технології підвищення показника поверхневої активності тонкодисперсним подрібненням доменних шлаків здійснене в будівельній фірмі "Ера плюс" в 2009 р. (м. Маріуполь). Фактичний економічний ефект при цьому склав 153 тис. грн.

**Особистий внесок автора.** Дисертаційна робота є самостійним, завершеним дослідженням автора, який зібрав статистичний матеріал, виконав його обробку, аналіз і наукове узагальнення, сформулював мету, ідею і задачі дослідження; обґрунтував методи дослідження і вирішив поставлені в роботі задачі дослідження; розробив нові технологічні схеми і лінії підвищення активності доменних шлаків струминним подрібненням. Участь автора в роботах, опублікованих в співавторстві, зазначена в списку праць за темою дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення дисертації доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях: "Застосування дисперсних і ультра- (нано-) дисперсних порошкових систем в промислових технологіях" (м. Санкт-Петербург, 2008 р.); "Теорія і практика процесів подрібнення, розподілу, змішування і ущільнення матеріалів" (м. Одеса, 2008 р.); "Динаміка та міцність машин, будівель, споруд" (м. Полтава, 2009 р.); XIII міжнародна науково-практична конференція із збагачення корисних копалин (м. Бердянськ, 2010 р.); «Форум гірників» (м. Дніпропетровськ 2011, 2012, 2013 р.р.).

**Публікації.** Основні положення виконаних досліджень опубліковані в 24 наукових роботах, у тому числі: 7 – у фахових виданнях, 8 статей в наукових журналах і збірниках, 5 патентів, 4 – матеріали конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів з висновками до кожного розділу і загальних висновків, списку літератури із 141 найменування, 4 додатків. Загальний обсяг дисертації - 210 сторінок, у тому числі 126 сторінок основного тексту, 59 рисунків і 54 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, викладено мету роботи, задачі, об'єкт і предмет досліджень, відображено наукову новизну отриманих результатів і особистий внесок здобувача; подано відомості про апробацію і публікацію основних результатів досліджень.

У розділі 1 згідно з першою задачею дослідження проведено аналіз розвитку уявлень про фізичну суть подрібнення твердої речовини. Проблеми подрібнення і теоретичні аспекти цього процесу відображено в роботах С.Є. Андреева, В.В. Товарова, І.Д. Хинта, Є.Г. Аввакумова, Л.Ж. Горобець та ін. В результаті проведеного аналізу виділено ряд чинників, що позитивно впливають на активність подрібненої речовини. Обґрунтована можливість підвищення показника поверхневої активності доменних шлаків шляхом тонкодисперсного подрібнення у струминному млині. За результатами аналізу сформульовані задачі дослідження.

У розділі 2 відповідно до другої задачі дослідження виконано прогнозну оцінку ефекту подрібнення струминним способом шлаку і клінкера шляхом встановлення швидкісних характеристик частинок на розгінній ділянці подрібнювача. Було використано розроблену в Приазовському державному технічному університеті (м. Маріуполь) програму числового рішення диференціальних рівнянь, які описують математичну модель течії газосуспензії в циліндричному каналі. Програма була адаптована для умов струминного подрібнення.

Початкові дані для розрахунку: діаметр розгінної трубки – 22 мм; довжина розгінної трубки – 150 мм; діаметр частинок, мм – 1,0; 0,5; 0,1; 0,05; 0,02; пилове завантаження (концентрація),  $\mu = (0,4; 0,3)$  кг/кг у повітряному середовищі енергоносія; температура – 20°C; щільність частинок: шлака – 2700 кг/м<sup>3</sup>, клінкера – 3500 кг/м<sup>3</sup>. Продуктивність струминного млина –  $\leq 20$  кг/год. Результати розрахунків подано у вигляді графіків на рис. 1-3.

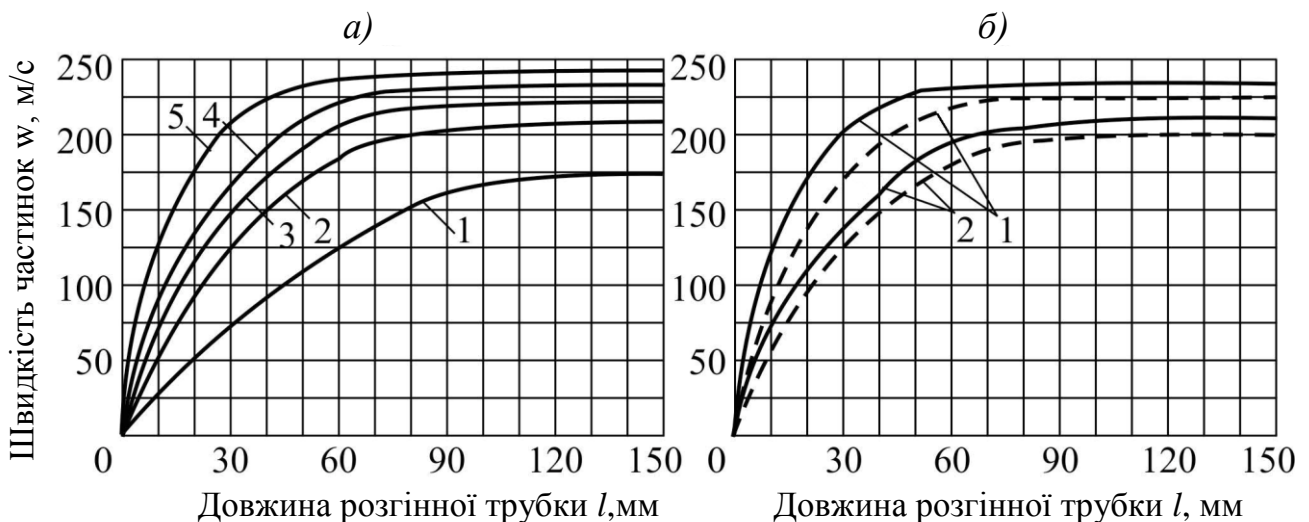


Рис. 1. Криві зміни швидкості частинок по довжині розгінної трубки: а) – доменний шлак при  $\mu = 0,4$ ,  $d$ , (мм): 1 – 1,0; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – 0,05; 5 – 0,02; б) – для  $d = 0,05$  мм, 1 – шлак, 2 – ПЦ клінкер; —  $\mu = 0,3$ ; - - -  $\mu = 0,4$

Відповідно до графіків (рис. 1) робимо висновок, що максимальні швидкості частинки шлаку і клінкера мають у кінці розгінної ділянки. При концентрації  $\mu = 0,3$  кг/кг швидкості частинок ( $d = 0,02$  мм) шлаку ( $W = 264$  м/с) перевищували швидкості таких самих частинок клінкера ( $W = 235$  м/с) на 12,3% (рис. 2).

Побудовані на рис. 3 криві свідчать, що подальше зниження пилового завантаження до  $\mu = 0,2$  недоцільно, оскільки в результаті може зменшитися продуктивність струминного апарату.

