

УДК:621.891:620.178.16

ОСОБЛИВОСТІ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ CHARACTERISTICS OF IMPACT-ABRASIVE WEAR

¹ Костянтин Борак, ² Олександр Умінський

¹ Житомирський агротехнічний фаховий коледж Житомир, Україна

² Поліський національний університет Житомир, Україна

В умовах експлуатації багатьох машин і технологічного обладнання поверхні деталей працюють не в одному «чистому» режимі тертя, а у поєднанні кількох механізмів пошкодження. Особливо небезпечним є випадок, коли тверді частинки середовища не лише дряпають або ріжуть поверхню, а й багаторазово вдаряють по ній, викликаючи локальні імпульсні навантаження. Саме такий режим прийнято називати ударно-абразивним зношуванням. Він характерний для зубів екскаваторів, ножів змішувачів, лопатей та футерівок дробарок, робочих органів ґрунтообробних і дорожньо-будівельних машин, елементів транспортуючих систем, млинів, бункерів, жолобів, бурового інструменту та іншого обладнання, що контактує з рудою, щебенем, піском, ґрунтом або кусковими матеріалами [1; 5; 13; 18].

За термінологією ASTM G40 зношування розглядають як прогресивну втрату матеріалу з робочої поверхні внаслідок механічної взаємодії з іншим тілом або середовищем [2]. Ударно-абразивний різновид є складним, оскільки в ньому поєднуються ознаки абразивного зносу, ерозії твердими частинками, контактної втоми, іноді - адгезійних і корозійно-механічних явищ. У реальних вузлах ці механізми накладаються в різній мірі, тому одна й та сама деталь може демонструвати зовсім різні закономірності руйнування залежно від фракційного складу матеріалу, вологості, температури, форми частинок, швидкості їх руху та жорсткості ударної взаємодії [1; 10; 14].

Актуальність теми визначається тим, що ударно-абразивне зношування зазвичай викликає прискорене вичерпання ресурсу деталей, а отже - підвищує витрати на ремонти, простої та запасні частини. Крім того, саме в цьому режимі традиційний підхід «чим вища твердість, тим краща зносостійкість» виявляється недостатнім. Підвищення твердості без забезпечення тріщиностійкості й здатності до дисипації енергії удару часто призводить до крихкого руйнування, сколювання або інтенсивного відшарування зміцненого шару [4; 11; 16]. Тому сучасний аналіз ударно-абразивного зношування повинен охоплювати не лише матеріалознавчі параметри, а й механіку контакту, структуру поверхневого шару, кінетику зародження тріщин і особливості реального навантаження.

Об'єктом дослідження є процеси руйнування поверхневих шарів матеріалів під спільною дією ударних навантажень і абразивних частинок. Предметом дослідження виступають закономірності зміни інтенсивності зношування залежно від умов навантаження, властивостей матеріалу та параметрів абразивного середовища. Методологічну основу роботи становить аналіз класичних праць з теорії зношування, сучасних оглядових досліджень, стандартів випробувань і публікацій, присвячених високоміцним сталям, чавунам, композиційним матеріалам, кераміці та поверхневому зміцненню [1-19].

У найзагальнішому розумінні ударно-абразивне зношування - це втрата матеріалу поверхневим шаром деталі внаслідок повторних ударів твердих частинок або ударних контактів за наявності абразивного середовища, яке бере участь у деформуванні, різанні, сколюванні та видаленні продуктів руйнування. Важливо підкреслити, що тут удар і абразивна дія не існують ізольовано. Удар створює в поверхневому шарі локальні напруження стиснення, зсуву та розтягу, спричиняє пластичний плин або зародження тріщин, а абразивні частинки використовують вже ослаблений стан матеріалу, поглиблюють пошкодження, виносять відокремлені фрагменти та формують новий мікрорельєф [1; 4; 6].



Рис. 1. Схема формування ударно-абразивного зношування.

