

ОСОБЛИВОСТІ ПОДРІБНЕННЯ І МЕХАНОАКТИВАЦІЇ СУМІШЕЙ РІЗНОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ ШИХТИ ДЛЯ ЗНОСОСТІЙКОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Лузан С.О., Петренко Д.М.

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

На основі аналізу фізико-хімічних явищ, що відбуваються при механічному розмолі і механічній активації порошкових матеріалів розроблено технологію синтезування модифікуючого матеріалу із застосуванням СВС-процесу і процесу наплавлення зносостійких покриттів на основі матеріалів, що самофлюсуються. Запропоновано алгоритм оцінки ступеня подрібнення порошкових матеріалів.

Ключові слова: модифікуючий матеріал, СВС-процес, механоактивація, подрібнення, зносостійкість, наплавлення.

Актуальність проблеми

В даний час технології подрібнення матеріалів застосовуються в основному у гірничо-металургійній, хімічній промисловості, в порошковій металургії, при виробництві будівельних матеріалів, скла, пластмас, кераміки, твердих палив та інших видів тонкодисперсних матеріалів. Як устаткування для цього використовуються барабанні, струменеві і планетарні млини.

Розвиток промисловості вимагає виробництва продуктів тонкого (менше 20 мкм) і надтонкого (менше 7 мкм) подрібнення для композиційних матеріалів, які застосовуються для наплавлення та напилювання газотермічними методами зносостійких покриттів. У зв'язку з цим актуальним стає питання вдосконалення обладнання і технології подрібнення.

Аналіз публікацій за темою дослідження

Подрібненням називають процес руйнування шматків твердого матеріалу при критичних внутрішніх напруженнях, створених в результаті якого-небудь навантаження і які перевищують відповідну межу міцності. Напруження в матеріалі можуть створюватися механічним навантаженням, температурними впливами, ультразвуковими коливаннями та ін. Найбільше вживання в сучасному виробництві мають механічні способи подрібнення.

Подрібнення ділять на дроблення і помел, а машини, які застосовуються для цих цілей, називаються дробарками і млинами. Залежно від розмірів частинок продукту розрізняють такі види подрібнення: дроблення крупне ($d_k = 100 \dots 350$ мм), середнє ($d_k = 40 \dots 100$ мм), дрібне ($d_k = 5 \dots 40$ мм), помел грубий ($d_k = 0,1 \dots 5$ мм), середній ($d_k = 0,05 \dots 0,1$ мм), тонкий ($d_k = 0,001 \dots 0,05$ мм), надтонкий ($d_k < 0,001$ мм). Основною характеристикою процесу подрібнення є ступінь подрібнення, яка визначається співвідношенням середньозважених розмірів частинок матеріалу до і після подрібнення:

$$i = d_n / d_k \quad (1)$$

Ступінь подрібнення, що досягається на одній машині, для більшості видів дробильного обладнання не перевищує 3...7. Тому для забезпечення $i = 30$ необхідно застосувати кілька стадій дроблення, наприклад: $i_1 = 3$, $i_2 = 3$, $i_3 = 4$. Тоді $i_0 = i_1 i_2 i_3 = 3 \cdot 3 \cdot 4 = 36$, тобто потрібно мінімум три стадії подрібнення [1].

Всі зносостійкі сплави мають високий вміст карбідів, боридів і карбоборидів, що забезпечує високу твердість і жароміцність захисних покриттів [2, 3].

Захисні покриття, що працюють при ударно-абразивному зношуванні, також включають дві складові частини – основу і зміцнюючу фазу [4, 5]. Основа є в'язкою матрицею, що утримує в собі тугоплавкі сполуки, які є зміцнюючою фазою.

Відомо, що сполуки металів з бором – бориди, мають високу твердість з пластичними властивостями і високу хімічну інертність, вони є одним з найбільш ефективних і економічних мікролегуючих елементів сталі. У більшості випадків мінімальна концентрація бору в металі для отримання позитивного результату становить близько однієї тисячної масової частки відсотка. Унікальність бору полягає в тому, що при такому малому вмісті в сталі, він здатний надавати на її властивості вплив, еквівалентний дії значно більшої кількості таких легуючих елементів, як Cr, Mo, Ni та ін. [6].

Фізико-хімічні явища, що відбуваються при механічному помолі створюють сприятливі умови для досягнення нанокристалічного стану речовини. В результаті утворення величезної активної поверхні відбувається збільшення хімічної активності подрібнюючих речовин. Таким чином, механічна активація збільшує швидкості реакції, за рахунок зниження температури реакцій порошкових матеріалів, або шляхом ініціювання хімічних реакцій в процесі подрібнення (механохімія).

