

**Антонюк Д.А.,  
Редька М.О.**

Запорізький національний технічний  
університет,  
м. Запоріжжя, Україна

## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ЗНОШУВАННЯ НАПІВЗАКРІПЛЕНИМ АБРАЗИВОМ З ЛОКАЛЬНИМИ УДАРНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ ТА ЗАЩЕМЛЕННЯМ ЧАСТОК

### Вступ

Згідно статистичних даних [1], середній рівень використання промислових відходів в Україні є меншим за 30 %, у той час як у Росії він сягає 53 %, а в деяких високорозвинених країнах – 80 - 90 %. Слід враховувати, що близько 80 % від загальних твердих промислових відходів складають шлаки металургійних підприємств, які є основними бюджетоутворюючими підприємствами України. Отже, ефективне використання вторинних ресурсів, особливо в кризові періоди, є нагальною проблемою як світової, так і української промисловості.

### Постановка проблеми

Значні обсяги шлакових відвалів металургійних виробництв обумовлюють можливість повторного їх використання в багатьох галузях промисловості України після відповідного подрібнення, розділення та фракціонування. Особливістю цих матеріалів є наявність у структурі металевих включень у вигляді зростків металу та шлаку. Разом з цим у поверхневих шарах шлаку, окрім безпосередньо вкраплень металу, відбувається утворення склоподібної та дрібнокристалічної фази, яка характеризується високою твердістю та абразивністю [2, 3]. Тому під час подрібнення шлаків у диспергаторах, дезінтеграторах, спеціальних дробарках та інших установках їх робочі органи (била, молотки, пластини тощо) працюють в умовах складного механізму ударно-абразивного руйнування, а тому мають низький строк експлуатації. Перспективним методом збільшення терміну служби цих інструментів є вибір оптимального зносостійкого матеріалу (підбір марки сталі та режимів термічного оброблення; отримання покриття шляхом наплавлення зносостійкими сплавами; використання комбінованого інструменту «сталь – зносостійка вставка» тощо) з урахуванням факторів зовнішнього середовища, умов зношування диспергаторів, матеріалознавчих і технологічних параметрів отримання металу.

### Аналіз літературних джерел

Відповідно до запропонованого раніше багатокритеріального підходу до дослідження зносостійкості деталей машин [4, 5], аналіз апріорної інформації проводили шляхом поетапного вивчення характеристик робочого органу, умов зношування та властивостей зовнішнього середовища, а також структурно-фазового стану й фізико-механічних показників матеріалів для цього механізму контактної взаємодії.

*Характеристика робочого органу.* Процеси подрібнення шлакових відходів відбувається у відцентрово-ударних установках (диспергаторах, дробарках, дезінтеграторах), які випускаються провідними світовими виробниками [6]: «Barmac» (США), «Kolberg Pioneer» (США), «Krupp» (Німеччина), «SBM» (Австрія), «Kroft Imprise» (Великобританія) тощо. Для подрібнення різних фракцій фероматеріалів застосовуються біла, молотки, пластини різної форми, конструкції та геометричних розмірів (рис. 1), які характеризуються високою зносостійкістю, здатністю легко замінюватися, витримувати значні ударні навантаження та навантаження від відцентрових сил. Робочі органи зазвичай виготовляють зі сталі 110Г13Л, що забезпечує їх досить високу зносостійкість, але іноді ускладнює конструкцію кріплення до ротора через складність механічної обробки цієї сталі.

