

УДК 622.24.08

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359804

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОВША ОБЛИЦЬОВАНОГО ГУМОТКАНИМИ МАТАМИ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

<b>Слабий О.О.</b>	канд. техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1274-2875">https://orcid.org/0000-0002-1274-2875</a> , e-mail: <a href="mailto:burewisnyk@gmail.com">burewisnyk@gmail.com</a> ;
<b>Гриджук А.С.</b>	д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1429-8640">https://orcid.org/0000-0002-1429-8640</a> , e-mail: <a href="mailto:jaroslav.gridzhuk@gmail.com">jaroslav.gridzhuk@gmail.com</a> ;
<b>Дмитрів І.В.</b>	канд. техн. наук, доцент, НУ «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-5107-7273">https://orcid.org/0000-0002-5107-7273</a> , e-mail: <a href="mailto:ihor.v.dmytriv@lpnu.ua">ihor.v.dmytriv@lpnu.ua</a> ;
<b>Суглобов В.В.</b>	д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-1743-0894">https://orcid.org/0000-0003-1743-0894</a> , e-mail: <a href="mailto:suglobov_v_v@pstu.edu">suglobov_v_v@pstu.edu</a> ;
<b>Русаченко О.В.</b>	аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0001-3919-1751">https://orcid.org/0009-0001-3919-1751</a> , e-mail: <a href="mailto:rusachenko_o_v@aspirants.pstu.edu">rusachenko_o_v@aspirants.pstu.edu</a>

Робота присвячена розробці чисельної моделі, яка б досліджувала особливості контактної взаємодії ковша навантажувача із гранульованою гірською породою в процесі його роботи та давала можливість визначати доцільність застосування окремих видів його зносостійкого футерування, зокрема на основі гумотканих матеріалів. За об'єкт дослідження обрано навантажувач, що здійснює навантажувальні роботи з гранульованим вапняком. Стінки ковша навантажувача з переважно нормальним напрямком дії сил контактної взаємодії (задня, верхня та бокові стінки) були захищені дисперсно-армованою гумотканою футеровкою, яка по наявних дослідженнях для м'яких порід має кращі зносостійкі властивості порівняно із сталлю, а також володіє іншими технологічними перевагами. Для реалізації поставленої задачі застосовано поєднання двох сучасних систем інженерного аналізу: метод дискретних елементів (Discrete Element Method), за допомогою якого описувалась контактна взаємодія між гірською породою та ковшем, та метод багато тільної динаміки (Multibody Dynamics), який використано для моделювання динаміки та кінематики переміщення ковша та z-подібного важільного механізму його приводу. Розроблена комплексна модель повністю відтворює основний цикл роботи навантажувача, який включає етапи заглиблення в штабель, переміщення, підняття та розвантаження матеріалу. Гранульований вапняк моделювався у вигляді частинок поліедричної форми (sphere-polyhedron) різних розмірів фракцією 75-100 мм та відповідних фізико-механічних властивостей. У ході чисельного експерименту отримано детальні карти розподілу нормальних та тангенціальних напружень на робочих поверхнях футерування зі зміною часу. Встановлено, що пікові навантаження виникають на етапі максимального заглиблення ковша в насип. Аналіз отриманих даних підтвердив висунуту гіпотезу про те, що обрані для футерування зони сприймають переважно нормальні ударні навантаження, тоді як частка тангенціальних зусиль, що викликають абразивне зрізання гуми, є мінімальною. Це може свідчити про доцільність використання гумотканих композитів в слабо навантажених зонах, де вони можуть реалізувати свій потенціал щодо гасіння вібрацій та ударів без ризику швидкого зношування та негативного впливу на конструкцію навантажувача. Результати дослідження доводять доцільність застосування комбінованих схем футерування для роботи з м'якими породами та демонструють ефективність використання зв'язки DEM-MBD моделювання для проектування та оптимізації конструкцій навісного обладнання кар'єрної техніки.

**Ключові слова:** ківи навантажувача; зносостійке футерування; метод дискретних елементів (DEM); багато-тільна динаміка (MBD).

