

УДК 622. 23

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.289-298](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.289-298)

В. В. Яцун, доц., канд. техн. наук, **С. О. Джирма**, доц., канд. техн. наук, **О. О. Руденко**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: stas55871@ukr.net

Огляд конструкцій гумових футеровок барабанних кульових млинів та подальші перспективи їх розвитку

У роботі виконано узагальнюючий огляд сучасних конструкцій гумових футеровок, призначених для використання у барабанних кульових млинах, що експлуатуються в різних галузях промисловості для здійснення процесів дезінтеграції мінеральної сировини. Основну увагу приділено аналізу технічних рішень, спрямованих на підвищення зносостійкості, зниження маси футеровки, покращення енергоефективності процесу подрібнення та спрощення монтажу-демонтажу футерувальних елементів. Розглянуто конструктивні особливості гумових футерувальних плит традиційних та спеціальних конструкцій, описані їх галузі застосування в залежності від типорозмірів кульових млинів, геометричні характеристики та способи кріплення.

Особливу увагу приділено впливу конструктивних параметрів футеровки на експлуатаційні характеристики і технологічні показники кульових млинів, зокрема зносостійкість футеровки, енергоефективність процесу подрібнення, продуктивність. У межах огляду проаналізовано технічні рішення, реалізовані у футеровках провідних світових виробників, а також узагальнено актуальні тенденції подальшого вдосконалення конструкцій гумових футеровок. Надано висновки щодо ефективності різних типів конструкцій гумових футеровок залежно від умов експлуатації млинів, перспективності подальшого впровадження інноваційних матеріалів та адаптивних геометричних форм з метою оптимізації техніко-економічних показників млинів.

гумова футеровка, барабанні млини, кульове завантаження, довговічність, продуктивність

Постановка проблеми. В усьому світі переробці піддається велика кількість корисних копалин, так за даними U.S. Geological Survey, світовий видобуток залізної руди складає 2,3 млрд. тон за рік і поступово збільшується, на переробку якої витрачається до 10% всієї світової енергії [1]. Тільки в Україні щороку перероблюють більше 100 мільйонів тон мінеральної сировини для отримання залізної руди [2].

Більшість матеріалів для промислових потреб України отримується шляхом подрібнення в барабанних (кульових) млинах. Кульові млини необхідні і широко застосовуються для здійснення процесів дезінтеграції мінеральної сировини у таких галузях промисловості, як перероблення корисних копалин, виробництво цементу, хімічна промисловість, кераміка і виробництво добрив, для дроблення і подрібнення таких матеріалів, як руда, вапняк, кварц, вугілля тощо.

Процеси подрібнення є доволі енергоємними і супроводжуються інтенсивним зношуванням обладнання, особливо тих вузлів і деталей, які мають безпосередній контакт із матеріалом, що переробляється: футерування барабана, розвантажувальні решітки та мелючі тіла.

Одним з напрямків покращення показників роботи кульових млинів є застосування гумових футерувальних елементів циліндричної поверхні барабана.

Незважаючи на багаторічний досвід використання барабанних млинів із гумовою футеровкою, поки що не вдається ефективно застосовувати цей вид футерування в середньо- і великорозмірних млинах з кульовим завантаженням діаметром 80-125 мм. Головною причиною є те, що енергія взаємодії куль з футеруванням часто перевищує граничну міцність гуми. Зниження рівня енергії знижує ефективність

дроблення. Для вирішення цих протиріч потрібно створити нові або вдосконалити існуючі рішення гумових футеровок які зможуть працювати в умовах високих ударних навантажень.

Розробка нових конструктивних рішень гумових футеровок дасть можливість застосовувати їх більш ширше і покращувати такі основні показники кульових млинів: зменшення споживання електроенергії у зв'язку зі зниженням матеріалоемності, вмісту заліза в продуктах здрібнювання, підвищення продуктивності млинів за готовим продуктом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними роботами в області дослідження та конструювання гумових футеровок можна виділити роботи Лавендела, Девіса, Шалламаха, Мура, В.Н. Потураєва, В.І. Дирди, В.П. Надутого, Є.Ф. Чіжика, В.А. Настоящого та інших.

На основні техніко-економічні показники кульових млинів, а саме: продуктивність по готовому класу сировини ($\text{т/год} \cdot \text{м}^3$), питома витрата електроенергії (кВт/т матеріалу), витрата футерувальних елементів (г/т матеріалу), термін праці футеровки, суттєво впливає вибір раціональних параметрів футерувальних елементів.

Позитивний досвід застосування гумових плит став основою для робіт з удосконалення конструкцій футерувальних елементів, робочих поверхонь барабанів млинів, що дозволять ширше використовувати фізико-механічні властивості гум.

Існуючі традиційні конструкції успішно застосовувались і застосовуються в теперішній час в сучасних млинах діаметром до 3,6 м з кульовим завантаженням діаметром не більше 80 мм [3, 4, 5].