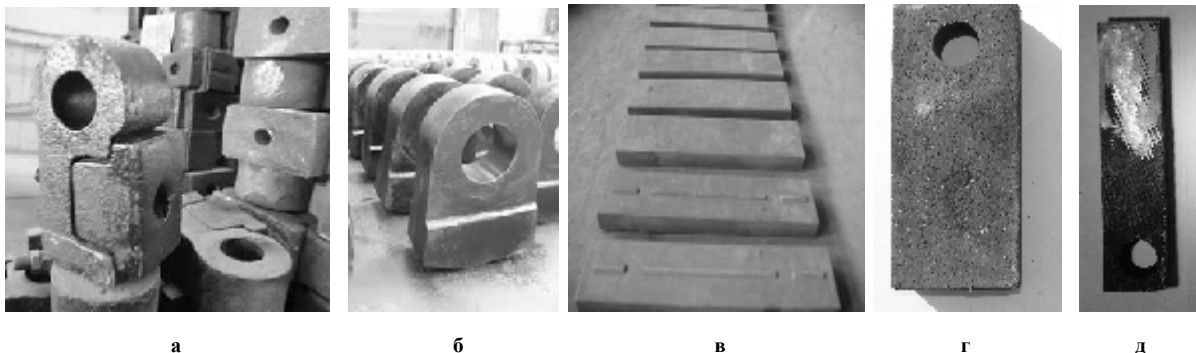


Рис. 1 – Зовнішній вигляд робочих органів відцентрово-ударних установок:  
а, б – молотки; в, г, д – біла

Під час розроблення конструкції бил і молотків беруть до уваги можливість їх багаторазового використання шляхом перестановок, перевертання тощо. Молотки, зазвичай, також мають декілька робочих поверхонь. Після зносу однієї сторони їх переставляють, і вони продовжують служити майже такий самий час.

Одним із шляхів підвищення зносостійкості робочих органів диспергаторів є наплавлення їх зносостійкими сплавами. В цьому випадку їх виготовляють зі звичайної сталі, а на робочі поверхні за допомогою спеціальних присадкових матеріалів наплавляють шар зносостійкого металу. Цей спосіб дозволяє використовувати широку гаму зносостійких сплавів для умов зношування робочих органів диспергаторів та проводити наплавлення без демонтажу бил і молотків.

*Умови зношування.* Результати спостереження за динамікою спрацьовування робочих елементів [7, 8] свідчать про незначний термін їх експлуатації (16 годин), що пояснюється складними умовами зношування (високі швидкості, тиск, ударні навантаження). Аналіз контактної взаємодії (рис. 2) дозволяє пояснити механізм зношування як сукупність складних процесів руйнування.

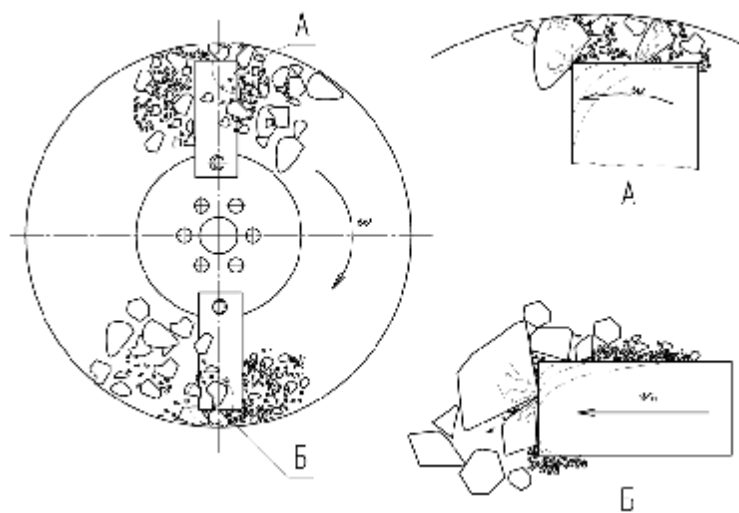


Рис. 2 – Схема зношування бил диспергатора:  
А – защемлення, Б – ударна та ковзна взаємодія

На торці робочих органів диспергаторів відбувається защемлення, подрібнення та стирання абразиву між торцем била та стінкою корпуса. На передній лобовій частині спостерігається зношування напівзакріпленим абразивом при ковзній взаємодії з кутом атаки  $45\text{--}80^\circ$ , а також наявність незначних локальних ударних навантажень, а на бокових поверхнях – лише ковзний контакт з кутом атаки  $\alpha_{\text{атаки}} = 5\text{--}10^\circ$ . Хоча специфіка механізму контактної взаємодії робочого органу диспергатора з абразивним середовищем практично не вивчена, зазначене вище дозволяє дійти висновку про наявність процесів зношування напівзакріпленим абразивом з локальними ударними навантаженнями та защемленням часток. Однак повне розуміння трибологічних та фізичних процесів в контактній парі «робочий орган – абразивне середовище» вимагає проведення додаткових спрямованих досліджень.