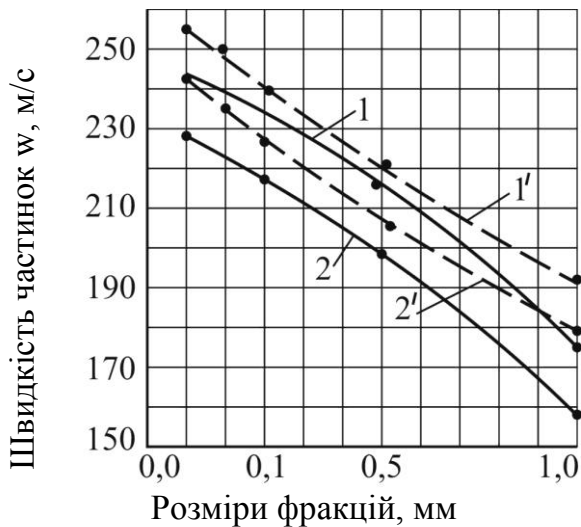


Рис. 2. Залежність швидкості частинок на зрізі розгінної трубки від розміру фракції: 1, 1' – доменний шлак; 2, 2' – ПЦ клінкер  
 ———  $\mu = 0,4$ ; - - - -  $\mu = 0,3$

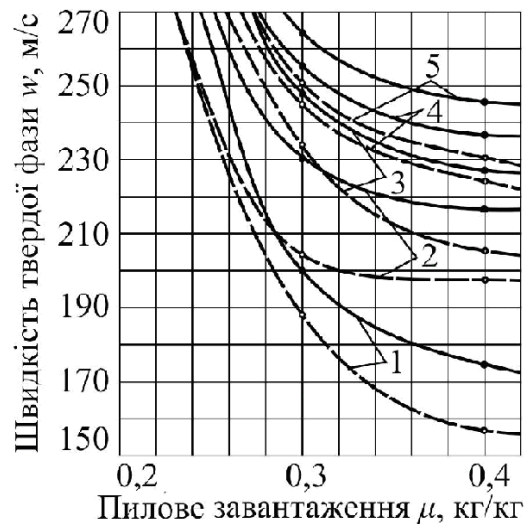


Рис. 3. Вплив пилового завантаження  $\mu$  на швидкість твердої фази у вихідному перерізі розгінної трубки: ——— – шлак, - - - - ПЦ клінкер;  $d$ , (мм): 1 – 1,0; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – 0,05; 5 – 0,02

Згідно з результатами розрахунку можна прогнозувати, що ефект подрібнення доменних шлаків в зустрічних струменях повинен бути вище, ніж ПЦ клінкера, тому що ефект струминного подрібнення визначається в основному швидкістю зустрічних частинок.

У розділі 3 відповідно до задач в п.п. 3–5 виконані експериментальні дослідження впливу гранулометричних характеристик подрібнених доменних шлаків на поверхневу активність, встановлені взаємозв'язки між параметрами дисперсного подрібнення, гранулометричними характеристиками і параметрами зміни показника активності шлаків.

Для досліджень використовувалися шлаки ПАТ "ММК ім. Ілліча", ПАТ "МК Азовсталь" і "Криворіжсталь". Відомо, що показник активності для ПЦ характеризується гідралічним модулем:  $m = 1,7 - 2,4$ .

У результаті дослідження хімічного складу шлаків трьох металургійних комбінатів виявлено їх ідентичність. Гідралічний модуль  $m$  був в межах 1,02–1,07, що менше нижньої межі гідралічного модуля ПЦ клінкера. Отже, доменні шлаки в початковому стані менш активні, ніж клінкер (цемент). Шлаки є потайно-гідралічними речовинами, які здатні підвищувати свою активність у присутності активатора (цементу), або шляхом їх подрібнення (диспергування).

Для отримання подрібнених фракцій доменного шлаку, цементу, клінкеру використовувалася струминна установка УСИ –20. Визначено режимні параметри роботи струминного подрібнювача:  $P = 0,4$  МПа – тиск енергоносія (повітря),  $n = 2500$  хв<sup>-1</sup> – частоту обертання ротора класифікатора, при яких були отримані порошки з питомою поверхнею  $S \geq 0,6$  м<sup>2</sup>/г і середнім розміром частинок  $d \leq 20$  мкм. Встановлено залежність величини питомої поверхні  $S$  (м<sup>2</sup>/г) подрібненого матеріалу від частоти обертання  $n$  (хв<sup>-1</sup>) ротора класифікатора. Залежність представлена рівнянням регресії (1) (для УСИ – 20):

$$S = 0,00021n + 0,066; \quad (1)$$

При  $n = 2500 - 3000$  хв<sup>-1</sup>,  $S = 0,6 - 0,7$  м<sup>2</sup>/г (за формулою 1).

З рівняння (1) можна визначити частоту обертання  $n$  ротора класифікатора подрібнювача для досягнення необхідної дисперсності  $S$ . Відхилення від експериментальних значень складає 7 – 9%. Вирішена третя наукова задача.

Досліджені чинники, що впливають на активність шлаків: гранулометричні характеристики шлаків, питома поверхня  $S$  і діаметр частинок  $d_{cp}$ . Гранулометричні аналізи проводилися на лазерних приладах MALVERN і Multisizer 3. На рис. 4 у вигляді графіків наведені результати аналізу, виконаного на приладі MALVERN, тонко-гранульованого шлаку (ТГШ) – кульове подрібнення та шлаку повітряно-струминного подрібнення (ПСП-шлак).

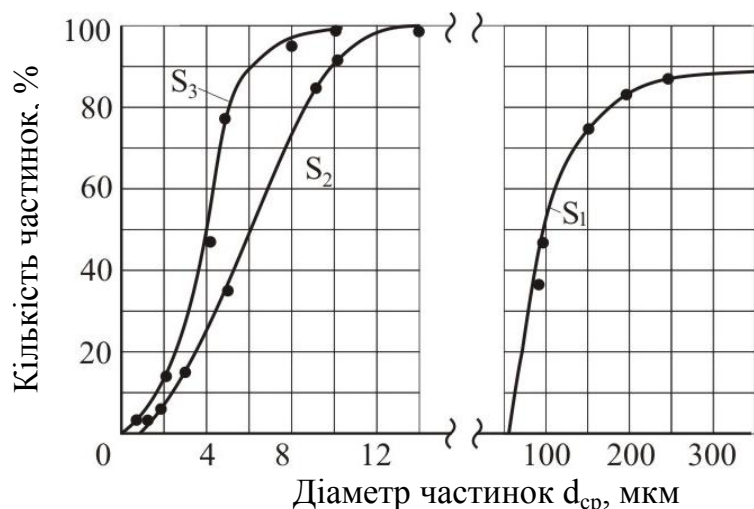


Рис. 4. Сумарні гранулометричні характеристики шлаку:  $S_1 = 0,4$  м<sup>2</sup>/г – кульове подрібнення (ТГШ);  $S_2 = 0,45$  м<sup>2</sup>/г,  $S_3 = 0,48$  м<sup>2</sup>/г – струминне подрібнення (ПСП-шлак)

Встановлено, що гранулометричний склад ТГШ і ПСП-шлаку при близьких питомих поверхнях (0,4; 0,45 м<sup>2</sup>/г) істотно відрізняється: в ПСП-шлаку вміст частинок менше 100 мкм складає 100%, тоді як при кульовому подрібненні – 47,2%. Із зростанням питомої поверхні від  $S_2 = 0,45$  м<sup>2</sup>/г до  $S_3 = 0,48$  м<sup>2</sup>/г при струминному подрібненні спостерігалось збільшення вмісту частинок менше 5 мкм від 22,6% до 45,5%.

На рис. 5 представлені графіки за результатами гранулометричного аналізу всіх досліджуваних проб шлаку, виконаного на приладі Multisizer 3.

З рис. 5 видно, що найбільший максимум на кривих розподілу за розміром зерен мають ПСП-шлаки, у гранскладі яких збільшується кількість дрібніших частинок (< 8 мкм). Продукт ПСП-шлаку більш монодисперсний.

