



Прийнято 21.04.2026. Прорецензовано 02.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 621.891:620.178.16

DOI: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-132-145

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЗМІВ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ЗНОСОТРИВКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Присяжнюк П. М.

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8325-3745>
e-mail: pavlo1752010@gmail.com

Тирлич М. В. *

Студент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-3787-5563>
e-mail: maksym.tyrlych-a13124@nung.edu.ua

Тирлич В. В.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6609-1975>
e-mail: turluch27@ukr.net

Анотація. У статті проаналізовано сучасні уявлення про механізми ударно-абразивного зношування матеріалів, що працюють в умовах одночасної дії ударних навантажень та абразивного середовища. Показано, що ударно-абразивне зношування є складним багатомеханізовим процесом. У ньому реалізуються мікрорізання поверхні абразивними частинками, інтенсивна пластична деформація приповерхневих шарів, втомне підповерхневе руйнування та деламінаційне відшаровування матеріалу. Проаналізовано особливості напружено-деформованого стану матеріалу в зоні контакту абразивних частинок із поверхнею деталі та визначено основні фактори, що впливають на інтенсивність зношування. Розглянуто умови експлуатації типових деталей машин, які працюють у режимі ударно-абразивного навантаження, зокрема ковшів екскаваторів, молотків і бил дробарок, бурових доліт, клапанів бурових насосів та футерівок дробильно-помольного обладнання. Показано, що інтенсивність їх зношування визначається комплексною дією ударних навантажень, властивостей абразивного середовища та фізико-механічних характеристик матеріалів. У роботі також узагальнено сучасні методи оцінки зносостійкості матеріалів, що включають лабораторні стендові випробування, натурні дослідження, мікроструктурний аналіз поверхонь зносу та чисельне моделювання процесів руйнування. Показано, що комплексне використання експериментальних і розрахункових методів дозволяє підвищити достовірність оцінки зносостійкості та прогнозування ресурсу деталей машин, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування.

Запропоноване посилання: Присяжнюк, П. М., Тирлич, М. В. & Тирлич, В. В. (2026). Особливості механізмів ударно-абразивного зношування та методи оцінки зносотривкості деталей машин. *Нафтогазова енергетика*, 1(45), 132-145. doi: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-132-145.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Ключові слова: ударно-абразивне зношування, зносостійкість, трибологія, механізми зношування, деталі машин, абразивне середовище.

Вступ

У сучасному машинобудуванні, гірничодобувній та нафтогазовій галузях значна кількість деталей машин і технологічного обладнання працює в умовах інтенсивної взаємодії з абразивним середовищем. При цьому такі деталі зазнають дії значних ударних навантажень. До таких умов експлуатації належать процеси буріння свердловин, дроблення та подрібнення гірських порід, транспортування абразивних матеріалів, а також робота землерийних і гірничих машин. У цих умовах поверхні деталей піддаються складному комплексу механічних впливів, що призводить до розвитку специфічного виду руйнування — ударно-абразивного зношування.

Ударно-абразивне зношування характеризується одночасною дією ударних імпульсів і абразивного контакту твердих частинок з поверхнею матеріалу. Така дія формує складний напружено-деформований стан у приповерхневих шарах. У результаті в матеріалі розвиваються процеси пластичної деформації, мікрорізання, викришування та втомного підповерхневого розтріскування. Зазначені процеси зумовлюють поступове руйнування поверхневого шару і втрату матеріалу.

Інтенсивність ударно-абразивного зношування значною мірою визначає довговічність робочих органів машин і обладнання, що працює в абразивних середовищах. До найбільш характерних прикладів таких елементів належать ковші екскаваторів, молотки та біла дробарок, футерівки дробильно-помольного обладнання, клапани бурових насосів, а також різальні елементи бурових доліт. Передчасне зношування цих деталей призводить до зниження ефективності роботи обладнання. Воно також збільшує витрати на ремонт і технічне обслуговування та зменшує загальну надійність технологічних систем.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених процесам абразивного та ударного зношування, механізми руйнування матеріалів в умовах їх поєднаної дії залишаються складними і багатofакторними. Інтенсивність зношування визначається не лише твердістю матеріалу, але і його мікроструктурою, ударною в'язкістю, тріщиностійкістю, а також параметрами навантаження та властивостями абразивного середовища.

У зв'язку з цим актуальним є узагальнення сучасних уявлень про механізми ударно-

абразивного зношування та аналіз умов експлуатації деталей машин, що працюють у таких режимах. Це дозволяє сформулювати наукове підґрунтя для вибору зносостійких матеріалів, оптимізації конструкції робочих органів і розроблення ефективних методів оцінки їх зносостійкості.

Метою роботи є аналіз сучасних уявлень про механізми ударно-абразивного зношування матеріалів, дослідження умов роботи типових деталей машин у таких режимах, а також узагальнення методів оцінки їх зносостійкості.

Враховуючи складний характер ударно-абразивної взаємодії, важливим є аналіз фізичних механізмів руйнування поверхневих шарів матеріалу. Дослідження цих процесів дозволяє встановити закономірності формування зношеного шару та визначити роль механічних властивостей матеріалу і параметрів навантаження у розвитку пошкоджень.

Механізми ударно-абразивного зношування

Ударно-абразивне зношування (*impact-abrasive wear*) є складним видом контактного руйнування поверхні матеріалів, що виникає в умовах одночасної дії ударних навантажень і абразивної взаємодії твердих частинок із поверхнею матеріалу [1, 2]. На відміну від чисто абразивного зношування, для якого характерні режими ковзання або перекочування абразивних зерен по поверхні, ударно-абразивна взаємодія реалізується в імпульсному режимі навантаження. Вона супроводжується високими локальними напруженнями і значними швидкостями деформації.

Фізична природа ударно-абразивного зношування визначається поєднанням декількох мікромеханізмів руйнування, які реалізуються в приповерхневих шарах матеріалу під дією повторних ударних імпульсів та абразивного контакту. До основних механізмів такого зношування належать пластична деформація, мікрорізання, викришування, підповерхневе тріщиноутворення та деламінаційне відшарування матеріалу. Співвідношення між цими механізмами залежить від механічних властивостей матеріалу, його мікроструктури, а також від параметрів навантаження і характеристик абразивного середовища.

