

В. І. Савуляк, д. т. н., проф.; В. О. Гримашевич, асп.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

Ударно-абразивне зношування відносять до найбільш небезпечних та поширених видів пошкоджень дорожньо-будівельних машин. За статистичними даними з причин, викликаних цим видом зношування, виконується біля 50% всіх ремонтних робіт по відновленню працездатності машин. Найбільше зношуються робочі органи тих машин, які працюють з високими тисками середовища на поверхні, що безпосередньо виконують корисну роботу. В дорожньо-будівельних машинах такі поверхні мають ножі скреперів, грейдерів та бульдозерів, щелепи грейферних навантажувачів тощо. Особливу проблему для функціонування дорожніх машин створюють не лише власне процеси зношування, але і їх нерівномірність, що спотворює профіль робочих органів машини, змінює величину та напрями векторів сил, які діють на різних ділянках деталей. У низці випадків компенсувати нерівномірність зносу окремих поверхонь не вдається. Виникає питання щодо можливості попередження таких проблем шляхом створення на поверхнях деталей робочих органів шарів з різною зносостійкістю за рахунок керування локальним складом та структурою матеріалу на різних ділянках. Дослідження закономірностей процесів абразивного зношування та пошук конструктивних і технологічних заходів для покращення якості та ефективності функціонування дорожніх машин є безумовно актуальною задачею.

Метою даної роботи є аналіз досліджень та публікацій з проблем ударно-абразивного зношування робочих органів дорожньо-будівельних машин в різних умовах експлуатації, методів їх відновлення та зміцнення.

Ключові слова: дорожньо-будівельні машини, робочі органи, матеріали, легування, ударно-абразивна зносостійкість, відновлення робочих органів, експлуатація.

Аналіз досліджень і публікацій

Моніторинг робіт з означеної проблеми показав значний приріст їх кількості та різнобічності. Стимулом розвитку такої тематики стали запити сьогодення з огляду колосального зростання робіт з будівництва та ремонту доріг, фортифікаційних споруд, розбирання та утилізації різних будівельних конструкцій.

Більшість статей вітчизняних та іноземних авторів розглядають описану проблему з позицій механічної взаємодії матеріалу робочого органу машини з абразивом ґрунту або іншого середовища. До цих середовищ переважно відносять пісок, щебінь, відсів та каміння. Під час розгляду роботи з камінням доречно вести розмову про ударно-абразивну взаємодію та зношування. При цьому більшість авторів схиляються до думки про важливу роль в процесах зношування твердості, розмірів та форми абразиву.

В статті [1] ретельно досліджено коефіцієнти форми абразивних частинок ґрунтів України. Встановлено, що вони коливаються в межах 79...490. Коефіцієнт форми абразивних частинок для крупних фракцій абразиву значно менший, ніж для дрібних фракцій. Значення коефіцієнта форми абразивних частинок в орному шарі менше на 11...48% порівняно з абразивними частинками в необроблювальному шарі. Спостерігається також значне зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок крупних фракцій порівняно з дрібним абразивом, що є наслідком їх взаємодії з робочими органами ґрунтообробних і посівних машин. Здатність зношувати в абразивних частинок зростає із збільшенням коефіцієнта форми. Прямої залежності між зменшенням зношувальної здатності ґрунтів і зменшенням коефіцієнта форми абразивних частинок виявити не вдалося через складність будови й самоорганізації ґрунтового середовища [2]. Підвищити довговічність і зносостійкість деталей та робочих органів машин можна завдяки використанню трьох груп методів: технологічних, конструктивних та експлуатаційних.