### Постановка проблеми

Ефективність роботи кар'єрної та будівельної техніки безпосередньо залежить від довговічності її робочих органів. Ковші екскаваторів та навантажувачів у процесі роботи піддаються інтенсивному ударному та абразивному зносу та значним динамічним навантаженням. Це призводить до передчасного виходу обладнання з ладу, збільшення витрат на ремонт та простою техніки. Одним із перспективних напрямків

розв'язання цієї проблеми є футерування (облицювання) внутрішніх поверхонь ковша зносостійкими матеріалами, зокрема гумотканими матами, які мають високі демпфуючі властивості. Завдяки здатності еластомерів до зворотного деформування, такі покриття дозволяють суттєво знизити енергію ударного впливу окремих частинок гірської маси, мінімізуючи втому металевої конструкції ковша. Окрім захисної функції, гумоткане футерування сприяє зменшенню ефекту налипання та намерзання вологого матеріалу, що оптимізує

процес розвантаження та підвищує загальну продуктивність машини. Проте складність прогнозування поведінки такого покриття при взаємодії із неоднорідним середовищем потребує детального аналізу.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності робочих органів кар'єрної техніки, зокрема фронтальних навантажувачів, залишається однією з ключових проблем гірничої механіки. В процесі роботи ківш зазнає інтенсивного комбінованого впливу: абразивного зносу при заглибленні в штабель та високоенергетичних динамічних ударів при завантаженні породи. Традиційним підходом до підвищення ресурсу є використання змінних футерувальних плит із високоміцних мартенситних сталей (типу Hardox, Weldox) або наплавлення твердих сплавів [1–3]. Попри високу твердість, такі рішення мають суттєві недоліки: значне збільшення власної маси робочого органу, що знижує коефіцієнт корисного використання вантажопідйомності, та повна відсутність демпфуючих властивостей. Альтернативним напрямком, що набуває поширення в індустрії (рішення компанії Metso, Forech), є застосування композитних полімерних та гумових футеровок [3–6].

Наявні дослідження зносу гумових матеріалів, а також композитів на її основі показують, що дані матеріали мають набагато кращу зносостійкість в порівнянні із сталлю, коли ударна взаємодія спостерігається по нормалі до поверхні [7, 8]. Це досягається за рахунок того, що гума має низький модуль пружності та високий коефіцієнт внутрішнього тертя, за рахунок чого працює як ефективний дисипатор енергії. В результаті збільшується час контактної взаємодії при ударі та, відповідно, знижуються пікові значення миттєвих ударних сил, що позитивно впливає на вібраційне навантаження та зменшує локальні напруження, які виникають в процесі роботи.

Додатковими експлуатаційними перевагами є ефект самоочищення від налипання вологих ґрунтів (адгезія до гуми значно нижча, ніж до металу), а також намерзання. Однак, застосування «чистих» гумових елементів для протидії абразивному зносу обмежене їх низькою стійкістю до мікро-різального впливу гострокутної породою. При малих кутах атаки абразиву гума схильна до мікро-різання та виривання шматків [8–11], що призводить до її швидкого зносу. Для нівелювання цього недоліку сучасні наукові роботи пропонують використання гумотканних дисперсно-армованих композитів. Введення вуглецевого волокна та спеціалізованих кордових тканин у гумову матрицю надає матеріалу анізотропних властивостей, суттєво підвищуючи модуль пружності та твердість матеріалу, зменшуючи при цьому сили тертя та зберігаючи гіперпружну поведінку, необхідну для амортизації ударів і, відповідно, високі показники абразивної стійкості [12–14]. Зважаючи на вищесказане, такі матеріали можуть

бути використані для захисту ненавантажених зон ківшів навантажувачів, що проводять навантажувальні роботи з нетвердими матеріалами (наприклад, вапняком, мергелем, гіпсом), де переважають нормальні ударні навантаження та відсутні значні дотичні сили, а самі матеріали не володіють гострими твердими кромками, що зменшує ефект мікро-різання.

Аналіз ефективності таких композитних футеровок вимагає складних методів розрахунку, оскільки класичні методи механіки суцільного середовища не здатні коректно описати дискретну поведінку сипучого вантажу. Сучасний рівень розвитку обчислювальної механіки передбачає використання методів дискретних елементів (discrete element method, DEM) для дослідження механізмів і машин, що працюють із сипучими та гравійними матеріалами. Використання програмних продуктів DEM дає змогу генерувати реалістичний масив частинок (підтримуються системи із числом частинок більше 1 млн) складної форми та різних розмірів, задаючи їм необхідні властивості фрикційної та ударної взаємодії, що є критичним для коректної оцінки навантажень, що діють на робочі органи екскаваторів та навантажувачів, що підтверджується чисельними дослідженнями на дану тему [15–21]. Для отримання достовірних результатів моделювання робочих органів екскаваторів та навантажувачів в середовищах DEM слід якісно задавати траєкторію їх робочого руху. Дана задача на сьогодні найкраще вирішується в системах багатотільної динаміки (multibody dynamics, MBD), де можна проводити дослідження механізмів, якщо є відома їх тривимірна модель [22, 23]. Враховуючи те, що теперішній розвиток системи інженерного аналізу дозволяє проводити одночасну симуляцію із застосуванням DEM і MBD систем шляхом передачі даних між ними, це дає можливість найбільш точно моделювати роботу ковшів екскаваторів та навантажувачів.

