**Стадник І. Я.**

д.т.н., професор

*Тернопільський національний
технічний університет
ім. Івана Пулюя***Піддубний В. А.**

д.т.н., професор, академік НААН України

*Державна наукова установа
«Український науково-
дослідний інститут спирту і
біотехнологій продовольчих
продуктів»***Михайлик В. С.**

к.т.н., ст. викладач

*Державний торговельно-
економічний університет***Захарук І. І.**

провідний інженер

*ТДВ «Івано-
Франківськзалізобетон»***Полевода Ю. А.**

к.т.н., доцент

*Вінницький національний
аграрний університет***Stadnyk I.**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Ternopil Ivan Puluj National
Technical University***Piddubnyi V.**Doctor of Technical Sciences, Professor,
Academic of the NAAS of Ukraine*State Scientific Institution
Ukrainian Research Institute for
Alcohol and Biotechnology of
Food Products***Mihailik V.**

Ph.D., assistant

*State University of Trade and
Economics***Zaharuk I.**

Leading Engineer

*PJSC «Ivano-
Frankivskzalizobeton»***Polievoda Y.**

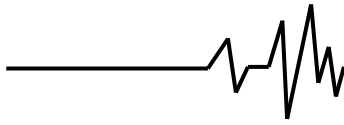
Ph.D., Associate Professor

*Vinnitsia National Agrarian
University***УДК 621.646.1****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-11**

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПОДРІБНЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В ПЕРЕРОБНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У роботі досліджено підвищення ефективності та надійності молоткових дробарок у переробній промисловості шляхом застосування робочих поверхонь із дискретною структурою та рельєфом у формі спіралі Архімеда. Проаналізовано механізми зношування подрібнювальних елементів і запропоновано конструктивні рішення, що знижують інтенсивність зносу та забезпечують ефект самозаточування. Розроблено математичну модель взаємодії робочих органів із сировиною та проведено експериментальні дослідження її подрібнення. Запропоновано модель зміни навантажень на робочий орган зі спіралеподібною кромкою з урахуванням динаміки контакту та геометрії леза. Модель базується на принципах механіки деформованого твердого тіла та теорії контакту. Порівняльний аналіз показав, що форма профілю молотка суттєво впливає на характер взаємодії з матеріалом. Встановлено, що застосування профілю у формі спіралі Архімеда покращує динамічні характеристики процесу та зменшує енерговитрати. Моделювання підтвердило, що рівноважне положення молотка під час обертання ротора є критичною умовою для ефективного подрібнення зернової сировини. Відхилення від цього положення спричиняє зниження продуктивності, зростання динамічних навантажень і прискорений знос поверхні. Запропонована конфігурація забезпечує рівномірний розподіл навантажень, зменшення контактних напружень та підвищення зносостійкості робочих органів. Отримані результати можуть бути використані для модернізації дробарок з метою підвищення їхньої надійності та зниження витрат на обслуговування. Крім того, аналіз показав можливість оптимізації геометричних параметрів ротора, що дозволяє зменшити енергоспоживання установки та покращити якість кінцевого продукту. Це створює підґрунтя для подальших досліджень у напрямі удосконалення конструкцій роторних дробарок та впровадження енергоефективних технологічних рішень у переробній промисловості.

Ключові слова: дискретна структура, зносостійкість, самозаточування, молоткова дробарка, спіраль Архімеда, математичне моделювання.



Вступ та стан проблеми. Одними з ключових чинників, що визначають характер зношування робочих органів подрібнювальної техніки в переробній промисловості, є характеристики робочого середовища, динаміка та кінематика взаємного переміщення контактних поверхонь, а також природа контакту й властивості матеріалів, з яких виготовлено робочі елементи. Перші дві групи чинників є визначальними, оскільки вони формують зовнішні умови експлуатації машин у переробній галузі та впливають на якісні й кількісні аспекти процесів зношування. Комбінація цих параметрів із фізико-механічними характеристиками трибологічних пар є основою для класифікації видів зносу.

Процес зношування робочих елементів подрібнювального обладнання зумовлений змінними силами тертя, неоднорідністю абразивного середовища (як за механічним, так і за хімічним складом), а також складністю динамічних процесів переміщення абразивних часток. На початкових етапах у точках контакту часток із поверхнею подрібнювальних елементів виникає концентрація напружень, що призводить до пластичної деформації матеріалу. При цьому деформований поверхневий шар, який характеризується підвищеною хімічною активністю, взаємодіє з агресивними компонентами середовища, сприяючи утворенню оксидних плівок. Напруження розтягу, які виникають у поверхневому шарі під дією сил тертя, руйнують ці плівки. Таким чином, значна частка зносу подрібнювальних елементів зумовлена корозійно-механічними процесами [1, 2].

За статистичними даними, до 80 % відмов обладнання спричинені саме зносом і корозією, тоді як поломки (включно з втомним руйнуванням) становлять лише 20–30% [1, 2]. При цьому важливо відзначити, що поломки часто виникають не лише через значні ударні навантаження, але й внаслідок втрати міцності матеріалу внаслідок тривалого зношування та корозійного впливу.