Експериментальні дослідження Марчука В.Є. [3] показали, що популярна для виготовлення робочих органів машин сталь 65Г має низьку зносостійкість в умовах абразивного зношування. Використання як альтернативи сталі 30ХГСА показало кращі результати в аналогічних умовах на 59-60%. Висока зносостійкість забезпечується високою твердістю поверхневих шарів, які краще протидіють швидкому стиранню поверхневих шарів абразивними частинками. Детальне вивчення поверхні виявило наявність великої кількості вм'ятин і борозенок на поверхні тертя. Це показує наявність на поверхнях, які сприймають безпосередньо тиск середовища з абразивом, процесів мікрорізання та пластичного деформування більш твердими абразивними частинками. Більш тверді абразивні частинки, які приховані у ґрунті, вдараються і вдавлюються в поверхню робочого органу, що призводить до пластичної деформації. Після зіткнення з абразивними частинами більших розмірів можуть з'являтися сколи.

Запропоноване в роботі [3] формування дискретної поверхні у формі заглибин зменшує абразивне зношування поверхонь зі сталі 65Г і сталі 30ХГСА на 24-25% і на 37-38% відповідно. Частина абразивних частинок заповнює об'єми лунок, що замінює тертя на поверхнево-пластичні деформації. Випукла поверхня навколо лунок покривається мікротріщинами (борознами), а дно і бокові поверхні лунки пластично деформуються витрачаючи ресурс пластичності матеріалу. З часом на дні лунки можуть сформуватися напливи металу. У зв'язку з цим відбудеться локальне підняття температури, що призведе до зниження механічних властивостей і опору абразивному зносу. В подальшому мікротріщини перетворяться в макротріщини, а наслідком є сколювання металу.

На нашу думку, підняття температури на поверхні металу буде незначною внаслідок розсіювання тепла в середовищі, що контактує з робочою поверхнею. Тому вплив цього фактору на пришвидшення руйнування деталі буде незначним. Але шорстка поверхня збільшує роботу сил тертя, що призведе до збільшення необхідного зусилля для переміщення робочого органу і тим самим до збільшення витрат енергії (палива).

У роботі [4] проведено аналіз статистичних даних відмов ґрунтових насосів. З'ясовано, що переважною їх причиною є зношення корпусу та робочого колеса. За результатами проведеного аналізу існуючих підходів указано на відсутність універсальних методів боротьби зі зношуванням, а також загальноприйнятих критеріїв зносостійкості. В роботі запропоновано відновлювати робочі характеристики насосів шляхом нанесення полімерних покриттів. Але в процесі експлуатації змінюються фізико-хімічні показники і, як наслідок, експлуатаційні властивості полімерів. Показано, що застосування та вдосконалення полімерних композитних матеріалів є перспективним напрямком розвитку технологій ремонту гірничо-збагачувального обладнання. Обґрунтовано, що зменшення собівартості й енергозатратності виробництва, а також маси конструкцій та металоємності вузлів можна досягти за рахунок застосування суперміцних полімерних матеріалів і композицій шляхом заміни металевих деталей на полімерні деталі, які не будуть поступатися їм за експлуатаційними властивостями [4].

Проте досвід використання полімер-композитних матеріалів для відновлення робочих органів дорожньо-будівельних машин показав їх недостатню протидію ударно-абразивному зношуванню, особливо при протидії ударним навантаженням від абразиву великих фракцій.

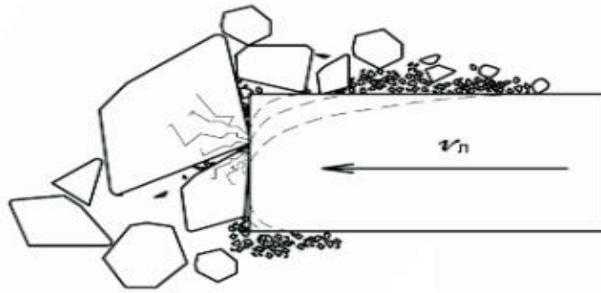
В праці Борака К.В. [5] досліджено вплив залишків решток кукурудзи на процеси зносу дискових робочих органів. Виявлено, що знос дисків на полі з рослинними рештками кукурудзи на 8% більший, ніж у порівнянні з швидкістю зношування дискових робочих органів на полі без рослинних решток. Результати експлуатаційних досліджень підтверджують лабораторні дослідження, хоча лабораторні дослідження продемонстрували підвищення на 21,5%, а експлуатаційні на 8%. Дане відхилення пов'язано з більш високою концентрацією рослинних решток кукурудзи в абразивній масі при проведенні лабораторних досліджень. Для дорожніх машин режими роботи в умовах наявності в ґрунті коріння рослин та дерев не є рідкісним явищем. Тому їх вплив на зносостійкість робочих органів потрібно враховувати.

