

orientation system's parameters on the machine's operational efficiency. It has been established that the machine's travel speed, the parameters of the orientation mechanism, the kinematics of bale pickup, and the capacity of the storage platform have the greatest impact on the process's productivity and energy consumption. The results obtained can serve as a theoretical basis for further justification of the design parameters of machines for mechanizing the processes of picking, accumulation, transportation, and unloading of baled products.

bales, bale handling, bale handling platform, bale orientation, productivity, energy consumption, fuel consumption

Одержано (Received) 15.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2026

УДК 622.24.08

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.90-103>

О. В. Русаченко

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна

І. В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

О. О. Слабий, доц., канд. техн. наук, **Я. С. Гриджук**, проф., докт. техн. наук

ДВНЗ «Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу», м. Івано-Франківськ, Україна

І. В. Дмитрів, доц., канд. техн. наук

НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

e-mail: rav@olis-group.com.ua, kntucpfzk@gmail.com, burewisnyk@gmail.com, jaroslav.gridzhuk@gmail.com, ihor.v.dmytriv@lpnu.ua

Вивчення зносу навантаженого ковша, облицьованого гумотканними матами при навантаженні сипучих матеріалів

Представлена робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі, пов'язаної з підвищенням експлуатаційного ресурсу та зниженням динамічної навантаженості робочих органів важких фронтальних навантажувачів, які функціонують в умовах інтенсивної взаємодії з великофракційною кусковою гірською масою низької абразивності. Дослідження умов роботи та характеру зносу елементів виконано шляхом чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM) повного кінематичного циклу роботи у програмному комплексі дискретно-елементного моделювання Ansys Rocky 2025 R2. Виявлено критичну зону підвищеного комбінованого зносу в нижній третині задньої стінки, яку слід вирішувати шляхом локального підсилення футерування керамічними елементами або оптимізацією геометрії робочого органу.

ківш навантажувача, метод дискретних елементів (DEM), зношування, футерування, дисперс армована гумоткана футеровка, Ansys Rocky, дисипація енергії, контактні напруження

Постановка проблеми. В процесі роботи ковші екскаваторів та навантажувачів, що працюють із кусковою гірською породою піддаються інтенсивному ударному навантаженню, абразивному та втомному зносу. Для запобігання їх передчасному виходу з ладу від абразивного зносу на сьогодні широко поширеною практикою є використання захисних змінних плит із зносостійких сталей або з твердосплавним

наплавленням що значно підвищують абразивні стійкість однак не володіють демпферними властивостями. Внаслідок цього ківш продовжує сприймати ударне навантаження, що спричинює виникнення вібрацій з подальшою їх передачею на робочі органи, що негативно впливає на ресурс їхньої роботи. Одним із способів вирішення даної проблеми є використання футеровки із матеріалів, які мають гарні демпфуючі властивості, до яких належать матеріали на основі полімерів та гуми. Хоча класичні гумові та гумоткані елементи не набули наразі широкого поширення в даній галузі, через низькі механічні властивості гуми, однак сучасні гумоткані матеріали з дисперсним армуванням вуглецевим та скловолокном показують значний ріст механічних властивостей, що розширяє сферу їх можливого застосування. Зважаючи на це, сформовано мету роботи, яка полягає в дослідженні можливості застосування та вивчення умов роботи футерування на основі гуми для захисту частин ковша навантажувача, які сприймають переважно нормальні ударні навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтенсивна взаємодія ковша фронтального навантажувача зі штабелем гірничої маси породжує кілька одночасних механізмів руйнування поверхні: мікрорізання гострокутними частинками при проникненні в матеріал, багатоцикловий втомний знос від повторних ударів і поверхнева деформація від пластичної текучості металу під контактним тиском. Переважання того чи іншого механізму визначається геометричною позицією конкретної ділянки ковша в кінематичному циклі машини. Різальна кромка і днище зазнають переважно тангенціального абразивного впливу, тоді як задня верхня і бокові стінки взаємодіють із матеріалом, що перерозподіляється всередині ковша, умови, за яких частинки б'ють у поверхню під кутами, близькими до нормального. Саме ця принципова відмінність навантаження обумовлює доцільність диференційованого підходу до вибору матеріалу футерування для різних зон ковша. Традиційно в науковій літературі найбільша увага приділяється аналізу напружено-деформованого стану та зносу ріжучої кромки і днища ковша, оскільки саме вони сприймають максимальні контактні навантаження під час впровадження у штабель гірської маси. Однак, як зазначають автори, задня, верхня та бокові стінки ковша також піддаються безперервному циклічному впливу як ударному, так і абразивному – в процесі заповнення та розвантаження матеріалу.

Традиційною відповіддю на проблему абразивного зносу є використання захисних бронеплит виготовлених із зносостійких мартенситних сталей Hardox, Weldox, Creusabro та інших [1–3] або наплавлення твердосплавних покриттів на елементи ковша [4]. Висока твердість цих матеріалів ефективна саме за умов ударного тангенціального зносу. Проте для нормального удару твердість є менш визначальним чинником, аніж здатність матеріалу розсіювати кінетичну енергію частинки без накопичення пошкоджень. Сталева футерування, що не володіє демпфуючими властивостями, в таких умовах генерує значні пікові контактні сили, передає вібрацію на несучу конструкцію та додатково обтяжує ківш, що безпосередньо скорочує корисне навантаження машини. В останні роки у гірничому машинобудуванні спостерігається стійка тенденція до застосування композитних еластомірних матеріалів для захисту поверхонь, що піддаються ударним навантаженням [5–7]. На відміну від металів, гума характеризується гіперпружною поведінкою: при ударі вона накопичує значну частку кінетичної енергії частинки у формі пружної деформації і повертає її при відскоку, суттєво знижуючи імпульс сили і розподіляючи його в часі. Водночас, базова гума має обмежений опір мікрорізанню гострими гранями колотої гірської породи [8–10]. Вирішенням цієї проблеми є застосування дисперсно армованих вугле- або скло-волокном гумотканих матеріалів. Дослідження [8; 11–13] показують, що введення вуглецевого волокна в гумоткану матрицю створює виражений синергетичний ефект:

еластомірна основа забезпечує поглинання ударної енергії, тоді як жорсткий вуглецевий каркас суттєво підвищує опір зсувним зусиллям та абразивному зношуванню. Це відкриває можливість застосування такого матеріалу в якості футерування для стінок ковша, які піддаються переважно нормальному ударному навантаженню, який працює з породами, що характеризуються невисокою абразивністю. Вапняк, мергель, гіпс та подібні відносно м'які гірничі матеріали з округлою або слабострокутною формою зерен є типовими кандидатами для застосування таких захисних систем, оскільки тут відсутній агресивний мікрорізальний вплив, а нормальні удари домінують у навантажувальному спектрі.