Абразивна складова механізму ударно-абразивного зношування проявляється у вигляді пластичного витіснення матеріалу абра-

живними частинками та мікрорізнання. Ці процеси традиційно розглядаються як базові мікромеханізми зношування при контакті типу «тверда частинка – м'якша поверхня» та широко використовуються для аналізу морфології поверхонь після випробувань [1, 8]. Ударний компонент, своєю чергою, зумовлює локальне вдавлювання абразивних частинок у поверхню матеріалу, а також формування зон інтенсивної пластичної деформації та наклепу. За повторних навантажень відбувається накопичення втомних пошкоджень і розвиток підповерхневого тріщиноутворення [3, 4].

Поєднання ударної та абразивної дії призводить до істотного збільшення глибини пластично деформованого шару та інтенсифікує локальну концентрацію напружень у підповерхневих об'ємах матеріалу. У результаті підповерхневі тріщини, що зароджуються в зоні максимальних циклічних напружень, поширюються переважно паралельно поверхні тертя і, з'єднуючись між собою, формують ослаблені шари матеріалу.

Деламінаційне відшаровування (*delamination wear*) є механізмом зношування, за якого втрата матеріалу відбувається внаслідок відокремлення тонких поверхневих або підповерхневих шарів. Такі шари формуються у результаті розвитку та злиття підповерхневих тріщин під дією повторних ударних і контактних навантажень. Такі тріщини, зазвичай, орієнтовані паралельно поверхні тертя і зароджуються в зоні максимальних циклічних зсувних напружень. Подальша дія ударних імпульсів та абразивного зсуву спричиняє відокремлення ослаблених шарів у вигляді пластин або лусочок. Це зумовлює інтенсивну втрату маси матеріалу та визначає домінуючий характер зношування в умовах ударно-абразивного навантаження [3, 4].

Сучасні експериментальні дослідження показують, що процес ударно-абразивного зношування має циклічний характер і включає стадії ударного контакту, абразивного зсуву та відшаровування матеріалу. Застосування методики *continuous impact abrasion test* дозволило встановити можливість зміни домінуючого механізму зношування залежно від енергії удару та температури [3, 4].

Повторні удари призводять до формування сильно деформованого поверхневого та підповерхневого шару з підвищеною щільністю дефектів і залишковими напруженнями, що створює умови для розвитку низькоциклової втоми, зародження підповерхневих тріщин і деламінаційного відшаровування матеріалу [3, 4, 7].

Встановлено, що твердість матеріалу не може розглядатися як визначальний критерій зносостійкості в ударно-абразивних умовах. Матеріали з підвищеною тріщиностійкістю та здатністю до поглинання енергії удару демонструють значно кращий опір ударно-абразивному зношуванню навіть за близьких значень твердості [5, 6].

У роботі [5] показано, що тріщиностійкість (*fracture toughness*) є одним із ключових чинників опору матеріалів ударно-абразивному зношуванню незалежно від рівня їх твердості. Дослідження виконано на спеціально розроблених сталях із близькими значеннями твердості, але різними показниками тріщиностійкості. Це дало змогу чітко відокремити вплив тріщиностійкості від впливу твердості. Встановлено, що сталі з вищою тріщиностійкістю демонструють значно кращий опір ударно-абразивному зносу, ніж матеріали з подібною твердою фазою, але меншою здатністю поглинати енергію удару. Підвищена тріщиностійкість ефективно пригнічує розвиток підповерхневих тріщин, зменшує інтенсивність втомного пошкодження та обмежує деламінаційне відшаровування матеріалу. Це підтверджує визначальну роль цього параметра в механізмі *impact-abrasion*.

Мікрорельєф поверхні при ударно-абразивному зношуванні істотно відрізняється від рельєфу, характерного для абразивного зношування в умовах ковзання. У місцях контакту поверхні з абразивними зернами діють високі питомі тиски. Унаслідок цього частина зерен проникає в матеріал і утворює лунки, спричиняючи локальну пластичну деформацію. За повторних контактів абразивні зерна можуть потрапляти в раніше сформовані лунки, розширюючи та поглиблюючи їх. Інші зерна, взаємодіючи між лунками, деформують матеріал і частково «завальцьовують» попередні uszkodження.

Багаторазова пластична деформація в зоні контакту з абразивом призводить до відриву часток матеріалу з поверхні зношування. Такий механізм характерний переважно для в'язких матеріалів. Із підвищенням твердості матеріалу поряд із відривом часток унаслідок передеформації посилюється крихке викришування, яке стає домінуючим механізмом зношування для більш твердих і крихких матеріалів [8].

За умов абразивного зношування при ковзанні залежність інтенсивності зношування від твердості має близький до лінійного характеру, тобто відносна зносостійкість сталі зростає зі

збільшенням твердості. Натомість зносостійкість при ударно-абразивному навантаженні визначається не лише твердістю матеріалу, а й його хімічним складом і мікроструктурою. Твердість у цьому випадку впливає передусім на глибину проникнення абразивних зерен у матеріал і, відповідно, на об'єм металу, що зазнає деформації, руйнування та видаляється з поверхні [8].

Мікроструктура матеріалу визначає співвідношення між абразивним різанням і ударно-втомним відшаровуванням. Для високоміцних мартенситних сталей характерне поєднання борознуотворення з деламінацією поверхневого шару, тоді як у багатофазних системах та наплавках додатково реалізуються механізми виривання твердих фаз і розвитку тріщин по міжфазних межах [6, 7].

Таким чином, сучасні уявлення розглядають ударно-абразивне зношування як **багатомеханізмовий процес**, у якому домінуючий шлях руйнування визначається співвідношенням між твердістю, здатністю до деформаційного зміцнення та тріщиностійкістю матеріалу [1–8]. Отримані уявлення є методологічною основою для вибору матеріалів і розроблення структур з підвищеною зносостійкістю в умовах ударно-абразивного навантаження.

