

## РУБРИКА:

# ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

## НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.891

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ ЗНОШУВАННЯ ЗАКРІПЛЕНИМ АБРАЗИВОМ

**Попов Сергій Миколайович**, кандидат технічних наук, доцент  
Доцент кафедри обладнання та технології зварювального виробництва  
Запорізького національного технічного університету, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063  
Контактний тел.: 8 (050) 341-72-17  
E-mail: spopov@zntu.edu.ua

**Антонюк Дмитро Анатолійович**  
Старший викладач кафедри обладнання та технології зварювального виробництва  
Запорізького національного технічного університету, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063  
Контактний тел.: 8 (050) 690-88-34  
E-mail: oasd@mail.ru

*Наведені результати роботи з удосконалення методики випробування матеріалів при зношуванні закріпленням абразивом з можливістю проведення досліджень в широкому діапазоні варіювання факторів. Проведено комплекс випробувань та аналіз інтенсивності зношування стандартних зносостійких наплавлювальних матеріалів.*

*Ключові слова: зношування закріпленням абразивом, зносостійкість, інтенсивність зношування, зносостійкі наплавлювальні сплави.*

*Представлены результаты работы по усовершенствованию методики испытания материалов при изнашивании закрепленным абразивом с возможностью проведения исследований в широком диапазоне варьирования факторов. Проведен комплекс испытаний и анализ интенсивности изнашивания стандартных износостойких наплавочных материалов.*

*Ключевые слова: изнашивание закрепленным абразивом, износостойкость, интенсивность изнашивания, износостойкие наплавочные сплавы.*

*There are presented results of work aimed at improvement of methods of test of materials at wear process by fixed concrete abrasive with the possibility of carrying out of researches in a wide range of factors variation. The complex of tests and analysis by definition of intensity of wear process standard wearproof deposited materials are spent.*

*Keywords: wear by fixed abrasive, wearresistance, wear intensity, wear-resistant deposited alloys.*

## 1. Вступ

Дослідження процесів, що відбуваються на поверхнях тертя та зношування при взаємодії робочих органів технологічного обладнання з абразивним матеріалом є важливим та необхідним завданням, оскільки дозволяє зрозуміти механізм руйнування поверхневого шару, а отже запропонувати необхідні заходи (зміцнювальне покриття, термічна чи хіміко-термічна обробка тощо) з метою зменшення їх спрацьованості. Визначення механізму руйнації, а також порівняння зносостійкості різних матеріалів в конкретних умовах зношування пов'язано з необхідністю проведення експериментальних випробувань, при цьому промислові дослідження не дозволяють швидко проводити оцінку зносостійкості сплавів. Варіювання параметрами зрощувального середовища, а також режимами експлуатації дає можливість моделювати реальні процеси зношування в лабораторних умовах експлуатації. Тому з метою дослідження процесів, що відбуваються при взаємодії робочих органів з закріпленим абразивним матеріалом, порівняння зносостійкості матеріалів із різним структурно-фазовим станом в конкретних специфічних умовах зношування з можливістю варіювання режимами експлуатації, поставлено завдання розробити методику випробування сталей і сплавів на зносостійкість.

## 2. Аналіз літературних джерел

Проведені раніше дослідження [1] дозволили встановити, що лабораторні методи випробування при визначенні триботехнічних властивостей зносостійких матеріалів дозволяють у незначний термін дослідити значну кількість зразків із різних сталей і сплавів, однак не завжди можуть забезпечити високу збіжність з результатами випробувань, отриманими в реальних умовах експлуатації. Окрім цього, випробування сучасних високозносостійких матеріалів із вмістом значної кількості зміцнювальної фази (до 60–75 %) є тривалим процесом, а прискорення дослідів завдяки застосуванню більш абразивних середовищ або жорсткості режимів випробувань (збільшення тиску, швидкості тощо) призводить до пониження ролі трибоматеріалознавчих факторів у процесі зношування. Однак не завжди у реальних умовах абразивної руйнації деталей дорожньо-будівельного обладнання можливо дослідити зносостійкість матеріалів, а тим більше провести кількісну оцінку інтенсивності зношування.

Аналіз відомих методик [2, 3] випробування матеріалів при зношуванні закріпленим абразивом дозволив встановити, що всі вони в основному засновані на взаємодії нерухомо чи рухомо-закріпленого зразка з абразивною шкуркою

чи брусом монолітного абразиву. Серед яких широко застосовуються випробування на машині Х-4Б (ГОСТ 17367–71), на машині МПІ, за методикою ASTM G56 (США) та інші.

Відомі спеціальні установки, які моделюють умови зношування робочих органів різноманітного обладнання. Так, наприклад розроблено [4] пристрій для випробування матеріалів на тертя та зношування, в якому зразок з інструментального матеріалу розташовують на балці над контрольним зразком, виготовленим з природного камення, який в свою чергу приводиться і обертається від шпінделя токарного верстату. Балка з противагою шарнірно затискається на кронштейні, який в свою чергу встановлений і закріплений на супорті токарського верстата. Для зміни величини сили тертя між зразком, що випробовується та контрольним зразком на балці, розташовано вантаж, величина якого змінюється.