Під час оцінки гранулометричного складу подрібненого продукту середній розмір і питому поверхню зв'язують зазвичай співвідношенням:



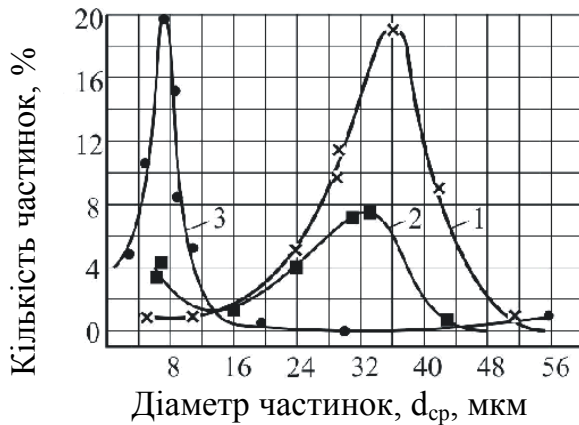


Рис. 5. Частинні криві розподілу частинок за крупністю в шлаках: 1 - шлак початковий (фракція - 45 мкм); 2 - ТГШ; 3 - ПСП-шлак

$$S = \frac{6}{\delta} \left[ \sum_{i=1}^n y_i / d_i \right], \quad (2)$$

де  $S$  – питома поверхня частинок,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;  $\delta$  – щільність матеріалу,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $y_i$  – вихід вузького класу крупності, частки одиниці;  $d_i$  – середній розмір  $i$ -го класу, см.

Розрахунки за формулою (2) – для частинок сферичної форми показали середнє відхилення  $\varepsilon_1 = 242\%$  від експериментальних досліджень (рис. 6, а), що свідчить про несферичну форму частинок подрібнених шлаків.

На підставі експериментальних значень  $S$  ( $\text{м}^2/\text{г}$ ) і  $d_{\text{ср}}$  (мкм) отримано рівняння лінійної регресії :

$$S = b + \rho/d_{\text{ср}} = 0,102 + 5,46/d_{\text{ср}}, \quad (3)$$

де  $b = 0,102$ ;  $\rho = 5,46$ .

Результати розрахунків за рівнянням (3) близькі до експериментальних значень  $S$ . Середнє відхилення  $\varepsilon_2 = 7 - 8\%$ . Це свідчить про придатність виведеного рівняння (3) для практичного використання (рис. 6, б).

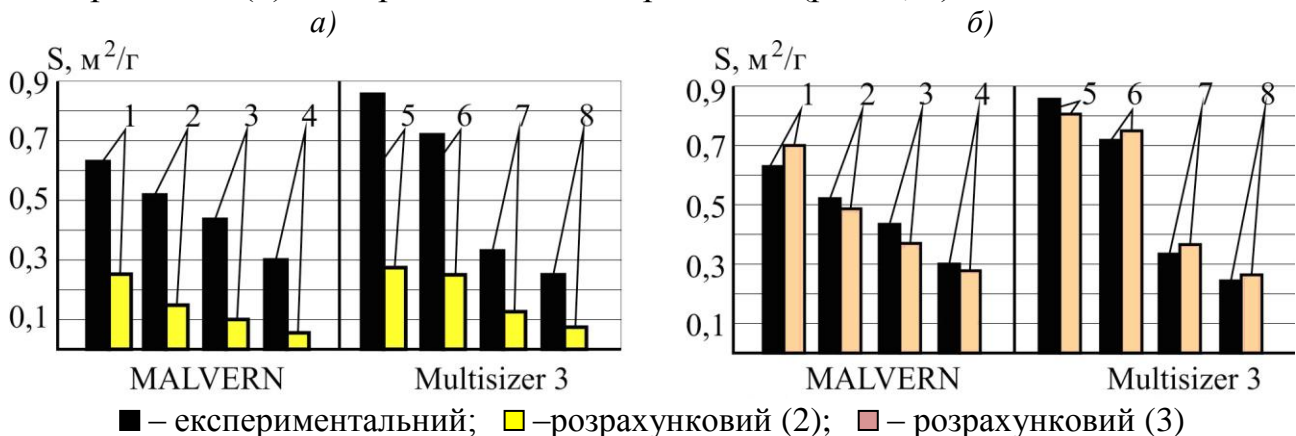


Рис. 6. Гістограми величин питомої поверхні порошків доменних шлаків: 1, 2, 3, 6 – ПСП-шлаки; 4, 7 – ТГШ; 5 – ПСП-шлак активований; 8 – шлак початковий (фракція – 45 мкм)

Активність продуктів циклону і фільтра оцінювалися міцністю доменних шлаків (метод ЦНИИПС - 2 і ДСТУБ.В. 2,7 - 46 - 96). Результати випробувань активності, зведені в таблицю 1, свідчать, що продукти фільтру, маючи вищу питому поверхню ( $1,8 - 2,1 \text{ м}^2/\text{г}$ ) відносно продукту циклона ( $0,72 - 0,87 \text{ м}^2/\text{г}$ ), показали нижчу міцність –  $200 \text{ кг}/\text{см}^2$ , ніж продукт циклону –  $300 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Це

пояснюється відмінністю хімічного складу продуктів циклону і фільтру.

Таблиця 1

**Результати випробувань активності початкового і тонкодисперсного доменного шлаку**

Найменування матеріалу	Питома поверхн., м <sup>2</sup> /г	Водоцемент. віднош.	Терміни схоплювання		Активність через 28 діб., кг/см <sup>2</sup>
			Початок	Кінець	
Граншлак початковий	–	0,42	Після пропарювання		50
ТГШ	0,45	0,32	2год.00хв.	7год.25хв.	105
ПСП-циклон	0,72	0,4	3год.00хв.	10год.10хв.	300
ПСП-циклон	0,87	0,42	3год.00хв.	10год.00хв.	300
ПСП-фільтр	1,81	0,68	5хв.	7хв.	200
ПСП-фільтр	2,11	0,69	8хв.	15хв.	204

З рис. 7 видно, що в продуктах циклона (I) спостерігається підвищений вміст основних оксидів відносно продуктів фільтра (II). Наприклад, вміст CaO в продуктах циклона ( $S = 0,87 \text{ м}^2/\text{г}$ ) складає  $\sim 47,7\%$ , а в продуктах фільтра ( $S = 2,1 \text{ м}^2/\text{г}$ ) зменшується до  $45,85\%$ .

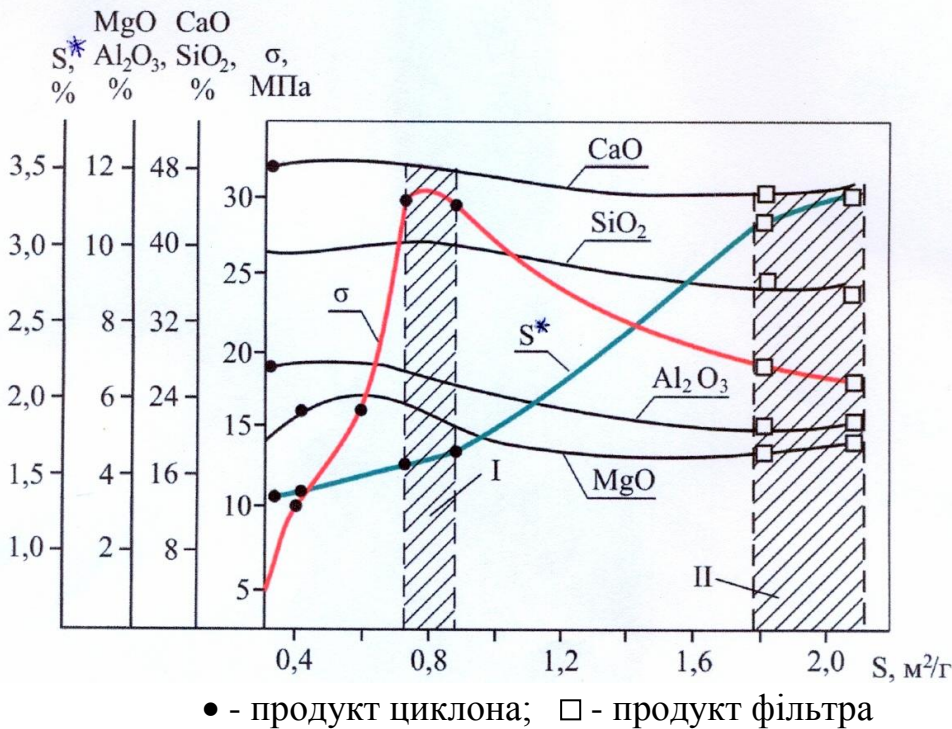


Рис. 7. Вплив дисперсності на активність (міцність) зразків (I) і хімічний склад подрібненого шлаку:

● - продукт циклона,  
 □ - продукт фільтра

Вміст сірки (крива  $S^*$  на рис. 7) в продуктах фільтра збільшується в 2,4 раза:  $1,39\%$  складає в продукті циклона і  $3,34\%$  – в продукті фільтра. Внаслідок аеро- (газо)динамічних умов роботи струминної установки процес подрібнення супроводжується збагаченням продукту циклона основними оксидами з великою щільністю речовини ( $\delta_{\text{ц}} = 2,7$ ,  $\delta_{\text{ф}} = 2,2 \text{ г/см}^3$ ). Цим пояснюється вища активність продуктів циклона відносно продуктів фільтра.

Активність доменних шлаків  $\sigma$  характеризується величиною питомої поверхні  $S$ , яка взаємозв'язана з гранулометричною характеристикою  $S = f(d_{\text{cp}})$ ,

формула (3). Виходячи з цього, визначена нелінійна регресійна залежність  $\sigma$  (кг/см<sup>2</sup>) від  $d_{cp}$ (мкм) і  $S$ (м<sup>2</sup>/г), яка відображується варіантами *a*) і *б*) формули (4):

$$a) \sigma = 950/\sqrt[3]{d_{cp}} - 168; \quad б) \sigma = 950/\sqrt[3]{5,46/S - 0,1} - 168. \quad (4)$$

Відхилення  $\sigma$  за формулою (4) від експериментальних значень не перевищує 10%, що прийнятно для практичного використання і підтверджує вирішення четвертої наукової задачі. Таким чином, за результатами вирішення четвертої задачі обґрунтовано перше наукове положення.

На рис. 8 заштрихована зона I свідчить, що активність  $\sigma \geq 30$  МПа мають шлаки з середнім розміром частинок до 12 мкм та питомою поверхнею  $S = 0,6 - 0,8$  м<sup>2</sup>/г, при цьому вміст частинок розміром менше 20 мкм складає 90%. Механоактивація шляхом струминного помелу шлаків і цементів показала позитивні результати (рис. 9).

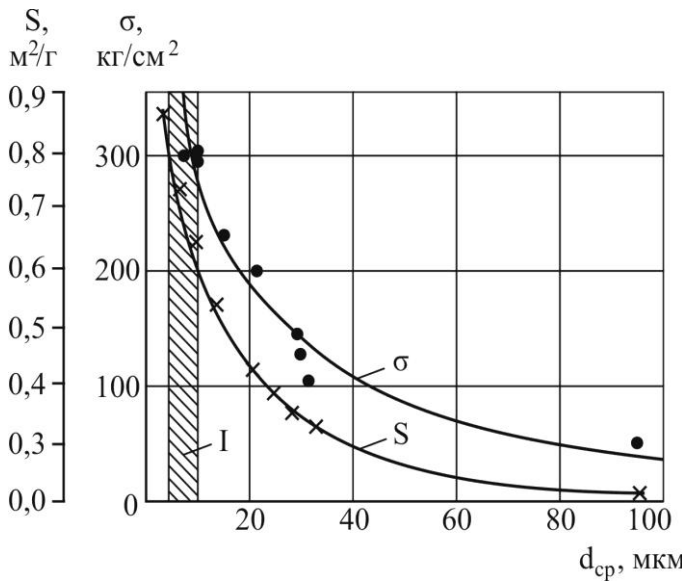


Рис. 8. Залежність активності шлаків  $\sigma$  і питомої поверхні  $S$  від розміру частинок  $d_{cp}$

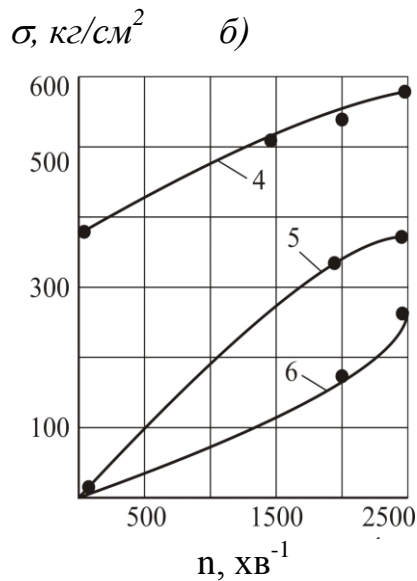
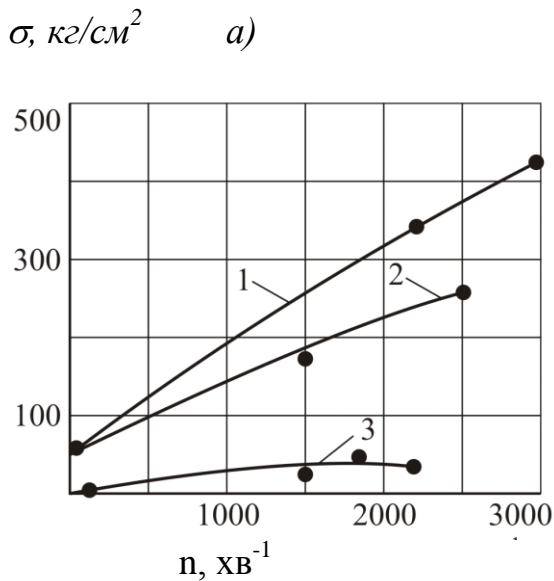


Рис. 9. Зміна активності (міцності) продуктів, подрібнених в струминній установці: *a*) – доменних шлаків, *б*) – цементів (ПЦ): 1, 2 – "свіжі" граншлаки; 3 – відвальні (десятирічні) шлаки; 4 – "свіжі" цементи; 5 – дворічний цемент (2006 р.); 6 – п'ятирічний цемент (2003 р.)

ПСП-шлаки підвищили міцність до  $400 \text{ кг/см}^2$  (рис. 9, а, крива 1), цементи – до  $600 \text{ кг/см}^2$  (рис. 9, б, крива 4); старі цементи – до  $225 \text{ кг/см}^2$  (п'ятирічний) та до  $370 \text{ кг/см}^2$  (дворічний) (рис. 9, б, криві 6 і 5). Таку зміну міцності (активності) активованих шлаків і цементів можна пояснити зміною їх гранулометричних характеристик, що ілюструються графіками розподілу частинок за крупністю на рис. 10.

Графіки на рис. 10 мають добре виражені максимуми на кривих 1-1', 2-2' змісту частинок. Максимуми активованого шлаку 1' і цементу 2' відносно ПСП-шлаку 1 і цементу 2 зміщені у бік дрібних частинок. У шлаку 1' зміщення спостерігається більшою мірою, ніж у цементі 2'. Це означає, що активовані шлаки дрібніші, ніж цементи.