Розглянуті механізми руйнування поверхневих шарів матеріалів є характерними для широкого спектра деталей машин, що працюють в умовах ударно-абразивного навантаження. Реалізація зазначених механізмів значною мірою визначається конструктивними особливостями робочих органів, умовами їх експлуатації та характером контакту з абразивним середовищем. Тому важливим є аналіз типових деталей машин, у яких ударно-абразивне зношування є визначальним фактором зниження ресурсу.

Типові деталі, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування

У сучасному машинобудуванні, гірничодобувній, металургійній, будівельній та сільськогосподарській галузях значна кількість машин і механізмів експлуатуються в умовах інтенсивного зношування. Одним із найбільш небезпечних і складних видів деградації поверхонь є **ударно-абразивне зношування**, яке поєднує дію твердих абразивних частинок і ударних навантажень.

Такий вид зношування суттєво скорочує ресурс деталей, підвищує витрати на технічне обслуговування і ремонт, а також негативно впливає на надійність машин у цілому.

За своєю природою ударно-абразивне зношування є процесом руйнування поверхневих шарів деталей унаслідок одночасної дії механічних ударів (короткочасних, але значних за рівнем напружень) та абразивних частинок (пісок, руда, ґрунт, шлак, щебінь тощо).

У процесі експлуатації абразивні частинки, що перебувають між контактними поверхнями або рухаються з високою швидкістю, завдають багаторазових мікроударів по поверхні деталі. Унаслідок цього відбувається утворення мікротріщин, пластична деформація поверхневого шару, викришування та відшаровування матеріалу, а також прискорений розвиток втомних процесів.

На відміну від чисто абразивного зношування, для ударно-абразивного характерною є циклічність навантаження, що значно інтенсифікує процеси втомного руйнування матеріалу.

Інтенсивність ударно-абразивного зношування визначається сукупністю таких факторів:

- властивостями абразиву (твердість, форма частинок, їх розмір і концентрація);
- параметрами ударного навантаження (сила та частота ударів, кут зіткнення частинок з поверхнею);
- властивостями матеріалу деталі (твердість, ударна в'язкість, структура та фазовий склад, наявність зміцнювальних елементів);
- умовами експлуатації (температура, вологість, наявність корозійно-активного середовища).

Найбільш несприятливими є умови, за яких висока твердість матеріалу поєднується з недостатньою ударною в'язкістю, що призводить до інтенсивного викришування поверхневих шарів.

До типових деталей, що зазнають ударно-абразивного зношування у гірничій та будівельній галузях, належать ковші екскаваторів, зуби та ріжучі кромки ковшів, футерівки дробарок і млинів, молотки та біла дробарок.

Ковші екскаваторів

Ударно-абразивне зношування ковша екскаватора є одним із ключових чинників, що визначають ресурс і надійність робочих органів землерийних машин. Воно формується внаслідок сумісної дії циклічних ударних навантажень і абразивного контакту з ґрунтами та гірськими породами, які містять тверді мінеральні включення, зокрема кварц і польові шпати [2, 10, 11]. У процесі копання ківш зазнає багаторазових ударів об вибій, а також інтенсивного ковзання абразивної маси по ро-



Рисунок 1 – Загальний вигляд зношених зубів кар’єрного екскаватора JCB



Рисунок 2 – Загальний вигляд зношеного ротора дробарки Pulvomatic

бочих поверхнях. Це зумовлює складний характер руйнування поверхневих шарів матеріалу.

Найбільш інтенсивне зношування спостерігається в зоні зубів, ріжучої кромки та внутрішньої поверхні ковша. У цих зонах реалізуються механізми мікрорізання, пластичної деформації та викришування матеріалу [9, 11]. Ударна складова навантаження сприяє ініціації мікротріщин, тоді як абразивна дія прискорює їх розвиток і видалення частинок металу з поверхні. Це призводить до прогресуючої втрати геометрії робочих елементів (рисунок 1).

Інтенсивність ударно-абразивного зношування ковша визначається абразивністю та гранулометричним складом ґрунту, енергією удару, швидкістю взаємодії, а також структурно-механічними властивостями матеріалу ковша [10]. У зв’язку з цим у наукових дослідженнях значна увага приділяється вибору зносостійких матеріалів, застосуванню наплавлених і композиційних шарів, а також оптимізації конструкції робочих органів з метою підвищення їх довговічності.

Робочі поверхні дробарок

Ударно-абразивне зношування молотків, бил та роторів дробарок є визначальним фактором, що обмежує ресурс робочих органів дробильного обладнання. Таке обладнання використовується для подрібнення гірських порід, руд і будівельних матеріалів. Воно зумовлене сумісною дією інтенсивних ударних навантажень, що виникають у процесі багаторазових зіткнень з кусковим матеріалом, та абразивного стирання твердими частинками, присутніми в подрібнюваній сировині [8–10] (рисунок 2).

Найбільш інтенсивне зношування спостерігається на робочих краях молотків і поверхнях бил, які безпосередньо взаємодіють з матеріалом. У цих зонах реалізуються механізми мікрорізання, пластичної деформації та викришування, що супроводжується утворенням мікротріщин і поступовим руйнуванням поверхневого шару [9]. Ударна складова навантаження визначає швидкість накопичення втомних пошкоджень, тоді як абразивна дія прискорює видалення матеріалу з поверхні.

Інтенсивність ударно-абразивного зношування робочих поверхонь дробарок залежить від маси та швидкості руху робочих поверхонь, твердості та абразивності матеріалу, що подрібнюється, конструктивних особливостей дробарки, а також фізико-механічних властивостей матеріалу молотків і бил [10].

Клапани бурових насосів

Ударно-абразивне зношування клапанів бурових насосів є одним із основних чинників, що обмежують їх надійність і строк служби в процесі буріння свердловин. Воно зумовлене сумісною дією циклічних ударних навантажень і абразивного впливу бурового розчину. Ударні навантаження виникають під час відкриття та закривання клапанів, а буровий розчин містить тверді частинки гірських порід [2, 10, 11].