Першими були дослідження Холмса, присвячені проблемі сухого подрібнення сумішей різних мінералів. В результаті було встановлено, що подрібнення кварцу і вапняку в суміші дає продукти, характеристики крупності яких подібні характеристикам крупності, отриманим при роздільному подрібненні кожного мінералу. В подальшому дослідженнями характеристик крупності подрібнених продуктів займалися Т. Танака, Д. Келсалл, П. Халасьямані та ін., котрі також показали, що кожен мінерал штучної суміші подрібнюється незалежно від іншого і характеристика крупності кожного компоненту відповідає рівнянню Годена-Андрєєва-Шумана при подрібненні компоненту як окремо, так і в суміші. У той же час за характеристиками крупності кінцевого продукту не можна простежити перебіг процесу подрібнення.

Своїми дослідженнями Л.Ф. Біленко довів положення про незалежне подрібнення різномісних компонентів в суміші. Причому встановлено, що характеристика крупності компоненту, подрібненого в суміші з іншим компонентом, залишається такою ж, як і при окремому подрібненні його до тієї ж крупності. При подрібненні суміші різномісних матеріалів коефіцієнт випереджувального подрібнення, що показує ступінь попереднього помолу твердого компоненту в схемі подрібнення двокомпонентних сумішей, не залежить від кількості твердої складової в суміші, а визначається тільки властивостями подрібнювальних матеріалів [7].

При тонкому подрібненні корисних копалин різні по крупності фракції матеріалу поведуться по-різному. На першому етапі відносно великий матеріал подрібнюється швидше, і на подрібнення потрібно менше енергії. Але при подрібненні частинок меншого розміру, тобто при збільшенні сумарної поверхні дрібнодисперсної фази для подрібнення частинок потрібно більше енергії. При цьому спостерігається термодинамічна нерівновага двофазної системи, для подрібнення частинок доводиться долати міжатомні зв'язки.

Подрібнення – це комплексний процес, що не закінчується тільки зміною розмірів частинок матеріалу. Особливо це відноситься до тонкого подрібнення мінеральної сировини. Тонке подрібнення – це складний фізико-хімічний процес збільшення потенційної енергії речовини, поверхневої енергії, енергії внутрішньої будови і, як наслідок, підвищення хімічної активності. В ході диспергування матеріалу збільшується питома поверхня частинок, питома поверхня контакту взаємодіючих фаз, що підвищує механоактивацію подрібненого продукту, визначає швидкість протікання подальших тепло- і масообмінних процесів, зміну властивостей матеріалів.

Проблеми подрібнення і механоактивації, їх теоретичні аспекти розглянуті в роботах В.А. Петрова, Є. Є. Андрєєва, Г.С. Ходакова, А.В. Белякова, Л.Ф. Біленко, А.П. Осокіна, Н.С. Прядко та ін. [3, 7-10].

Комплексні теоретичні та практичні дослідження процесів подрібнення, які

реалізовані в сучасних високоенергонапружених млинах, показали, що безпосередньо на процес диспергування витрачається лише незначна частина енергії, що підводиться до оброблюваного матеріалу. Більша її частина перетворюється у тепло, а менша засвоюється, накопичується матеріалом і використовується у вигляді різних дефектів структури і подальшого руйнування [11]. Ця енергія йде на збільшення поверхневої енергії і є корисною роботою подрібнювача.

Дисперсність одержуваного продукту в значній мірі визначає якість отриманих продуктів і впливає на підвищення їх технологічних і споживчих властивостей.

Мета роботи

Вивчення особливостей подрібнення і механоактивації сумішей композиційних матеріалів на основі матеріалу системи Ni-Cr-B-Si.

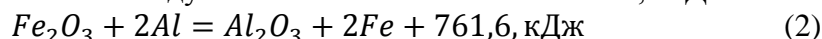
Результати дослідження

Останнім часом створено новий клас композиційних матеріалів для детонаційного напилювання захисних покриттів, що складаються з металевої матриці і містять в якості зміцнюючої дисперсної фази рівномірно розподілені в обсязі синтезовані нанорозмірні (величина зерна близько 15-40 нм.) керамічні частинки [12]. Для порошкових наплавочних сумішей зазвичай в якості матричного матеріалу застосовуються самофлюсуючі порошки системи Ni-Cr-B-Si, наприклад ПГ-10Н-01 [13].