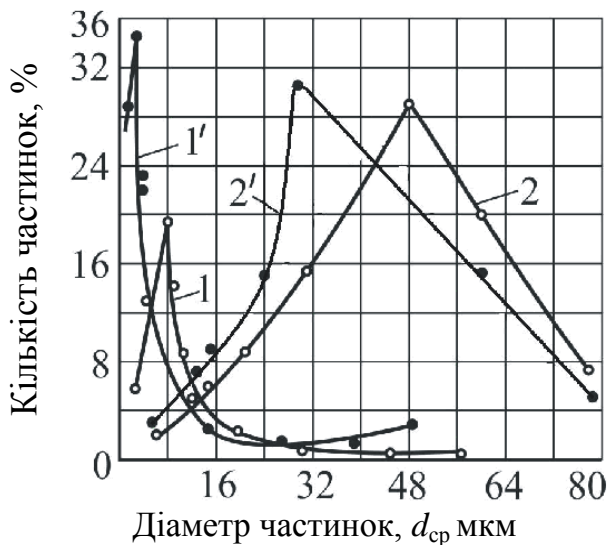


Рис. 10. Графічне відображення розподілу частинок в продуктах механоактивації: 1 – ПСП-шлак ( $S = 0,6 \text{ м}^2/\text{Г}$ ,  $d_{cp} = 11 \text{ мкм}$ ); 1' – ПСП-шлак активований ( $S = 0,9 \text{ м}^2/\text{Г}$ ,  $d_{cp} = 6,8 \text{ мкм}$ ); 2 – цемент ( $S = 0,23 \text{ м}^2/\text{Г}$ ,  $d_{cp} = 40 \text{ мкм}$ ); 2' – цемент активований ( $S = 0,36 \text{ м}^2/\text{Г}$ ,  $d_{cp} = 18 \text{ мкм}$ )

Зроблений висновок ілюструють і підтверджують мікрофотографії проб активованих шлаків і цементів на рис. 11 і 12.

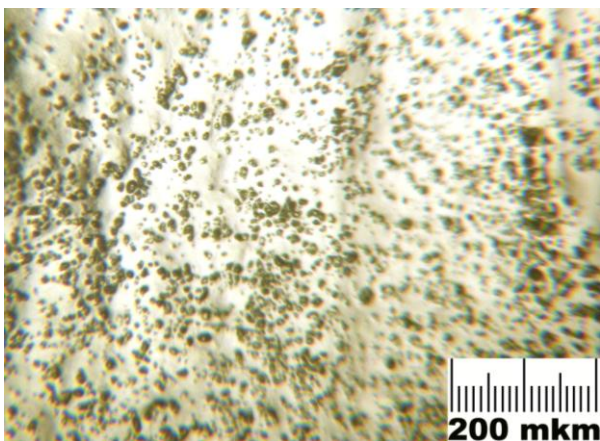


Рис. 11. Мікроструктура ПСП-шлаку активованого ( $d_{cp} = 6,8 \text{ мкм}$ ,  $S = 0,9 \text{ м}^2/\text{Г}$ )

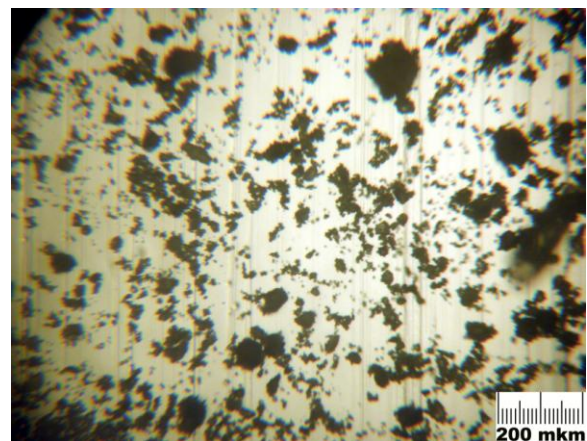


Рис. 12. Мікроструктура активованого цементу: ( $d_{cp} = 18 \text{ мкм}$ ,  $S = 0,36 \text{ м}^2/\text{Г}$ )

Таким чином, в аналогічних режимах струминного подрібнення доменні шлаки і цементи мали середній розмір частинок:  $d_{cp} = 6,8 \text{ мкм}$  (рис. 11),  $d_{cp} = 18 \text{ мкм}$  відповідно (рис. 12). Це підтверджує результати розрахунків швид-

костей частинок шлаку і клінкеру, які вказують на більш високий ефект подрібнення доменних шлаків відносно ПЦ клінкеру.

Гранулометричний розподіл частинок за крупністю (рис. 10, 1 і 1') є для доменного шлаку раціональним, оскільки при такому розподілі (90% частинок в інтервалі 6 – 12 мкм) активовані шлаки показали максимальну активність – 400 кг/см<sup>2</sup>. Можливо їх використання в якості в'язучих матеріалів нарівні з цементами. Таким чином вирішена п'ята наукова задача і обґрунтоване друге наукове положення.

В цементах, компонентами якого є шлак і клінкер, тонкому ( $S \geq 0,6 \text{ м}^2/\text{г}$ ) подрібненню необхідно піддавати шлак. Це дозволяє при однакових показниках міцності (активності) значно (до 20 – 25% замість 95%) скоротити в цементі вміст клінкеру (рис. 13).

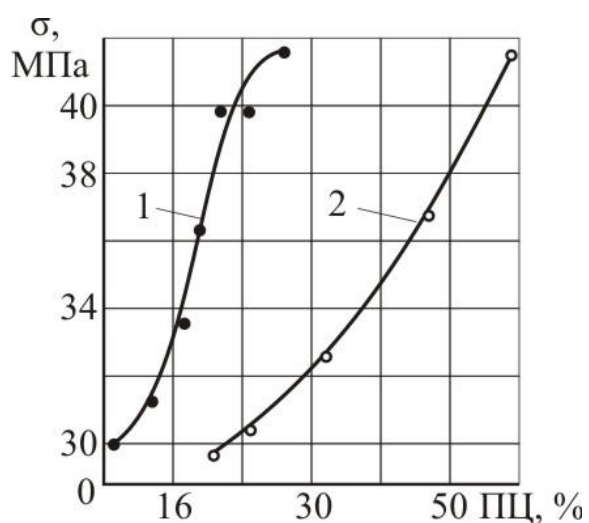


Рис. 13. Залежність міцності зразків на основі подрібненого шлаку і масової частки ПЦ в шихті: 1 – на основі шлаку струминного помелу; 2 – з публікації

На рис. 13 крива 1 відображає вміст у шихті близько 80% дисперсного шлаку струминного подрібнення з додаванням 20% ПЦ і крива 2 побудована з урахуванням вмісту в шихті 50% ПЦ клінкеру, подрібненого до  $S = 0,6 \text{ м}^2/\text{г}$ . Оскільки клінкер являє собою енергоємний у виробництві матеріал, вважаємо, що варіант відображений кривою 2 не має переваг порівняно із запропонованим (крива 1).

Проведені дослідження дозволяють струминну технологію подрібнення доменних шлаків вважати перспективною у виробництві активних матеріалів, що відповідає науковим положенням цієї роботи. Варіант (рис. 13, крива 1), що ґрунтується на результатах цієї роботи, є більш вигідним в технологічному та в економічному аспектах. Таким чином, у розділі 3 вирішено задачі, поставлені в п.п. 3 – 5.

**У розділі 4** відповідно до шостої задачі дослідження розроблені технологічні схеми отримання активних матеріалів шляхом тонкодисперсного струминного подрібнення доменних шлаків.

У розроблених технологічних схемах передбачається подрібнення доменних шлаків до дисперсності з гранулометриєю, яка забезпечує високу активність частинок.