*Характеристика матеріалів для робочих органів диспергаторів.* Аналіз літературних джерел [9 - 13] свідчить, що високу зносостійкість в умовах абразивного зношування показують матеріали з нестабільною аустенітною, аустенітно-карбідною структурою, а також зі структурою мартенситу з нестабільним аустенітом. Легований аустеніт за міцністю посідає проміжне місце між феритом і мартенситом, має значну в'язкість, близькі параметри ґратки з карбідною фазою, що сприяє кращому закріпленню карбідів в основі матеріалу, тим самим підвищує ударно-абразивну зносостійкість [11]. Недостатня зносостійкість стабільного аустеніту призводить до необхідності застосування для умов зношування закріпленим і напівзакріпленим абразивом комплексної матриці, що містить аустеніт і мартенсит. Визначення оптимального співвідношення фаз мартенсит / аустеніт залежить від кількості й властивостей твердої фази, а також від наявності та величини ударного навантаження. Чим воно більше, тим більше в сплаві повинно бути аустеніту. При цьому рекомендується, щоб мартенсит був низьковуглецевим. Це пов'язане з тим, що поверхня такого матеріалу має високу опірність абразивному зношуванню, а наявність в'язкої аустенітної серцевини забезпечує відсутність тріщин і відколів металу. Щодо виготовлення бил диспергаторів відсутня однозначна оцінка необхідної кількості метастабільного аустеніту в структурі наплавленого металу. Саме тому, вважаємо, що для умов зношування напівзакріпленим абразивом з локальними ударними навантаженнями та защемленням часток доцільно випробувати матеріали із аустенітною, аустенітно-мартенситною та ледебуритною структурою з наявністю зміцнювальної фази у вигляді карбідів, боридів і карбоборидів.

За результатами літературного огляду, **мету дослідження** можна сформулювати як: теоретичний та експериментальний аналіз зносостійкості сталей і сплавів, які використовуються для умов абразивного, ударно-абразивного зношування напівзакріпленим і закріпленим абразивом, у промислових умовах експлуатації диспергаторів. Для цього були поставлені такі завдання:

1. Спроекувати та розробити експериментальний диспергатор-подрібнювач для проведення серії промислових випробувань.
2. Запропонувати геометричну форму експериментального била з можливістю наплавлення робочої ділянки зносостійкими сплавами.
3. Провести випробування серії сталей і сплавів, які використовуються для умов інтенсивного абразивного й ударно-абразивного зношування.
4. Сформулювати основні вимоги до хімічного складу, структурно-фазового стану та фізико-механічних властивостей матеріалу для деталей, що працюють в умовах зношування напівзакріпленим абразивом з локальними ударними навантаженнями та защемленням часток.

### Методика проведення дослідження

Дослідження матеріалів в аналізованих умовах зношування проводили за допомогою спеціально розробленого обладнання (рис. 3), призначеного для перероблення шлакових відвалів металургійних підприємств. Конструктивно воно складалося з диспергатора – установки для подрібнення фероматеріалів окремої фракції і повітряних класификаторів, які є альтернативою віброгрохотам при фракціонуванні дрібних фракцій (менше 5 мм). Оскільки процес подрібнення визначається лише кінетичною енергією геометрії била, в роботі використали робочі органи за формою рис. 4.