Для великорозмірних млинів з діаметром барабану 4,0-4,5 м, які працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-125 мм, було створено гумову футеровку з герметичними повітряними порожнинами, яка отримала назву оболонкова гумова футеровка [6, 7]. Вона знайшла широке застосування в млинах діаметром 4,5 м, що працюють з кульовим завантаженням 85-125 мм.

Для середньорозмірних млинів з діаметром барабану 3,6-4,2 м, які працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-100 мм, було створено гумову футеровку спеціальної конструкції, яка має повітряний зазор і податливі опорні ребра, вона отримала назву буферна гумова футеровка [8].

Останнім часом на гірничо-збагачувальних комбінатах України застосовуються нові оригінальні конструкції гумових футерувальних елементів виробництва ТОВ "НПП Валса ГТВ" (м. Біла Церква, Україна) відомі у практиці як "Плита – Хвиля", "G.M – Хвиля", "Плита – Ліфтер – Хвиля" [2, 9, 10]. Конструкції цих футеровок дозволили успішно застосовувати їх у млинах МШР 3,6х4,0 та МШЦ 3,6х5,5 з кульовим завантаженням діаметром 100 мм і 40 мм на першій, другій, третій стадії подрібнення ГЗК, на заміну металевих броне плит.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є виконати огляд існуючих конструкцій гумових футерувальних елементів циліндричної частини барабана кульових млинів, визначити можливості і границі їх застосування в залежності від діаметру барабана млина і діаметру кульового завантаження. Виявити недоліки існуючих конструкцій гумових футеровок і визначити шляхи та можливості покращення їх конструкцій або створення нових конструктивних рішень. Це дозволить значно ширше застосовувати гуми в якості футерувальних елементів кульових млинів.

Виклад основного матеріалу. На практиці при конструюванні футерувальних елементів притримуються основних вимог: футеровка повинна забезпечити заданий оптимальний режим руху мелючого середовища в барабані млина, збільшення

міжремонтних періодів (мати максимальну довговічність), простоту монтажно-демонтажних робіт по заміні футеровки, задану продуктивність млинів по готовому продукту.

В якості футеровки використовували різні матеріали: леговані сталі, зносостійкі чавуни, пластмаси, еластomers тощо. На практиці, спираючись на досвід використання футеровки в промислових млинах, в якості матеріалу найбільше розповсюдження отримали метали і гуми.

Зносостійкі гуми знайшли широке застосування в якості матеріалу футеровки, так як гуми мають ряд переваг перед металом: витримують значну кількість циклів навантаження без руйнування, мають високу зносостійкість в умовах ударного і ударно-абразивного зношування, питома вага у 6-7 разів менше питомої ваги сталі, стійкі до великої кількості хімічних сполук і температурам до $+90^{\circ}\text{C}$ [3, 11]. Гумові деталі не важко отримувати заданого розміру і форми, виконувати в них порожнини і ребра.

В більшості випадків застосовування гумових футеровок має ряд переваг на відміну від застосування металевої футеровки:

- збільшення терміну праці і як наслідок збільшення міжремонтних періодів;
- зменшення затрат праці при виконанні перефутерувальних робіт, що в свою чергу зменшує виробничі втрати від простоїв обладнання;
- зменшення споживання електроенергії у зв'язку зі зниженням матеріалоємності;
- зниження вмісту заліза в продуктах подрібнення;
- підвищення продуктивності млинів за готовим продуктом.

Крім цього, застосування гуми для футерування кульових млинів знижує рівень шуму на 15-20 дБ в області особливо шкідливих для людини низьких і середніх частот, тим самим покращуючи умови праці обслуговуючого персоналу.

На початку 60-х років кріплення гумових футерувальних плит здійснювалося гумовими брусами (ліфтерами). Ця система кріплення отримала назву плита – ліфтер і навіть сьогодні знаходить широке застосування у сучасній техніці.

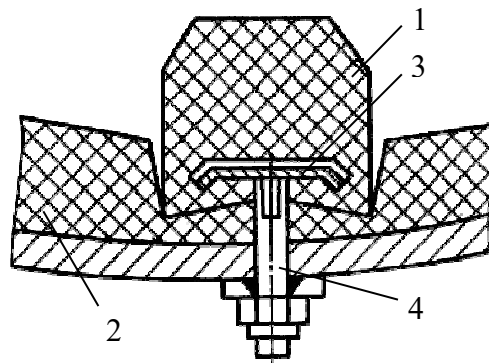
Наразі застосовуються в основному дві системи кріплення футерувальних плит ліфтерами, запропонованими шведськими фірмами "Skega" та "Trelleborg". За системою "Skega" кріплення здійснюється притисочною скобою, що вставляється в Т-подібний проріз цільногумового ліфтера, який притискає футерувальну плиту по всій довжині (рис. 1) [4]. Кріплення за системою фірми "Trelleborg" здійснюється за допомогою металевої планки, яка прикріплюється до цільногумових ліфтерів клейовим способом у процесі вулканізації, та кріпильного болта (рис. 2) [5].