Вирішення комплексної задачі підвищення зносостійкості та забезпечення довговічності ріжучих і подрібнювальних елементів машин переробної промисловості ґрунтується на детальних кількісних методах оцінки умов їх експлуатації [1, 2]. Зношування ріжучих елементів подрібнювального обладнання тісно пов'язане з кінематичними особливостями процесу різання [1], що було доведено, зокрема, дослідженнями особливостей зносу ріжучих елементів кутерних подрібнювачів. Аналіз результатів їх експлуатаційних випробувань виявив, що лезо ножа та протиріжучого елемента зношуються

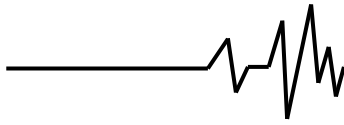
нерівномірно. Знос робочої частини ножа переважно проявляється у зміні товщини ріжучої кромки, тоді як знос протиріжучого елемента характеризується затупленням та зміщенням ріжучої кромки по висоті.

Попри широкий спектр конструктивних рішень, у багатьох існуючих дробарках залишаються невирішеними проблеми надмірного енергоспоживання, нерівномірного подрібнення, інтенсивного зношування елементів робочої зони та зниження експлуатаційної надійності обладнання. Плоска або гладка робоча поверхня робочих органів не забезпечує керованої динаміки переміщення матеріалу в зоні подрібнення, що спричиняє турбулентний рух частинок, їх неефективне зіткнення з молотками, повторне дроблення вже обробленої сировини та, як наслідок, зниження загальної ефективності процесу. Це неминуче призводить до інтенсифікації процесу зношування ключових робочих елементів.

Згідно з даними заводських випробувань, серійні робочі органи (виготовлені зі сталі 65Г) після напрацювання 1000 тонн сировини демонструють збільшення радіуса заокруглення до 2,5 ... 3 мм. Такий рівень зносу суттєво знижує ефективність подрібнення та вимагає частої заміни або відновлення деталей, що збільшує експлуатаційні витрати та простої обладнання.

Одним із найбільш перспективних напрямків є застосування таких схем, які забезпечують ефект самозаточування [1]. Цей ефект полягає у здатності ріжучої кромки зберігати в процесі експлуатації достатню міцність і зносостійкість, оптимальний профіль та прийнятну товщину, що дозволяє безперервно виконувати технологічний процес з необхідною ефективністю. Традиційні підходи до зміцнення, такі як використання високоміцних сталей або наплавлення, хоч і підвищують початкову твердість та зносостійкість, часто не вирішують проблему нерівномірного зносу та затуплення, що вимагає періодичного заточування або заміни.

Аналіз наукової літератури та патентних джерел [1–5] свідчить про значну кількість досліджень, присвячених удосконаленню геометрії робочих органів, підбору оптимальних режимів подрібнення, вибору матеріалів для зносостійких деталей. Проте недостатньо вивченою залишається тема формування керованого рельєфу внутрішніх робочих поверхонь, здатного змінити кінематику руху матеріалу в зоні дроблення та підвищити інтенсивність ударної взаємодії. Особливу увагу заслуговує можливість створення дискретного мікрорельєфу за формою спіралі Архімеда, що може сприяти впорядкуванню



потоків частинок, зниженню навантажень на окремі елементи машини та покращенню енергетичних характеристик процесу.

У цьому контексті особливої актуальності набуває ідея використання робочих поверхонь із дискретною структурою та рельєфом за формою спіралі Архімеда. Така конфігурація може не лише покращити ефективність руйнування сировини завдяки оптимальному розподілу навантажень, але й сприяти реалізації ефекту самозаточування або рівномірнішого зносу. Це дозволить зберігати функціональність ріжучої кромки протягом тривалішого терміну експлуатації. Також потенційно може забезпечити реалізацію принципу самозаточування або, щонайменше, рівномірного зносу, що підтримуватиме гостроту та функціональність ріжучої кромки протягом тривалішого часу. Це, в свою чергу, дозволить суттєво підвищити довговічність молотків та надійність роботи всієї дробарки, зменшуючи потребу в частих ремонтах та забезпечуючи стабільну продуктивність.

Попередні дослідження показують перспективність застосування рельєфних структур як інструменту впливу на динаміку подрібнення [6–8]. Водночас відсутні повноцінні теоретичні моделі, які б описували зміну силових навантажень та траєкторій частинок при наявності таких поверхонь, а також бракує експериментальних підтверджень ефективності запропонованих конструктивних рішень. Подальші дослідження в роботі спрямовано на теоретичне обґрунтування та експериментальну перевірку доцільності використання дискретних структур з рельєфом спіралі Архімеда як конструктивного рішення для зниження зносу та підвищення ефективності дробарного обладнання.

Мета роботи: Підвищення ефективності та надійності функціонування молоткових дробарок шляхом теоретичного обґрунтування й експериментального підтвердження доцільності застосування робочих поверхонь із дискретною структурою та рельєфом за формою спіралі Архімеда.

Задачі дослідження: Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні задачі:

1. Проаналізувати вплив кінематичних та динамічних характеристик системи «машина – інструмент – матеріал» на процеси зношування та ефективність подрібнення сировини, з особливою увагою до радіального рівноважного положення робочих органів.