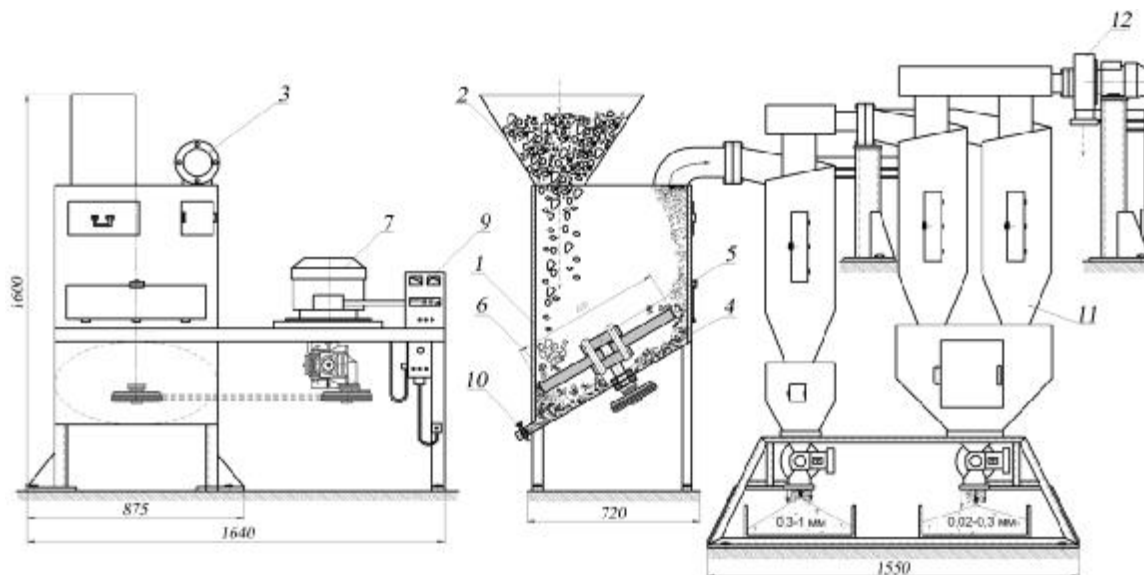


Рис. 3 – Конструкція установки диспергатора-подрібнювача АІСС-07/50:

- 1 – рамний корпус; 2 – завантажувальний желоб; 3 – патрубок для вивантаження;
- 4 – ротор; 5 – диск кріплення бил; 6 – било (робочий орган диспергатора); 7 – електропривод;
- 8 – клино-ременна передача; 9 – шкаф керування; 10 – механізм вилучення тіл, що не подрібнені;
- 11 – повітряний класифікатор; 12 – транспортний вентилятор

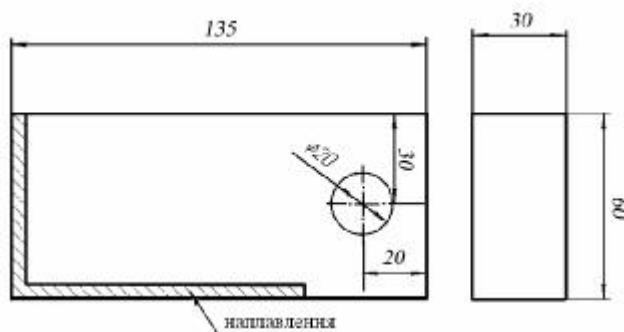


Рис. 4 – Форма експериментального била диспергатора-подрібнювача та схема його наплавлення

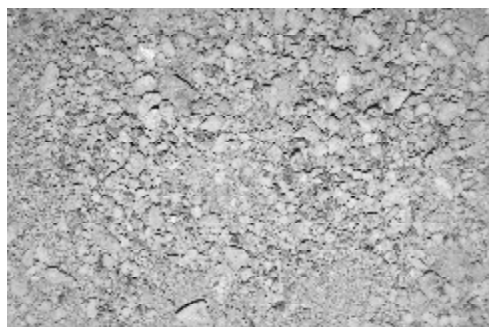
Для промислових випробувань стандартних матеріалів, що застосовуються для умов інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування напівзакріпленим і закріпленим абразивом, виконували наплавлення за схемою рис. 4.

В якості абразивного матеріалу використовували шлаки металургійних підприємств м. Запоріжжя фракції 0 - 10 мм та 10 - 60 мм (табл. 1, рис. 5).

Таблиця 1

**Фізико-механічні характеристики шлаків  
для промислових випробувань дослідних зразків**

Найменування матеріалу	Хімічний склад, %								Твердість по Моосу	Межа міцності			Форма зерен
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO		на стиск	при ударі	на роздав.	
0 - 10 мм не магнітний	13,5	4,15	27,0	24,2	0,8	2,1	2,2	25,13	6,9 - 7,2	$0,9 \times 10$ Н/м <sup>2</sup>	97,5 МПа	16,6 %	ку- това
10 - 60 мм не магнітний	16,3	4,34	26,8	24,4	0,9	2,24	2,15	16,2	6,9 - 7,2	$0,7 \times 10$ Н/м <sup>2</sup>	97 Па	16,6 %	ку- това