Проте, обґрунтування місць розташування такого композиту та його картина зносу потребує додаткового вивчення з розумінням характеру взаємодії ковша з насипним матеріалом протягом усього циклу роботи. Для прогнозування ресурсу захисних покриттів та глибокого дослідження трибологічної взаємодії сипучого середовища з робочими органами сьогодні провідним інструментом є метод дискретних елементів (DEM). Як доведено у роботах [14–19], DEM-моделювання дозволяє отримати детальні карти розподілу зусиль (Force Maps) та спектри кінетичної енергії частинок, які вкрай важко виміряти емпірично. Сучасні середовища DEM дають змогу моделювати насипи із частинок довільної форми та розмірів, враховувати вплив адгезії, рідини та магнітного поля на їх взаємодію, моделювати руйнування частинок під дією зовнішніх сил згідно існуючих теорій роботи млинів та отримувати повні статистичні дані щодо характеру взаємодії частинок із тілами, які дають можливість проведення подальшого більш детального аналізу згідно поставленою задачею [20; 21].

Існуючі дослідження [22–24] демонструють успішне застосування різних моделей зношування (зокрема модифікованих моделей Archard, Fienie, Oka [25; 26] або McLaury [27]) в середовищі DEM для оцінки деградації сталевих поверхонь. Разом з тим, калібрування та застосування цих моделей для еластомерів вимагає комплексного врахування напрямку (кутів атаки) та енергії ударів, а також розподілу нормальних та тангенціальних сил у контактних зонах.

Незважаючи на значний масив публікацій щодо оптимізації геометрії ковшів методами комп'ютерного моделювання, комплексні дослідження, присвячені оцінці застосування еластомірних футерувань на їх частинах, практично відсутні. Відтак, існує об'єктивна наукова та практична потреба у проведенні досліджень умов роботи такого футерування та встановлення умов роботи ковша та визначення найбільш доцільних ділянок встановлення такого футерування. Це дозволить науково обґрунтувати доцільність застосування та оптимальну конфігурацію композитного футерування у зазначених зонах.

Огляд літературних джерел показав, що сучасний розвиток композитів на основі гуми дає можливість їх застосовувати, як футеровку, що володіє, за певних умов роботи, кращими показниками зносостійкості за спеціальні сталі, яка вже пройшла перевірку на практиці в гірничому обладнанні. Незважаючи на наявність досліджень DEM моделюванням ковшів, у оглянутій літературі не досліджувалось питання, щодо доцільності та можливості захисту окремих частин ковша гумотканинами матами.

Постановка завдання. Об'єктом дослідження є ківш фронтального навантажувача Komatsu WA500-8 місткістю 4,5 м³ виготовлений із зносостійкої сталі HARDOX 400, що здійснює процес завантаження із штабеля гранульованого вапняку фракцією 80–120 мм. Для вивчення можливості застосування еластомірної футеровки, задня, верхня та бокові поверхні ковша, що згідно висунутої гіпотези отримують переважно нормальні удари відскоку від сипучого матеріалу в процесі роботи футеровані гумотканинами дисперсно армованими вуглеволокном матами товщиною 20 мм, а їх торці захищені стальними клинами.

Метою даної роботи є дослідження умов роботи та характеру зносу ковша навантажувача, окремі поверхні якого футеровані гумотканими матами, що працює з гранульованою породою низької твердості і абразивності, за умов найбільш оптимальних для забезпечення роботи ковша. Досягнення поставленої мети вимагає розв'язання наступних завдань:

1. Вивчення процесу контактної взаємодії частинок гірської породи з елементами ковша.
2. Дослідження закономірностей розподілу ударної енергії та контактних навантажень по поверхні ковша.
3. Встановити та можливість застосування еластомірної футеровки.

Виклад основного матеріалу. Поставлене завдання вирішується шляхом проведення чисельного експерименту процесу забору породи із штабеля, її підйому та розвантаження в середовищі DEM Ansys Rocky2025R2 та подальшого аналізу отриманих результатів параметрів контактної взаємодії масиву гранульованого вапняку із стінками ковша навантажувача.

Чисельна модель досліджуваної системи в середовищі DEM розроблена на основі моделі описаної в роботі [28], і відтворює типовий цикл роботи фронтального навантажувача. Модель включає робочий механізм та геометрію ковша з футеровкою, поверхня якого дискретизована скінченноелементною сіткою максимальний розміром елемента якої складає 75 мм. Така деталізація забезпечує достатню просторову роздільність для локалізації зон ударного навантаження та кількісної оцінки зносу по окремих ділянках стінок ковша при помірній обчислювальній складності.

З метою зниження обчислювальних витрат у моделі задається виключно кінематика руху робочого механізму, ідентична [28]. Закон руху ковша розраховано в середовищі Ansys Motion та інтегровано в DEM-симуляцію через стандартний інтерфейс FMU (Functional Mock-up Unit). Такий підхід дозволяє точно відтворити реальну траєкторію руху машини без спрощення законів руху та накладних обчислювальних задач розв'язку повних рівнянь динаміки механізму безпосередньо в процесі симуляції в Rocky.

Насип вапняку формується із частинок типу Polyhedron 14 corners із розмірами у діапазоні 80–120 мм. Дана багатогранна форма частинок є найбільш наближена до реальної форми кускового матеріалу та підтримує моделювання процесу руйнування. Врахування можливості руйнування необхідне для забезпечення чисельної стабільності моделі та уникнення виникнення нефізичних сил внаслідок «заклинювання» частинок між елементами рухомої геометрії.

Для отримання якісної картини взаємодії частинок сипучого матеріалу із елементами ковша при дослідженні були активовані наступні модулі:

- *Boundary Collision Statistics* (з усіма підмодулями) – реєстрація параметрів кожного зіткнення частинки з поверхнею: координати точки удару, нормальна та тангенціальна складові швидкості, кут удару, передана імпульсна сила;
- *Contacts Energy Spectra* – спектральний розподіл дисипованої контактної енергії за діапазонами значень;
- *Contacts Overlap Monitor* – контроль глибини перекриття частинок для оцінки числової стабільності;
- *Eroded Mass Analysis* – розрахунок накопиченої ерозійної маси та товщини зносу по поверхні геометрії з активованими моделями зносу Fennie, Oka, McLaury;
- *Multibody Dynamics FMU Coupling* – зв'язок DEM-симуляції з FMU-моделлю кінематики.

Розрахунок зносу був ввімкнений виключно для ковша та гумотканого футерування. Оскільки програмне середовище Rocky не надає можливості призначити

різні моделі зносу з різними параметрами окремим тілам, в дослідженні моделі зносу біли налаштовані під різні матеріали: Fennie і McLaury для сталі, а Ока для еластомірної футеровки. У зв'язку з відсутністю експериментально визначених констант для моделей зносу для конкретних матеріалів, що вивчаються, їх значення прийняті з літературних джерел як типові для відповідних класів матеріалів і є достатніми для порівняльної оцінки. Зведені параметри моделі наведені на рис. 1.