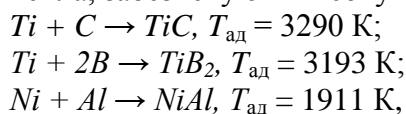
Процес отримання модифікуючого матеріалу із застосуванням саморозповсюджувального високотемпературного синтезу вимагає подрібнення і механоактивації порошкової суміші.

В якості вихідних матеріалів для отримання модифікуючого матеріалу використовували порошки титану марки ВТ1-0, бору В і вуглецю марки ПМ-15. Крім того, для збільшення теплового ефекту СВС процесу в механічну суміш вводили терморегулюючий порошок алюмінід нікелю ПТ-НА-01, алюмінієву пудру (порошок) ПАП-1 ГОСТ 5494-95 і оксид заліза Fe_2O_3 [14].

Тепловий ефект при відновленні оксиду заліза алюмінієм становить 761,6 кДж:



Обрані матеріали в реакціях СВС систем металів з неметалами і металів з металами, крім виділення великої кількості тепла, забезпечують високу температуру процесу:



що сприятливо позначається на процесах синтезування тугоплавких сполук.

Фракційний склад всіх вихідних порошкових компонентів знаходився в межах (63...100) мкм. Співвідношення компонентів в суміші було еквімолярним, щоб в результаті подальшої СВС-реакції відбувався синтез боридів стехіометричного складу.

Послідовність технологічних етапів виготовлення модифікуючого матеріалу наведена на рис. 1.

Порошкова суміш піддавалася механічній активації в планетарних кульових млинах АГО-2: обсяг барабанів – 160 см³, діаметр куль – 4-5 мм, маса куль – 200 г. Час процесу механоактивації варіювався в діапазоні від 2 до 6 хвилин (рис. 2).

На рис. 2 видно, що в результаті механоактивації алюмінієвий порошок піддався пластичній деформації і перетворився в плоскі частинки, інші компоненти конгломерувалися в більші частинки.

Після дроблення отриманого модифікуючого матеріалу, його додавали в матричний матеріал ПГ-10Н-01 в кількості 10-20% і здійснювали механоактиваційну обробку.



Рисунок 1 – Технологічні етапи виготовлення модифікуючого матеріалу

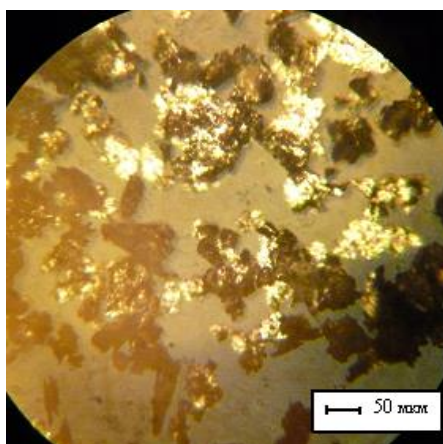


Рисунок 2 – Порошкова суміш після механічної активації

Послідовність технологічних етапів приготування композиційного матеріалу на основі сплаву ПГ-10Н-01 наведена на рис. 3.