Рекомендуються такі технологічні способи отримання активованих у струминному млинні доменних шлаків, розроблені на рівні винаходів:

- 1) селективна активація доменних шлаків (патент № 68838);
- 2) тонкодисперсне струминне подрібнення доменних шлаків - варіант А (патенти № 35336, 18575, 36034);
- 3) тонкодисперсне струминне подрібнення доменних шлаків з додаванням активатора (ПЦ) - варіант Б (патент № 36035).

Для селективної активації пропонується схема, в якій як початковий матеріал рекомендується використовувати ТГШ (рис. 14).

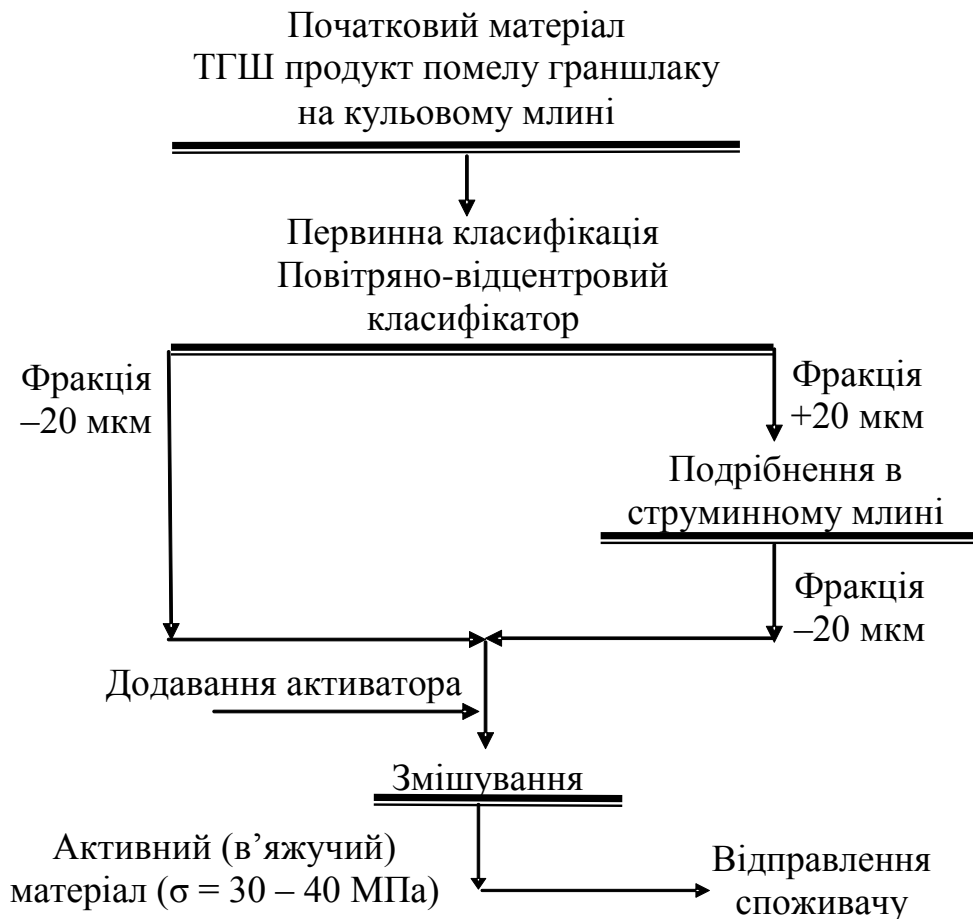


Рис. 14. Схема селективної активації доменних граншлаків

Схема розроблена на основі результатів гранулометричних досліджень, де було встановлено, що фракція 0 – 20 мкм в загальній масі ТГШ складає 46%.

Відповідно до схеми із ТГШ відділяється відцентровим класифікатором фракція 0 – 20 мкм – продукт первинної класифікації. Крупна фракція + 20 мкм, що не пройшла класифікатор, подрібнюється в струминному млині до фракції – 20 мкм – продукт вторинної класифікації, яка змішується з продуктом первинної класифікації. Схема передбачає на завершальному етапі введення у змішувач активаторів, наприклад ПЦ.

Запропонована схема значно знижує (на 46%) потрібний об'єм подрібнення шлаку. Регулюючи роботу класифікаторів первинної класифікації і струминного подрібнювача до фракції – 20 мкм), можна отримати гранулометричний склад шлаку з високими показниками активності ( $\sigma = 30 - 40$  МПа).

Варіант А включає отримання активних матеріалів (М300) з доменних граншлаків струминним подрібненням ( $S = 0,6 - 0,8 \text{ м}^2/\text{г}$ ) без добавок активатора – безклінкерний активний матеріал.

Стосовно варіанта Б передбачається отримання активних матеріалів (М400) з доменних граншлаків з активуючими добавками (15 – 20 % ПЦ). Вирішена шоста задача.

Усі способи захищені патентами України і дозволяють отримувати активні матеріали з доменних шлаків з еколого-економічними перевагами:

- 1) використання вторинної сировини – відходів металургійного виробництва;
- 2) використання струминного подрібнення доменного шлаку знижує вміст ПЦ клінкеру і собівартість виробництва активного матеріалу;
- 3) практично повна відсутність викидів  $\text{CO}_2$  в усіх варіантах;
- 4) звільнення займаних шлаковими відвалами земельних площ для повернення їх під сільгоспугіддя.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, у якій вирішено актуальну наукову задачу, що полягає у встановленні залежності показника поверхневої активності від гранулометричних характеристик доменного шлаку. Це дозволило розробити технологічні схеми (лінії) отримання активних (в'язучих) матеріалів заданого гранулометричного складу шляхом тонкодисперсного струминного подрібнення доменних шлаків. В залежності від необхідного значення показника поверхневої активності дані матеріали можуть бути використані або в якості основного компонента з незначною добавкою клінкеру, або як самостійний в'язучий матеріал. Запропоновані схеми отримання в'язучих матеріалів мають переваги в економічному та екологічному аспекті в порівняно із існуючими технологіями.

### Основні наукові і практичні результати.

1. Встановлена функціональна залежність питомої поверхні  $S$  від частоти обертання  $n$  ротора класифікатора струминної установки. Розрахунком за рівняннями регресії був визначений режим роботи подрібнювача ( $P = 0,4 \text{ МПа}$ ,  $n = 2500 \text{ хв}^{-1}$ ) для отримання продукту з  $S \geq 0,6 \text{ м}^2/\text{г}$ .

2. ТГШ характеризується полідисперсним складом частинок, ПСП-шлаки – монодисперсні. Встановлена залежність питомої поверхні  $S$  шлаків від медіанного діаметра  $d_{cp}$  (3). Відхилення значень  $S$  від експериментальних величин (MALVERN, Multisizer 3) – 7 – 8%. Це дозволяє рекомендувати формулу (3) для прогнозування дисперсності подрібненого продукту.

3. В хіманалізі продуктів циклону (масова доля 92 – 95%) в 2,4 раза зменшується вміст сірки і збільшується вміст основних оксидів. Струминне подрібнення збагачує подрібнений шлак оксидами, позитивно впливаючи на поверхневу активність частинок.

4. Максимальні характеристики міцності мають ПСП-шлаки при  $S = 0,6 - 0,8 \text{ м}^2/\text{г} - 30 \text{ МПа}$ , з добавками активатора (15 – 20% ПЦ) – 40 МПа, що відпові-

дає цементам марок М300 і М400.

5. Механоактивація шляхом струминного подрібнення підвищила активність шлаків з 271 до 422 кг/см<sup>2</sup>, цементів - з 400 до 600 кг/см<sup>2</sup>. Розроблена технологічна схема селективної активації доменних шлаків (ТГШ), яка дозволяє знизити на 46% об'єм додатково подрібнюваного шлаку.