Механічні властивості матеріалів					
Сталь		Футерівка		Вапняк	
Густина, ρ :	7850 кг/м³	Густина, ρ :	1400 кг/м³	Густина, ρ :	2550 кг/м³
Модуль Юнга, E :	210 ГПа	Модуль Юнга, E :	0.1 ГПа	Модуль Юнга, E :	30 ГПа
Коефіцієнт Пуассона, ν :	0.3	Коефіцієнт Пуассона, ν :	0.45	Коефіцієнт Пуассона, ν :	0.3
Параметри контактної взаємодії матеріалів					
Сталь-Вапняк		Футерівка-Вапняк		Вапняк-Вапняк	
Коефіцієнти тертя:		Коефіцієнти тертя:		Коефіцієнти тертя:	
статичний, f_{st} :	0.55	статичний, f_{st} :	0.8	статичний, f_{st} :	0.7
динамічний, f_d :	0.45	динамічний, f_d :	0.7	динамічний, f_d :	0.5
Коефіцієнт відновлення e :	0.45	Коефіцієнт відновлення e :	0.65	Коефіцієнт відновлення e :	0.4
Модель контакту:			Модель руйнування частинки:		
нормальна сила:	Hysteric Linear Spring		параметри:	Ab-T10	
дотична сила:	Linear Spring Coulomb Limit		Reference Minimum Specific Energy:	300 Дж/кг	
Модель опору коченню:	Type C. Linear Spring Rolling Limit		Maximum T10 Value:	50%	
Коефіцієнт опору коченню:	0.4		Minimum Absolute Size:	0.03 м	
Моделі зносу					
Fennie модель		Ока модель		McLaury модель	
Моделювання пари: Сталь-Вапняк		Моделювання пари: Футерівка-Вапняк		Моделювання пари: Сталь-Вапняк	
k :	$1 \cdot 10^{-10}$	Reference Erosion Rate:	$1 \cdot 10^{-6}$	A:	$5 \cdot 10^{-8}$
Velocity exponent:	2	Vickers Hardness:	20 МПа	Velocity Exponent:	2
Angle of Maximum Erosion:	25°	n1:	0.9	Transition Angle:	20°
		n2:	2	b:	-12
		Velocity Exponent:	2.35	c:	7.5
		Reference Velocity:	2 м/с	γ :	0.1

Рисунок 1 – Чисельні параметри досліджуваної моделі

Джерело: розроблено авторами

Розв'язок моделі вівся на проміжку часу 0–20 с з кроком запису результатів симуляції 0,01 с. Для покращення продуктивності Numeric Softening Factor встановлений рівним 0,1. В результаті розв'язку моделі отримано чисельні дані взаємодії гірської породи ковша за один цикл роботи, що дають змогу проаналізувати особливості його роботи. Протягом симуляції значення contact 2,5% overlap не перевищував значення 0,2% для всіх обчислюваних контактів, що вказує на хорошу

математичну стійкість моделі та якість отриманих результатів. На рис. 2 наведено стоп-кадр представлення результатів симуляції у якості тривимірної моделі.

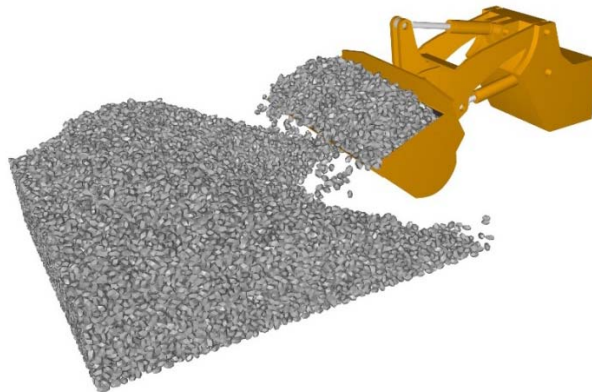
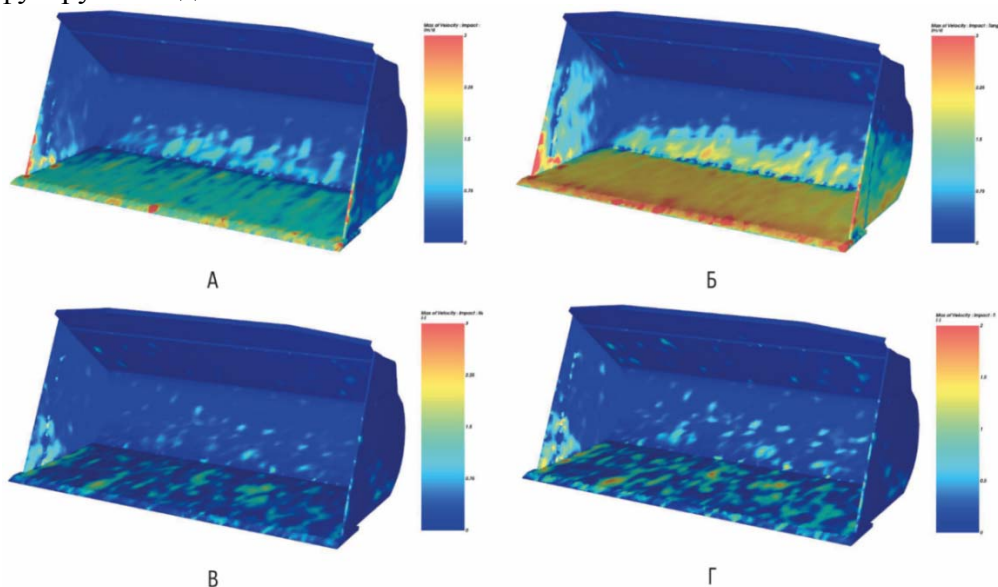


Рисунок 2 – Стоп-кадр симуляції процесу навантажувальних робіт ковшем навантажувача
Джерело: розроблено авторами

Для оцінки характеру взаємодії гранульованого вапняку з елементами ковша першочергово було проаналізовано кінематичні характеристики ударів. На рис. 3 (А, Б) наведено карту розподілу максимальних значень середньої нормальної та тангенціальної швидкості удару визначеної за один крок запису результатів 0.01 за весь досліджуваний робочий цикл. Отримані карти чітко розмежовують робочі зони ковша: днище та ріжуча кромка характеризуються домінуванням тангенціальної швидкості ковзання, на ріжучій кромці також спостерігаються екстремальні значення як нормальної так і тангенціальної складової швидкості взаємодії, тоді як на задній, верхній та частково бокових стінках (де встановлено футерування) фіксуються виражені помірні значення нормальної та тангенціальної швидкості удару. Винятком є нижня частина задньої стінки, яка за результатами симуляції показує значну інтенсивність дотичної взаємодії із гірською породою, що може негативно вплинути на ресурс футерування даної частини ковша.



А – нормальна складова; Б – тангенціальна складова; коефіцієнт асиметрії швидкості:
В – нормальна складова, Г – тангенціальна складова.