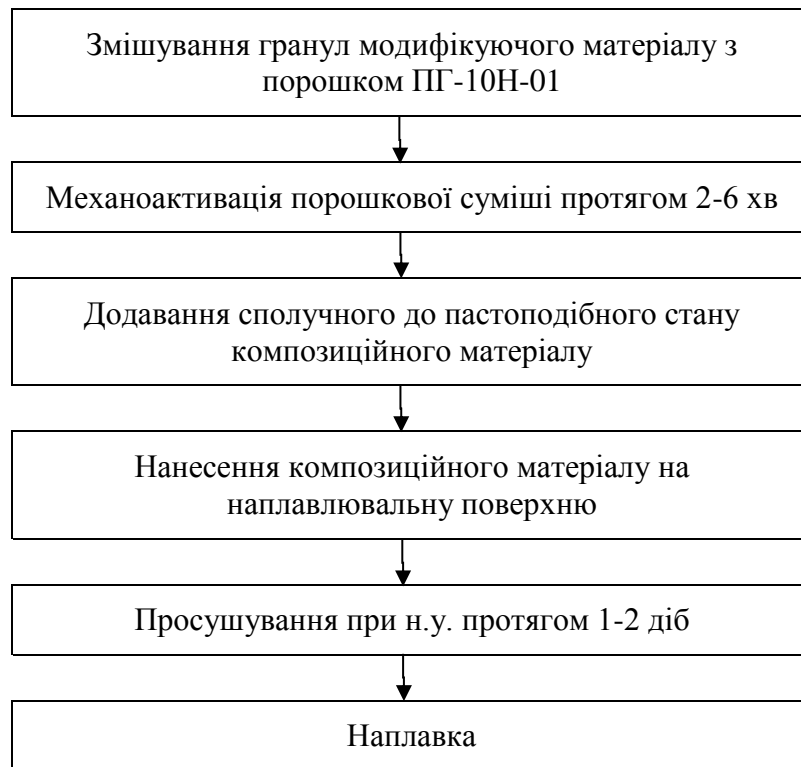


Рисунок 3 – Технологічні етапи приготування і наплавлення композиційного матеріалу

Механоактивація в кульовому млині призводить до подальшого подрібнення і коагуляції частинок композиційного матеріалу між собою і частками ПГ-10Н-01 (кулясті частинки) (рис. 4).

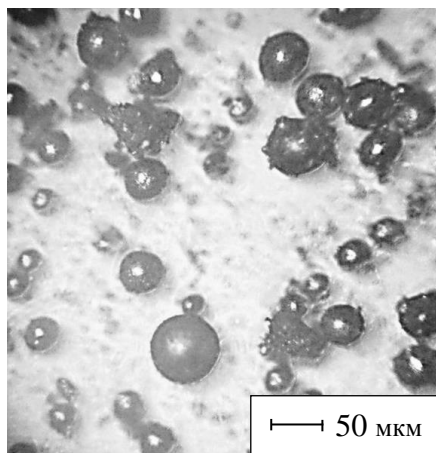


Рисунок 4 – Композиційний матеріал: 10% модифікуючого матеріалу і 90% порошку ПГ-10Н-01 після механоактивації

Гранично невеликий розмір частинок, отриманих при механічному подрібненні – менше 100 нм. У літературі є відомості про отримання порошоків заліза з розміром частинок 10-20 нм і порошоків оксидів вольфраму і молібдену розміром 5 нм.

У механіці існує два підходи до проблеми міцності твердих тіл – механічний і кінетичний. Механічна теорія міцності розглядає руйнування матеріалу як втрату стійкості твердого тіла під впливом зовнішніх і внутрішніх напружень при досягненні порогового значення, характерного для кожного твердого тіла і не вивчає особливості

проходження стадій, що передують руйнуванню. Механічна теорія дозволяє провести кількісну оцінку мінімального розміру частинок при механічному диспергуванні. Для цього розглядається баланс пружної енергії, що накопичується в кожній частинці при подрібненні, і додаткової вільної енергії, що створюється утворенням нової поверхні. На цьому принципі побудована теорія міцності крихких тіл Грифітса [15].

З умови руйнування індивідуальної частинки, яка піддається інтенсивному стисканню між двома тілами, можливо провести оцінку ступеня подрібнення частинок порошкових матеріалів [15]. Такою умовою є нерівність:

$$W_{\text{пр}} \gg g_0 \cdot \Delta S \quad (3)$$

де $W_{\text{пр}}$ – енергія пружної деформації частинки;

g_0 – питома вільна поверхнева енергія;

ΔS – приріст площі поверхні в результаті руйнування.

Енергія пружної деформації частинки $W_{\text{пр}}$ розраховується за формулою:

$$W_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{сер}} \cdot \varepsilon_{\text{сер}} \cdot V \quad (4)$$

де $\sigma_{\text{сер}}$ – середня напруга деформації;

$\varepsilon_{\text{сер}}$ – пружна деформація частинки;

V – об'єм частинки.

Рішення рівняння Грифітса для випадку частинки кубічної форми, у якій розмір ребра дорівнює a :

$$W_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{сер}} \cdot \varepsilon_{\text{сер}} \cdot a^3. \quad (5)$$

Враховуючи, що при руйнуванні кубічної частинки з ребром a утворюються нові частинки з сумарною поверхнею площею $2a^2$, отримаємо вираз:

$$W_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{сер}} \cdot \varepsilon_{\text{сер}} \cdot a^3 \gg g_{\text{еф}} \cdot 2 \cdot a^3 \quad (6)$$

де $g_{\text{еф}}$ – ефективна вільна поверхнева енергія з урахуванням енергії пластично деформованого поверхневого шару. Для випадку ідеально крихкого твердого тіла $g_{\text{еф}} = s$, де s – рівноважне значення питомої поверхневої енергії.