#### Мета статті

Створення та дослідження моделі процесу контактної взаємодії ковша навантажувача, який футерований дисперсно-армованими гумотканними матами, з гранульованою гірською породою. Детальне дослідження напружено-деформованого стану футеровки та оцінювання ефективності її застосування при навантажувальних роботах. Пошук шляхів оптимізації конструкції ковшів та підвищення їх експлуатаційного ресурсу.

#### Виклад основного матеріалу

На основі наявних матеріалів про навантажувач [24] створена тривимірна модель його робочого z-подібного важільного механізму із ківшом (рис. 1, В) модифікованої конструкції, задня, верхня та бокові стінки якого футеруються гумотканними матами товщиною 20 мм.

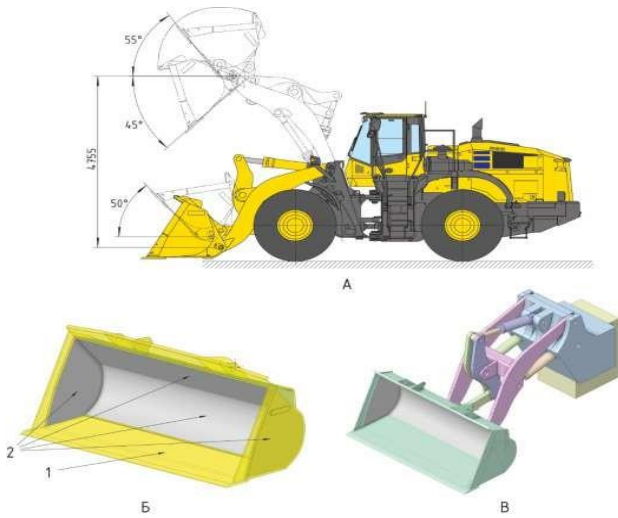


Рис. 1 – Досліджуваний об’єкт: А – схема навантажувача WA-500-8 [24], Б – тривимірна модель модифікованого ковша (1 – ківш, 2 – футеровка ковша), В – тривимірна модель ковша з z-подібним важільним механізмом приводу

Для захисту від передчасного руйнування торці гумотканих матів були захищені металевими клинами (рис. 1, Б). Вибір футерування лиш цих стінок ковша обумовлений висунутою гіпотезою про те, що вони в процесі роботи є помірно навантаженими і сприймають переважно нормальні ударні зусилля, що є найбільш сприятливими режимами роботи зносостійких елементів на основі гуми [8]. Оскільки питання кріплення такої футеровки виходить за межі даного дослідження, приймаємо, що гумоткана футеровка жорстко кріпиться до корпусу ковша по поверхні їх контакту.

Провівши аналіз рішень, що застосовують при вирішенні такого роду задач, було вирішено використати зв’язку програмних продуктів Ansys Motion/Ansys Rocky (MBD/DEM), що дає змогу проводити спільну симуляцію досліджуваного об’єкту завдяки створенню і експорту FMU моделі ковша і його приводу з середовища MBD в середовище DEM. Для цього на основі створеної тривимірної моделі в середовищі Ansys Motion Preprocessor створено модель MBD, що складається із 17 тіл та 14 обертових пар (Revolute Joint), 3 циліндричних пар (Cylindrical joint), якими моделювався взаємозв’язок поршня та циліндра гідроциліндрів, 1 поступальної пари (Translation Joint), що описувала можливість переміщення об’єкту відносно нерухомої системи координат та 5 жорстких з’єднань (Fixed Joint), за допомогою яких описано кріплення футеровки до тіла ковша. Графічне зображення створеної моделі наведено на рис. 2.

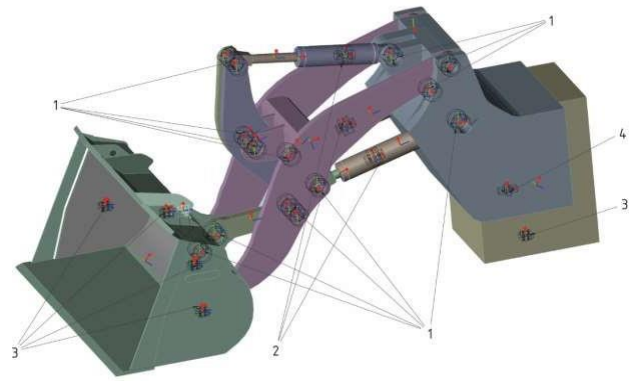


Рис. 2 – Модель ковша з привідним механізмом в середовищі Ansys Motion Preprocessor. 1 – обертові пари, 2 – циліндричні пари, 3 – жорстке кріплення, 4 – поступальна пара