Рисунок 3 – Карта розподілу максимальних значень за весь робочий цикл.

Середнє значення швидкості (за один цикл запису результатів – 0,01 с)

Джерело: розроблено авторами

Статистичний аналіз часових рядів кінематики підтверджує зміну характеру потоку матеріалу. Максимальні значення обчисленого усереднений за цикл запису даних коефіцієнт асиметрії (*Average Skewness*) нормальної (рис. 3В) та тангенціальної швидкості удару (рис. 3Г) на поверхні футерування знаходиться у вузькому діапазоні від -0,4 до 0,12. Такі значення свідчать про формування квазісиметричного розподілу динамічних впливів, що вказує на перехід взаємодії великофракційного вапняку з ковшем у фазу усталеного щільного ковзання. Процес відбувається без екстремальних одиничних високошвидкісних ударних аномалій, незважаючи на врахування в моделі процесу руйнування частинок.

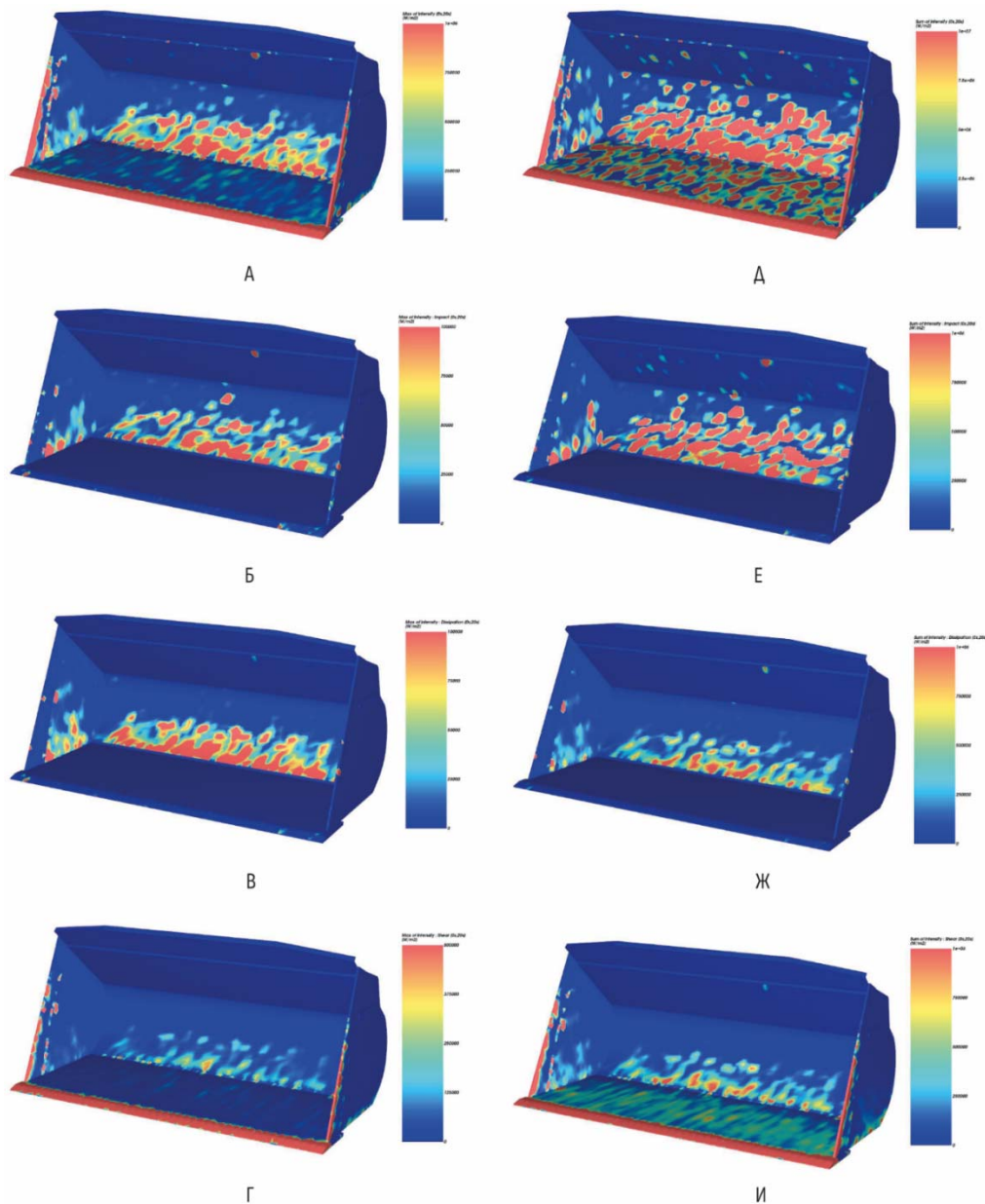
Карти розподілу контактної енергії частинок із елементами ковша протягом досліджуваного циклу отримані за результатами підключення модуля *Contacts Energy Spectra* наведені на рис. 4. Максимальна (рис. 4А) та сумарна (рис. 4Д) енергія взаємодії демонструють яскраво виражену зональну нерівномірність: основна частка пікової контактної енергії концентрується в нижній третині задньої стінки та в зонах лез ковша. Ці ділянки є зонами первинного контакту матеріалу у фазі забору, що пояснює їх підвищене навантаження. Зокрема, слід відмітити відсутність пікових значень енергії взаємодії нижньої стінки ковша із великофракційним вапняком в порівнянні із задньою стінкою, при співвмірному сумарному значенні енергій взаємодії. Це можна пояснити виникненням локальних екстремумів на кінцевому етапі забору матеріалу зі штабеля, коли частинки вапняку втискають в футеровку, так і значно меншим модулем Юнга матеріалу футеровки, що призводить до більших деформацій та триваліших взаємодій вапняку з футеровкою, в порівнянні із сталлю, що значною мірою впливає на обчислені значення енергії взаємодії. Порівняння складових енергій: ударної (рис. 4, Б, Е) та зсуву (рис. 4, Г, И) на досліджуваних поверхнях підтверджує переважання нормального характеру навантаження зон футерування, особливо задньої стінки, яка сприймає основну частину енергії удару по нормалі. Локальні екстремуми енергії зсуву, що спостерігаються в нижній частині задньої стінки ковша, хоча і не набувають значних значень вказують на можливість активного зношення гумотканої футеровки, яка погано працює на дотичний абразивний знос. Зважаючи на це, доцільно розглянути посилення футерування даної частини ковша більш абразивостійкими елементами, наприклад керамічними, на гумотканій основі [5] або розробити нову конструкцію ковша, яка запобігатиме передачі сил, що спричиняють тангенціальний рух частинок, що контактують із футеровкою.

Отримані карти сумарної та максимальної енергії дисипації (рис. 4, В, Ж) підкреслюють позитивні особливості роботи пропонованого футерування на основі гумотканих дисперсно армованих матеріалів. Так, на ділянках із футеруванням енергія дисипації значно перевищує аналогічні показники для сталевих зон. Це підтверджує високу здатність футеровки поглинати та розсіювати енергію, зменшуючи ударне вібраційне навантаження ковша та робочих органів навантажувача.