Найбільш інтенсивне зношування спостерігається на посадкових поверхнях клапана та сідла, де реалізуються механізми мікрорізання, пластичної деформації та ерозійного руйнування матеріалу [9]. Ударна взаємодія елементів клапанної пари сприяє ініціації мікротріщин у поверхневих шарах. Абразивні частинки бурового розчину, своєю чергою, прискорюють їх розвиток і видалення частинок матеріалу. У результаті відбувається порушення герметичності клапана. Це призводить до зниження об'ємного коефіцієнта корисної дії бурового насоса.

Інтенсивність ударно-абразивного зношування клапанів визначається гранулометричним складом і концентрацією твердих частинок у буровому розчині, частотою циклів роботи клапана, швидкістю потоку, а також фізико-механічними властивостями матеріалів клапанної пари [10].

Бурові долота

Бурові долота є одними з найбільш навантажених елементів бурильного інструменту, оскільки в процесі буріння вони безпосередньо взаємодіють з вибією поверхнею свердловини. Умови їх роботи характеризуються поєднанням значних осьових навантажень, ударної дії та інтенсивного абразивного контакту з гірськими породами, що зумовлює розвиток ударно-абразивного зношування.

У процесі руйнування породи різальні елементи бурових доліт зазнають багаторазових ударів, а також ковзання і прокочування по поверхні породи. Така порода часто містить тверді мінеральні включення, зокрема кварц, карбіди та інші абразивні компоненти [2, 10,

11]. За таких умов у поверхневих шарах матеріалу долота формується складний напружено-деформований стан, що сприяє інтенсивному руйнуванню матеріалу.

Найбільш інтенсивне зношування спостерігається на зубцях, шарошках і твердосплавних вставках бурових доліт, де реалізуються механізми мікрорізання, пластичної деформації та викришування матеріалу [8, 10]. Ударна складова навантаження сприяє ініціації мікротріщин, тоді як абразивна дія породи прискорює їх розвиток і видалення частинок матеріалу з поверхні. У результаті відбувається заокруглення, обламування або повне руйнування різальних елементів. Це призводить до зниження ефективності буріння.

На рисунку 3 показано зношене трикусне бурове долото з позначенням основних конструктивних елементів. До них належать твердосплавні вставки (cemented carbide inserts), кнопки із твердого сплаву (cemented carbide buttons), зміцнювальний зносостійкий шар (hardfacing) та елементи підшипникового вузла. Зазначені конструктивні елементи забезпечують ефективне руйнування гірської породи та підвищують зносостійкість бурового інструмента під час буріння свердловин.

Інтенсивність ударно-абразивного зношування бурових доліт визначається фізико-механічними властивостями гірських порід, величиною осьового навантаження, частотою обертання долота, а також матеріалом і конструкцією різальних елементів [10]. У зв'язку з цим у сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється застосуванню високоміцних легованих сталей, твердосплавних матеріалів і зносостійких покриттів, а також оптимізації геометрії різальних елементів з метою підвищення ресурсу бурових доліт.

Футерівки дробарок і млинів

Футерівки дробарок і млинів є відповідальними елементами дробильно-помольного обладнання, які забезпечують захист корпусів машин від руйнування та безпосередньо сприймають навантаження від подрібнюваного матеріалу. У процесі експлуатації вони працюють в умовах інтенсивної дії ударних навантажень і абразивного стирання, що зумовлює розвиток ударно-абразивного зношування.

У дробарках і млинах футерівки зазнають багаторазових ударів від кускового матеріалу, а також дії абразивних частинок руди, породи або інших сипких матеріалів, які характеризуються високою твердістю та абразивністю [2,10,11]. За таких умов у поверхневих шарах

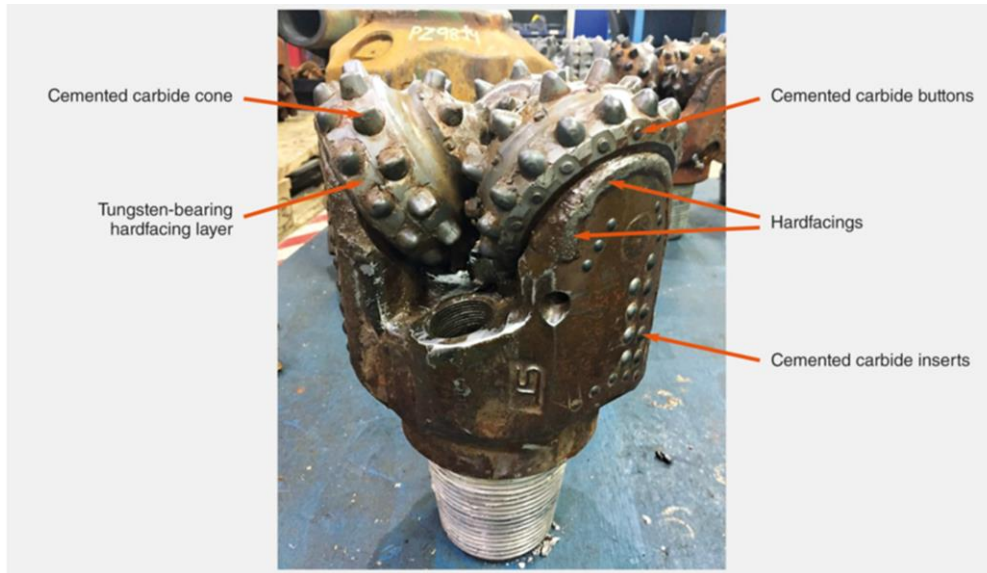


Рисунок 3 – Зношене триконусне бурове долото з позначенням основних конструктивних елементів [22]



Рисунок 4 – Робоча поверхня конусної дробарки після реставрації методом наплавлення

матеріалу футерівок виникає складний напружено-деформований стан, що сприяє інтенсивному руйнуванню.