6. Залежність показника активності шлаків  $\sigma$  від його гранскладу: середнього діаметра  $d_{\text{ср}}$  частинок і питомої поверхні  $S$  визначається формулами у вигляді рівнянь регресії (4). Середнє відхилення розрахункових значень від експериментальних величин  $\sigma$  становить 9 – 11%. Дані формули (4) рекомендується використовувати для прогнозування оцінки активності шлаків при розробці технології отримання активних матеріалів шляхом струминного подрібнення.

7. Вперше розроблені та рекомендуються для впровадження технологічні варіанти отримання активних матеріалів із шлаків шляхом тонкодисперсного струминного подрібнення.

8. Визначений розрахунком очікуваний економічний ефект від запропонованих технологічних варіантів (А, Б) отримання активних матеріалів з відходів металургійного виробництва – доменних шлаків з використанням тонкодисперсного струминного подрібнення. Собівартість активного матеріалу в 1,5 – 1,8 рази нижча, ніж собівартість матеріалу, який отримують способами виробництва цементу.

Очікуваний економічний ефект від впровадження, наприклад, варіанту А на ПАТ «ММК ім. Ілліча» становить 7,2 млн. грн. на рік (у ціни за 2010 р.), а фактичний на фірмі «Ера плюс» – 153 тис. грн. (у ціни за 2009 р.).

9. Крім економічної ефективності, розроблені варіанти мають переваги в екологічному аспекті: у всіх технологічних схемах практично повністю відсутні викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу.

### **Основні положення і результати дисертації опубліковані в роботах:**

1. Кравченко В.П. Улучшение технологических свойств строительных материалов на основе измельчения и механоактивации / Л.Ж. Горобец, В.В. Коваленко, И.А. Шуляк, В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. // Нац. гірн. ун-т. – Д., 2008. – Вип. 34 (75). – С. 75-81.

2. Кравченко В.П. Гидравлическая активность доменных шлаков / В.П. Кравченко, В.А. Струтинский // Сталь. – 2007. – № 1. – С. 94-95.

3. Кравченко В.П. Актуальные проблемы рециклинга и утилизации шлаков металлургического производства / В.А. Струтинский, А.В. Савощенко, В.П. Кравченко // Металл и литье Украины. – 2007. – № 1-2. – С. 14-16.

4. Кравченко В.П. Гранулометрические и фракционные характеристики порошков доменного шлака / В.П. Кравченко, Н.С. Прядко // Техническая механика. – 2010. – № 4. – С. 98-110.

5. Кравченко В.П. Активация доменных шлаков / В.П. Кравченко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць. – Маріуполь, 2010. – Вип. 21. – С. 17-20.

6. Кравченко В.П. Оценка гидравлической активности доменных шлаков / В.П. Кравченко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць. –



Маріуполь, 2010. – Вип. 20. – С. 44-47.

7. Кравченко В.П. Селективная активация доменных шлаков / В.П. Кравченко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць. – Маріуполь, 2011. – Вип. 2 (23). – С. 45-51.

8. Пат. 18575, Украина, С 04В 7/147. Способ подготовки гранулированного доменного шлака / В.П. Кравченко, П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.В. Климанчук [и др.]; заявитель и патентообладатель ПАО «ММК им. Ильича». – № 200605146; заявл. 10.05.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.

9. Пат. 68838 Украина, С 048 7/147. Способ активации доменных шлаков/В.П. Кравченко[и др.]; заявитель и патентообладатель НГУ (г. Днепропетровск). – № 201112098; заявл. 14.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

10. Пат. 36035, Украина, С 04 В 7/00. Технологическая линия для изготовления вяжущего / В.П. Кравченко, С.А. Матвиенков, В.А. Струтинский, А.В. Савощенко; заявитель и патентообладатель ПАО «ММК им. Ильича». – № 200806304; заявл. 13.05.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.

11. Пат. 36034, Украина, С 04 В 7/00. Технологическая линия для изготовления вяжущего / В.П. Кравченко, С.С. Мацегора, В.А. Струтинский, В.И. Трубников, П.И. Пилов [и др.]; заявитель и патентообладатель ПАО «ММК им. Ильича». – № 200806302; заявл. 13.05.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.

12. Пат. 35336, Украина, С 04 В 7/00. Способ получения вяжущего / В.П. Кравченко, С.С. Мацегора, В.А. Струтинский, В.И. Трубников, П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец; заявитель и патентообладатель ПАО «ММК им. Ильича». – № 200805173; заявл. 21.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17.

13. Рациональный вариант переработки доменных шлаков / В.П. Кравченко, Л.Ж. Горобец [и др.] // XIII Міжнар. наук.-практ. конф. зі збагачення корисних копалин (19-22 трав. 2010 р., м. Бердянськ): Нац. гірн. ун-т. – Д., 2010. – Вип. 40 (81). – С. 186-191.

14. Упрочнение строительных материалов при обработке в струях / В.П. Кравченко, Л.Ж. Горобец [и др.] // Динаміка та міцність машин, будівель, споруд: наук.-техн. конф. (16-19 черв. 2009 р., – м. Полтава): зб. наук. пр. – Полтава, 2009. – Т. 3, вип. 3 (25). – С. 59-66.

15. Влияние дисперсности на гидравлические свойства доменных шлаков / В.П. Кравченко, П.И. Пилов [и др.] // Теория и практика процессов измельчения, смешения и уплотнения материалов: Материалы XVI науч. - техн. конф. (18-23 июля 2008, г.Одесса): Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2008. – Вып. 38. – С. 58-67.

16. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов / В.П. Кравченко П.И. Пилов [и др.] // Применение ультра-(нано-) дисперсных порошковых систем в промышленных технологиях: междунар. науч.-техн. конф. (8–10 июля 2008 г., С.–Петербург): тез. док. – С. Пб., 2008. – С. 112-127.

17. Кравченко В.П. Поиск оптимального режима струйного измельчения доменных шлаков / В.П. Кравченко [и др.] // Збагачення корисних копалин: наук. – техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2011. – Вип. 44 (85). – С. 33-39.

18. Кравченко В.П. Исследование влияния степени измельчения на

гранулометрические характеристики доменных шлаков / В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2010. – Вип. 43 (84). – С. 36-42.

19. Кравченко В.П. Рациональные технологии получения бесклинкерного вяжущего из доменных шлаков на основе измельчения и механоактивации / В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2009. – Вип. 39 (80). – С.41-46.

20. Кравченко В.П. Высокоактивные вяжущие материалы из доменных шлаков и способы их получения / В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2011. – Вип. 46 (87). – С.120-127.

21. Кравченко В.П. Динамика дисперсного потока газозвеси в разгонном узле струйного аппарата / В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2011. – Вип. 47(88). – С. 40-48.

22. Кравченко В.П. Экспериментальные исследования измельчаемости доменных шлаков / В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2012. – Вип. 49(90). – С. 38-41.

23. Кравченко В.П. Влияние гранулометрических характеристик на гидравлическую активность доменных шлаков / В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2012. – Вип. 50 (91). – С. 56-60.

24. Кравченко В.П. Гранулометрические характеристики и активность порошков доменных шлаков / В.П. Кравченко // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Д., 2013. – Вип. 52(93). – С. 52-58.

Особистий внесок автора в роботах, які написані в співавторстві: [1-3] – ідея підвищення поверхневої активності доменних шлаків, складання програми випробувань, проведення випробувань, висновки; [4] – проведення експериментальних робіт, аналіз результатів; [13-16] – складання програми випробувань активності (міцності) і визначення експериментально характеристик поверхневої активності доменних шлаків різних фракцій; [8-12] – розробка технологічних варіантів отримання активних матеріалів з доменних шлаків: ідея, основні відмінні ознаки, оформлення.