Моделювання руху навантажувача відбувалось шляхом задання контрольованих положень гідроциліндрів стріли та повороту ковша, а також лінійної швидкості шасі відносно глобальної системи координат. Досліджувався один цикл роботи навантажувача тривалістю 20 с, який включав процес забору породи її переміщення та розвантаження. Детальніше досліджуваний цикл роботи навантажувача наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Опис досліджуваного робочого циклу навантажувача					
№	Час, с	Горизонтальна швидкість, м/с	Переміщення гідроциліндрів стріли, мм	Переміщення гідроциліндра повороту ковша, мм	Робочий процес
1	0	2.5	0	0	Переміщення до насипу породи та занурення в нього
2	2	2.5	0	0	
3	2.5	1	0	0	
4	3	0.5	0	0	
5	3.5	0.2	-25	-80	Підняття ковша в транспортне положення
6	5.5	0	-50	-250	
7	6.5	-1.5	-75	-250	Від’їзд від насипу породи
8	9	-1.5	-75	-250	
9	9.5	0	-75	-250	
10	10	0	-75	-250	Підняття ковша для розвантаження
11	13.2	0	-860	-250	
12	13.5	1.5	-860	-250	Під’їзд до місця розвантаження
13	15.5	0	-860	-250	
14	16	0	-860	-250	
15	18	0	-860	300	Розвантаження ковша
16	20	0	-860	300	

Чисельні значення переміщень гідроциліндрів визначені по тривимірній моделі відносно початкового положення ковша, шляхом переміщення ковша в одне із його основних положень згідно схеми, наведеної на

рис. 1, А. Усі переміщення рухомих елементів задавались часовими рядами (spline) із подальшою їх апроксимацією сплайном за допомогою функції AKISPL() в рівняннях руху (Function Expression). Для запобігання нерівномірності апроксимацій за допомогою сплайн функції періодів вистою, в часові ряди додатково вводили точки на ділянках вистою. Отриману модель експортовано як FMU-модель для подальшого імпорту в середовище DEM.

Для зменшення кількості частинок, що беруть участь в симуляції, що напряму впливає на обчислювальну складність і її тривалість, прийнято, що насип гірської породи формується відносно вертикальних стінок, які знаходяться на відстані 1 м від крайніх положень переміщення ковша. Так досягається нівелювання впливу крайових ефектів уклинювання частинок між стінкою та ковшем і моделювання «нетипової» контактної взаємодії. Зважаючи на те, що кінематика руху ковша навантажувача задавалась із 0 с, для формування статичного насипу проведено окреме моделювання в середовищі DEM. Насип формувался шляхом рівномірного генерування частинок в площині 1 (рис. 3, А) з інтенсивністю до 56000 т/год протягом часу 0-3 с та подальшим вистоем утвореного насипу протягом 1 с. В результаті отримано насип з кількістю частинок 81944 та масою 44 т, більшість частинок якого є нерухомими (рис. 3, А), а наявною залишковою швидкістю окремих частинок по схилу можна знехтувати. Форма частинок гірської породи описана моделю sphere-polyhedron із 14 кутами (рис. 3, Б) та мала три розмірні фракції 75, 80 і 100 мм. Початковий розподіл частинок різних фракцій в насипі можна побачити на рис. 3, В. Механічні властивості породи та матеріалів ковша і параметри їх контактної взаємодії, що використовувались в DEM моделюванні зведені в табл. 2. Для зменшення тривалості симуляції Numerical softening factor встановлений рівним 0,01.

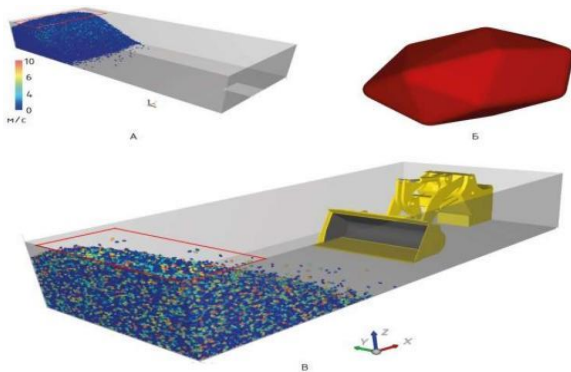


Рис. 3 – Модель системи в середовищі Ansys Rocky: А – результат попереднього моделювання насипу (кольорова градація абсолютна швидкість тіл), Б – тривимірна модель частинки, що використовувалась в моделюванні, В – модель досліджуваної системи в початковий момент часу (кольором відмічені частинки різного об'єм дискретними частинками та частинками і стінками тримірної моделі ковша та його привод)

Після створення насипу в середовище імпортовано FMU-модель ковша та відповідна геометрія. В результаті отримано остаточну модель досліджуваної системи в середовищі DEM (рис. 3, В). Моделювання проводилось на проміжку часу 0-20 с з кроком 0.05 с. В процесі моделювання величина contacts overlap more 2,5% не перевищувала значення 0,18% всіх контактів, що свідчить про чисельну стабільність та достовірність отриманих розрахунків при заданому значенні softening factor.