Знайшов застосування пристрій для випробування покриттів на стійкість до стирання в умовах сухого тертя [5]. Установка включає рухома каретку для закріплення зразка, кривошипно-шатунний механізм, електропривод, змінні елементи для передачі зусиль, абразивний інструмент та пристрій для створення навантаження.

Аналіз різноманітних способів визначення зносостійкості сталей і сплавів дозволив встановити, що основними вимогами до випробувань є: твердість абразивних часток повинна бути вищою твердості зношуваного матеріалу; в контакт з контр-тілом повинна безперервно чи періодично вводитися нова поверхня абразивного матеріалу, що необхідно для виключення впливу на результати випробувань засалювання абразиву продуктами зносу; при визначенні відносної зносостійкості матеріалів еталонний зразок обирають таким, щоб його структура не змінювалась в процесі тертя та зношування, а твердість була нижчою твердості досліджуваних матеріалів. Відповідно до цих вимог розроблено метод [6] випробування матеріалів в умовах зношування закріпленим абразивом, сутність якого полягала у тому, що за однакових умов проводили одночасне стирання 4–8 зразків випробуваного матеріалу брусом асфальтобетонного абразиву, що подавався із постійним (заданим) зусиллям. Після випробувань визначали масовий знос зразків за конкретний проміжок часу або шлях тертя.

Однак проведений значний обсяг експериментальних досліджень матеріалів із різним структурно-фазовим станом та фізико-механічними властивостями в досить широких межах варіювання параметрами експлуатації, показав, що методика має деякі недоліки, серед яких:

➔ значна поверхня контакту зразка з абразивним матеріалом, а також невеликий радіус пристосування для закріплення зразків, обумовлює

необхідність врахування великого періоду приробітку при проведенні досліджень;

→ відсутність вимірювальних приладів тиску та температури не дозволяє адекватно варіювати параметрами зрощувального середовища;

→ оригінальна форма зразків (з наявністю пазів для закріплення в пристосуванні) обумовлює необхідність проведення попередньої складної механічної обробки.

Тому мета роботи полягала в удосконаленні розробленої раніше методики з метою розширення діапазону можливих факторів варіювання та зменшення кількості дослідів.

### 3. Удосконалення методики випробування зразків

Установка складається з токарського верстату, пристосування, що забезпечує закріплення зразків, пристрою, який імітує абразивні навантаження й ударний вплив, і абразивного монолітного матеріалу.

Удосконалені зразки (17×10×7) з досліджуваних матеріалів встановлюються під кутом  $\alpha = 8-12^\circ$  у вузлі кріплення та обертання зразків, який складається з вала 1 (рис. 1), що закріплюється в патроні токарського верстату. На поверхні вала розташовуються зразки 4 (по три одиниці в кожному пазі), які з'єднуються між собою дротом 3 та фіксуються рухомими упорами 2, що переміщуються по різьбленню.

Утримання й подача абразивного матеріалу (брусок асфальтобетону циліндричної форми) здійснюється за допомогою додаткового пристосування (рис. 2).

Брусок асфальтобетону 7, який за геометричними характеристиками відповідає ГОСТ 9128-97, заключений в оболонку 6, встановлюється в корпусі пристосування 1, яке у свою чергу закріплюється в різцетримачі токарського верстата. Робочий хід пристосування забезпечується автоматичною подачею супорта токарського верстата. Компенсація зносу бруска асфальтобетону регулюється гвинтом, що через стрижень 2 забезпечує переміщення притиску 4. У момент обертання обой-

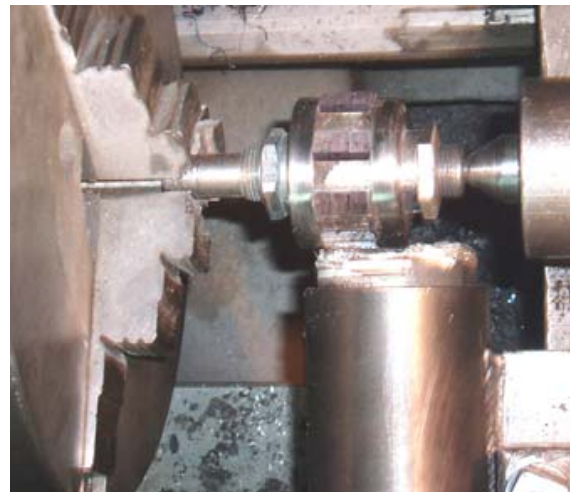
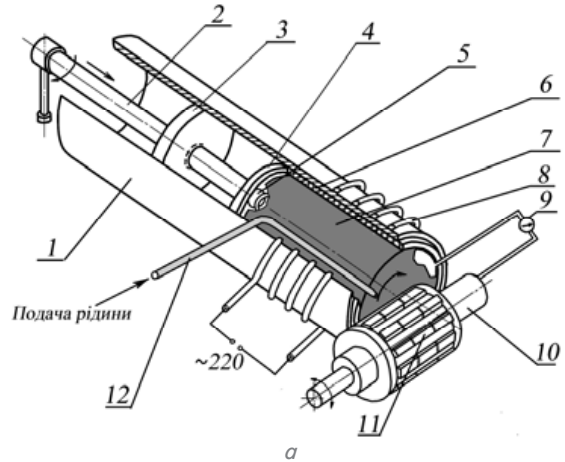