Ці футеровки отримали велике розповсюдження в колишньому СРСР, особливо на підприємствах по виробництву цементу та на другій і третій стадіях подрібнення гірничо-збагачувальних комбінатів.

Однак термін служби ліфтерів, за допомогою яких здійснюється кріплення гумових футерувальних плит, в 2-3 рази менший ніж термін служби самих плит.

Невеликий термін служби ліфтерів зумовлений тим, що під час одностороннього обертання млина відбувається прискорене зношування частини ліфтера, яка виступає над поверхнею футерувальних плит. Основне навантаження припадає на бокову грань ліфтера, товщина гумового шару якої до краю кріпильного паза не перевищує 30 мм. Через інтенсивний знос цього шару кріпильні елементи (ліфтери) поступово втрачають свою міцність і потребують заміни.

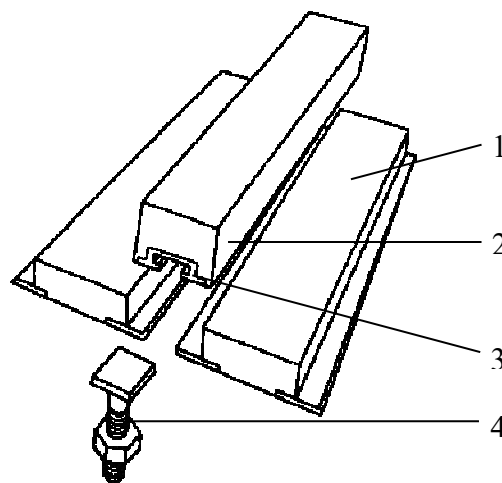
Дані обставини потребують використовувати з одним комплектом плит 2-3 комплекти ліфтерів. Необхідність частої заміни ліфтерів і вимушені зупинки млина на перефутерувальні роботи збільшують витрати на експлуатацію обладнання знижуючи його загальну ефективність використання.



1 – цілнорумовий ліфтер; 2 - футерувальні плити; 3 – притискна скоба; 4 – кріпильний болт.

Рисунок 1 – Конструкція гумового футерування фірми "Skega" (Країна Швеція).

Джерело: розроблено авторами на підставі [4]



1 – футерувальні плити; 2 - цілнорумовий ліфтер; 3 – притискна скоба; 4 – кріпильний болт.

Рисунок 2 – Конструкція гумового футерування фірми "Trelleborg" (Країна Швеція)

Джерело: розроблено авторами на підставі [5]

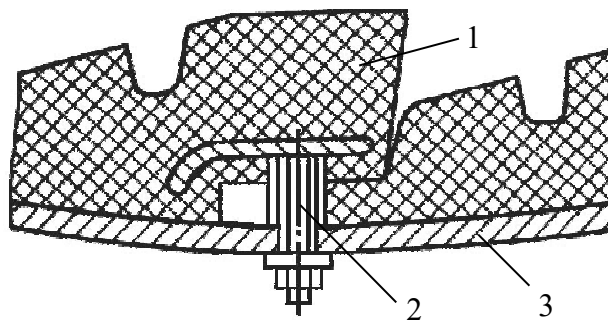
Враховуючи дані обставини, конструктори гумових футерувальних плит пішли шляхом створення гумових футерувальних елементів без різких виступаючих частин.

Одноелементна гумова футеровка без різких виступаючих частин представлена на рис. 3 [12]. Кріпильні елементи знаходяться в тілі футерувальної плити. Це запобігає їх руйнуванню поки не відбудеться зношення футеровки по всій площині, спрощує її конструкцію. Даний вид футерувальних плит широко застосовувався на цементних заводах і гірничо-збагачувальних комбінатах СРСР замість металевих бронеплит відповідної товщини в млинах діаметром до 3,6 м з мелючими кулями діаметром до 80 мм.

Розглянуті конструкції гумових футеровок пробували застосовувати в млинах більшого діаметру, а саме 3,6-4,5 м з кульовим завантаженням 100-125 мм. Але ці спроби були невдалі. Ударні навантаження металевих куль перевищують граничну міцність гумових футеровок (гуми), що викликало швидке зношування футеровки її руйнування і, як наслідок передачу ударних навантажень на корпус барабану кульових млинів.

Наступним кроком у створенні і більш широкого застосування гумових футерувальних елементів в умовах підвищених ударних навантажень (у

великорозмірних млинах) було запропоновано для зниження ударного імпульсу вводити в конструкцію гумової футеровки герметичних повітряних порожнин.