Таблиця 2

Механічні властивості матеріалів				
№	Властивість	Вапняк	Сталь	Гума
Механічні властивості матеріалів				
1	Густина, кг/м <sup>3</sup>	2550	7850	1400
2	Модуль Юнга, ГПа	30	210	0,1
3	Коефіцієнт Пуасона	0,3	0,3	0,45
Взаємодія матеріалів				
№	Властивість	Вапняк-вапняк	Вапняк-сталь	Вапняк-гума
1	Статичний коефіцієнт тертя	0,7	0,55	0,8
2	Динамічний коефіцієнт тертя	0,55	0,35	0,7
3	Коефіцієнт відновлення	0,4	0,5	0,3
4	Коефіцієнт тертя кочення, см	0,4	-	-

На рис. 4 наведено графічне зображення результатів моделювання для різних моментів часу, яке детально описує відносно розташування елементів породи та ковша навантажувача в процесі досліджуваного циклу навантажувальних робіт. Оскільки при моделюванні в DEM тривимірні моделі вважаються абсолютно твердими тілами, за результатами розв'язку моделі можна провести лиш оцінку особливостей контактної взаємодії елементів гірської породи із стінками ковша. Аналіз зміни величини зусиль, що діють на ківш, значень контактних швидкостей та розподілу напружень в елементах гірської породи показує, що найбільш навантаженим ківш перебуває в момент заглиблення в штабель гірської породи із піковими значеннями в крайньому положенню, що відповідає моменту часу 3 с в проведеної симуляції. На рис. 5 наведено розподіл ексцесу нормальної і дотичної ударної швидкості (Kurtosis impact velocity) по ковшу навантажувача, що характеризують нерівномірність пікових локальних значень ударної швидкості відносно середньої величини. Отримані результати показують домінуючі значення ударних навантажень по нормалі в зонах футерування ковша, а також те, що основні ударні навантаження сприймає нижня стінка ковша.

Загалом значення ексцесів швидкостей не набувають значних величин, які вказують на значну нерівномірність ударної взаємодії. На рис. 6 наведено картину розподілу нормальних та дотичних напружень, що

виникають в елементах гірської породи, яка взаємодіє із ковшем. Отримані значення показують домінування нормальних напружень над дотичними та відносно невелике значення дотичних напружень в зонах футерування ковша. Однак отримані значення для футерування задньої стінки можуть показувати про можливість процесів мікрорізання

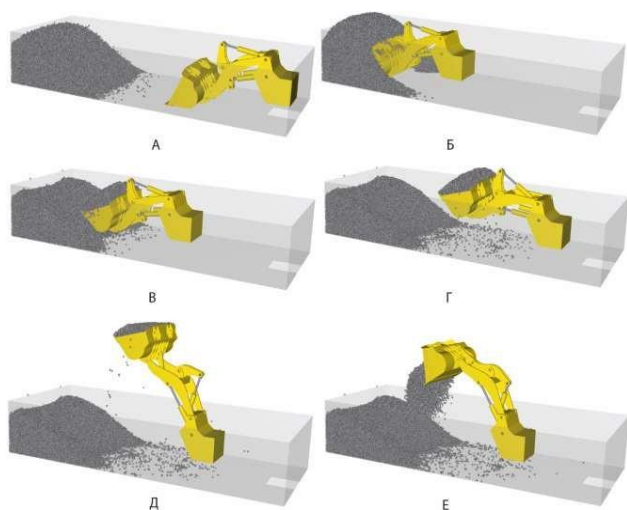


Рис. 4 – Результати моделювання процесу навантаження.  
А – 0 с, Б – 3,5 с, В – 7 с, Г – 10,5 с, Д – 14 с, Е – 17,5 с

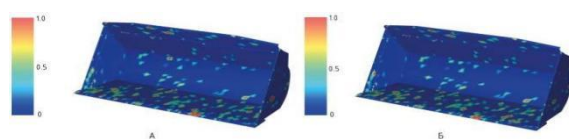


Рис. 5 – Розподіл ексцесу швидкості ударної взаємодії породи зі стінками ковша в момент часу 3,0 с: А – по нормалі, Б – по дотичній

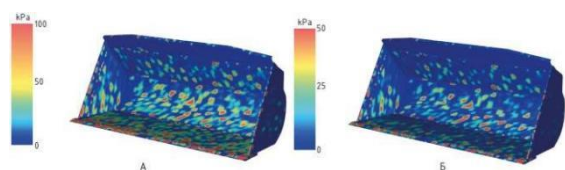


Рисунок 6 – Розподіл напружень в елементах породи при їх ударній взаємодії зі стінками ковша в момент часу 3,0 с: А – по нормалі, Б – по дотичній

породою. Результати симуляції підтверджують доцільність використання гумотканих матеріалів у зонах з переважанням ударних нормальних навантажень, що відкриває шляхи до оптимізації конструкцій ковшів та підвищення їх експлуатаційного ресурсу.