Рис. 2. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) установки для випробування зразків при зношуванні закріпленим абразивом:

1 — корпус пристосування; 2 — обертаний стрижень; 3 — нерухомий упор; 4 — рухомий упор; 5 — кулька для забезпечення мінімальної площі контакту абразиву з упором; 6 — мастильний й утримуючий шар; 7 — брусок асфальтобетону; 8 — спіраль нагрівального елемента; 9 — динамометр; 10 — вузол закріплення зразків; 11 — зразки випробуваного матеріалу; 12 — трубка для подачі охолоджувальної рідини

ми 10 зі зразками 11 і руху бруска асфальтобетону, оболонка виконує роль змащувального й утримуючого елемента, а наявність рухомого упору 4

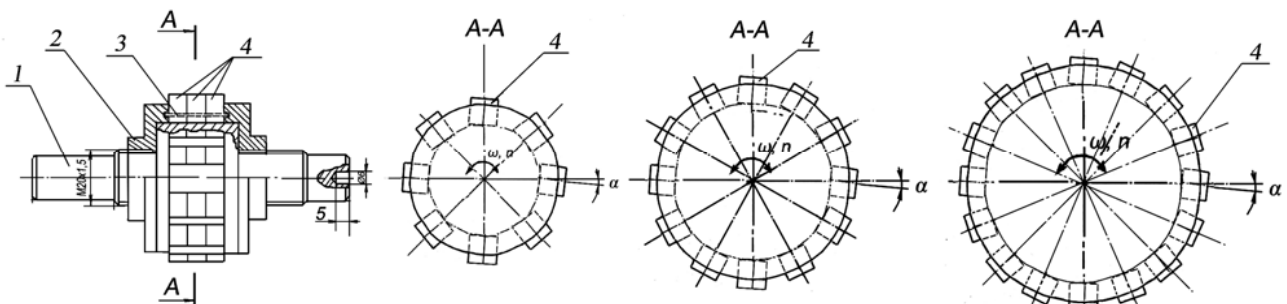


Рис. 1. Вузол для кріплення та обертання зразків (різних розмірів):

1 — вал; 2 — рухомий упор; 3 — з'єднувальний дріт; 4 — зразки з досліджуваних матеріалів

і зазори між корпусом пристосування, у які вводиться графітовий змащувальний шар, забезпечують обертання абразиву, що імітує обертання різця в різцетримачі. Контроль температури в місці контакту зразка з асфальтобетоном проводиться за допомогою пірометру Raytek.

Зразки з асфальтового бетону для лабораторних випробувань виготовляли на ВАТ «Запорізький асфальтобетонний завод» відповідно до ДСТУ БВ.2.7–89–99 (12801–98). Суміш готували в лабораторній лопатевій мішалці, яка обладнана обігрівальним пристроєм. Щебінь, пісок і мінеральний порошок зважували в ємності, нагрівали (періодично перемішуючи) до температури 150–170 °С з додаванням необхідної кількості нагрітої в окремій ємності в'язкої речовини. Зразки мали циліндричну форму, отриману ущільненням суміші в порожніх сталевих циліндрах. Для випробувань в основному використали бруски асфальтобетону двох типів фракції абразивних зерен: 5–10 мм та 5–20 мм.

Зважування зразків виконували на аналітичних вагах (марка ВЛА-200-М) з точністю до  $1 \cdot 10^{-4}$  г. Перед зважуванням зразки промивали в органічному розчиннику і просушували.

Здатність матеріалів опиратися впливу монолітного абразиву оцінювали за показником відносної зносостійкості, яка визначалась відношенням втрати маси зразків з еталонного ( $\Delta m_{\text{ет}}$ ) та випробуваного ( $\Delta m_{\text{вип}}$ ) матеріалів за рівні цикли тривалості випробувань з урахуванням щільності матеріалів:

$$\epsilon_{\text{Л}} = \frac{\sum \Delta m_{\text{ет}} \rho_{\text{вип}}}{\sum \Delta m_{\text{вип}} \rho_{\text{ет}}}, \quad (1)$$

де  $\rho_{\text{ет}}$ ,  $\rho_{\text{вип}}$  — щільність еталонного та досліджуваного матеріалів, г/см<sup>3</sup>.