Найбільш інтенсивне зношування спостерігається на робочих поверхнях футерівок, які безпосередньо контактують з матеріалом, що подрібнюється. У цих зонах реалізуються механізми мікрорізання, пластичної деформації та викришування матеріалу. Ці процеси супроводжуються утворенням мікротріщин, локальним відшаровуванням поверхневих шарів і поступовим зменшенням товщини футерівки [9, 10]. Ударна складова навантаження визначає швидкість ініціації дефектів, тоді як абразивна дія прискорює їх розвиток і поширення.

Робочу поверхню великого конуса дробарки із подрібнення вугілля наведено на рисунку 4, а плиту щоквої дробарки — на рисунку 5.

Інтенсивність ударно-абразивного зношування футерівок залежить від гранулометричного складу і маси кусків матеріалу, швидкості

їх руху, конструктивних особливостей дробарки або млина, а також фізико-механічних властивостей матеріалу футерівки [11]. У зв'язку з цим у сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється застосуванню високомарганцевих сталей, зносостійких чавунів і композиційних матеріалів. Окремим напрямом є оптимізація геометрії та способів кріплення футерівок з метою підвищення їх довговічності в умовах ударно-абразивного навантаження.

Дорожні фрези

Дорожні фрези (холодні фрезерувальні машини) призначені для демонтажу асфальтобетонних покриттів у процесі ремонту доріг. Їх основним робочим органом є фрезерний барабан із пікоподібними різцями, оснащеними твердосплавними наконечниками на основі WC-Co, які у процесі обертання здійснюють руйнування матеріалу покриття [2, 9, 10].



Рисунок 5 – Плита щоквої дробарки із нерівномірним зносом.



Рисунок 6 – Барабан дорожньої фрези із різцями в різному ступені зношування: повна втрата твердосплавного наконечника у частини різців

Умови роботи різців характеризуються поєднанням циклічних ударних навантажень при врзанні в покриття та інтенсивного абразивного контакту з мінеральним заповнювачем — щебенем, гравієм і кварцовим піском [1, 8, 10]. Кожен різець за один оберт барабана здійснює ударний контакт. Це зумовлює виражений циклічний характер навантаження, а отже — прискорений розвиток втомних пошкоджень.

Найбільш інтенсивне зношування спостерігається на твердосплавному наконечнику та в зоні його переходу до сталевого хвостовика. У цих зонах реалізуються механізми мікрорізання, пластичної деформації та викришування [9]. Ударна складова сприяє ініціації мікротріщин у наконечнику, тоді як абразивна дія прискорює їх розвиток і видалення матеріалу. Це призводить до повної втрати різальної здатності інструменту (рисунок 6).

Інтенсивність зношування різців визначається твердістю мінерального заповнювача,

глибиною фрезерування, швидкістю барабана та фізико-механічними властивостями матеріалу наконечника і хвостовика [8, 10, 11]. У зв'язку з цим сучасні дослідження спрямовані на оптимізацію складу твердосплавних матеріалів, застосування зносостійких сталей для хвостовиків та вдосконалення геометрії різців [21].

Узагальнення

Проведений аналіз умов експлуатації деталей машин свідчить, що ударно-абразивне зношування є характерним і визначальним видом деградації для широкого спектра елементів гірничодобувної, будівельної та бурової техніки. Незважаючи на відмінності у конструкції та функціональному призначенні розглянутих деталей, для всіх них спільною є поєднана дія ударних навантажень і абразивного стирання.

Порівняння механізмів зношування показує, що основними процесами руйнування по-

верхневих шарів є мікрорізання, пластична деформація, викришування та втомне руйнування матеріалу. При цьому співвідношення між зазначеними механізмами визначається умовами експлуатації, кінематикою контакту, властивостями абразивного середовища та фізико-механічними характеристиками матеріалу деталі.

Аналіз також свідчить, що підвищення твердості матеріалу без забезпечення достатньої ударної в'язкості не завжди приводить до зростання зносостійкості в умовах ударно-абразивного навантаження. У зв'язку з цим перспективними напрямками підвищення довговічності деталей є застосування збалансованих за властивостями матеріалів, використання композиційних і наплавлених шарів, а також оптимізація геометрії робочих поверхонь.

Таким чином, результати аналізу підтверджують доцільність комплексного підходу до вибору матеріалів і конструктивних рішень для деталей, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування. Аналіз умов експлуатації деталей машин, що працюють під дією ударно-абразивних навантажень, свідчить про складний характер процесів руйнування поверхневих шарів матеріалу. Інтенсивність зношування визначається сукупністю факторів, серед яких важливу роль відіграють механічні властивості матеріалу, мікроструктура, енергія удару, характеристики абразивного середовища та умови контакту.

Для кількісної оцінки зносостійкості матеріалів у таких умовах застосовують спеціальні експериментальні методики та випробувальні установки, що дають змогу відтворювати режими ударно-абразивної взаємодії та досліджувати механізми руйнування поверхні.

Методи оцінки зносотривкості за умов ударно-абразивного зношування

Ударно-абразивне зношування є одним із найбільш складних і небезпечних видів зношування деталей машин, оскільки поєднує в собі дію ударних навантажень і абразивного середовища. Даний процес характеризується складним напружено-деформованим станом поверхневих шарів матеріалу, високими градієнтами напружень та інтенсивним накопиченням пошкоджень. У результаті цього відбувається прискорене руйнування матеріалу, що значно знижує ресурс деталей і вузлів машин [2, 9, 10, 12, 13, 16].

Особливістю ударно-абразивного зношування є одночасна реалізація декількох механізмів руйнування, зокрема мікрорізання, пластичної деформації, втомного викришування та крихкого відколювання.

Для матеріалів із високою твердістю, але недостатньою ударною в'язкістю, характерним є розвиток мікротріщин, які швидко поширюються під дією повторних ударів. Тому оцінка зносотривкості за таких умов повинна базуватися не лише на показниках твердості, але й на аналізі здатності матеріалу до поглинання енергії удару [2, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 17].