#### Перелік використаних джерел

- [1] SAAB. HARDOX wear plate. Hard and tough. URL: <https://www.italautocar.com/> (дата звернення: 25.12.2025).
- [2] Attachment Inc. Hardox in my body. URL: <https://www.amiattachments.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [3] Welding Alloys. Integra engineered wear services. URL: <https://www.welding-alloys.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [4] Forech. Composite rubber and ceramic liners. URL: <https://www.forech.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [5] Masso. Composite rubber and ceramic liners. URL: <https://www.cqmasso.com> (дата звернення: 25.12.2025).
- [6] FirstGraphene. Bucket Wear Liner Trial Results Point to a 6x Improvement in Lifespan. URL: <https://www.firstgraphene.net/bucket-wear-liner-trial-results-point-to-a-6x-improvement-in-lifespan-2/> (дата звернення: 25.12.2025).
- [7] Sare I. R., Mardel J. I., Hill A. J. Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries – an overview. *Wear*. 2001. Vol. 250, no. 1-12. Pp. 1–10. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00622-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00622-6).
- [8] Rubber Wear: History, Mechanisms, and Perspectives / Xu R., Sheng W., Zhou F., Persson B. N. J. *Tribology Letters*. 2025. Vol. 73, no. 3. DOI: <https://doi.org/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, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0248199>.
- [10] Nahvi S. M., Shipway P. H., McCartney D. G. Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test. *Wear*. 2009. Vol. 267, no. 11. Pp. 2083–2091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.08.013>.
- [11] Muhr A. H., Roberts A. D. Rubber abrasion and wear. *Wear*. 1992. Vol. 158, no. 1-2. Pp. 213–228. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90040-F](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90040-F).
- [12] Friction and wear of Stellite 6B during sliding against rubber compound with varied carbon fiber content / D. Han et al. *Polymer Testing*. 2022. Vol. 106. Article 107470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.10747>.
- [13] Wear property improvement by short carbon fiber as enhancer for rubber compound / Q. He et al. *Polymer Testing*. 2019. Vol. 77. P. 105879. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.04.026>.

#### Висновки

У роботі розроблено та реалізовано комплексну методику моделювання роботи ковша навантажувача, який футерований дисперсно-армованими гумотканими матами, з використанням систем MBD-DEM (Ansys Motion та Ansys Rocky). Отримана модель дозволяє детально досліджувати процес контактної взаємодії ковша і напружено-деформований стан футеровки та оцінювати ефективність її застосування при навантажувальних роботах з гранульованою гірською

- [14] Baek D. K., Khonsari M. M. Friction and wear of a rubber coating in fretting. *Wear*. 2005. Vol. 258, no. 5–6. Pp. 898–905. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.075>.
- [15] Frank B., Kleinert J., Filla R. Optimal control of wheel loader actuators in gravel applications. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 91. Pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.005>.
- [16] Viscosity Reduction and Drag Reduction Performance Analysis of Bionic Excavator Buckets Based on Discrete Element Method / G. Liu et al. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9, no. 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9110686>.
- [17] Kalkat M., Bahadır M., Yılmaz F. 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*. 2018. Vol. 7, no. 1. Pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1324598>.
- [18] Simulation of front end loader bucket–soil interaction using discrete element method / Nezami E. G., Hashash Y. M. A., Zhao D., Ghaboussi J. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2007. Vol. 31, no. 9. Pp. 1147–1162. DOI: <https://doi.org/10.1002/nag.594>.
- [19] Optimization of Excavator Bucket Structure by a Coupled Simulation Method / Y. Wang et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 20. Article 11336. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132011336>.
- [20] Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid FE-DEM granular material model / Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. *Computational Particle Mechanics*. 2021. Vol. 8, no. 4. Pp. 825–843. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00372-z>.
- [21] Forsström D., Jonsén P. Calibration and validation of a large scale abrasive wear model by coupling DEM-FEM. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. Pp. 274–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.04.007>.
- [22] Shape Optimization of an Excavator Bucket with the Help of ANSYS Software / Thombarer A. V., Dudhe S. V., Wankhade S. K., Deshmukh C. G. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 08, no. 03. Pp. 378–383.
- [23] Digging Performance and Stress Characteristic of the Excavator Bucket / Y. Sun et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 20. Article 11507. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132011507>.
- [24] Komatsu. WA500-8-YardLoader. 2016. URL: <https://www.komatsu.com> (дата звернення: 25.12.2025).