Інтенсивність зношування зразка розраховували з виразу:

$$I_{\text{Л}} = \frac{\Delta m}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n \cdot t}, \quad (2)$$

де  $\Delta m$  — втрати маси зразка;  $R$  — радіус вузла кріплення зразків;  $t$  — час випробування;  $n$  — частота обертання зразків.

Таким чином, за рахунок модернізації методики випробування зразків при зношуванні закріпленим абразивом отримані наступні результати:

1. Застосування вузла кріплення зразків різних розмірів, а також спрощеної конфігурації зразків дозволяє змінити геометрію площі контакту зразка та збільшити кількість одночасно досліджуваних матеріалів.

2. Використання нагрівального елемента навколо корпусу пристосування дозволяє проводити

дослідження у різних температурних інтервалах, а отже варіювати фізико-хімічними властивостями та в'язкістю абразиву.

3. Додаткове введення охолоджувальної рідини забезпечує можливість проведення порівняльних досліджень в умовах «сухого» та «мокрого» тертя.

Лабораторний стенд для випробувань за удосконаленою методикою випробування зразків в умовах зношування закріпленим абразивом має наступні технічні характеристики:

1. Частота обертання зразків матеріалу,  $\text{хв}^{-1}$  — 12,5–1600.
2. Площа поверхні тертя дослідного зразка,  $\text{мм}^2$  — 70.
3. Радіальна подача супорта,  $\text{мм/об}$  — 0,025–1,4.
4. Площа абразивного матеріалу,  $\text{мм}^2$  — 2041,8.
5. Кількість одночасно випробуваних зразків, шт — 4–16.
6. Потужність приводу, кВт — 10.

#### 4. Аналіз отриманих результатів

Дослідження матеріалів з низьким вмістом зміцнювальної фази обумовлено необхідністю аналізу механізму руйнування сталей та сплавів різних структурних класів у специфічних умовах зношування закріпленим абразивом, а з високим — із з'ясуванням максимальної кількості твердих включень, за якої зберігається достатня експлуатаційна надійність. Для порівняння в лабораторних умовах випробували наплавки з феритною, аустенітною, мартенситною та комбінованою аустенітно-мартенситною структурою (табл. 1).

Низьку зносостійкість ( $\epsilon = 2,19$ ) мають феритні сплави групи I (ОЗН-300М – 15МЗС1, ОЗН-400 – 17М4С2, рис. 3, а). На поверхні тертя ідентифіковані лунки й риски значних розмірів (внаслідок низької твердості матеріалу), орієнтовані в напрямку руху абразива (рис. 4, а). Мала агрегатна твердість (32 HRC) та одночасно високі міцнісні характеристики [7] обмежують можливість застосування цих матеріалів для умов зношування закріпленим абразивом.

Незначну зносостійкість у лабораторних умовах ( $\epsilon = 2,71$ – $2,83$ ) також показав метал, наплавлений електродами, що мають структуру мартенситу середньовуглецевого високолегованого (ОЗШ-7, див. рис. 3, б) та високовуглецевого низьколегованого (ЭН-60М, 13КН-ЛИВТ (див. рис. 3, в)), з незначною кількістю карбідів (5,3–8,6 %, [8]). Така ситуація пов'язана з утворенням тріщин при наплавленні внаслідок формування в мартенситній матриці розтягуючих напружень. Поверхня тертя також покрита подряпинами та впадинами (див. рис. 4, б), однак дещо меншої глибини, ніж у сплавів попередньої групи, що обумовлено незначним підвищенням твердості.

Таблиця 1

Фазовий склад, механічні та триботехнічні властивості випробуваних матеріалів

Група	Матеріал	Фазовий склад матриці сплаву	Твердість, HRC	Мікротвердість основи $H_{50}$ , ГПа	Мікротвердість зміцнювальної фази $H_{50}$ , ГПа	Кількість зміцнювальної фази К, %	Щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Інтенсивність зношування $I_{Д \cdot 10^{-6}}$ , г/мм	Відносна зносостійкість $\epsilon$
I	ОЗН-300М	Ф	32	4,8	—	—	7,84	1,0200	2,19
II	ОЗШ-7	15 % А + 85 % М	56	7,8	—	—	7,85	0,8267	2,71
III	ЭН-60М	100 % М	54	5,4–6,2	—	5,3–8,6	7,84	0,8002	2,80
	13КН-ЛИВТ	15 % А + 85 % М	58	7,5	—	7,4	7,86	0,7918	2,83
IV	ОЗШ-6	100 % А	43	3,8–4,5	—	—	7,85	1,2266	1,83
V	ОЗН-6	100 % М	62	7,6	—	10–15	7,88	0,7444	3,02
VI	ОЗИ-6	100 % А	62	—	—	—	7,86	0,6803	3,30
	ВСН-9	60–70 % М	49	8,3–8,7	10,3	30–40	7,86	0,6622	3,39
VII	Сормайт ЦС-1	30 % А + 70 % М	50	5,3–6,1	12,0–13,0	60	7,85	0,4976	4,50
	Т-590	10 % А + 90 % М	53	6,2–6,8	14,3–16,5	50	7,48	0,5193	4,11
VIII	150Х13Р4ФТ	25 % А + 75 % М	65	8,0–9,5	18,0–23,0	67	7,01	0,4074	4,91
	320Р5Т5Х2СН	—	75	7,5–9,5	19,5–25,0	70	7,12	0,3928	5,18
	225Т10Р4	—	66	6,3–8,6	22,0–25,0	65	7,07	0,3773	5,35
IX	Реліт ТЗ	—	90 HRA	4,5–6,0	24,0–30,0	80	11,35	0,3189	10,16
	ВКЗМ	97 % WC + 3 % Со	90 HRA	—	29,0	97	15,15	0,1672	15,87
	Еталон, ст. 45	—	166 HV	—	—	—	7,85	—	1