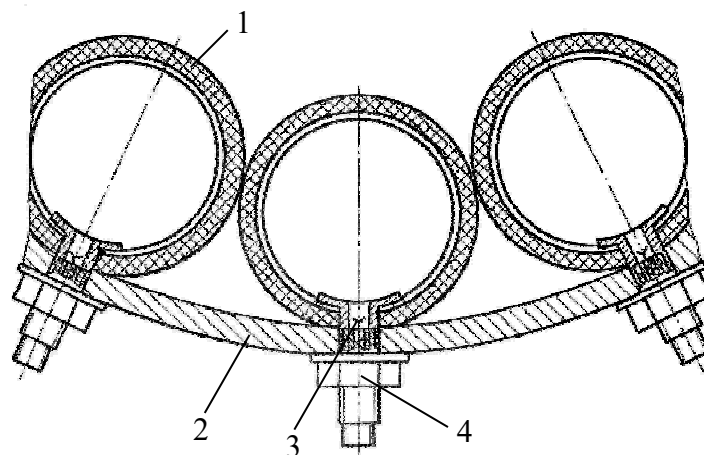


1 – гумова футерувальна плита; 2 – елементи кріплення; 3 – барабан кульового млина

Рисунок 3 – Одноелементна гумова футеровка

Джерело: розроблено авторами на підставі [12]

Основою для створення гумових футеровок, здатних працювати в умовах підвищених ударних навантажень (великорозмірних млинах), стала гумова футеровка, що представляє собою герметичну оболонку заповнену повітрям і обладнана ніпелем для його підводу (рис. 4) [7].



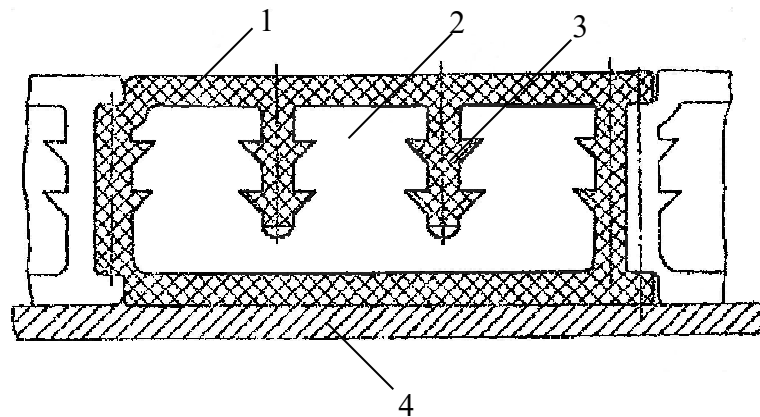
1 – герметична оболонка; 2 – барабан млина; 3 – ніпель для підводу повітря; 4 - елементи кріплення

Рисунок 4 – Гумова футеровка барабанів млинів.

Джерело: розроблено авторами на підставі [6]

За цим принципом створено гаму конструкцій гумових футеровок для великорозмірних млинів, що можуть працювати в умовах підвищених ударних навантажень. Основні конструкції створені провідними вченими: В.Н. Потураєв, В.П. Надутий, О.О. Тарасенко, А.А. Взоров, Е.Ф. Чижик, В.А. Настоящий, А.Г. Червоненко та іншими приведені на рис. 5, 6, 7 [13-15].

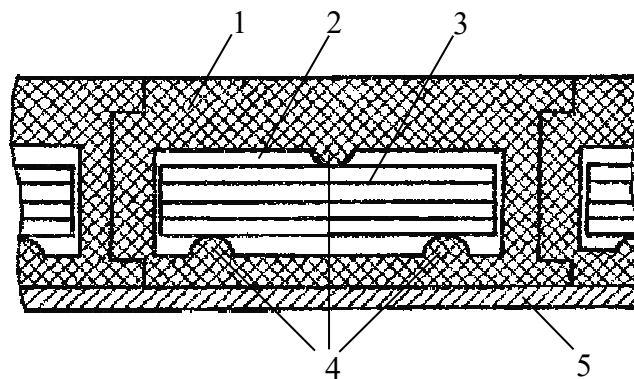
Для захисту циліндричної частини барабану великорозмірних кульових млинів діаметром 4,5 м застосовано оболонкову гумову футеровку (рис. 8). Вона представляє собою набір однотипних гумових елементів з герметичними повітряними порожнинами. Оптимальні геометричні параметри оболонкових гумових футерувальних елементів визначено на основі виконаних досліджень в роботі [8].



1 – футерувальна плита; 2 – повітряна порожнина; 3 – консольні ребра жорсткості;
4 – поверхня, що захищається

Рисунок 5 – Гумова футеровка барабанів млинів.