При абразивному зношуванні в умовах ковзання залежність зношування від твердості має лінійний характер, тобто відносна зносостійкість сталі зростає з підвищенням твердості. Зносостійкість при зіткненні з абразивними частинками визначається не тільки твердістю матеріалу, але і його складом та структурою, які впливають на ударну в'язкість матеріалу [6]. Твердість поверхні при ударно-абразивному зношуванні впливає, насамперед, на глибину проникнення зерен абразиву в метал і, відповідно, на об'єм металу, що деформується, руйнується і видаляється з поверхні. З підвищенням кількості вуглецю в сталі і, відповідно, підвищенням її твердості пластична деформація поверхні поступово змінюється крихким викришуванням. Відомо, що максимальну зносостійкість мають сталі з вмістом вуглецю 0,7-0,8%. Збільшення кількості вуглецю в сталі вище евтектоїдної концентрації знижує її зносостійкість внаслідок крихкого викришування, а зменшення вуглецю знижує зносостійкість внаслідок значної пластичної деформації та мікрорізання абразивом. Найбільш суттєво зміна концентрації вуглецю в загартованій сталі позначається на її зносостійкості при високих значеннях енергії удару. Високі експлуатаційні характеристики при роботі в умовах ударно-абразивного зношування мають аустенітні сталі 110Г13Л, 60Х5Г10Л, в яких під впливом енергії ударів відбувається деформаційне мартенситне перетворення, а також сталі карбідного класу, аустенітні чавуни. В роботі [7] запропоновано покращити ударну міцність, твердість та зносостійкість чавунів за рахунок їх термообробки з утворенням аустенітної матриці.

Під час міжсезонного зберігання ґрунтообробної техніки вона піддається впливу атмосферної корозії. Найінтенсивніше процеси корозії протікають в зоні фрикційного контакту, де проявляються сліди абразивного зношування [8]. Це явище можна пояснити особливістю абразивного зношування, оскільки в результаті такого виду зношування на поверхні тертя утворюються вторинні структури, мікродефекти та дефекти кристалічної ґратки. Встановлено, що атмосферна корозія поверхонь тертя робочих органів ґрунтообробних машин призводить до зміни триботехнічних характеристик, а саме: зменшення мікротвердості на 3,54...9,6 %, та зростання інтенсивності зношування на 9,4%. Рекомендовані раціональні способи і методи зберігання та консервації робочих органів ґрунтообробних машин для мінімізації дії атмосферної корозії на поверхні тертя робочих органів ґрунтообробних машин.

В роботі [9] досліджено зносостійкість дискретних покриттів під час роботи з абразивом, що має розміри фракції 300-315 мкм. Встановлено, що при такій зернистості дискретні покриття показують максимальну зносостійкість, а при зернистості абразиву 50-70 мкм питомий знос таких поверхонь становиться максимальним. В процесі зношування кількість абразивних часток такої зернистості, які беруть участь у терті на одиниці площі, у 3-6 разів більше, ніж для абразиву з більшою зернистістю. Отже, в результаті експериментальних досліджень встановлено, що зі збільшенням розміру абразивних часток величина зносу поверхні зразка зменшується.

Робочі органи диспергаторів [10] зазвичай виготовляють зі сталі 110Г13Л, що забезпечує високу ударну стійкість, але не зносостійкість. Дослідження контактної поверхні стандартних деталей доводить, що на передній частині реєструється наявність слідів в'язко-пластичного деформування (20-30%) у вигляді лунок та крихко-пластичного переддеформування мікрооб'ємів з утворенням канавок та напливів (25-40%), з наявністю треків проходження абразиву і одноциклового зняття мікроостружок (20-30%). Автори вважають, що у даному випадку спостерігається зношування напівзакріпленим абразивом при ковзній взаємодії (рис. 1) з куту атаки 45-80° та наявністю локальних ударних навантажень.