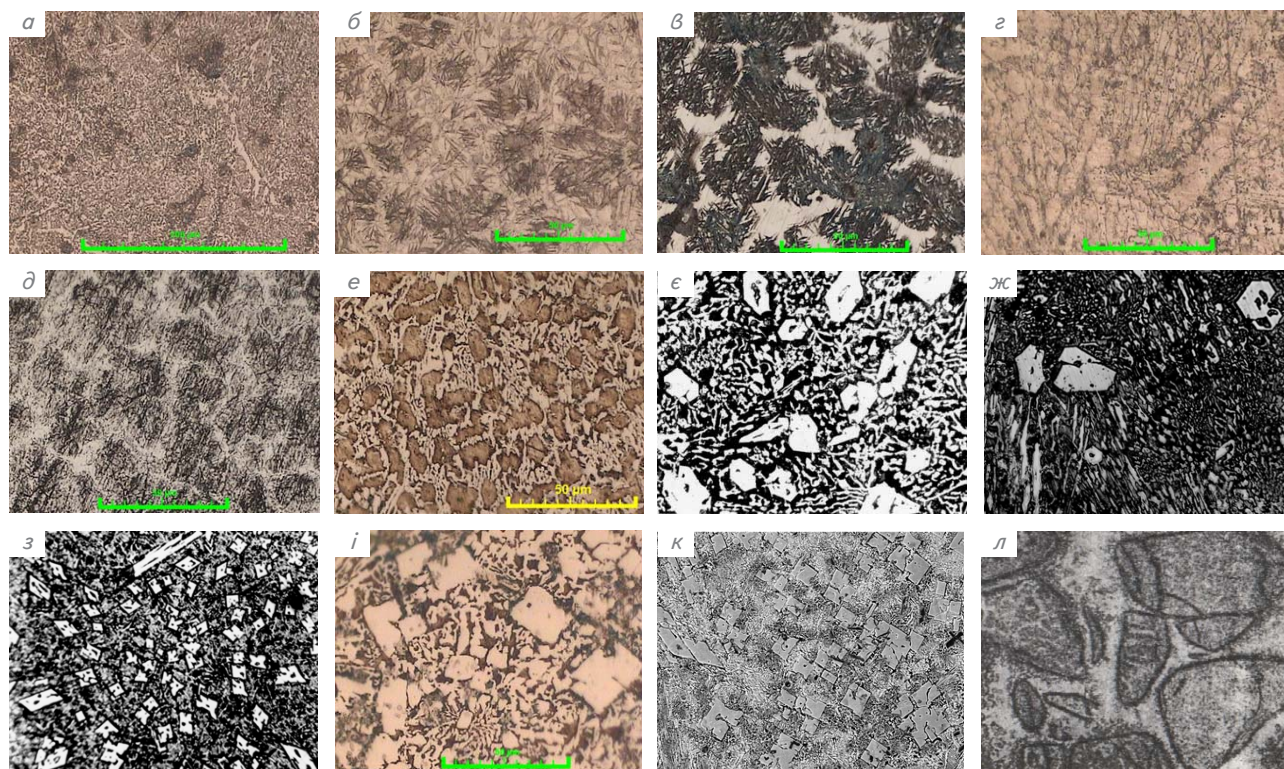
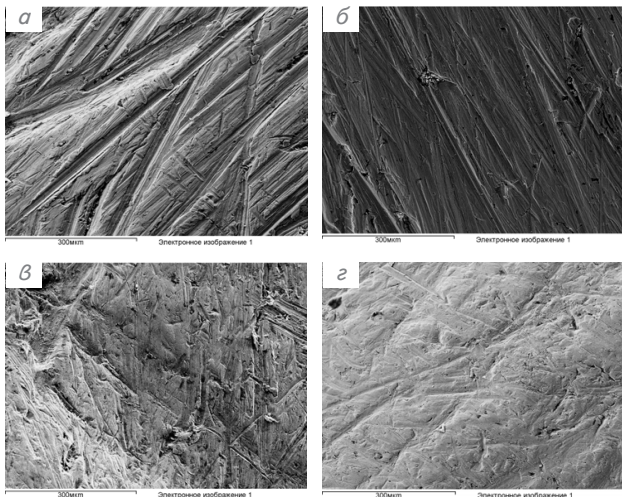