Лабораторні методи оцінки зносотривкості є найбільш поширеними на початкових етапах дослідження матеріалів. Вони дозволяють у контрольованих умовах відтворити процеси ударно-абразивного зношування та визначити порівняльні характеристики різних матеріалів. У рамках прикладної механіки такі методи дають можливість аналізувати вплив енергії удару, контактної геометрії та властивостей абразиву на інтенсивність зношування [2, 9, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19].

Стендові ударно-абразивні випробування передбачають багаторазовий контакт зразка з абразивними частинками за наявності ударного навантаження. Основними параметрами, що регулюються під час випробувань, є маса та швидкість ударника, частота ударів, фракційний склад абразиву та кут взаємодії. Результати таких досліджень використовуються для побудови емпіричних залежностей та калібрування аналітичних моделей зношування [2, 9, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19].

Комбіновані абразивно-ударні методи дозволяють більш повно врахувати циклічний характер навантаження, притаманний реальним умовам експлуатації машин. Чергування фаз ударного навантаження та ковзного контакту призводить до накопичення втомних пошкоджень, що є важливим з точки зору механіки руйнування. Такі методи широко застосовуються при дослідженні наплавлених шарів і композиційних матеріалів [2, 10, 12, 13, 16, 17, 20].

Натурні випробування матеріалів у реальних умовах експлуатації забезпечують найбільш достовірну інформацію щодо їх зносотривкості в умовах ударно-абразивного зношування. Вони дозволяють врахувати комплексний вплив експлуатаційних факторів, характерних для роботи машин і механізмів. На відміну від лабораторних досліджень, натурні випробування відображають реальний напружено-деформований стан деталей. Цей стан формується під дією змінних ударних навантажень, абразивного середовища та конструктивних особливостей вузлів.

Такі випробування дають змогу оцінити вплив геометрії деталей, схем закріплення, розподілу навантажень і контактних умов на інтенсивність зношування та характер руйнування матеріалу. Вони також дозволяють виявити локальні зони концентрації напружень, які не завжди можуть бути адекватно відтворені в лабораторних умовах або чисельних моделях. Отримані результати використовуються для уточнення граничних умов та оцінки відповідності розрахунково-аналітичних і чисельних моделей реальним умовам зношування.

Разом із тим, натурні випробування мають низку суттєвих обмежень. Основними недоліками є їхня висока вартість, значна тривалість і складність контролю параметрів зношування, таких як енергія удару, інтенсивність абразивного потоку та змінність навантаження в часі. Це ускладнює відтвореність результатів і обмежує можливість їх прямого порівняння між різними об'єктами дослідження. У зв'язку з цим натурні випробування доцільно використовувати як завершальний етап комплексного дослідження зносотривкості матеріалів та як інструмент перевірки адекватності лабораторних і чисельних методів [2, 9, 17, 18, 19, 20].

Важливу роль у дослідженні процесів ударно-абразивного зношування відіграє мікроструктурний аналіз поверхонь і приповерхневих шарів матеріалів після випробувань. Такі дослідження дозволяють перейти від суто кількісної оцінки зношування до якісного аналізу механізмів руйнування, що реалізуються в умовах складної ударно-абразивної взаємодії. У межах прикладної механіки мікроструктурний аналіз розглядається як засіб встановлення зв'язку між напружено-деформованим станом матеріалу та характером його руйнування.

Застосування методів оптичної та сканівної електронної мікроскопії дає змогу ідентифікувати домінуючі механізми зношування, зокрема мікрорізання, пластичну течію, втомне викришування та крихке відколювання матеріалу. Аналіз морфології поверхні зносу дозволяє оцінити глибину пластичної деформації, напрямки розвитку мікротріщин, а також роль абразивних частинок у формуванні локальних концентраторів напружень.

З позицій механіки руйнування особливу увагу приділяють впливу структурних складових матеріалу, таких як карбіди, включення та межі зерен, на зародження і розвиток тріщин у приповерхневому шарі. Наявність жорстких фаз може підвищувати опір мікрорізанню, проте за умов інтенсивних ударних навантажень вони можуть виступати осередками кри-

хкого руйнування. Таким чином, мікроструктурні дослідження є необхідними для коректної інтерпретації експериментальних результатів та пояснення відмінностей у зносотривкості матеріалів із близькими механічними характеристиками.

Хоча мікроструктурні методи не забезпечують безпосередньої кількісної оцінки зносотривкості, їх висока інформативність дозволяє обґрунтувати результати лабораторних і натурних випробувань, а також використовується для верифікації розрахунково-аналітичних і чисельних моделей зношування [2, 9, 10, 12, 13, 16, 18, 19].

Непрямі методи оцінки зносотривкості ґрунтуються на встановленні кореляційних залежностей між механічними властивостями матеріалів і їх поведінкою в умовах ударно-абразивного зношування. Такі підходи дозволяють пов'язати інтенсивність зношування з параметрами напружено-деформованого стану, які формуються під час ударної взаємодії та абразивного контакту, без прямого моделювання процесу руйнування.

Особливу увагу приділяють співвідношенню між твердістю, ударною в'язкістю та межею текучості матеріалу, оскільки саме ці характеристики визначають здатність поверхневих шарів протидіяти локальній пластичній деформації, мікрорізанню та зародженню тріщин. Підвищена твердість сприяє зменшенню глибини проникнення абразивних частинок, однак за недостатньої ударної в'язкості це може призводити до крихкого викришування матеріалу під дією повторних ударів.

З точки зору механіки руйнування, оптимальне поєднання високої межі текучості та достатньої здатності до поглинання енергії удару забезпечує зниження рівня контактних напружень і гальмування розвитку втомних пошкоджень. Таким чином, непрямі методи оцінки зносотривкості є ефективним інструментом попереднього відбору матеріалів і структурних станів для роботи в умовах ударно-абразивного зношування, особливо у поєднанні з експериментальними та чисельними методами дослідження [2, 9, 12, 13, 16].

Розрахунково-аналітичні та чисельні методи відіграють важливу роль у дослідженні процесів ударно-абразивного зношування, оскільки дозволяють прогнозувати інтенсивність руйнування матеріалів на основі аналізу напружено-деформованого стану приповерхневих шарів. Такі підходи базуються на розв'язанні контактних задач із урахуванням імпульсного характеру навантаження, неліній-

ної деформації матеріалу та складної геометрії взаємодії з абразивними частинками.