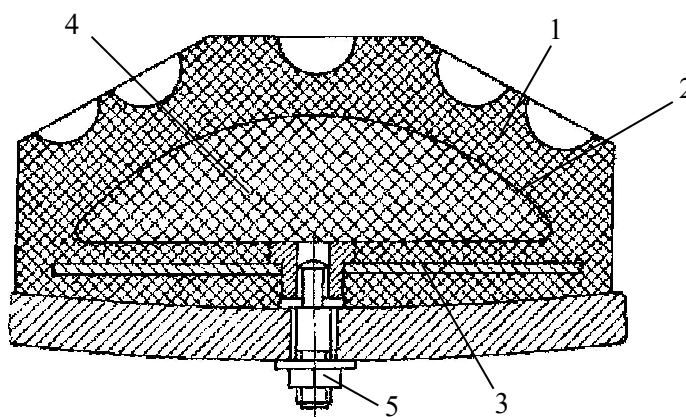
Джерело: розроблено авторами на підставі [13]



1 – футерувальна плита; 2 – повітряна порожнина; 3 – багатошарова пластина; 4 – повздовжні ребра;
5 – поверхня, що захищається

Рисунок 6 – Гумова футеровка барабанів млинів.

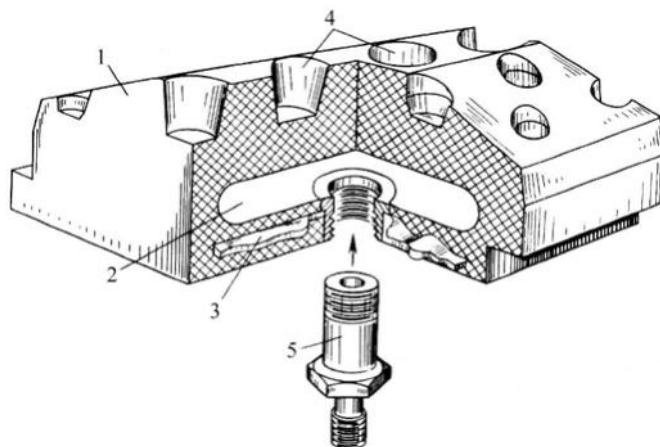
Джерело: розроблено авторами на підставі [14]



1 – гумова плита; 2 – порожнина; 3 – кріпильна планка; 4 – вкладиш з пористої гуми;
5 – кріпильні елементи

Рисунок 7 – Гумова футеровка барабанів млинів.

Джерело: розроблено авторами на підставі [15]



1 – гумова плита, 2 – герметична повітряна порожнина, 3 – кріпильна планка,
4 – поглиблення в гумі, 5 – кріпильний болт з клапаном

Рисунок 8 – Оболонкова гумова футеровка.

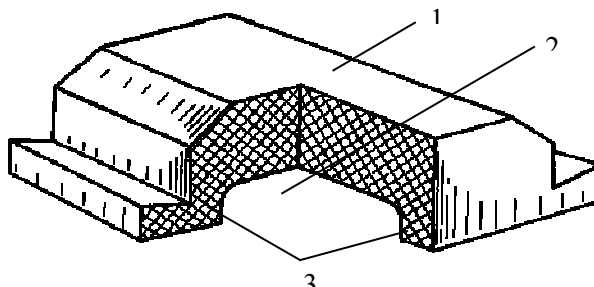
Джерело: розроблено авторами на підставі [8]

Оболонкова футеровка добре зарекомендувала себе в млинах діаметром 4-4,5 м, які працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-125 мм і проблема застосування гумової футеровки в великорозмірних млинах була вирішена.

Однак застосування оболонкової футеровки в середньорозмірних млинах діаметром 3,6-4,2 м було не доцільно, так як введення в тіло футеровки герметичної повітряної порожнини призвело до збільшення загальної товщини гумової плити, що зменшує корисний робочий об'єм барабана млина. При виготовленні гумових оболонкових плит для млинів діаметром 3,6-4,2 м висотою не більше висоти металевих бронеплит, суттєво знижується запас товщини шару гуми над повітряною порожниною на зношування.

Подальшим розвитком гумових футерувальних елементів для кульових млинів стала буферна гумова футеровка, яка поєднала в собі переваги оболонкових і традиційних гумових плит та представляє собою набір однотипних гумових пластин. По периметру цих пластин розташовані опорні ребра, які утворюють повітряний зазор (рис. 9) [7, 16].

Конструкція даної футеровки зробила можливим застосування гумових футерувальних елементів в млинах діаметром 3,6-4,2 м, що працюють з кульовим завантаженням діаметром 80-100 мм. Загальна висота буферної футеровки не перевищує висоту металевих футерувальних елементів для кульових млинів діаметром 3,6-4,2 м, що дозволило зберегти корисний об'єм кульових млинів, а система кріплення дозволяє встановлювати її в барабан без його переробки.



1 – гумова плита, 2 – повітряний зазор, 3 – опорні ребра

Рисунок 9 – Буферна гумова футеровка.

Джерело: розроблено авторами на підставі [7, 16]

В сучасній практиці на основі хвильової теорії абразивно-втомного зношування гумових футеровок [19] вченими, механіками і технологами створено гамму нових одноелементних футеровок "Плита – Хвиля", "G.M – Хвиля", "Плита – Ліфтер – Хвиля" (рис. 10) [2, 9, 10].