Рис. 3. Мікроструктури стандартних зносостійких наплавочних матеріалів:

- а — ОЗН-300М,  $\times 200$ ;      б — ОЗШ-7,  $\times 500$ ;      в — 13КН-ЛИВТ,  $\times 500$ ;      г — ОЗШ-6,  $\times 500$ ;  
 д — ОЗН-6,  $\times 500$ ;      е — ВСН-9,  $\times 500$ ;      є — Т-590,  $\times 500$ ;      ж — Сормайт ЦС-1,  $\times 500$ ;  
 з — 150Х13Р3Ф,  $\times 200$ ;      і — 320Р5Т5Х2СН,  $\times 500$ ;      к — 225Т10Р4,  $\times 300$ ;      л — Реліт-ТЗ,  $\times 300$



**Рис. 4.** Поверхні тертя зразків після зношування матеріалів закріпленим абразивом ( $\times 500$ ):  
 а — ОЗН-300М; б — ЗН-60М; в — Сормайт ЦС-1;  
 г — 150Х13Р3Ф

Мінімальну зносостійкість у лабораторних умовах показали матеріали, що забезпечують в наплавленому металі аустенітну структуру. Так, метал, зміцнений електродами ОЗШ-6 (див. рис. 3, г), у процесі взаємодії із частками закріпленого абразиву має дуже низьку зносостійкість ( $\epsilon = 1,83$ ), що обумовлено малою мікротвердістю стабільного аустеніту (3,8–4,5 ГПа) і відсутністю зміцнювальної фази. Таке співвідношення мікротвердостей абразиву ( $H_a = 14\text{--}16$  ГПа) та складових сплаву ( $H_M$ ) не може забезпечити стабільну роботу через невиконання умови  $H_M \geq H_a$ . Зносостійкість наплавлені матеріали I–IV груп (феритні, аустенітні та мартенситні, див. табл. 1) за практично повної відсутності в структурі карбідної фази визначається співвідношенням фізико-механічних властивостей абразивних часток ( $H_a$ ,  $\sigma_a$ ) і матриці сплаву ( $H_{\text{матр}}$ ,  $\sigma_{\text{матр}}$ ). Оскільки умова  $H_a < H_M$  та  $\sigma_a < \sigma_M$  не дотримується, то ці сплави мають низьку зносостійкість в умовах зношування закріпленим абразивом.

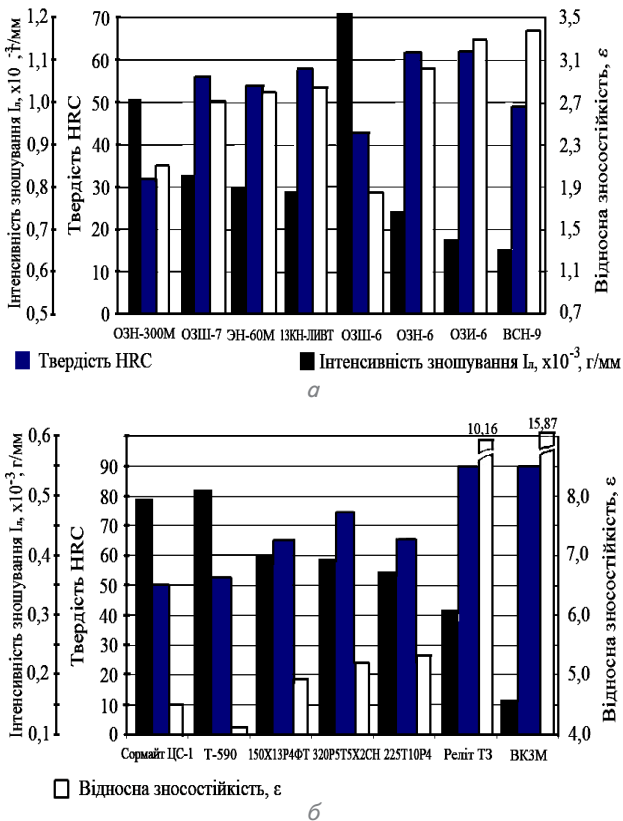
Зносостійкі сплави V групи (ОЗН-6, див. табл. 1) забезпечують у процесі наплавлення метал з мартенситною структурою (див. рис. 3, д) та сіткою карбідів ( $K = 10\text{--}15\%$ ) [9]. Зносостійкість цього матеріалу дещо вища ( $\epsilon = 3,02$ ), однак недостатня для умов зношування закріпленим абразивом. Останнє обумовлено сколюванням фрагментів наплавленого матеріалу внаслідок високої твердості (62 HRC) та крихкості мартенситу.