Аналіз розподілу максимальних нормальних (рис. 5А) та тангенціальних (рис. 5Б) напружень, що виникають на поверхні ковша за весь досліджуваний цикл роботи, яскраво ілюструє докорінну зміну напружено-деформованого стану в контактній зоні при переході від класичної сталеві броне до еластомірного композиту.

На незахищених сталевих ділянках ріжучої кромки та днища, де модуль Юнга матеріалу становить 210 ГПа, зафіксовано чітко локалізовані концентратори нормальних напружень. Вони викликані безпосередніми пружними ударами жорстких багатограних частинок вапняку (модуль Юнга породи 30 ГПа). Натомість у зонах встановлення гумотканих матів на задній та бокових стінках спостерігається суттєве розмиття та редукція ізополів напружень. Завдяки низькому еквівалентному модулю

Юнга футерування та високому коефіцієнту Пуассона, максимальні нормальні контактні напруження на поверхні еластомеру виявилися в 4,3–5,5 разів нижчими, ніж на сталі. Це безпосередньо пов'язано зі збільшенням площі фактичного трибологічного контакту та реалізацією гіперпружного поглинання імпульсу сили.



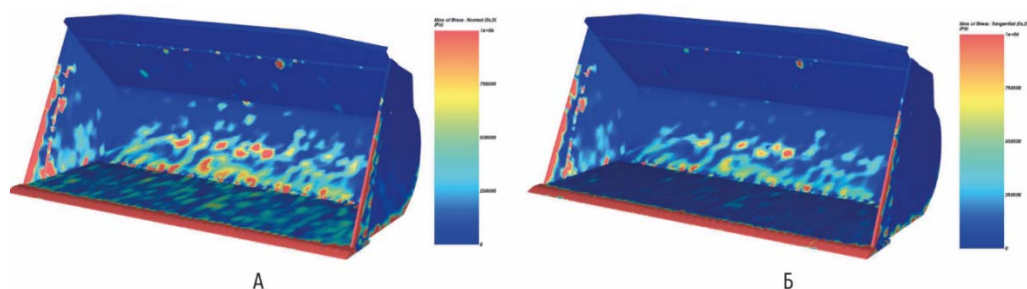
енергія взаємодії (А – максимальна, Д – сумарна); енергія удару (Б – максимальна, Е – сумарна), дисипація енергії (В – максимальна Ж – сумарна), енергія зсуву (Г – максимальна И – сумарна)

Рисунок 4 – Карта розподілу енергії взаємодії частинок з елементами ковша протягом досліджуваного циклу роботи

Джерело: розроблено авторами

Аналіз тангенціальних напружень (рис. 5Б) показує, що дотичні зусилля на поверхні футерування ефективно сприймаються та перерозподіляються завдяки наявності коротких вуглецевих волокон у матриці композиту. Дисперсне армування нівелює схильність чистої гуми до масштабних поверхневих зсувів та виривання матеріалу під дією масивного потоку гірської породи. Проте на межі контакту еластомерних матів із

захисними сталевими клинами фіксуються локальні градієнти тангенціальних напружень. Це підтверджує необхідність точного конструктивного оформлення стиків для запобігання підриву країв футерування в процесі тривалої експлуатації.

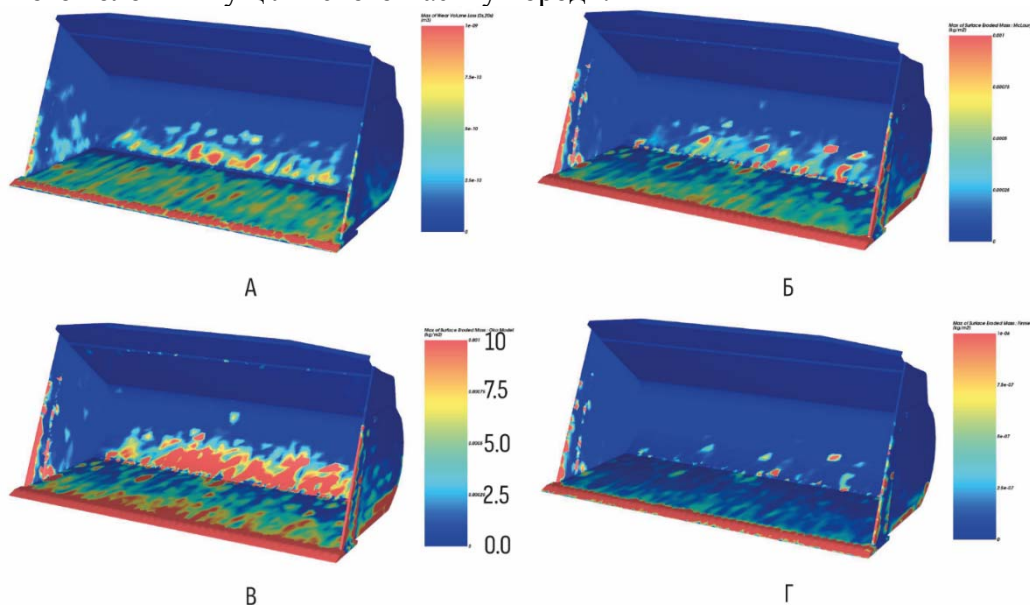


А – нормальні; Б – тангенціальні.

Рисунок 5 – Максимальні напруження, що виникли в ковші за один цикл роботи

Джерело: розроблено авторами

Для довгострокового трибологічного прогнозування та порівняльної оцінки стійкості елементів ковша було активовано модуль *Eroded Mass Analysis* із залученням чотирьох моделей зношування: Archard (рис. 6А), McLaury (рис. 6Б), Ока (рис. 6В) та Fienie (рис. 6Г). Результати розрахунків за моделями Fienie та McLaury, які оптимізовані для опису деградації металевих поверхонь, чітко локалізують максимальну інтенсивність зносу на лобовому листі ріжучої кромки та бічних кутових переходах днища ковша. Модель Fienie, яка враховує мікрорізання за чітко визначеного кута атаки (екстремум ерозії задано при 25°), чітко виділила початкову фазу активного впровадження ковша у штабель, коли порода динамічно зачерпується під гострими кутами. Модель McLaury, що описує нелінійний перехід між деформаційним та абразивним руйнуванням, показала більш згладжену картину довготривалого стирання днища ковша у фазі транспортування та щільного волочіння ущільненого масиву породи.



А – Archard; Б – McLaury; В – Ока; Г – Fienie.