## TRESEARCH ON THE LOADING OF A BUCKET LINED WITH HUMID MATS WHEN LOADING BULK MATERIALS

<b>Slaby O.O.</b>	<i>PhD (Engineering), associate professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1274-2875">https://orcid.org/0000-0002-1274-2875</a>, e-mail: <a href="mailto:burewisnyk@gmail.com">burewisnyk@gmail.com</a>;</i>
<b>Gridzhuk A.S.</b>	<i>D.Sc. (Engineering), professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1429-8640">https://orcid.org/0000-0002-1429-8640</a>, e-mail: <a href="mailto:jaroslav.gridzhuk@gmail.com">jaroslav.gridzhuk@gmail.com</a>;</i>
<b>Dmytriv I.V.</b>	<i>PhD (Engineering), associate professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-5107-7273">https://orcid.org/0000-0002-5107-7273</a>, e-mail: <a href="mailto:ihor.v.dmytriv@lpnu.ua">ihor.v.dmytriv@lpnu.ua</a>;</i>
<b>Suglobov V.V.</b>	<i>D.Sc. (Engineering), professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-1743-0894">https://orcid.org/0000-0003-1743-0894</a>, e-mail: <a href="mailto:suglobov_v_v@pstu.edu">suglobov_v_v@pstu.edu</a>;</i>
<b>Rusachenko O.V.</b>	<i>postgraduate student, SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0001-3919-1751">https://orcid.org/0009-0001-3919-1751</a>, e-mail: <a href="mailto:rusachenko_o_v@aspirants.pstu.edu">rusachenko_o_v@aspirants.pstu.edu</a></i>

The paper focuses on the development of a numerical model to investigate the features of contact interaction between a loader bucket and granular rock during operation, enabling the assessment of the feasibility of applying specific types of wear-resistant lining, particularly those based on rubber-fabric materials. A loader performing loading operations with granular limestone was selected as the object of study. The bucket walls subject to predominantly normal contact forces (rear, top, and side walls) were protected by a dispersion-reinforced rubber-fabric lining. According to existing studies for soft rocks, this lining exhibits superior wear resistance compared to steel and possesses other technological advantages. To achieve the objective, a combination of two modern engineering analysis systems was applied: the Discrete Element Method (DEM), used to describe the contact interaction between the rock and the bucket, and Multibody Dynamics (MBD), used to simulate the dynamics and kinematics of the bucket movement and its Z-bar linkage drive mechanism. The developed comprehensive model fully reproduces the main operating cycle of the loader, including penetration into the pile, transport, lifting, and unloading of the material. Granular limestone was modeled as polyhedral particles (sphere-polyhedron) of various sizes within the 75–100 mm fraction range, with corresponding physical and mechanical

properties. During the numerical experiment, detailed time-dependent distribution maps of normal and tangential stresses on the lining working surfaces were obtained. It was established that peak loads occur during the stage of maximum bucket penetration into the pile. Analysis of the obtained data confirmed the hypothesis that the zones selected for lining are subjected primarily to normal impact loads, while the proportion of tangential forces causing abrasive cutting of the rubber is minimal. This indicates the feasibility of using rubber-fabric composites in less loaded zones, where they can realize their potential for damping vibrations and impacts without the risk of rapid wear or negative impact on the loader structure. The research results demonstrate the feasibility of applying combined lining schemes for operations with soft rocks and prove the effectiveness of using coupled DEM-MBD simulation for the design and optimization of mining equipment attachments.