З погляду механіки контакту ударно-абразивний процес можна розглядати як послідовність окремих мікроподій. Частинка або кусковий елемент середовища наближається до поверхні з певною швидкістю, має нормальну і тангенціальну складові імпульсу, контактує з матеріалом, викликає пружно-пластичну деформацію, а далі або відскакує, або ковзає, або перекочується, або вдавлюється з частковим руйнуванням поверхні. У результаті в зоні контакту виникає поле напружень, яке може спричинити: мікрорізання виступами абразиву; мікрооранка без негайного відриву частинок матеріалу; втомне відшарування після багаторазових циклів; крихке сколювання; видавлювання матеріалу по краях лунки; зсувне руйнування зміцнених фаз; руйнування поверхневих оксидних або наплавлених шарів [7].

Класичні підходи до абразивного зношування виходять із того, що інтенсивність втрати матеріалу корелює з твердістю зношуваної поверхні та геометрією абразивних зерен. Однак в умовах удару цього вже недостатньо. Для ударно-абразивного процесу значущими стають ударна в'язкість, тріщиностійкість, межа текучості за високих швидкостей деформації, здатність до деформаційного зміцнення, фазові перетворення типу TRIP/TWIP, стабільність карбідної фази та міцність зчеплення покриття з основою [1; 11; 15; 16].

Важливо також відрізнити ударно-абразивне зношування від близьких за змістом понять. Термін «ерозія твердими частинками» зазвичай використовують для потокових систем, де матеріал руйнується частинками, що переносяться газом або рідиною; «абразивне зношування» частіше описує дряпання і різання при відносному ковзанні; «ударне зношування» пов'язане з циклічними контактами без обов'язкової участі вільних твердих частинок. У реальних машинах ці режими часто формують неперервний спектр, але для ударно-абразивного випадку принциповими є одночасна наявність ударної енергії й твердого середовища, яке або вже є абразивом, або перетворюється на нього внаслідок дроблення [2; 5;].

Ще однією специфічною ознакою цього виду зношування є виражена неоднорідність пошкодження на макро- і мікрорівнях. На різних ділянках однієї й тієї самої поверхні можуть домінувати різні механізми: на фронтальних зонах - вдавлювання і тріщиноутворення, на периферії - мікрорізання та борознування, у западинах - накопичення дрібного абразиву й трибошару, на виступах - локальне перевантаження та викришування. Саме тому для коректної інтерпретації результатів випробувань потрібне фрактографічне й металографічне дослідження ушкодженого шару, а не лише масова втрата зразка [7; 12; 14].

У загальному випадку ударно-абразивне зношування є відкритою термодинамічною системою, де зовнішня механічна енергія перетворюється на пластичну деформацію, руйнування зв'язків, тепловиділення, акустичні та хвильові явища, утворення нових поверхонь і вторинних структур.

Частина енергії дисипується через наклеп і внутрішнє тертя, частина витрачається на зародження тріщин, а частина - на переміщення та подрібнення самого абразиву. Отже, матеріал з високою твердістю, але низькою здатністю до енергопоглинання, може поступитися менш твердому, проте в'язкішому матеріалу в умовах інтенсивної ударної дії [4; 11; 16].

З позицій структурного матеріалознавства основна суперечність цього процесу полягає в необхідності одночасно забезпечити високу опірність проникненню абразиву та достатню опірність крихкому руйнуванню. У металах це досягається або за рахунок оптимальної комбінації мартенситної матриці з контрольованою кількістю залишкового аустеніту, або через формування дрібнодисперсних твердих фаз у відносно в'язкій основі, або завдяки багаточастинковим та градієнтним поверхневим структурам. У керамічних і композиційних матеріалах, навпаки, вирішальною стає проблема пригнічення катастрофічного розповсюдження тріщин і підвищення зв'язності фаз [11; 15; 17].