Рисунок 6 – Обчисленні значення зносу ковша навантажувача згідно моделей

Джерело: розроблено авторами

Оцінка зносостійкості гумотканого футерування за допомогою моделі Ока (рис. 6В) підтвердила високу життєздатність еластомеру в умовах переважання нормальних ударів. Згідно з розрахунками, завдяки низькій еквівалентній твердості за Віккерсом, швидкість ерозії в середній та верхній частинах задньої стінки прагне до мінімуму. Матеріал демонструє здатність до майже повного пружного відновлення при кутах удару, близьких до нормалі. Це робить його застосування у цих зонах значно вигіднішим за використання зносостійкої сталі HARDOX 400, яка в аналогічних умовах накопичує втомні мікротріщини через нездатність дисипувати кінетичну енергію.

Проте критичною точкою, зафіксованою всіма чотирма моделями зносу (включаючи Ока та Archard), є нижня третина задньої стінки ковша на стику з днищем. У цій зоні вектор кінематики частинок зазнає різкої зміни напрямку: кінетична енергія потоку вапняку при заглибленні ковша в штабель трансформується у високі зсувні зусилля ущільненого масиву породи. Композитне футерування тут зазнає комбінованого навантаження, де значна частка енергії зсуву (рис. 4И) провокує інтенсивне поверхнєве стирання еластомеру. Товщина зносу за один модельний цикл у цій локальній зоні перевищує середні показники по задній стінці в 3,5–4 рази. Це підтверджує трибологічну небезпеку дотичного абразивного впливу футерування та диктує необхідність впровадження додаткових конструктивних заходів.

Отримані результати DEM-симуляції чисельно підтверджують висунуту гіпотезу щодо доцільності диференційованого підходу до захисту внутрішніх поверхонь ковшів важких навантажувачів. Класичний підхід, який полягає в суцільному бронюванні ковша мартенситними сталями, є надлишковим для задніх і верхніх стінок, оскільки там превалює нормальний удар, для якого висока поверхнева твердість металу не є вирішальним фактором опору руйнуванню. Застосування спектрального аналізу енергії (Contacts Energy Spectra) дозволило виявити, що гумоткане футерування змінює сам характер передачі навантаження на несучу конструкцію ковша. Завдяки низькому модулю Юнга (0,1 ГПа) та високому коефіцієнту Пуассона (0,45), гума розтягує імпульс сили в часі (демпфує удар). Наявність дисперсного вуглецевого армування, у свою чергу, забезпечує достатню жорсткість каркасу для опору дотичним напруженням (рис. 5Б), які виникають при зсуві ущільненого масиву породи під час підйому ковша. Встановлений квазісиметричний розподіл асиметрії (Skewness від -0,4 до 0,11) має вагоме методологічне значення. Він доводить легітимність застосування інтегральних моделей ерозії (McLaury, Oka) для прогнозування довговічності полімерних футерувань у середовищі DEM. Оскільки масив породи рухається у режимі щільного ковзання без хаотичних флуктуацій, усереднені значення енергії зсуву (Shear Energy) є репрезентативними для оцінки втомно-абразивного стирання еластомеру. Разом з тим, мапи зносу (рис. 6) чітко локалізують потенційно вразливі ділянки дисперсно армованої гуми – це зони сполучення стінок, де кінематика потоку змушує уламки вапняку ковзати під гострими кутами, та нижня частина його задньої стінки. Застосування в цих місцях перехідних сталевих клинів, потовщення гумового шару або футеровки із керамічними елементами в гумотканій матриці є необхідною конструктивною умовою для забезпечення рівномірного ресурсу всього ковша. Також можливе розроблення геометрії ковша спеціальної конструкції, яка зменшуватиме інтенсивність дотичного переміщення породи, що контактує із футеровкою.

Висновки: На основі проведеного чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM) процесу взаємодії фронтального навантажувача з гранульованою гірською породою можна зробити наступні висновки. Кінематичний аналіз циклу завантаження вапняку фракцією 80–120 мм довів наявність чітко розмежованих зон впливу. На днищі та ріжучій кромці переважає тангенціальне

ковзання, тоді як на задній та бокових стінках генеруються переважно нормальні ударні навантаження відскоку. Статистичний аналіз швидкостей співудару свідчить про формування режиму щільного ковзання породи без аномальних викидів кінетичної енергії, що створює сприятливі умови для роботи еластичних захисних покриттів, виключаючи ймовірність їх непрогнозованого пробиття окремими брилами. Оцінка спектру контактної енергії підтвердила високу демпфуючу здатність гумотканого дисперсно армованого футерування. Сумарна дисипована енергія в зонах його встановлення дозволяє значно знизити пікові контактні напруження (нормальні та тангенціальні), запобігаючи передачі вібраційного фону на несучу стрілу навантажувача. Встановлено, що застосування еластомірних композитів є доцільним для захисту задньої та верхньої частин ковша при роботі з породами низької абразивності. Відповідно до моделей ерозії Ока, знос гуми в зонах нормального удару є мінімальним порівняно зі сталлю, що за умови правильного конструктивного захисту кромek (сталевими клинами) здатне суттєво підвищити міжремонтний ресурс обладнання. Отримані розрахункові дані показують про значне навантаження та спрацювання, що виникають в нижній частині задньої стінки. Для вирішення цієї задачі слід додатково розглянути можливість її кращого захисту, або зміни геометрії ковша для перерозподілу напрямків ковзання гірської породи в процесі завантаження і її додаткового захисту від надмірних тангенціальних навантажень.

Список літератури

1. SAAB. HARDOX wear plate. Hard and tough. URL: italautocar.com/images/informazioni_tecniche/pdf/en/materials/high_strength_steel/hardox_en.pdf.
2. Ami Attachment Inc. Hardox in my body. 2019. URL: amiattachments.com/wp-content/uploads/2019/04/Hardox-In-My-Body-Brochure-1.pdf.
3. ArcelorMittal. Creusabro. Unique, Best, Proven. 2018. URL: bergsmekaniska.se/wp-content/uploads/2025/03/Creusabro%C2%AE-Brochure-English3.pdf. (acc. date: 07.06.2026).
4. Welding Alloys. Integra engineered wear services. URL: welding-alloys.com/library/integra-engineered-wear-services/. (acc. date: 25.12.2025).
5. Forech. Composite rubber and ceramic liners. URL: cdn.forech.com/fc/media/Composite-Rubber-Ceramic-Liners.pdf. (acc. date: 25.12.2025).
6. Masso. Composite rubber and ceramic liners. 2023. URL: cqmasso.com/trs/es/download/5ce4acab381b355d7dd1570129a3314e/CERAMIC-LINERS-%26-COMPOSITE-RUBBER.pdf. (acc. date: 25.12.2025).
7. FirstGraphene. Bucket Wear Liner Trial Results Point to a 6x Improvement in Lifespan. 4 March, 2021. URL: firstgraphene.net/bucket-wear-liner-trial-results-point-to-a-6x-improvement-in-lifespan-2/.
8. Xu R., Sheng W., Zhou F., Persson B. N. J. Rubber Wear: History, Mechanisms, and Perspectives. *Tribology Letters*. 2025: Vol. 73, № 3. DOI: 10.1007/s11249-025-02025-9.
9. Persson B. N. J., Xu R., Miyashita N. Rubber wear: Experiment and theory. *The Journal of chemical physics*. 2025: Vol. 162. № 7. DOI: 10.1063/5.0248199.
10. Muhr A. H., Roberts A. D. Rubber abrasion and wear. *Wear*. 1992: Vol. 158 № 1-2. P. 213–228. DOI: 10.1016/0043-1648(92)90040-F.
11. Han D., Pan Y., Li S., Xu M., Xiao X., Hao x., Huang E., Wang C., Bian H. Friction and wear of Stellite 6B during sliding against rubber compound with varied carbon fiber content. *Polymer Testing*. 2022: Vol. 106. P. 107470. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107470.
12. He Q., Zhou Y., Qu W., Zhang Y., Song L., Li Z. Wear property improvement by short carbon fiber as enhancer for rubber compound. *Polymer Testing*. 2019: T. 77. C. 105879. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.04.026.
13. Baek D. K., Khonsari M. M. Friction and wear of a rubber coating in fretting. *Wear*. 2005: Vol. 258 № 5-6. P. 898–905. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.075.
14. Frank B., Kleinert J., Filla R. Optimal control of wheel loader actuators in gravel applications: *11th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids*: Processing of 11th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids, Edinburgh, UK. Edinburgh. 2024. C. 1–14. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.005.