Футеровки даної конструкції застосовуються на II і III стадіях подрібнення на гірничо-збагачувальних комбінатах Полтавський ГЗК (м. Полтава) і Північний ГЗК (м. Кривий Ріг), показали гарні результати їх використання [2, 17].

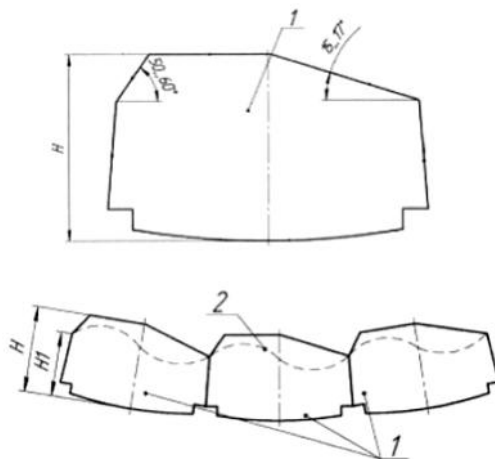
В останні роки гумову футеровку типу "Хвиля" збільшеної висоти виробництва ТОВ "НПП Валса ГТВ" (м. Біла церква, Україна) застосовано в млинах I стадії подрібнення діаметром 3,6 м з кулями діаметром 100-125 мм і кусками породи розміром до 25 мм (рис. 11). Дана футеровка показала гарні результати застосування, а саме збільшення довговічності і надійності, зменшення витрат на заміну футеровки, збільшення продуктивності по готовому класу на 10-12% [17, 18].

Висновки. Світовий досвід застосування гумової футеровки в барабанних кульових млинах дозволяє зробити висновок, що покращуються не тільки експлуатаційні, а і технологічні показники млинів.

Застосування гумових футеровок якості альтернативи традиційним металевим плитам демонструє суттєві переваги в експлуатації барабанних млинів. Зокрема, відзначається зниження енергоспоживання, зменшення питомої витрати мелючих тіл (куль), підвищення продуктивності (збільшення готового матеріалу необхідної фракції), а також збільшення ресурсу служби футерувальних елементів.

У межах цієї роботи проаналізовано найпоширеніші типи футеровок, що використовуються в барабанних млинах. Більшість із них активно застосовуються на практиці, проходять модернізацію й залишаються предметом технічних і наукових досліджень. У зв'язку з цим, питання вдосконалення футерувальних систем набуває особливої актуальності як у виробничому середовищі, так і в науково-дослідницькому контексті.

Попри активне впровадження гумових футеровок, фізико-механічні характеристики гуми та її вплив на процес подрібнення залишаються вивченими не повною мірою. Це свідчить про наявність значного потенціалу для подальшого розвитку та оптимізації конструкцій футеровок з еластомірних матеріалів.



1 – гумова плита, 2 – хвиляста форма поверхні, що утворюється під час роботи кульового млина

Рисунок 10 – Гумова футеровка типу "Хвиля"

Джерело: розроблено авторами на підставі [10]

Для розширення сфери застосування гумових футеровок необхідно зосередити увагу на розробці конструкцій, які поєднуюватимуть в собі інноваційність, технологічність і доступність для серійного виробництва в умовах українського машинобудування. Такі рішення повинні враховувати особливості роботи млинів у різних режимах, забезпечувати ефективний захист внутрішніх поверхонь барабанів і сприяти зниженню загальних експлуатаційних витрат.



Рисунок 11 – Гумова футеровка "G.M-Хвиля" встановлена у млині І-ої стадії подрібнення Південного ГЗК (м. Кривий Ріг) млин діаметром 3,6 м кулі діаметром 100 мм.

Джерело: розроблено авторами на підставі [17]

З урахуванням сучасних тенденцій, перспективними напрямками розвитку є впровадження полімерних композитів із заданими характеристиками, комп'ютерне моделювання процесів зносу та навантаження, а також удосконалення методів розрахунку і проектування гумової футеровки.