Порошкові частинки різних твердих матеріалів (карбідів, боридів, нітридів та ін.) мають не тільки кубічну, а й кулеподібну форму.

Тоді рішення рівняння Грифітса для випадку сферичної частинки радіусом r матиме вигляд:

$$W_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \sigma_{\text{сер}} \cdot \varepsilon_{\text{сер}} \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \gg g_{\text{еф}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (7)$$

Згідно із законом Гука середня напруга в частці пропорційно середній деформації:

$$\sigma_{\text{сер}} = E \cdot \varepsilon_{\text{сер}} \quad (8)$$

де E – модуль пружності.

Також середня напруга приблизно дорівнює твердості матеріалу HV частинки:

$$\sigma_{\text{сер}} = HV \quad (9)$$

З урахуванням виразів (6-9), отримали:

– для кубічної частинки:

$$\frac{1}{2} \sigma_{\text{max}}^2 \cdot \frac{1}{E} \cdot a^3 \gg \sigma_{\text{еф}} \cdot 2 \cdot a^2 \quad (10)$$

– для кульової частинки:

$$\frac{1}{2} \sigma_{\text{max}}^2 \cdot \frac{1}{E} \cdot r^3 \gg \sigma_{\text{еф}} \cdot r^2 \quad (11)$$

де σ_{max} – найбільша середня напруга в частинці.

$$a_{min} \gg 4 \cdot E \sigma_{ef} \cdot \frac{1}{(HV)^2}, \quad (12)$$

$$r_{min} \gg 3 \cdot E \cdot \sigma_{ef} \cdot \frac{1}{(HV)^2} \quad (13)$$

де a_{min} и r_{min} – мінімальний розмір ребра кубічної частинки і мінімальний радіус сферичної частинки відповідно.

Висновки

На основі аналізу особливостей процесу тонкого подрібненні твердих матеріалів запропоновано технологію отримання модифікуючого матеріалу із застосуванням СВС-процесу для наплавлення зносостійких покриттів на основі самофлюсівного порошку ПГ-10Н-01. З урахуванням механічної теорії міцності наведено алгоритм оцінки ступеня подрібнення частинок порошкових матеріалів.

Список використаних джерел

1. Лузан С.О., Сідашенко О.І., Лузан А.С., Петренко Д.М. Теоретичні основи подрібнення і механоактивації матеріалів для наплавлення і газотермічного напилення. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2019. № 15. С. 8-18.
2. Ляхов Н.З., Талако Т.Л., Григорьева Т.Ф. Влияние механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. Новосибирск: Параллель, 2008. 168 с.
3. Ходаков Г. С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 308 с.
4. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1978. 294 с.
5. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушений крупномасштабных объектов. *ФТТ*. 2005. том 47, вып. 5. С. 788-794.
6. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические принципы прогнозирования механического разрушения. *ДАН СССР*. 1981. 259, №6. С. 1350-1352.
7. Биленко Л.Ф., Орлов Ю.И., Костин И.М. Промышленная проверка положения о независимом измельчении компонентов в шаровой мельнице. *Обогащение руд*. 1974. №4, С. 20-22.
8. Осокин А.П., Сулименко Д.М. Механохимическая активация – перспективное направление в совершенствовании силикатных материалов. *Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее*: материалы Межд. научно-практ. конф. Под ред. П.Д. Саркисова. М.: Информатизация образования, 2003. С. 144-163.
9. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. – 301 с.
10. Прядко Н.С. Развитие теории тонкого измельчения полезных ископаемых дисс. д.т.н., спец. 05.15.08 – обогащение полезных ископаемых. Днепропетровск, 2015. 274 с.
11. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984. 200 с.
12. Лузан С.А., Сідашенко А.И., Лузан А.С. СВС-процессы в технологиях упрочнения и восстановления деталей машин наплавкой и газотермическими способами напыления покрытий (обзор). *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2016. Вип. 6. С. 152-162.
13. Туренко А.Н., Полянский А.С., Лузан С.А. Интегрирование технологии газотермического напыления покрытий и метода электроискрового легирования. *Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов*. 2011. Вып. 28. С. 109-113.

14. Luzan S.A., Sidashenko A.I., Luzan A.S. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using SHS-process. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. V. 42 (4). P. 541-552.

15. Дмитренко Д.В., Бледнова Ж.М., Русинов П.О. Механическое измельчение твердых порошковых материалов. *Научный журнал КубГАУ.* 2015. №112(08).