15. Liu G., Han X., Wang Z., Wang K., Zhang Z., Duan Z. Viscosity Reduction and Drag Reduction Performance Analysis of Bionic Excavator Buckets Based on Discrete Element Method. *Biomimetics (Basel, Switzerland)*. 2024: Vol. 9 № 11. DOI: 10.3390/biomimetics9110686.
16. Menderes Kalkat, Mehmet Bahadır, Furkan Yılmaz. The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*. 2023: Vol. 12 № 4. P. 1499–1507. DOI: 10.28948/ngmuh.1324598.
17. Nezami E. G., Hashash Y. M. A., Zhao D., Ghaboussi J. Simulation of front end loader bucket–soil interaction using discrete element method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2007: Vol. 31 № 9. P. 1147–1162. DOI: 10.1002/nag.594.
18. Wang Y., Wang L., Li C., Xue Z., Sun Y., Ma R., Wang D., Cui M., Wei X., Tang L., Sun Y., Xu W. Optimization of Excavator Bucket Structure by a Coupled Simulation Method. *Applied Sciences*. 2023: Vol. 13 № 20. P. 11336. DOI: 10.3390/app132011336.
19. Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid FE-DEM granular material model. *Computational Particle Mechanics*. 2021: Vol. 8 № 4. P. 825–843. DOI: 10.1007/s40571-020-00372-z.
20. Boehling et al. Rocky Tutorial Guide. 2025. URL: ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v252/en/pdf/Rocky_Tutorial_Guide.pdf. (acc. date: 07.06.2026).
21. Dosta M., Andre D., Angelidakis V., Caulk R. A., Celigueta M. A., Chareyre B., Dietiker J.-F., Girardot J., Govender N., Hubert C., Kobylka R., Moura A. F., Skorych V., Weatherley D. K., Weinhart T. Comparing open-source DEM frameworks for simulations of common bulk processes. *Computer Physics Communications*. 2024: T. 296. C. 109066. DOI: 10.1016/j.cpc.2023.109066.
22. Liu B., Zhou Z., Zou R., Yu A. Numerical investigation of bucket wear and excavation performance with non-spherical materials. *Powder Technology*. 2024: T. 447. P. 120219. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.120219.
23. Dong Z., Jiang F., Tan Y., Wang F., Ma R., Liu J. Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery. *Lubricants*. 2023: Vol. 11 № 6. P. 253. DOI: 10.3390/lubricants11060253.
24. Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. Full-Scale Simulation and Validation of Wear for a Mining Rope Shovel Bucket. *Minerals*. 2021: Vol. 11 № 6. P. 623. DOI: 10.3390/min11060623.
25. Oka Y. I., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*. 2005: T. 259 № 1-6. P. 102–109. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.040.
26. Oka Y. I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*. 2005: T. 259 № 1-6. P. 95–101. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.039.
27. McLaury B. S., Shirazi S. A., Burden T. L. Effect of Entrance Shape on Erosion in the Throat of Chokes. *Journal of Energy Resources Technology*. 2000: Vol. 122 № 4. P. 198–204. DOI: 10.1115/1.1325407.
28. Слабий О. О., Гридчук Я. С., Дмитрів І. В., Суглобов В. В., Русаченко О. В. Дослідження навантаженості ковша облицьованого гумотканними матами при навантаженні сипучих матеріалів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2026: Т. 1. № 53. С. 162–169. DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359804.

References

1. SAAB. HARDOX wear plate. Hard and tough. URL: https://italautocar.com/images/informazioni_tecniche/pdf/en/materials/high_strength_steel/hardox_en.pdf.
2. Ami Attachment Inc. Hardox in my body. (2019). URL: <https://amiattachments.com/wp-content/uploads/2019/04/Hardox-In-My-Body-Brochure-1.pdf>.
3. Arcelor Mittal. Creusabro. Unique, Best, Proven. (2018). URL: <https://bergsmekaniska.se/wp-content/uploads/2025/03/Creusabro%C2%AE-Brochure-English3.pdf>.
4. Welding Alloys. Integra engineered wear services. URL: <https://welding-alloys.com/library/integra-engineered-wear-services/>.
5. Forech. Composite rubber and ceramic liners. URL: <https://welding-alloys.com/library/integra-engineered-wear-services/cdn.forech.com/fc/media/Composite-Rubber-Ceramic-Liners.pdf>.
6. Masso. Composite rubber and ceramic liners. (2023). URL: <https://welding-alloys.com/library/integra-engineered-wear-services/cqmasso.com/trs/es/download/5ce4acab381b355d7dd1570129a3314e/CERAMIC-LINERS-%26-COMPOSITE-RUBBER.pdf>.