Таким чином, ударно-абразивне зношування слід розглядати не як просту суму «удару плюс абразив», а як багаторівневий процес, у якому механізми контакту, руйнування і самоорганізації поверхневого шару змінюються в часі. На початковій стадії переважають деформація і наклеп, на перехідній - накопичення дефектів та мікротріщин, а на розвинутій - стабілізація або, навпаки, лавиноподібне прискорення зносу залежно від здатності матеріалу утворювати захисний вторинний шар. Саме ця еволюційність відрізняє ударно-абразивний процес від спрощених статичних схем зношування.



Рис. 2. Структурна схема процесу та наслідків ударно-абразивного зношування.

Для зручності узагальнення домінуючих механізмів у різних умовах доцільно користуватися порівняльною характеристикою, наведеною в таблиці 1.

Таблиця 1. Узагальнення домінуючих механізмів ударно-абразивного зношування

Умови контакту	Домінуючий механізм	Типовий мікрорельєф	Матеріалознавчий акцент
Малі кути атаки, гострий абразив	Мікрорізання	Борозни, гребені	Підвищення твердості поверхні
Середні кути, повторні удари	Мікрооранка + наклеп	Лунки, згладжування, валки матеріалу	Баланс твердості й в'язкості
Великі кути, високий імпульс	Тріщини, сколювання	Кратери, лущення, сколи	Тріщиностійкість, стискальні напруження
Багаточастинкове	Змішаний режим	Трибошар, борознування,	Стабільність поверхневого шару

середовище		локальне лушення	шару
------------	--	------------------	------

Ударно-абразивне зношування реалізується через кілька базових механізмів, які проявляються або послідовно, або одночасно. Найпоширенішим для пластичних металів є мікрорізання. Якщо частинка має гострі кромки і тангенціальна складова швидкості достатньо велика, вона діє як мініатюрний різець: врізається у поверхню, відтискає матеріал убік, формує борозну і виносить частину металу у вигляді стружкоподібних або лускоподібних фрагментів. За нижчого співвідношення тангенціального і нормального навантаження переважає мікрооранка - матеріал відтискається в боки без негайного відриву, але багаторазове повторення такого акту призводить до втомного видалення гребенів борозен [1; 4; 6].

Другий механізм - локальне вдавлювання та видавлювання матеріалу. За переважно нормального удару частинка утворює лунку, а навколо неї - кільце деформованого металу. Якщо матеріал достатньо пластичний, виникає зона інтенсивного наклепу, в якій твердість зростає, але водночас накопичуються дислокації та внутрішні напруження. При повторних ударах у тих самих або сусідніх зонах наклепаний шар втрачає деформаційну здатність і починає руйнуватися через зсувні смуги, лушення або відрив фрагментів по підповерхневих тріщинах [4; 7; 12].

Для крихких або надтвердих матеріалів, а також для сильно наклепаних поверхонь, домінує механізм мікросколювання. Початковий удар породжує поле стискальних і розтягальних напружень, під дією яких під поверхнею зароджуються медіанні, кільцеві та латеральні тріщини. Коли наступні удари або абразивне ковзання активізують ці тріщини, з поверхні відколюються частинки матеріалу. Саме тому матеріали з дуже високою твердістю, але низькою тріщиностійкістю, в умовах ударно-абразивного навантаження часто зношуються не повільніше, а швидше за більш «м'які», але в'язкі аналоги [4; 9; 16].

Окреме місце займає контактна втома. Навіть коли одиничний удар не перевищує критичний рівень руйнування, багаторазова циклічна дія створює скупчення мікрodefektів: дислокаційні комірки, смуги зсуву, мікропори, підповерхневі тріщини уздовж меж зерен або між твердими фазами й матрицею. Зовні це може проявлятися як лускування, пітинг, відшарування поверхневого шару або «викришування» карбідних частинок. Ударно-абразивне середовище істотно прискорює цей механізм, тому що продукти втомного руйнування одразу видаляються абразивом, не даючи поверхні стабілізуватися [3; 6; 15].