Список літератури

1. Цаніді І.М., Калганков Є.В. Захисні футерівки барабанних млинів: сучасний стан та перспективи розвитку. *Геотехнічна механіка*. 2017. №133. С. 75-80.
2. Калганков Є.В. Гумова футеровка та її місце у дезінтеграції мінеральної сировини. *Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості та транспорту 2020: матеріали міжнар. конф., м. Дніпропетровськ 24-25 квіт. 2020 р. Дніпропетровськ: ДТУ, 2020. С. 168-173.*
3. Джирма С.О., Настоящий В.А., Півнева О.В. Перспективи використання стійкої проти спрацювання гуми в якості робочих поверхонь технологічного і транспортного обладнання. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2007. Вип. 18. С. 188-191.
4. Ersmark E. Skega Gummipanzerung fur Kugel. Peble und Stabrohrmuhlen. Sweden, 1977. – P. 12.
5. Trelleborg Mill Linings. Trelleborg. Sweden, 1979. – P. 14.
6. А. с. 706114 СРСР, В О2 С 17/22. Футеровка барабанного млина / А.А. Тарасенко, Г.П. Хабло, А.А. Взорев, Е.Ф. Чижик, В.А. Настоящий. – №2652138 заяв. 31.07.78; опубл. 30.12.79, Бюл. №48.
7. Футерівка робочих поверхонь подрібнювального устаткування: пат. 65103А Україна. №2003054971 ; заявл. 30.05.2023 ; опубл. 15.03.2004, Бюл. № 3. – 3 с.
8. Настоящий В.А. Вибір параметрів і розробка конструкції гумових футеровок великорозмірних рудорозмольних млинів: дис... канд. техн. наук: 05.05.06 / Кіровоградський інститут сільськогосподарського машинобудування. Кіровоград, 1986. 187 с.
9. Футерівка барабанного млина: пат. 78397 Україна. №u201214920; заяв. 26.12.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. – 6 с.
10. Футерівка барабанного млина: пат. 105550 Україна. №u201509188; заяв. 24.09.2015; опубл. 25.03.2016, Бюл. № 6. – 4 с.
11. Каткова І.О., Тарасенко О.А., Чеберячко І.М. Використання гуми, як конструкційного матеріалу. *Вібрації в техніці і технологіях*. 1998. №3. С. 66-67.
12. Надольний Г.С., Настоящий В.А., Чижик Е.Ф. Проектування робочих поверхонь механічного устаткування для дроблення, змільчення та сортування мінеральних матеріалів: навч. посіб. Київ: НМК ВО, 1993. 128 с.
13. А. с. 706114 СРСР, В О2 С 17/22. Футеровка барабанного млина / О.А. Тарасенко, Г.П. Хабло, А.А. Взорев, Е.Ф. Чижик, В.А. Настоящий – №2652138 заяв. 31.07.78; опубл. 30.12.79, Бюл. №48.
14. А. с. 963553 СРСР, В О2 С 17/22. Футеровка, переважно, барабанів млинів / А.Г. Червоненко, В.П. Надутый, Ю.Я. Ободан, Е.Ф. Чижик – №3285942 заяв. 28.04.81; опубл. 07.10.82, Бюл. №37.
15. А. с. 1435293 СРСР, В О2 С 17/22 Футеровка барабанних мелинів / Е.Г. Баранов, А.А. Тарасенко, В.А. Настоящий, Е.Ф. Чижик, Л.И. Данилов, Е.А. Тарасенко, Т.Н. Настоящая, Б.И. Коротких – №4224281 заяв. 07.04.87; опубл. 07.11.88, Бюл. №41.
16. Джирма С.О., Васильєв О.С., Таран В.В. Розроблення конструкцій буферних гумових футеровок барабанних і трубних млинів та результати випробування моделей. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2003. – Вип. 11. – С. 26-29.
17. Калганков Є. В. Деякі питання ресурсо- та енергозбереження при подрібненні мінеральної сировини у барабанних кульових млинах. *Геотехнічна механіка*. 2020. №151. С. 138-149. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.138> (дата звернення: 08.04.2025).
18. Kalhankov Ye.V., Lysytsia M.I., Ahalsov H.M., Cherniy O.A. Reliability prediction for the rubber lining operating under extreme conditions. *Geo-Technical Mechanics*. 2022. №160, С. 96-105. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2022.160.096> (дата звернення: 08.04.2025).
19. Bulat A.F., Dyrdy V.I., Kalgankov Ye.V. Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. №3. С. 39-47.