## АНОТАЦІЯ

Кравченко В.П. Обґрунтування параметрів струминного подрібнення при переробці і збагаченні доменних шлаків. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.08. – «Збагачення корисних копалин». – Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, 2014.

Дисертація присвячена питанням отримання активних матеріалів з доменних шлаків шляхом підвищення їх поверхневої активності за допомогою нового способу їх переробки – тонкодисперсного струминного подрібнення.

В дисертації визначено метод отримання дисперсних фракцій доменного шлаку і режимних параметрів струминного подрібнювача для підготовки подрібнених проб доменного шлаку різних фракцій.

Встановлено вплив факторів на поверхневу активність доменних шлаків,

гранулометричний склад вихідного матеріалу та його дисперсність, що визначаються питомою поверхнею ( $S = 0,6 - 0,8 \text{ м}^2/\text{г}$ ). Встановлено, що максимальну активність мають ПСП-шлаки – 30 МПа, з додаванням активатора (15 – 20 % ПЦ) – 40 МПа.

Розроблені технологічні варіанти отримання поверхнево активних матеріалів з доменних шлаків. Високий рівень рентабельності у всіх варіантах забезпечується низькою собівартістю за рахунок використання вторинної сировини і екологічності технологій.

**Ключові слова:** доменний шлак, поверхнева активність, дисперсність, гранулометричний аналіз, міцність, технологія, активні матеріали, подрібнення, струминний млин.

## АННОТАЦІЯ

Кравченко В.П. Обоснование параметров струйного измельчения при переработке и обогащении доменных шлаков. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.08 – «Обогащение полезных ископаемых». – Национальный горный университет, Днепропетровск, 2014.

В диссертации решена актуальная научная задача, направленная на установление зависимости показателя поверхностной активности от гранулометрических характеристик доменного шлака и разработаны способы получения заданного гранулометрического состава путем тонкодисперсного струйного измельчения в технологических линиях.

Проанализированы литературные источники, освещающие вопросы механоактивации материалов для повышения их активности, в результате чего выделены факторы, влияющие на активность материала. Это позволило обосновать возможность повышения поверхностной активности путем дисперсного измельчения шлака в струйной мельнице. По результатам анализа сформулированы задачи исследования.

Рассмотрены физико-химические свойства доменных шлаков, особенности структуры старых (лежалых) и "свежих" гранулированных шлаков. Отмечена более высокая активность "свежих" гранулированных шлаков, имеющих аморфную (стекловидную) структуру. Определены химсоставы доменных шлаков разных металлургических комбинатов. Вычислены гидравлические модули шлаков, величина которых (1,02 – 1,07) характеризует шлаки как скрытно-гидравлические вещества, требующие дополнительной активации для повышения их поверхностной активности.

Для получения дисперсной фракции шлака был выбран струйный способ измельчения, сделана прогнозная оценка эффекта измельчения струйным способом шлака и клинкера путем установления скоростных характеристик частиц на разгонном участке инжектора струйной мельницы. В результате численного решения дифференциальных уравнений, представляющих собой математическую модель течения газозвеси в цилиндрическом канале, было установлено, что при одинаковой крупности скорости частиц шлака превышают на 12% скорости частиц клинкера. На основании результатов расчета можно предполо-

жить, что эффект измельчения доменных шлаков во встречных струях может быть выше, чем клинкера.

Путем экспериментальных исследований определены режимные параметры измельчения шлаков и установлена регрессионная зависимость удельной поверхности измельченного продукта от режимного параметра работы струйного измельчителя – частоты вращения ротора классификатора. Расчетом по полученному уравнению регрессии был определен режим работы струйного измельчителя для получения продукта с удельной поверхностью  $\geq 0,6 \text{ м}^2/\text{г}$ , необходимого для исследования гранулометрических характеристик и показателя активности.

Проведенными исследованиями гранулометрического состава установлено, что продукты шарового помола доменного шлака являются полидисперсными, продукты струйного помола – монодисперсные и частицы распределяются в узком классе крупности.

Установлена линейная регрессионная зависимость удельной поверхности от медианного размера частиц измельченного шлака. Отклонение расчетных значений от экспериментальных величин составило 7 – 8%, что свидетельствует о пригодности полученного выражения для практического использования.

Результаты испытаний активности (прочности) показали, что у продукта фильтра, имеющего более высокую удельную поверхность относительно продукта циклона, активность была в 1,5 раза ниже, чем у продукта циклона (20 и 30 МПа соответственно). Это объясняется тем, что вследствие аэродинамических условий работы струйной мельницы, измельчение сопровождается обогащением продукта циклона основными оксидами с высокой плотностью вещества, положительно влияющими на увеличение показателя активности. Такое различие было установлено химанализом продукта циклона и фильтра.

Установлена нелинейная регрессионная зависимость активности шлака от характеристик дисперсности: среднего диаметра и удельной поверхности частиц. Среднее отклонение расчетного значения от экспериментальных величин активности составило 9 – 11%. Эти формулы можно применить для прогнозной оценки активности шлаков при разработке технологии получения активных материалов путем струйного измельчения.

Максимальные прочностные характеристики шлаки струйного помола показали при измельчении до удельной поверхности  $0,6 – 0,8 \text{ м}^2/\text{г}$  – 30 МПа, с добавками активатора (15 – 20% клинкера) – 40 МПа. Их можно использовать в качестве вяжущих материалов вместо цементов.

Было установлено, что механоактивация путем дополнительного струйного измельчения повысило активность шлака до 40 МПа, а цементов до 60 МПа.

Разработана технологическая схема селективной активации доменных шлаков, позволяющая снизить на 46% объем доизмельчаемого материала. Рекомендуется использовать данную технологию непосредственно на строительной площадке, не подвергая длительному хранению получаемый активный вяжущий материал.

Впервые разработаны и рекомендуются для внедрения технологические

варианты получения активных материалов из доменных шлаков струйным измельчением, которые защищены патентами.

Себестоимость полученного по разработанным технологическим схемам активного вяжущего материала в 1,5 – 1,8 раза ниже, чем по существующей технологии. Высокий уровень рентабельности обеспечивается низкой себестоимостью за счет использования вторичного сырья – техногенных отходов (шлаков) и экологичности технологий.

**Ключевые слова:** доменный шлак, поверхностная активность, дисперсность, гранулометрический анализ, прочность, технология, активные материалы, измельчение, струйная мельница.

### ANNOTATION

V.P. Kravchenko. Ground of parameters processing and enrichment for jet grinding of blast-furnace slags. – Manuscript.

The dissertation to obtaining of the scientific degree of Candidate in Technical Sciences with spesiality 05.15.08 «Enrichment of minerals». – National mining university, Dnipropetrovs'k, 2014.

In the dissertation the issue of active materials production from blast-furnace slags by means of using new way of their preparation, i.e. fine grinding to increase their superficial activity.

In the dissertation defines the method of production of blast-furnace slag disperse fractions and optimal mode parameters for jet crushing machine to obtain fine samples of blast-furnace slag of different fractions.

Various factors influencing blast-furnace slag superficial activity were determined. Optimal grain-size composition was found for finished material as well as its dispersity determined with specific surface ( $S=0,6 - 0,8 \text{ m}^2/\text{g}$ ). PSM-slags (air jet comminuted slags) were found to have maximum activity of 30 MPa or 40 MPa with addition of activator (15 to 20 per cent Portland cement). Three technological options were developed for active materials production from blast-furnace slags. In all of the three options a high profitability level is ensured by low cost of the binder due to use of secondary raw materials and ecological compatibility of the process.

**Key words:** blast-furnace slag, superficial activity, dispersity, grain-size analysis, active materials, strength, grinding, jet mill.