Аннотация

Лузан С.А. Особенности измельчения и механоактивации смесей разнопрочных материалов шихты для износостойкой наплавки

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка

На основе анализа физико-химических явлений, происходящих при механическом размоле и механической активации порошковых материалов разработана технология синтеза модифицирующего материала с применением СВС-процесса и процесса наплавки износостойких покрытий на основе самофлюсующихся материалов. Предложен алгоритм оценки степени измельчения порошковых материалов.

Ключевые слова: модифицирующий материал, СВС-процесс, механоактивация, измельчение, износостойкость, наплавка.

Summary

Luzan S.A. Features of grinding and mechanical activation of mixtures of different-strength charge materials for wear-resistant surfacing

Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture

Based on the analysis of physical and chemical phenomena that occur during mechanical grinding and mechanical activation of powder materials, a technology for synthesizing a modifying material using the SHS process and the process of surfacing wear-resistant coatings based on self-fluxing materials has been developed. An algorithm for estimating the degree of grinding of powder materials is proposed.

Keywords: modifying material, SHS process, mechanical activation, grinding, wear resistance, surfacing.

References

1. Luzan S.O., Sidashenko O.I., Luzan A.S., Petrenko D.M. Teoretichni osnovi podribnennya i mehanoaktivaciyi materialiv dlya naplavlennya i gazotermichnogo napilennya. *Tekhnichnij servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv.* Harkiv, 2019. № 15. S. 8-18.

2. Lyahov N.Z., Talako T.L., Grigoreva T.F. Vliyanie mehanoaktivacii na processy fazo- i strukturoobrazovaniya pri samorasprostranyayushemsya vysokotemperaturnom sinteze. Novosibirsk: Parallel, 2008. 168 s.

3. Hodakov G. S. Fizika izmelcheniya. M.: Nauka, 1972. 308 s.

4. Tamuzh V.P., Kuksenko V.S. Mikromehanika razrusheniya polimernyh materialov. Riga: Zinatne, 1978. 294 s.

5. Kuksenko V.S. Diagnostika i prognozirovanie razrushenij krupnomasshtabnyh obektov. *FTT.* 2005. tom 47, vyp. 5. S. 788-794.

6. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Fizicheskie principy prognozirovaniya mehanicheskogo razrusheniya. *DAN SSSR*. 1981. 259, №6. S. 1350-1352.
7. Bilenko L.F., Orlov Yu.I., Kostin I.M. Promyshlennaya proverka polozheniya o nezavisimom izmelchenii komponentov v sharovoj melnice. *Obogashenie rud*. 1974. №4, S. 20-22.
8. Osokin A.P., Sulimenko D.M. Mehanohimicheskaya aktivaciya – perspektivnoe napravlenie v sovershenstvovanii silikatnyh materialov. *Nauka i tehnologiya silikatnyh materialov – nastoyashee i budushee: materialy Mezhd. nauchno-prakt. konf. Pod red. P.D. Sarkisova. M.: Informatizaciya obrazovaniya, 2003. S. 144-163.*
9. Perov V.A., Andreev E.E., Bilenko L.F. Droblenie, izmelchenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh. M.: Nedra, 1990. – 301 s.
10. Pryadko N.S. Razvitie teorii tonkogo izmelcheniya poleznyh iskopaemyh diss. d.t.n., spec. 05.15.08 – obogashenie poleznyh iskopaemyh. Dnepropetrovsk, 2015. 274 s.
11. Tihonov O. N. Zakonomernosti effektivnogo razdeleniya mineralov v processah obogasheniya poleznyh iskopaemyh. M.: Nedra, 1984. 200 s.
12. Luzan S.A., Sidashenko A.I., Luzan A.S. SVS-processy v tehnologiyah uprochneniya i vosstanovleniya detalej mashin naplavkoj i gazotermicheskimi sposobami napyleniya pokrytij (obzor). *Tekhnichnij servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv. Harkiv, 2016. Vyp. 6. S. 152-162.*
13. Turenko A.N., Polyanskij A.S., Luzan S.A. Integrirovanie tehnologi gazotermicheskogo napyleniya pokrytij i metoda elektroiskrovogo legirovaniya. *Avtomobilnyj transport : sb. nauchn. trudov. 2011. Vyp. 28. S. 109-113.*
14. Luzan S.A., Sidashenko A.I., Luzan A.S. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using SHS-process. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. V. 42 (4). P. 541-552.
15. Dmitrenko D.V., Blednova Zh.M., Rusinov P.O. Mehanicheskoe izmelchenie tverdyh poroshkovykh materialov. *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2015. №112(08).