а



б

Рис. 5 – Зовнішній вигляд шлаків фракцією 0-10 мм (а) та 10-60 мм (б)

У роботі досліджували сталі та сплави із різним співвідношенням  $\gamma / \alpha$ , твердістю, мікротвердістю зміцнювальної фази тощо. Для проведення експериментів використовували наплавлювальні матеріали (електроди, порошкові дроти, порошки) Т-590, Т-620, НР-70, ЦС-1, 300Х20Р2Ф1, ПГ-Ср3 (50Х15Н78С5Р6), ПП-202 (ІЕЗ ім. Є.О. Патона). Натурні зразки бил виготовляли зі сталі 110Г13, високхромистого чавуну 300Х16Г5 і сталі Х12 із різними режимами термічного оброблення. Окрім цього випробували металокерамічні пластини з твердого сплаву ВК-8.

Твердість НРС визначали на твердомірі типу ТК-2. Для більш детального дослідження властивостей наплавлених сплавів вимірювали мікротвердість основних структурних складових за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3 при навантаженні на індентор 50 г.

### Результати дослідження

Для вирішення поставленого завдання систематизовані відомості про зносостійкі матеріали, що застосовуються для умов інтенсивного абразивного і ударно-абразивного зношування. Проведені випробування дозволили розрахувати масовий знос експериментальних бил та, виходячи з цього, відносну зносостійкість дослідних матеріалів (табл. 2, рис. 6).

Виходячи з втрат маси за однаковий проміжок часу, досліджувані сталі та сплави умовно розподілили на кілька груп:

1) сталі та сплави із агрегатною твердістю < 52–54 HRC та мікротвердістю зміцнювальної фази  $H_u < 12 - 16$  ГПа: електроди Т-590 та Т-620, сталь 110Г13Л, електрод НР-70, порошок для наплавлення та наплення ПГ-СР3;



2) матеріали, що схильні до зміцнення в процесі взаємодії із абразивним середовищем через  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення: сталь X12 із температурами закалки 975, 1100 та 1170 °С, 300X16Г5;

3) гетерогенні сплави, що містять > 60 % зміцнювальної фази у вигляді карбідів, боридів і карбоборидів із мікротвердістю > 18 ГПа: 300X20P2Ф1, ПП-АН202, металокерамічний сплав ВК-8.

Перша група матеріалів характеризується незначною зносостійкістю в умовах зношування бил диспергаторів через недостатню агрегатну твердість та мікротвердість основи й надлишкової зміцнювальної фази. Матеріали другої групи, в структурі яких міститься мартенсит деформації, схильний до зміцнення в процесі взаємодії з абразивним середовищем, проявили себе краще в умовах зношування напівзакріпленим абразивом із локальними ударними навантаженнями та защемленням часток. При чому оптимальне співвідношення  $\gamma / \alpha$  для величини енергії удару та особливостей процесу зношування робочих органів диспергаторів напівзакріпленим абразивом у цих сталей складає 40/60. Високу зносостійкість показав сплав 300X16Г5, що пояснюється тим, що його структурно-фазовий стан представлений легованим аустенітом (має значну в'язкість, близькі параметри ґратки з карбідною фазою) та карбідною фазою. Це підвищило його ударно-абразивну зносостійкість. Сплави третьої групи мають найбільшу зносостійкість, однак через низькі технологічні властивості на дослідних зразках з'явилась значна кількість тріщин та відколів унаслідок дії ударних навантажень.