Р

и

Макроаналіз поверхні тертя на бічних зонах бил дозволив встановити наявність слідів лише ковзної взаємодії з приблизним кутом атаки $5-10^\circ$. Аналіз результатів показав, що для умов інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, зокрема експлуатації робочих органів диспергаторів, доцільно рекомендувати матеріали з аустенітною чи аустенітно-мартенситною структурою, з наявністю не менше 40-50% зміцнювальної фази за агрегатної твердості 45-60 HRC із мікротвердістю зміцнювальної фази не менше $H_{\mu} = 18-24$ ГПа, орієнтовною зносоустійкістю біля 0,5-0,6 ГПа та мікротвердістю після деформаційного зміцнення в межах 0,8-1,0 ГПа.

У результаті взаємодії активованих поверхневих шарів сталі з активними елементами середовища–пасиваторами (киснем, сіркою, фосфором, хлором, азотом та ін.) утворюються нові однофазні або гетерофазні тонкоплівкові утворення, які отримали назву вторинних структур. Механохімічні процеси формування вторинних структур на поверхнях тертя зумовлені зовнішніми механічними впливами, природою тертьових матеріалів та складом робочих середовищ. У результаті досліджень кінетики механізмів утворення та властивостей трансформованих поверхневих плівок, проведених на різних матеріалах і в різних середовищах, було визначено існування двох основних типів вторинних структур. Поверхні тертя, вкриті вторинними структурами I і II типів, відрізняються за зовнішніми ознаками. Вторинні структури I типу – перенасичені розчини кисню, сірки, фосфору та інших реагентів у металах, мають бездислокаційну будову. Товщина плівок вторинних структур I типу знаходиться в межах $2 \cdot 10 \dots 4 \cdot 10$ НМ. Утворення оксидів на поверхнях тертя багато дослідників розглядали як результат термічних процесів, що протікають у відповідності з класичними механізмами окислення металів, або безпосередньо в процесі тертя, або після тертя, в результаті взаємодії поверхонь з киснем повітря. Складність вивчення механізмів абразивного зношування полягає в неможливості використання традиційних засобів контролю фізико-хімічного стану поверхонь під час протікання фрикційних процесів. У зв'язку з цим вивчення механізмів поверхневого руйнування здійснюється, як правило, на основі непрямих методів дослідження [11].

Найвища абразивна зносостійкість плазмового покриття з складним карбідом титану та хрому (70% ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-TiC}$)) [12] пов'язана з високою температурою плавлення та малою густиною карбідів, які за умов їх короткотривалого перебування у високотемпературній зоні струменя плазми, повільно взаємодіють між фазами, що й підтверджено рентгеноструктурними дослідженнями. Це сприяє утворенню пластичної матриці з наявного в суміші нікелю, яка сукупно з високою твердістю зміцнювальної фази забезпечує покриттю високу зносостійкість.

Наявність в механічній суміші самофлюсівних порошків сплавів на нікелевій основі (NiCrBSi) карбідів вольфраму [12], які фіксуються рентгеноструктурно, при напиленні не окрихчують нікель насиченням присутнім у них вуглецем. Наявні в ядрі (NiCrBSi) борида при взаємодії з нікелевою оболонкою можуть утворювати борида нікелю та окрихчувати матрицю.

Вищезазначене та наявність у складі поверхні фази TiX ($\text{X} = \text{O}, \text{N}, \text{C}$) структурного типу NaCl сприяють значно меншій зносостійкості покриття ПС-12НВК-01, порівняно з покриттями порошками ($\text{TiC-Cr}_3\text{C}_2$)Ni та ПОАН-30. Плазмове напилення порошком сплаву

ТС-8, який є сумішню сплавів ВТ-20 та ТС-5 з добавками Fe, Ni, Cr, найменш стійке до абразивного зношування.