Підвищену зносостійкість ( $\epsilon = 3,30\text{--}3,39$ ), порівняно з попередніми матеріалами, показують аустенітні сплави, зміцнені мілкодисперсними карбідами групи VI (ОЗН-6 та ВСН-9, див. рис. 3, е), які рекомендуються [7] для роботи при високих ударних навантаженнях разом із впливом грубого абразивного середовища. Це обумовлено тим, що

аустеніт завдяки своїй в'язкості добре утримує карбідні частки. Крім того, додаткове зміцнення досягається переходом аустенітної матриці в метастабільний стан, що дозволяє їй зміцнюватися в процесі експлуатації за рахунок утворення мартенситу деформації. Підвищена зносостійкість сплаву ВСН-9 порівняно з ОЗН-6 обумовлена збільшенням кількості карбідів хрому й мікролегуванням азотом. Отже, кількість карбідної фази чинить більш істотний вплив, ніж агрегатна твердість, підвищена тільки через збільшення мікротвердості основи металу.

Високу зносостійкість ( $\epsilon = 4,11\text{--}4,50$ ) мають сплави VII групи (Т-590, див. рис. 3, є, Сормайт ЦС-1, див. рис. 3, ж) зі значним ( $K = 50\text{--}57\%$ ) вмістом надлишкової фази. В структурі сплаву У30Х28Н4С3 (Сормайт ЦС-1) утворюються ледебурит і карбіди типу  $M_7C_3$ , що мають форму шестигранної призми, а в сплаві 320Х25С2ГР (Т-590) — ледебурит і карбобориди типу  $M_7(CB)_3$ , що мають подібну форму. Низька мікротвердість матриці ( $H_{50} = 6,2\text{--}6,8$  ГПа) і карбідів хрому  $Cr_7C_3$  (12–13 ГПа), а також несприятлива голкоподібна витягнута форма, яка не здатна повною мірою протистояти руйнуванню більш міцних ( $H_{50} = 14\text{--}16$  ГПа,  $\sigma = 10\text{--}30$  ГПа) абразивних часток, компенсуються наявністю в сплаві Т-590 карбоборидів високої мікротвердості ( $H_{50} = 14,3\text{--}16,5$  ГПа), що мають витягнуту прямокутну або розітчасту форму. Робоча поверхня зношування (див. рис. 5, в) цих сплавів має полірований вигляд зі значною кількістю лунок, слідів вдавлення, мікрорізання, а також наявністю виступів (не зруйнованих ділянок зміцнювальної фази).

Ще більш високу зносостійкість ( $\epsilon = 4,91\text{--}5,35$ ) мають гетерогенні зносостійкі сплави, які містять у своєму складі  $K = 64\text{--}75\%$  надлишкової зміцнювальної фази, розташованої в аустенітно-мартенситній матриці. Утворення карбоборидів високої мікротвердості ( $H_{50} = 13,9\text{--}19,5$  ГПа) в сплаві 150Х13Р3Ф (див. рис. 3, з), поряд з кристалізацією спеціальних карбідів титана з  $H_{0,5} = 29\text{--}30$  ГПа (сплав 320Р5Т5Х2СН, див. рис. 3, і), боридів титана (сплав 225Т10Р4, див. рис. 4, к), а також складних карбоборидів ромбовидної витягнутої форми, забезпечує високу зносостійкість. Структура металу, наплавленого електродами 150Х13Р3Ф, представлена порівняно м'якою мартенситно-аустенітною матрицею (8,0–9,5 ГПа) та значною кількістю (55–65%) зміцнювальної фази ( $[Fe; Cr]_2B$ ;  $[Fe; Cr]B$ ;  $[Cr; Fe]_3B_4$ ;  $M_7C_3$ ;  $M_{23}(CB)_6$ ) високої мікротвердості (18–23 ГПа) [10]. Надлишкова фаза має форму голок, рівномірно розподілених в основі металу. Орієнтація зміцнювальної фази перпендикулярно до поверхні тертя забезпечує надійне її утримання в матриці та запобігає викрашуванню. У свою чергу основа сплаву руйнується на початковій стадії зношування,



**Рис. 5.** Твердість (HRC), інтенсивність зношування ( $I_n$ ) та відносна зносостійкість ( $\epsilon$ ) сплавів із вмістом зміцнювальної фази  $< 50\%$  (а) та  $> 50\%$  (б)

«оголюючи» тверді включення. Це підтверджується характером спрацювання поверхні тертя (див. рис. 5, г), де ділянки зміцнювальної фази «виступають» над матрицею.

Високі експлуатаційні показники таких сплавів, як 320P5T5X2CH та 225T10P4, окрім мікротвердості, міцності, форми та розмірів зміцнювальної фази (карбідів, боридів титана й заліза прямокутної та витягнутої форми), обумовлені тим, що карбід титана й аустеніт мають однаковий тип кристалічних ґрат – гранецентрований куб. У цьому випадку на границі аустеніт/карбід можливе утворення міцного сполучення кристалічних ґраток, тобто встановлення когерентного зв'язку. Тому сплави системи Fe-C-Ti-V, що показали високу

зносостійкість, викликають особливий інтерес та вимагають подальших досліджень.