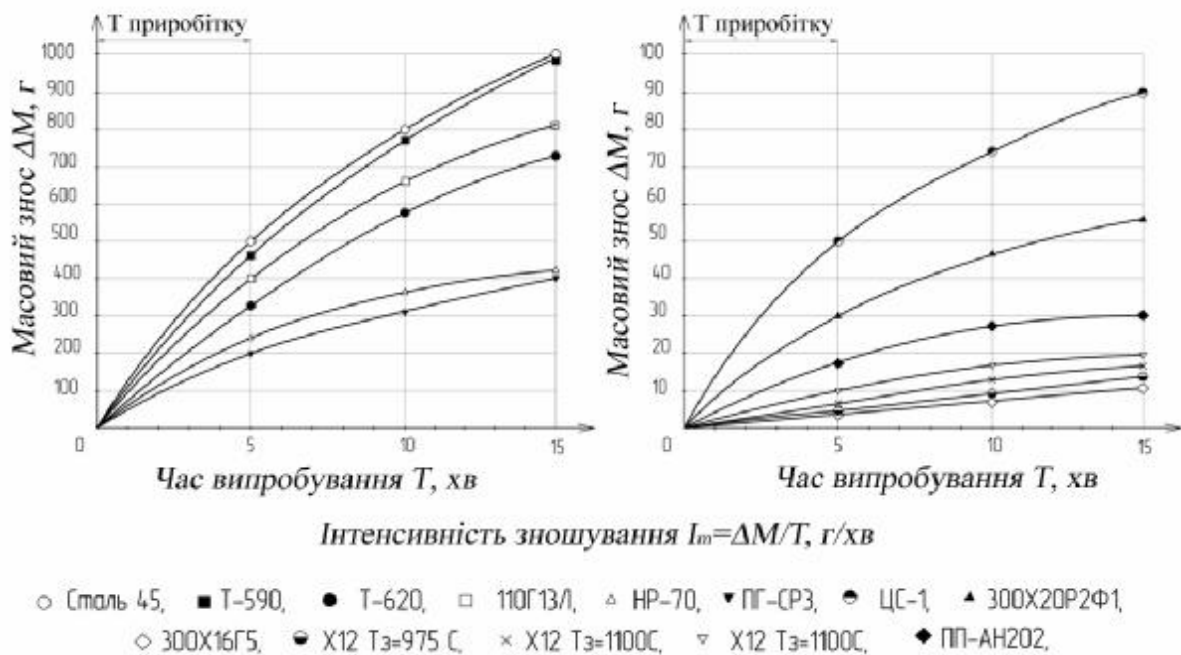


Рис. 6 – Інтенсивність зношування сталей і сплавів в умовах експлуатації бил диспергаторів

Таблиця 2

№ зразка	Матеріал	Середній вміст легуючих елементів у сплаві, %									Твердість HRC	Фазовий склад, %		Кількість зміцнювальної
		C	Cr	Mn	Si	Ni	W	V	B	Інші		α	γ	
1	T-590	2,75	22,5	1,3	1,93	-	-	-	1,0	-	50-55	90	10	50
2	T-620	3,25	22	1,1	2,2	-	-	-	1,2	1,2Ti	50-60	65	35	55
3	HP-70	0,38	1,0	2,0	0,15	-	-	-	-	0,9Mo	42	100	-	1,5
4	ЦС-1	3,0	27	1,35	3,5	4,0	-	-	-	-	45-54	70	30	60
5	ПГ-CP3	1,0	16,5	2,5	3,5	78,0	0,4	-	3,8	-	47-52	-	-	-
6	300X20P2Ф1	3,0	19,5	-	-	-	-	0,9	1,7	-	60	70	30	70
7	ПП-АН202	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50-55	90	10	60
8	110Г13Л	1,4	1,0	14	0,8	1,0	-	-	-	0,3Cu	59	-	100	2,5
9	300X16Г5 т.о.	3,0	16,5	5,4	0,45	0,35	-	-	-	-	60	-	-	70
10	X12 $t_3=975\text{ C}$	2,2	14,0	0,45	0,40	0,35	0,2	0,15	-	0,3Cu	59-62	60	40	19
11	X12 $t_3=1100\text{ C}$	2,2	14,0	0,45	0,40	0,35	0,2	0,15	-	0,3Cu	52	23	87	9
12	X12 $t_3=1170\text{ C}$	2,2	14,0	0,45	0,40	0,35	0,2	0,15	-	0,3Cu	55	0	-	100
13	БК-8	металокерамічний сплав 92% WC, W <sub>2</sub> C та 8% Co								92 WC	88HRA	-	-	92
00	Еталон Сталь 45 $t_3=870\text{ C}$	0,45	0,25	0,65	0,32	-	-	-	-	0,3Cu	HV166	-	-	8,73

## Висновки

Проведені дослідження дозволили дійти таких висновків.