Широке застосування отримав метод скінченних елементів, який дає змогу визначати розподіл напружень і деформацій у зоні ударного контакту, виявляти області локалізації максимальних еквівалентних напружень та оцінювати умови зародження і початкового розвитку мікротріщин. Особливу цінність такі моделі мають для аналізу впливу енергії удару, швидкості навантаження, механічних властивостей матеріалу та структурних неоднорідностей на інтенсивність зношування.

Разом із тим, застосування чисельних моделей у задачах ударно-абразивного зношування супроводжується низкою обмежень. Ці обмеження пов'язані зі складністю адекватного опису взаємодії з абразивним середовищем, вибору критеріїв руйнування та врахування накопичення втомних пошкоджень. У зв'язку з цим результати розрахунків потребують обов'язкової експериментальної верифікації, а чисельні методи доцільно розглядати як складову комплексного підходу до оцінки зносотривкості матеріалів [6, 7].

Узагальнюючи наведене, можна зробити висновок, що оцінка зносотривкості матеріалів за умов ударно-абразивного зношування повинна базуватися на комплексному підході. Поєднання лабораторних, натурних та розрахункових методів дозволяє отримати повну картину механізмів руйнування та підвищити достовірність прогнозування ресурсу деталей машин [2, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

Висновки

1. У результаті проведеного аналізу встановлено, що ударно-абразивне зношування є складним багатомеханізовим процесом. У ньому одночасно реалізуються мікрорізання, локальна пластична деформація, крихке викришування та втомне підповерхнє розтріскування. На відміну від абразивного зношування при ковзанні, цей вид руйнування визначається чергуванням ударних імпульсів та абразивного контакту. Така взаємодія зумовлює формування високих локальних напружень і значну глибину пошкодженого шару.

2. Показано, що твердість матеріалу не може розглядатися як основний критерій його зносотривкості в умовах ударно-абразивного навантаження. Визначальним є поєднання твердості, ударної в'язкості та тріщиностійкості. Матеріали з недостатньою здатністю до погли-

нання енергії удару, навіть за високої твердості, схильні до інтенсивного викришування.

3. Проаналізовано умови роботи типових деталей гірничої, будівельної та бурової техніки (ковшів екскаваторів, молотків і бил дробарок, клапанів бурових насосів, бурових доліт, футерівок млинів). Встановлено, що незалежно від конструктивного призначення усі вони піддаються аналогічним механізмам руйнування, а інтенсивність зношування визначається комбінацією ударного навантаження, абразивності середовища та властивостей матеріалу.

4. Обґрунтовано необхідність використання комплексних методів оцінки зносотривкості, що включають лабораторні стендові випробування, натурні дослідження, мікроструктурний аналіз та чисельне моделювання. Поєднання цих методів дозволяє системно оцінювати закономірності руйнування та визначати чинники, що впливають на ресурс деталей.

Отримані результати дозволяють сформувати методичну основу для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію матеріалів та технологій зміцнення, а також на вдосконалення теоретичних моделей і критеріїв прогнозування ресурсу деталей, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Zum Gahr K.-H. Wear by hard particles. *Tribology International*. 1998. Vol. 31, No. 10. P. 587–596. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00079-6).
2. Hutchings I. M., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2-е вид. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 411 с. ISBN 978-0-08-100910-9.
3. 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. P. 1167–1175. DOI: <https://doi.org/10.1243/13506501JET535>.
4. Winkelmann H., Badisch E., Varga M. et al. Wear Mechanisms at High Temperatures. Part 3: Changes of the Wear Mechanism in the Continuous Impact Abrasion Test with Increasing Testing Temperature. *Tribol Lett*. 2010. Vol. 37. P. 419–429. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9534-3>.
5. Chintha A. R., Prakash B., Vleugels J., Celis J.-P. Role of fracture toughness in impact-abrasion wear. *Wear*. 2019. Vol. 426–427. P. 385–394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.028>.
6. Naiko O., Valtonen K., Ojala N., Holmberg K., Kuokkala V.-T. Comparison of impact-abrasive wear characteristics and performance of direct quenched and direct quenched and partitioned steels. *Wear*. 2018. Vol. 400–401. P. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.016>.
7. Rojacz H., Badisch E., Winkelmann A., Varga M. Impact-abrasive wear of martensitic steels and complex iron-based hardfacing alloys. *Wear*. 2022. Vol. 500–501. Art. 204356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204183>.
8. Галико А. В. Ударно-абразивне зношування деталей машин та агрегатів. *Наукові записки : зб. наук. пр.* Кіровоград : КНТУ, 2007. Вип. 8. С. 77–79. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/4451>.
9. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. *Engineering tribology*. 4th ed. Oxford : Elsevier, 2014. 884 p.
10. Zum Gahr K.-H. *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam : Elsevier, 1987. 560 p.
11. Finnie I. Some reflections on the erosion of surfaces by solid particles. *Wear*. 1960. Vol. 3, no. 2. P. 87–103.
12. Крагельский И. В. *Трение и износ*. Москва : Машиностроение, 1968. 480 с.
13. Хрущов М. М., Бабичев М. А. *Абразивное изнашивание металлов*. Москва : Наука, 1970. 252 с.
14. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953. Vol. 24. P. 981–988.
15. Bayer R. G. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. New York : Marcel Dekker, 2004. 397 p.
16. Ratia V., Valtonen K., Kuokkala V.-T. Impact-abrasion wear of wear-resistant steels at perpendicular and tilted angles. *Proc. IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2013. Vol. 227, No. 8. P. 868–877. DOI: <https://doi.org/10.1177/1350650113487831>.
17. Brownlie F., Hodgkiess T., Galloway A. M., Pearson A. Experimental Investigation of Engineering Materials under Repetitive Impact with Slurry Conditions. *Tribology Letters*. 2021. Vol. 69. Art. 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01381-y>.
18. ASTM G65-16R21: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2021.
19. ASTM G174-04R17: Standard Test Method for Measuring Abrasion Resistance of Materials by Abrasive Loop Contact. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2017.
20. Gee M. G. *Rotating Wheel Abrasive Wear Testing*. Measurement Good Practice Guide No. 55. Teddington : National Physical Laboratory, 2002.
21. Дворук В. І., Белих С. С. Абразивна зносостійкість та структура легованих сталей. *Проблеми трибології*. 2012. № 1. С. 14–19.
22. Zeiler B., Bartl A., Schubert W.-D. Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2021. Vol. 98. Art. 105546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105546>.