7. First Graphene. Bucket Wear Liner Trial Results Point to a 6x Improvement in Lifespan. 4 March, 2021. URL: <https://firstgraphene.net/bucket-wear-liner-trial-results-point-to-a-6x-improvement-in-lifespan-2/>.
8. Xu, R., Sheng, W., Zhou, F., & Persson, B. N. J. (2025): Rubber Wear: History, Mechanisms, and Perspectives. *Tribology Letters*. Vol. 73, № 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-025-02025-9>.
9. Persson, B. N. J., Xu, R., & Miyashita, N. (2025). Rubber wear: Experiment and theory. *The Journal of chemical physics*. Vol. 162. № 7. DOI: 10.1063/5.0248199.
10. Muhr, A. H., & Robert, A. D. (1992). Rubber abrasion and wear. *Wear*. Vol. 158 № 1-2. P. 213–228. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90040-F](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90040-F).
11. Han, D., Pan, Y., Li, S., Xu, M., Xiao, X., Hao, x., Huang, E., Wang, C., & Bian, H. (2022). Friction and wear of Stellite 6B during sliding against rubber compound with varied carbon fiber content. *Polymer Testing*. Vol. 106. P. 107470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107470>.
12. He, Q., Zhou, Y., Qu, W., Zhang, Y., Song, L., & Li, Z. (2019). Wear property improvement by short carbon fiber as enhancer for rubber compound. *Polymer Testing*. T. 77. C. 105879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.04.026>.
13. Baek, D. K., & Khonsari, M. M. (2005). Friction and wear of a rubber coating in fretting. *Wear*. Vol. 258 № 5-6. P. 898–905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.075>.
14. Frank, B., Kleinert, J., & Filla, R. (2024). Optimal control of wheel loader actuators in gravel applications: *11th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids*: Processing of 11th International Conference on Conveying and Handling of Particulate Solids, Edinburgh, UK. Edinburgh. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.005>.
15. Liu, G., Han, X., Wang, Z., Wang, K., Zhang, Z., & Duan, Z. (2024). Viscosity Reduction and Drag Reduction Performance Analysis of Bionic Excavator Buckets Based on Discrete Element Method. *Biomimetics (Basel, Switzerland)*. Vol. 9 № 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9110686>.
16. Menderes Kalkat, Mehmet Bahadır, & Furkan Yilmaz. (2023). The determination of the working life of backhoe-loader bucket teeth showing abrasive wear under the effect of dynamic loads. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*. Vol. 12 № 4. P. 1499–1507. DOI: <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1324598>.
17. Nezami, E. G., Hashash, Y. M. A., Zhao, D., & Ghaboussi, J. (2007). Simulation of front end loader bucket–soil interaction using discrete element method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. Vol. 31 № 9. P. 1147–1162. DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.594>.
18. Wang, Y., Wang, L., Li, C., Xue, Z., Sun, Y., Ma, R., Wang, D. et al. (2023). Optimization of Excavator Bucket Structure by a Coupled Simulation Method. *Applied Sciences*. Vol. 13 № 20. P. 11336. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132011336>.
19. Svanberg, A., Larsson, S., Mäki, R., & Jonsén, P. (2021). Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid FE-DEM granular material model. *Computational Particle Mechanics*. Vol. 8 № 4. P. 825–843. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00372-z>.
20. Boehling et al. (2025). Rocky Tutorial Guide. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v252/en/pdf/Rocky_Tutorial_Guide.pdf.
21. Dosta, M., Andre, D., Angelidakis, V., Caulk, R. A., Celigueta, M. A., Chareyre, B., Dietiker, J.-F et al. (2024): Comparing open-source DEM frameworks for simulations of common bulk processes. *Computer Physics Communications*. T. 296. C. 109066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2023.109066>.
22. Liu, B., Zhou, Z., Zou, R., & Yu, A. (2024). Numerical investigation of bucket wear and excavation performance with non-spherical materials. *Powder Technology*, 447, 120219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120219>.
23. Dong, Z., Jiang, F., Tan, Y., Wang, F., Ma, R., & Liu, J. (2023). Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery. *Lubricants*. Vol. 11 № 6. P. 253. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants11060253>.
24. Svanberg, A., Larsson, S., Mäki, R., & Jonsén, P. (2021). Full-Scale Simulation and Validation of Wear for a Mining Rope Shovel Bucket. *Minerals*. Vol. 11 № 6. P. 623. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11060623>.
25. Oka, Y. I., & Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 259, № 1-6, 102–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.040>.
26. Oka, Y. I., Okamura, K., & Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 259, № 1-6, 95–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.01.039>.
27. Mc Laury, B. S., Shirazi, S. A., & Burden, T. L. (2000). Effect of Entrance Shape on Erosion in the Throat of Chokes. *Journal of Energy Resources Technology*. Vol. 122 № 4. P. 198–204. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1325407>.

29. Slaby, O. O., Grydzhuk, Ya. S., Dmytriv, I. V., Suglobov, V. V., & Rusachenko, O. V. (2026). Research on the loading of a bucket lined with rubber-woven mats when loading bulk materials. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*. Vol. 1. No. 53. P. 162–169. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359804>. [in Ukrainian]

Oleksandr Rusachenko, post-graduate

Priazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine

Ihor Shepelenko, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Orest Slabyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yaroslav Hrydzhuk**, Prof., DSc.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Ihor Dmytriv, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

A Study of the Wear on a Loaded Bucket Lined with Rubber-Woven Mats when Loaded with Bulk Materials

The paper addresses a highly important engineering and scientific problem of increasing the operational lifetime and mitigating the structural vibration levels of heavy front-end wheel loader buckets operating under intensive interaction with fragmented rock mass of low abrasiveness, such as limestone with a fraction size of 80–120 mm. Conventional wear protection techniques based on continuous lining with high-strength cavities or martensitic steels (such as HARDOX 400) show supreme performance under tangential micro-cutting and sliding abrasion conditions on the cutting edge and bottom plate, but are dynamically sub-optimal for bucket zones dominated by normal impact loads and material recirculation. Rigid metallic liners generate severe peak contact forces, transferring harmful cyclic vibrations to the lifting boom and prime mover structure, thereby decreasing overall equipment reliability and operator comfort. This study proposes and validates a differentiated protection concept by implementing a 20 mm thick elastomer liner made of short carbon-fiber-reinforced rubber-fabric composite on the rear, upper, and side walls of a 4.5 m³ Komatsu WA500-8 bucket, where its structural edges are protected by transition steel wedges. The operational behavior and surface degradation mechanisms were evaluated via comprehensive numerical Discrete Element Method (DEM) simulations encompassing a complete kinematic cycle (digging, lifting, carrying, dumping) realized in Ansys Rocky 2025 R2 software. The bucket kinematics were precisely incorporated using Functional Mock-up Unit (FMU) co-simulation coupling derived from the Ansys Motion environment. Based on computed contact energy spectra and particle velocity fields, the excellent damping capacity of the elastomeric composite was quantitatively verified: its low Young's modulus prolongs the impact pulse duration and drastically amplifies energy dissipation compared to bare steel sections. Statistical time-series analysis of particle kinematics revealed that the average velocity skewness stays within a narrow margin (-0.4 to 0.12), proving the establishment of a steady-state dense sliding regime devoid of catastrophic high-velocity impact anomalies. The simulation successfully pinpointed a vulnerable zone prone to severe tangential abrasion in the lower third of the rear wall, and practical design recommendations, including local ceramic reinforcement layouts or bucket geometry optimization, were formulated to ensure uniform lifespan of the entire equipment.

wheel loader bucket, Discrete Element Method (DEM), surface wear, protective lining, carbon-fiber reinforced rubber, Ansys Rocky, energy dissipation, contact stress fields

Одержано (Received) 18.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 19.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 23.06.2026