Найменшу інтенсивність зношування серед випробуваних матеріалів має сплав Реліт ТЗ ( $\epsilon = 10,16$ ), структура якого (див. рис. 3, л) складається з твердого розчину з великими частками WC та  $W_2C$  розеткової форми. Однак висока мікротвердість зміцнювальної фази (20–24 ГПа), яка значно перевищує мікротвердість абразивних часток ( $H_M > H_a$ ), не забезпечує достатньої технологічної міцності. Осколкова форма зерен дробленого реліту, сприятлива при використанні його для зміцнення різального інструменту при ударних і циклічних навантаженнях, спричиняє виникнення мікротріщин і викрашування зносостійкого наплавлення [11]. Наявність значної кількості тріщин, викликана низькою міцністю зчеплення матриці з карбідами ( $\sigma_{з.ф.} < \sigma_a$ ) та обумовлена відсутністю когерентного зв'язку. Однак застосуванню цього матеріалу в якості зміцнювального сплаву перешкоджає його висока вартість.

## Висновки

1. Удосконалено методику, спроектовано й виготовлено пристосування для випробування матеріалів при зношуванні закріпленим абразивом. Метод може бути застосований як при дослідженні механізму зношування, так і для вибору зносостійких сталей і сплавів робочих органів дорожньої техніки (різців, зубків дорожніх фрез). Причому останні можуть експлуатуватися як в умовах малих швидкостей відносного переміщення й низьких питомих тисків, так і працювати зі значними локальними ударними навантаженнями.

2. Результати трибологічних випробувань матеріалів в умовах зношування закріпленим абразивом свідчать, що основним показником при виборі сталей і сплавів є твердість. Збільшення останньої обумовлює зниження інтенсивності зношування матеріалу, при цьому для наплавленіальних сплавів з малим або незначним вмістом зміцнювальної фази ця тенденція має стрибкоподібний характер (ОЗН-300М  $\rightarrow$  ВСН-9, рис. 5, а), а зі вмістом зміцнювальної фази  $> 50\%$  – більш виражений характер (Сормайт ЦС-1  $\rightarrow$  Реліт ТЗ, рис. 5, б).

## Література

1. Попов, С. Н. Методика производственных испытаний материалов реза дорожной фрезы в условиях изнашивания закрепленным абразивом [Текст] / С. Н. Попов, Д. А. Антонюк // Проблемы трибологии (Problems of tribology). – 2008. – № 1. – С. 43–56.
2. Добровольский, А. Г. Абразивная износостойкость материалов [Текст]: справочное пособие / А. Г. Добровольский, П. И. Кошеленко. – К.: «Техніка», 1989. – 128 с.
3. Богданович, П. Н. Трение и износ в машинах [Текст]: учеб. для вузов / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374 с.
4. Пристрій для випробування матеріалів на тертя та зношування [Текст]: пат. № 6333U, МПК G 01 N 3/56 / Баннов Г. М., Цмікал Ю. В., Матвеев О. В. – Заявл. 02.06.2004; опубл. 16.05.2004.

5. Пристрій для дослідження покриття на стійкість до сухого стирання [Текст]: пат. № 61775А, МПК G 01 N 3/56 / Олянишен Т. В., Раевський П. Ю., Мельников О. В., Лятошинська Н. Д. та ін. — Заявл. 18.04.2003; опубл. 17.11.2003.
6. *Антонюк, Д. А.* Способ испытания материалов при изнашивании закрепленным асфальтобетонным абразивом [Текст] / Д. А. Антонюк // Проблемы трибологии (Problems of tribology). — 2007. — № 2. — С. 71–76.
7. *Лужанский, И. Б.* Легирование кремнием при разработке сплавов для различных условий износа [Текст] / И. Б. Лужанский // Сварочное производство. — 1985. — № 2. — С. 6–8.
8. *Лившиц, Л. С.* Наплавочные материалы и технология наплавки для повышения износостойкости и восстановления деталей машин [Текст] / Л. С. Лившиц // Сварочное производство. — 1991. — № 1. — С. 15–17.
9. *Балин, А. Н.* Наплавочные материалы для упрочнения деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания [Текст] / А. Н. Балин, А. В. Березовский, А. А. Вишневский, Б. А. Кулишенко // Автоматическая сварка. — 2006. — № 2. — С. 46–47.
10. *Попов, С. Н.* Оптимизация химического состава наплавленного металла деталей для работы в условиях абразивного изнашивания [Текст] / С. Н. Попов // Автоматическая сварка. — 2001. — № 4. — С. 33–35.
11. *Токарев, А. О.* Износостойкие покрытия из порошкового самофлюсующегося сплава со сферическим ре-литом [Текст] / А. О. Токарев // Сварочное производство. — 2000. — № 7. — С. 37–38.