References

1. Zum Gahr, K.-H. (1998). Wear by hard particles. *Tribology International*, 31(10), 587–596. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00079-6)
2. Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
3. Badisch, E., Kirchgaßner, M., & Franek, F. (2009). Continuous impact/abrasion testing: Influence of testing parameters on wear behaviour. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 223(8), 1167–1175. <https://doi.org/10.1243/13506501JET535>
4. Winkelmann, H., Badisch, E., Varga, M., et al. (2010). Wear mechanisms at high temperatures. Part 3: Changes of the wear mechanism in the continuous impact abrasion test with increasing testing temperature. *Tribology Letters*, 37(2), 419–429. <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9534-3>
5. Chinthia, A. R., Prakash, B., Vleugels, J., & Celis, J.-P. (2019). Role of fracture toughness in impact-abrasion wear. *Wear*, 426–427, 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.028>
6. Haiko, O., Valtonen, K., Ojala, N., Holmberg, K., & Kuokkala, V.-T. (2018). Comparison of impact-abrasive wear characteristics and performance of direct quenched and direct quenched and partitioned steels. *Wear*, 400–401, 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.016>
7. Rojacz, H., Badisch, E., Winkelmann, A., & Varga, M. (2022). Impact-abrasive wear of martensitic steels and complex iron-based hardfacing alloys. *Wear*, 500–501, Article 204356. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204183>
8. Halyko, A. V. (2007). Udarno-abrazivne znoshuvannia detalei mashyn ta ahrehativ [Impact-abrasive wear of machine parts and assemblies]. *Naukovi zapysky: zb. nauk. pr.*, (8), 77–79. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/4451> (in Ukrainian)
9. Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4th ed.). Elsevier.
10. Zum Gahr, K.-H. (1987). *Microstructure and wear of materials*. Elsevier.
11. Finnie, I. (1960). Some reflections on the erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 3(2), 87–103. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90005-5)
12. Kragelsky, I. V. (1968). *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Mashinostroenie. (in Russian)
13. Khrushchov, M. M., & Babichev, M. A. (1970). *Abrazivnoe iznashivanie metallov* [Abrasive wear of metals]. Nauka. (in Russian)
14. Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
15. Bayer, R. G. (2004). *Mechanical wear fundamentals and testing*. Marcel Dekker.
16. Ratia, V., Valtonen, K., & Kuokkala, V.-T. (2013). Impact-abrasion wear of wear-resistant steels at perpendicular and tilted angles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 227(8), 868–877. <https://doi.org/10.1177/1350650113487831>
17. Brownlie, F., Hodgkiess, T., Galloway, A. M., & Pearson, A. (2021). Experimental investigation of engineering materials under repetitive impact with slurry conditions. *Tribology Letters*, 69(1), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01381-y>
18. ASTM International. (2021). *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus* (Standard No. ASTM G65-16R21). <https://doi.org/10.1520/G0065-16R21>
19. ASTM International. (2017). *Standard test method for measuring abrasion resistance of materials by abrasive loop contact* (Standard No. ASTM G174-04R17). <https://doi.org/10.1520/G0174-04R17>
20. Gee, M. G. (2002). *Rotating wheel abrasive wear testing* (Measurement Good Practice Guide No. 55). National Physical Laboratory.
21. Dvoruk, V. I., & Bielykh, S. S. (2012). Abrazivna znosostiikist ta struktura lehovanykh stalei [Abrasive wear resistance and structure of alloyed steels]. *Problemy trybolohii*, (1), 14–19. (in Ukrainian)
22. Zeiler, B., Bartl, A., & Schubert, W.-D. (2021). Recycling of tungsten: Current share, economic limitations, technologies and future potential. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 98, Article 105546. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105546>

FEATURES OF IMPACT-ABRASIVE WEAR MECHANISMS AND METHODS FOR ASSESSING THE WEAR RESISTANCE OF MACHINE PARTS

Prysiazhniuk P. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8325-3745>
e-mail: pavlo1752010@gmail.com

Tyrlych M. V. *

Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-3787-5563>
e-mail: maksym.tyrlych-a13124@nung.edu.ua

Tyrlych V. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6609-1975>
e-mail: turluch27@ukr.net

Abstract. The paper analyzes modern concepts of impact-abrasive wear mechanisms of materials operating under simultaneous action of impact loads and abrasive particles. It is shown that impact-abrasive wear is a complex multi-mechanism process that includes micro-cutting of the surface by abrasive particles, intensive plastic deformation of the subsurface layers, subsurface fatigue fracture, and delamination of the material surface layer. The stress-strain state of the material in the contact zone between abrasive particles and the surface of machine parts is considered, and the main factors influencing the wear intensity are determined. The operating conditions of typical machine parts subjected to impact-abrasive wear are analyzed. Such components include excavator buckets, crusher hammers, drill bits, drilling pump valves, and liners of crushing and grinding equipment. It is shown that the wear intensity of these parts is determined by the combined influence of impact loads, properties of the abrasive environment, and mechanical characteristics of the materials. The paper also summarizes modern methods for evaluating wear resistance of materials, including laboratory bench tests, field experiments, microstructural analysis of worn surfaces, and numerical modeling of wear processes. It is demonstrated that the combined use of experimental and computational methods allows improving the reliability of wear resistance evaluation and predicting the service life of machine parts operating under impact-abrasive conditions.

Key words: impact-abrasive wear, wear resistance, tribology, machine parts, abrasive particles.