Значною мірою механізм руйнування визначається формою абразивних частинок. Гострокутні зерна кварцу, корунду або уламків руди інтенсивніше ріжуть поверхню та концентрують напруження на вершинах. Округлі частинки частіше спричиняють вдавлювання, прокочування і повторне пластичне деформування. Якщо ж частинка сама руйнується під час контакту, система ускладнюється: утворюються нові дрібні абразиви, зростає кількість контактів, змінюється локальний розподіл навантажень, а характер зношування може переходити від високоенергетичного сколювання до дрібномасштабного борознування [5; 10; 14].

Дуже важливим є кут атаки частинок. Для пластичних матеріалів максимальна швидкість втрати матеріалу зазвичай спостерігається за відносно малих або середніх кутів, коли поєднуються врізання та ковзання. Для крихких матеріалів максимум часто зміщується до великих кутів, близьких до нормального удару, оскільки саме в цих умовах найактивніше розвивається мережа тріщин [4; 6; 10]. Проте в ударно-абразивних вузлах із замкненою циркуляцією частинок ця залежність може бути складнішою: одна й та сама частинка спочатку діє як ударник, а після відскоку - як абразив, що ковзає.

Не менш суттєвою є швидкість деформації. Під час імпульсного контакту поверхневий шар зазнає короткочасного, але дуже інтенсивного навантаження. Для багатьох сталей це означає зростання межі текучості, локальне адіабатичне нагрівання, зміни механізму ковзання дислокацій, а іноді - деформаційно-індуковані фазові перетворення. Наприклад, залишковий аустеніт у деяких сталях здатний перетворюватися на мартенсит безпосередньо під час ударно-абразивної дії, підвищуючи твердість поверхні, але лише за умови, що ця трансформація не супроводжується небезпечним рівнем крихкості [11; 15].

Тепловий чинник у більшості машин не є провідним, однак нехтувати ним не можна. Локальні спалахи температури у мікроконтактах здатні прискорити релаксацію напружень, окиснення, розм'якшення або, навпаки, крихке руйнування оксидних плівок. У вологих чи корозійно-активних середовищах до механічного пошкодження додається хімічний компонент: мікротріщини полегшують доступ середовища, а продукти корозії можуть або тимчасово заповнювати западини, або руйнуватися і перетворюватися на додатковий абразив [2; 10; 14].

На підповерхневому рівні ударно-абразивне зношування майже завжди супроводжується градієнтом властивостей. Безпосередньо біля поверхні формується найтвердіший, але часто й найкрихкіший шар; нижче розташовується зона інтенсивної деформації; ще глибше - перехідна область із меншою щільністю дефектів. Товщина цих зон залежить від енергії удару, модуля пружності, мікроструктури матеріалу й розміру абразивних зерен. Чим різкіший цей градієнт, тим вища ймовірність відшарування поверхневого шару по підповерхневій межі, де концентруються напруження [7; 12; 16].

Отже, фізична картина ударно-абразивного зношування є багатоканальною. Вона включає пластичну деформацію, різання, втомне накопичення пошкоджень, тріщиноутворення, локальний нагрів, утворення вторинних структур та руйнування цих структур. Для правильного підбору матеріалу важливо не просто зменшити один із механізмів, а змістити систему в такий режим, де пошкодження дисипується переважно через контрольований наклеп і неглибоке борознування, а не через катастрофічні сколи чи підповерхнєве лущення.



Рис. 3. Узагальнена залежність відносної інтенсивності зношування від кута атаки частинок для пластичних і крихких матеріалів.

Параметри, що визначають інтенсивність ударно-абразивного зношування, доцільно поділяти на три групи: властивості матеріалу деталі; характеристики абразивного середовища; параметри зовнішнього навантаження та кінематики руху. Кінцевий результат завжди є наслідком їхньої взаємодії. Тому оцінювати, наприклад, вплив твердості без урахування форми зерен або енергії удару методично неправильно.