References

1. Tsanidi, I. M., & Kalgankov, Ye. V. (2017). *Protective linings of drum mills: Current state and development prospects. Geotechnical Mechanics*, (133), 75–80 [in Ukrainian].
2. Kalgankov, Ye. V. (2020). *Rubber lining and its place in the disintegration of mineral raw materials. In Modern Innovative Technologies for Training Engineering Personnel for the Mining Industry and Transport 2020: Proceedings of the International Conference (Dnipro, April 24–25, 2020)* (pp. 168–173). Dnipro: DTU [in Ukrainian].
3. Dzhyrma, S. O., Nastoiaschchiy, V. A., & Pivnieva, O. V. (2007). *Prospects of using wear-resistant rubber as working surfaces of technological and transport equipment. Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (18), 188–191 [in Ukrainian].
4. Ersmark, E. (1977). *Skega Gummipanzerung für Kugel-, Peble- und Stabrohmühlen* (p. 12). Sweden.
5. Trelleborg. (1979). *Trelleborg Mill Linings* (p. 14). Sweden.
6. Tarasenko, A. A., Khablo, H. P., Vzorov, A. A., Chyzhyk, E. F., & Nastoiaschchiy, V. A. (1979). *Lining of a drum mill*. Author's certificate 706114 USSR, V O2 C 17/22, No. 2652138; filed 31.07.1978; published 30.12.1979, Bulletin No. 48 [in Russian].
7. *Lining of working surfaces of grinding equipment*: Patent 65103A Ukraine, No. 2003054971; filed 30.05.2003; published 15.03.2004, Bulletin No. 3 [in Ukrainian].
8. Nastoiaschchiy, V. A. (1986). *Selection of parameters and design development of rubber linings for large-size ore-grinding mills* (Candidate's thesis). Kirovohrad Institute of Agricultural Engineering, 187 p. [in Ukrainian].
9. *Lining of a drum mill*: Patent 78397 Ukraine, No. u201214920; filed 26.12.2012; published 11.03.2013, Bulletin No. 5 [in Ukrainian].
10. *Lining of a drum mill*: Patent 105550 Ukraine, No. u201509188; filed 24.09.2015; published 25.03.2016, Bulletin No. 6 [in Ukrainian].
11. Katkova, I. O., Tarasenko, O. A., & Cheberiachko, I. M. (1998). *Use of rubber as a structural material. Vibrations in Engineering and Technology*, (3), 66–67 [in Ukrainian].
12. Nadolnyi, H. Ye., Nastoiaschchiy, V. A., & Chyzhyk, E. F. (1993). *Design of working surfaces of mechanical equipment for crushing, grinding, and sorting mineral materials: Textbook*. Kyiv: NNM VO, 128 p. [in Ukrainian].
13. Tarasenko, O. A., Khablo, H. P., Vzorov, A. A., Chyzhyk, E. F., & Nastoiaschchiy, V. A. (1979). *Lining of a drum mill*. Author's certificate 706114 USSR, V O2 C 17/22, No. 2652138; filed 31.07.1978; published 30.12.1979, Bulletin No. 48 [duplicate; in Russian].
14. Chervonenko, A. H., Nadutyi, V. P., Obodan, Yu. Ya., & Chyzhyk, E. F. (1982). *Lining, mainly for mill drums*. Author's certificate 963553 USSR, V O2 C 17/22, No. 3285942; filed 28.04.1981; published 07.10.1982, Bulletin No. 37 [in Russian].
15. Baranov, E. G., Tarasenko, A. A., Nastoiaschchiy, V. A., Chyzhyk, E. F., Danilov, L. I., Tarasenko, E. A., Nastoiashaia, T. N., & Korotkikh, B. I. (1988). *Lining of drum mills*. Author's certificate 1435293 USSR, V O2 C 17/22, No. 4224281; filed 07.04.1987; published 07.11.1988, Bulletin No. 41 [in Russian].
16. Dzhyrma, S. O., Vasyliiev, O. S., & Taran, V. V. (2003). *Development of designs of buffer rubber linings of drum and tube mills and results of model tests. Collection of Scientific Papers (Mechanical Engineering, Construction)*, Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk, (11), 26–29 [in Ukrainian].
17. Kalgankov, Ye. V. (2020). *Some issues of resource and energy saving in mineral raw material grinding in drum ball mills. Geotechnical Mechanics*, (151), 138–149. <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.138> [in Ukrainian].
18. Kalgankov, Ye. V., Lysytsia, M. I., Ahaltsov, H. M., & Cherniy, O. A. (2022). Reliability prediction for the rubber lining operating under extreme conditions. *Geo-Technical Mechanics*, (160), 96–105. doi.org/10.15407/geotm2022.160.096
19. Bulat, A. F., Dyrda, V. I., & Kalgankov, Ye. V. (2018). Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 39–47 [in Ukrainian].

Volodymyr Yatsun, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Stanislav Dzhyrma**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Rudenko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Overview of the Rubber Linings Designs of Drum Ball Mills and Further Prospects for Their Development

The work provides a general overview of modern designs of rubber linings intended for use in drum ball mills operated in various industries for the disintegration of mineral raw materials. The main attention is paid to the analysis of technical solutions aimed at increasing wear resistance, reducing the weight of the lining, improving the energy efficiency of the grinding process and simplifying the assembly and disassembly of lining elements. The design features of rubber lining plates of traditional and special designs are considered, their areas of application are described depending on the standard sizes of ball mills, geometric characteristics, and methods of fastening.

Particular attention is paid to the influence of the design parameters of the lining on the operational characteristics and technological indicators of ball mills, in particular the wear resistance of the lining, the energy efficiency of the grinding process, and productivity. The paper analyses the technical solutions implemented in the linings of leading world manufacturers, summarizes the current trends in further improving the designs of rubber linings. Conclusions are provided on the effectiveness of different types of rubber lining designs depending on the operating conditions of the mills, the prospects for further implementation of innovative materials and adaptive geometric shapes in order to optimise the technical and economic indicators of the mills.

rubber lining, drum mills, ball loading, durability, productivity

Одержано (Received) 28.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 01.05.2025

Прийнято до друку (Approved) 24.06.2025