**Keywords:** loader bucket; wear-resistant lining; Discrete Element Method (DEM); Multibody Dynamics (MBD).

### References

- [1] SAAB. HARDOX wear plate. Hard and tough. [Online]. Available: <https://www.italautocar.com/>. Accessed on: December 25, 2025.
- [2] Attachment Inc. Hardox in my body. [Online]. Available: <https://www.amiattachments.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [3] Welding Alloys. Integra engineered wear services. [Online]. Available: <https://www.welding-alloys.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [4] Forech. Composite rubber and ceramic liners. [Online]. Available: <https://www.forech.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [5] Masso. Composite rubber and ceramic liners. [Online]. Available: <https://www.cqmasso.com>. Accessed on: December 25, 2025.
- [6] FirstGraphene. Bucket Wear Liner Trial Results Point to a 6x Improvement in Lifespan. [Online]. Available: <https://www.firstgraphene.net/bucket-wear-liner-trial-results-point-to-a-6x-improvement-in-lifespan-2/>. Accessed on: December 25, 2025.
- [7] I. R. Sare, J. I. Mardel, and A. J. Hill, “Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries – an overview,” *Wear*, vol. 250, no. 1-12, pp. 1–10, 2001. doi: **10.1016/S0043-1648(01)00622-6**.
- [8] R. Xu, W. Sheng, F. Zhou, and B. N. J. Persson, “Rubber Wear: History, Mechanisms, and Perspectives,” *Tribology Letters*, vol. 73, no. 3, 2025. doi: **10.1007/s11249-025-02025-9**.
- [9] B. N. J. Persson, R. Xu, and N. Miyashita, “Rubber wear: Experiment and theory,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 162, no. 7, 2025. doi: **10.1063/5.0248199**.
- [10] S. M. Nahvi, P. H. Shipway, and D. G. McCartney, “Particle motion and modes of wear in the dry sand–rubber wheel abrasion test,” *Wear*, vol. 267, no. 11, pp. 2083–2091, 2009. doi: **10.1016/j.wear.2009.08.013**.
- [11] A. H. Muhr and A. D. Roberts, “Rubber abrasion and wear,” *Wear*, vol. 158, no. 1-2, pp. 213–228, 1992. doi: **10.1016/0043-1648(92)90040-F**.
- [12] D. Han et al., “Friction and wear of Stellite 6B during sliding against rubber compound with varied carbon fiber content,” *Polymer Testing*, vol. 106, article 107470, 2022. doi: **10.1016/j.polymertesting.2021.107470**.
- [13] Q. He, Y. Zhou, W. Qu, Y. Zhang, L. Song, and Z. Li, “Wear property improvement by short carbon fiber as enhancer for rubber compound,” *Polymer Testing*, vol. 77, article 105879, 2019. doi: **10.1016/j.polymertesting.2019.04.026**.
- [14] D. K. Baek, and M. M. Khonsari, “Friction and wear of a rubber coating in fretting,” *Wear*, vol. 258, no. 5-6, pp. 898–905, 2005. doi: **10.1016/j.wear.2004.09.075**.
- [15] B. Frank, J. Kleinert, and R. Filla, “Optimal control of wheel loader actuators in gravel applications,” *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 1–14, 2018. doi: **10.1016/j.autcon.2018.03.005**.
- [16] G. Liu, X. Han, Z. Wang, K. Wang, Z. Zhang, and Z. Duan, “Viscosity Reduction and Drag Reduction Performance Analysis of Bionic Excavator Buckets Based on Discrete Element Method,” *Biomimetics*, vol. 9, no. 11, 2024. doi: **10.3390/biomimetics9110686**.
- [17] M. Kalkat, M. Bahadır, and F. 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*, vol. 7, no. 1, pp. 331–339, 2018. doi: **10.28948/ngumuh.1324598**.
- [18] E. G. Nezami, Y. M. A. Hashash, D. Zhao, and J. Ghaboussi, “Simulation of front end loader bucket–soil interaction using discrete element method,” *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 31, no. 9, pp. 1147–1162, 2007. doi: **10.1002/nag.594**.
- [19] Y. Wang et al., “Optimization of Excavator Bucket Structure by a Coupled Simulation Method,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 20, p. 11336, 2023. doi: **10.3390/app132011336**.
- [20] A. Svanberg, S. Larsson, R. Mäki, and P. Jonsén, “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, no. 4, pp. 825–843, 2021. doi: **10.1007/s40571-020-00372-z**.
- [21] D. Forsström, and P. Jonsén, “Calibration and validation of a large scale abrasive wear model by coupling DEM-FEM,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 66,

- pp. 274–283, 2016. doi: 10.1016/j.eng-failanal.2016.04.007.
- [22] A. V. Thombarer, S. V. Dudhe, S. K. Wankhade, and C. G. Deshmukh, “Shape Optimization of an Excavator Bucket with the Help of ANSYS Software,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 378–383, 2020.
- [23] Y. Sun et al., “Digging Performance and Stress Characteristic of the Excavator Bucket,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 20, p. 11507, 2023. doi: 10.3390/app132011507.
- [24] Komatsu, “WA500-8-YardLoader,” 2016. [Online]. Available: <https://www.komatsu.com>. Accessed on: December 25, 2025.

Стаття надійшла 15.11.2025

Стаття прийнята 28.12.2025

Стаття опублікована 26.03.2026

**Цитуйте цю статтю як:** Дослідження навантаженості ковша облицьованого гумотканними матами при навантаженні сипучих матеріалів / О.О. Слабий та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 1. С. 162–169. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359804>.