Твердість матеріалу залишається базовим параметром, оскільки визначає опір проникненню абразивної частинки в поверхню. За інших рівних умов із підвищенням твердості зменшується глибина врізання, площа реального контакту й об'єм пластично деформованого матеріалу. Саме тому в режимах переважно абразивного дряпання твердість добре корелює зі зменшенням зносу [1; 3; 8]. Проте в умовах сильного удару залежність стає нелінійною: після певного рівня твердість продовжує зростати, але в'язкість руйнування знижується, і матеріал починає втрачати стійкість до тріщиноутворення [11; 16]. Звідси випливає висновок, що для ударно-абразивного режиму потрібен не максимум твердості, а її оптимум.

Список використаних джерел

1. Hutchings I., Shipway P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p.
2. ASTM G40-22a. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022. DOI: 10.1520/G0040-22A.
3. Archard J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics. 1953. Vol. 24, no. 8. P. 981-988. DOI: 10.1063/1.1721448.
4. Finnie I. Erosion of Surfaces by Solid Particles. Wear. 1960. Vol. 3, no. 2. P. 87-103. DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
5. Gates J. D. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. Wear. 1998. Vol. 214. P. 139-146.
6. Hutchings I. M. Mechanisms of wear in powder technology: A review. Powder Technology. 1993. Vol. 76, no. 1. P. 3-13. DOI: 10.1016/0032-5910(93)80035-9.
7. Kragelsky I. V., Zolotar A. I., Sheiwekhman A. O. Theory of material wear by solid particle impact - a review. Tribology International. 1985. Vol. 18, no. 1. P. 3-11. DOI: 10.1016/0301-679X(85)90002-7.
8. Brown R., Jun E. J., Edington J. W. Mechanisms of solid particle erosive wear for 90° impact on copper and iron. Wear. 1981. Vol. 74. P. 143-156. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90200-3.
9. Wilson R. D., Hawk J. A. Impeller wear impact-abrasive wear test. Wear. 1999. Vol. 225-229, Part 2. P. 1248-1257. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00046-0.
10. Badisch E., Kirchgassner M., Franek F. Continuous impact/abrasion testing: Influence of testing parameters on wear behaviour. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2009. Vol. 223, no. 5. P. 741-750. DOI: 10.1243/13506501JET535.
11. Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions: A review. Powder Technology. 2021. Vol. 387. P. 527-559. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.04.055.
12. Melentiev R. Physical theories of solid particle erosion and abrasive jet wear. Journal of Manufacturing Processes. 2023. Vol. 106. P. 422-452. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.10.014.
13. Савуляк В. І., Гримашевич В. О. Аналіз процесів ударно-абразивного зношування робочих органів дорожньо-будівельних машин. Наукові праці ВНТУ. 2024. № 4. С. 114-120. DOI: 10.31649/2307-5376-2024-4-114-120.
14. Галико А. В. Ударно-абразивне зношування деталей машин та агрегатів. Наукові записки. Кіровоград: КНТУ, 2007. Вип. 8. С. 77-78.
15. Chintha A. R., Valtonen K., Kuokkala V.-T., Kundu S., Peet M. J., Bhadeshia H. K. D. H. Role of fracture toughness in impact-abrasion wear. Wear. 2019. Vol. 428-429. P. 430-437. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.028.
16. Zambrano O. A. A Review on the Effect of Impact Toughness and Fracture Toughness on Impact-Abrasion Wear. Journal of Materials Engineering and Performance. 2021. Vol. 30, no. 10. P. 7101-7116. DOI: 10.1007/s11665-021-05960-5.
17. Saha G., Valtonen K., Saastamoinen A., Peura P., Kuokkala V.-T. Impact-abrasive and abrasive wear behavior of low carbon steels with a range of hardness-toughness properties. Wear. 2020. Vol. 450-451. Art. 203263. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203263.
18. ASTM G65-16(2021). Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
19. ASTM G76-18. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.