Досліджено мікроструктуру [13] наплавлених шарів із порошкових дротів ПД 80Х20Р3Т виробництва двох фірм – "Велтек" та "Торез". Виявлено відмінність структури наплавлених шарів, отриманих з їх використанням. Якщо, в разі використання ПД фірми "Велтек", переважає структура з однорідно розподіленими дендритами 1-3-го порядків, то у структурі з ПД фірми "Торез" менш однорідно розподілені дендрити 1-го і 2-го порядків. За складом осі дендритів 1-го порядку в наплавленому шарі з використанням ПД фірми "Велтек" відповідають фазі FeCrB, а дрібніші – включенням FeCrB₂, тоді як з використанням ПД фірми "Торез" – FeCrB₂ та Fe₃C.

Встановлено, що зносостійкість шарів, наплавлених обома ПД, вища, ніж прототипу (високоміцна сталь ШХ15). Зносостійкість шарів, наплавлених обома ПД, за випробуванням незакріпленим абразивом, практично, не змінюється. За зношування закріпленим абразивом, ударним чи ударно-абразивним способом зносостійкість шару, наплавленого із ПД фірми "Велтек" від 1,5 до 2,0 разів вища, ніж наплавленого ПД 80Х20Р3Т фірми "Торез". Це пояснюється рівномірним розподілом фаз з високою твердістю в шарі, наплавленому ПД фірми "Велтек".

Таблиця 1 – Абразивна зносостійкість шарів, наплавлених ПД 80Х20Р3Т

Наплавлення ПД 80Х20Р3Т	Втрати маси під час зношування, $\times 10^{-4}$ г				Середня твердість наплавленого покриття HV _{0.2} (МПа)
	Закріпленим абразивом	Незакріпленим абразивом	Ударно- абразивне	Ударом кульки	
ПД1	53	73	31	22	6080
ПД2	85	75	20	41	9022
Сталь ШХ15 (HRC 60)	220	150	-	-	-

Встановлено, що зносостійкість наплавлених шарів з ПД 1 за зношування закріпленим абразивом в 1,6 раз вища, ніж з ПД 2. У разі зношування незакріпленим абразивом зносостійкість шарів, наплавлених обома ПД, була практично однаковою з втратою маси $(73...75) \cdot 10^{-4}$ г.

У дослідженні [14] було визначено поведінку зношування алюмінію 6082, латуні UNS C38500 та нержавіючої сталі 304 за різних умов шляхом поєднання експериментальних випробувань зносу кулькою на диску з модельованим методом кінцевих елементів. Використання ефекту теплового розширення в моделі підвищило точність прогнозування профілю рубця зносу, особливо при вищих навантаженнях і швидкостях обертання, де термічні ефекти стають більш виразними. Для алюмінію профілі рубців від зносу більше узгоджувалися з експериментальними результатами, якщо врахувати теплове розширення, тоді як латунь і сталь були менш чутливими до цих теплових ефектів.

Результати продемонстрували, що підвищена твердість матеріалу, нижча швидкість ковзання та зменшені коефіцієнти зносу та тертя допомагають зменшити шум, спричинений тертям [14].

Профіль хвилястості рухомого основного тіла сильно впливає на тертя. Невеликі відхилення в профілі поверхні, наприклад, «пагорб» висотою близько 2 мкм може збільшити коефіцієнт тертя на 91%. Локальна різниця в коефіцієнті тертя є причиною нерівномірного зносу по поверхні робочого органу від тертя, що спостерігається в умовах абразивного зношування. Трибологічні системи з меншими абразивними частинками (наприклад, у суспензії 5 мкм) більш чутливі до профілю хвилястості ніж системи з більшими частинками

(наприклад, у суспензії 13 мкм), оскільки, профіль хвилястості стає більш вираженим. Локальна флуктуація коефіцієнта тертя призводить до нерівномірного зносу по площі робочого органу. Існує чітка позитивна кореляція між локальним коефіцієнтом тертя і місцем зносу [15].