1. Внаслідок інтенсивного абразивного зношування робочі органи диспергаторів для подрібнення шлаків металургійних виробництв потребують застосування зносостійких матеріалів та впровадження відповідних технологій зміцнення, однією з яких є нанесення зносостійких наплавов.

2. Специфіка механізму контактної взаємодії робочого органу диспергатора з абразивним середовищем практично не вивчена, однак результати проведених досліджень дозволяють дійти висновку про наявність процесів зношування напівзакріпленим абразивом з локальними ударними навантаженнями та защемленням часток. Детальне розуміння трибологічних та фізичних процесів у контактній парі «робочий орган – абразивне середовище» вимагає проведення додаткових спрямованих досліджень.

3. Спроектвані та розроблені дослідний диспергатор-подрібнювач, а також експериментальне било з можливістю наплавлення робочої ділянки зносостійкими сплавами, дозволили створити умови для проведення серії досліджень матеріалів в умовах зношування напівзакріпленим абразивом з локальними ударними навантаженнями та защемленням часток.

4. Аналіз результатів промислових випробувань стандартних сталей і наплавлювальних матеріалів, які застосовуються для умов інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, показав, що для зміцнення робочих органів диспергаторів доцільно рекомендувати матеріали з аустенітною чи аустенітно-мартенситною структурою, наявністю не менше 40 - 50 % зміцнювальної фази за агрегатної твердості 60HRC із мікротвердістю зміцнювальної фази не менше  $H_{\mu} = 22 - 24$  ГПа, орієнтовною вихідною мікротвердістю основи сплаву  $H_{\mu} = 0,5 - 0,6$  ГПа та одержаною мікротвердістю в межах 0,8 - 1,0 ГПа.

## Література

1. Шадрюнова И.В. Перспективы применения центробежно-ударной техники для переработки металлургических шлаков [электронный ресурс] / И. В. Шадрюнова, Е. В. Колодежная. – 2011. – Режим доступа: [www.uralomega.ru/infonews/articles/perspectives2/](http://www.uralomega.ru/infonews/articles/perspectives2/).
2. Довгопол В.И. Использование шлаков черной металлургии / В. И. Довгопол. – М.: Металлургия, 1978. – 289 с.
3. Купряков Ю.П. Шлаки медеплавильного производства и их переработка / Ю. П. Купряков. – М.: Металлургия, 1987. – 201 с.
4. Износостойкость сплавов, восстановление и упрочнение деталей машин: учебное пособие / Под ред. В.С. Попова. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2006. – 420 с.
5. Попов С. Н. Решение задач трибоматериаловедения на основе системных многокритериальных методов математического анализа износостойкости сталей и сплавов / С.Н. Попов, Д.А. Антонюк, Т.В. Попова // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2004. – № 4. – С. 172-181.
6. Обзор рынка дробильного оборудования России [электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: [http://maxi-exkavator.ru/news/inf\\_news/~id=1750](http://maxi-exkavator.ru/news/inf_news/~id=1750).
7. Попов С.М. Аналіз механізму зношування бил диспергаторів / С.М. Попов, Д.А. Антонюк, М.О. Редька // Тези міжнар. наук.-практ. конференції «Ольвійський форум – 2011: стратегії України в геополітичному просторі» – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Том 11. – С. 3-4.
8. Попов С.М. Підвищення зносостійкості робочих органів диспергаторів для подрібнення шлаків металургійного виробництва / С.М. Попов, Д.А. Антонюк, М.О. Редька // Матеріали Міжнар. науково-технічної конференції «Сучасні аспекти металознавства та термічної обробки металів» (м. Маріуполь). – Маріуполь.: ПДТУ, 2010. – С. 130 - 131.
9. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли. – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
10. Виноградов В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Альбагачиев. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
11. Малинов В.Л. Разработка экономнолегированных наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / Малинов Владимир Леонидович. – Мариуполь, 1999. – 135 с.
12. Попов В.С. Износостойкость прессформ огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Брыков, Н.С. Дмитриченко. – М.: Металлургия, 1971. – 220 с.
13. Данильченко Б.В. Выбор износостойкого наплавленного металла для работы в условиях абразивного изнашивания / Б.В. Данильченко // Сварочное производство. – 1992. – № 5. – С. 31-33.

Надійшла 16.07.2012