Висновки

1. Абразивне зношування корелює з показниками міцності і пластичності металів, добре пояснюється теорією різання металів, з врахуванням геометричних характеристик абразивних частинок, їх розмірів та різальних властивостей.
2. При ударно-втомному зношуванні руйнування металевих деталей відбувається внаслідок багаторазового прикладання навантажень. Характер виявлення втомних процесів руйнування залежить від фізико-механічних властивостей поверхонь і від питомої енергії ударів.
3. Аналіз досліджень і публікацій показує, що на даний час ще не винайдено універсальних методів ефективної протидії зношуванню та його прогнозуванню.
4. Знос та довговічність робочих органів залежить від умов та середовища їх експлуатації, складу, твердості абразивних часток та їх фракційного складу.
5. Для гальмування інтенсивного абразивного зношування робочі органи потребують застосування нових адекватних зносостійких матеріалів, покриттів та технологій їх застосування. Перспективними є технології нанесення зносостійких покриттів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Борок К.В. Уплив коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин/ Наукові праці ВНТУ, № 1, 2020, с. 46-56.
2. Tylczak J.H. Abrasive wear //AS Handbook. / J.H. Tylczak // Materials Park, OH, ASM International, № 18, 1992, с. 184. -190.
3. Марчук В.Є. Механізм зношування дискретних поверхонь в умовах абразивного зношування/ Вид-во НАУ «НАУ-друк», Вип. 52, 2010, с. 112-119.
4. Дубровський С.С. Використання сучасних технологій при виготовленні та ремонті елементів конструкцій гірничо-збагачувального обладнання/ Вісник Криворізького національного університету, № 48, 2019, с. 5-10.
5. Борок К.В. Вплив рослинних решток на інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин/ Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, № 3, 2020, с. 96-101.
6. Галико А.В. Ударно-абразивне зношування деталей машин та агрегатів/ Наукові записки. – Кіровоград: КНТУ, № 8, 2007, с. 77-78.
7. Осадчук В.І., Грига Г.А., Осадчук А.А. Поліпшення механічних характеристик сірих чавунів термообробкою та обґрунтування її параметрів/ Вісник ВП, №1, 2019, с. 72-77.
8. Борок К.В., Куликівський В.Л., Руднік Д.І. Вплив попередньої корозії на інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин/ Наукові праці ВНТУ, № 2, 2023, с. 1-10.
9. Марчук В.Є. Вплив зернистості абразиву на зносостійкість дискретних поверхонь. Проблеми тертя та зношування/ Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», № 53, 2010, с. 139–146.
10. Попов С.М. Дослідження процесу абразивного зношування контактних поверхонь в умовах ударних навантажень роботи диспергаторів/ Східно-Європейський журнал передових технологій. ISSN 1729-3774 2/7 (62) 2013, с. 1-4.
11. Денисенко М. Саморегулювання процесів руйнування та утворення вторинних структур при абразивному зношуванні/ Вісник ТНТУ. Спецвипуск – частина № 2, 2011, с. 219-229.
12. Похмурський В., Калахан О., Охота Г. Абразивне зношування поверхнево модифікованих титанових сплавів/ Вісник Тернопільського державного технічного університету. Том 11. № 2, 2006, с. 21-26.
13. Похмурська Г.В., Войтович А.А. Ударно-абразивне зношування поверхневих шарів, наплавлених порошковими дрютами системи Fe-Cr-B-C/ Науковий вісник НЛТУ України, № 25, 2015, с. 129-135.
14. Yang Tian, Muhammad Khan, Haoxuan Deng, Intisar Omar. Quantifying the interrelationship between friction, wear, and noise: A comparative study on aluminum, brass, and steel. Tribology International, Volume № 203, № 110403, 2025, с. 2-5.
15. Yulong Li, Nikolay Garabedian, Johannes Schneider, Christian Greiner. Waviness Affects Friction and Abrasive Wear/ Published, № 64, 2023, с. 1-12.

Гримашевич Володимир Олександрович – аспірант 2 року навчання кафедри галузевого машинобудування

Савуляк Валерій Іванович – д.т.н. професор кафедри галузевого машинобудування.
Вінницький національний технічний університет.