2. Розробити теоретичну модель процесу руйнування та подрібнення сировини, що враховує специфіку взаємодії з робочими поверхнями, виконаними у вигляді дискретної

структури з рельєфом спіралі Архімеда, а також особливості ударного імпульсу.

3. Провести експериментальні дослідження процесу подрібнення сировини з використанням робочих органів з запропонованою геометрією поверхні для підтвердження теоретичних положень та оцінки їх практичної ефективності.

4. Виконати математичне моделювання поведінки робочих органів та їх взаємодії з сировиною для прогнозування та оптимізації характеристик робочих органів.

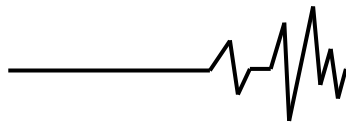
Матеріали та методи дослідження.

Дослідження процесів подрібнення зернової сировини вимагає системного підходу до аналізу взаємодії робочих органів дробарки з матеріалом. Ключовим аспектом є визначення оптимальних умов деформації сировини, що забезпечують необхідну якість кінцевого продукту — борошна, крупи чи корму. Ці умови формують жорсткі вимоги до конструктивних та геометричних параметрів ріжучого інструменту, які є вирішальними для ефективності процесу. Швидкість руху окремих точок леза визначає енергію подрібнення, що робить розуміння кінематичних аспектів критично важливим для оптимізації продуктивності і енергоефективності дробарки. Тому увагу приділено забезпеченню радіального рівноважного положення молотка при обертанні ротора, оскільки його відхилення призводить до нерівномірних ударів, підвищених вібрацій та зниження ефективності подрібнення.

Для дослідження процесу подрібнення розглянуто прямий та обраний робочі органи із серпоподібною формою у вигляді спіралі Архімеда з ріжучою кромкою, загостреною під кутом 16° [4]. Конструктивною особливістю робочої поверхні є профільний отвір на бічній поверхні ножа, що зменшує загальну площу контакту, мінімізує тертя та знижує енергетичні втрати [5, 9]. Параметри робочої частини ріжучої кромки визначені так: кут повороту променя ϕ змінюється від $\pi/8$ до $7\pi/16$ радіан, а радіус-вектор ρ є змінним, що дозволяє врахувати динамічні зміни в точці контакту.

Ці параметри, разом із результатами досліджень дії прямого молотка, лягли в основу математичної моделі, яка дозволяє кількісно оцінити процеси подрібнення. У моделюванні враховувалися також параметри раціональної маси молотка та його динамічних характеристик для оцінки взаємодії з сировиною в умовах усталеного руху.

Моделювання динаміки взаємодії молотка із сировиною. Під час роботи дробарки молоток, обертаючись з високою кутовою



швидкістю, завдає удару сировині, спричиняючи її руйнування (рис.1). Протидія з боку сировини виступає у вигляді ударної сили. Для кількісної оцінки цієї взаємодії розглянемо ударний імпульс ($S_{y\delta}$), який передається частинці. Його величина залежить від початкової швидкості сировини (v_0) відносно молотка. Якщо початкова швидкість сировини v_0 дорівнює нулю, то ударний імпульс визначається як: $S_{y\delta} = m \cdot v_m$

У випадку, коли частинка до удару мала деяку початкову швидкість у напрямку окружної швидкості молотка ($v_0 > 0$), ударний імпульс зменшується: $S_{y\delta} = m(v_m - v_0)$. Якщо ж початкова швидкість частинки спрямована проти напрямку руху молотка, ударний імпульс, навпаки, збільшується: $S_{y\delta} = m(v_m + v_0)$. Загалом, ударний імпульс $S_{y\delta}$ є інтеграл сили удару $F_{y\delta}$ за час взаємодії Δt :

$$S_{y\delta} = \int_{\Delta t} F_{y\delta} dt = m \cdot v_m$$

де $S_{y\delta}$ – усереднений ударний імпульс, Н·с; $F_{y\delta}$ – миттєва сила удару, Н; Δt – тривалість удару, с; m – маса частинки, що зазнає удару, кг; v_m – усереднена швидкість молотка відносно частинки в момент удару, м/с.

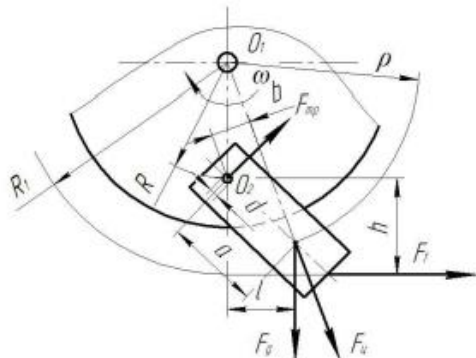


Рис. 1. Схема сил, що діють на молоток під час руху

Ці залежності є основою для аналізу динамічних навантажень, що виникають у молотковій дробарці, і дозволяють оцінити енергію, що передається сировині для руйнування, а також пікові навантаження на молоток. В рамках математичного моделювання, при розрахунку швидкості удару v_m та визначенні тривалості контакту Δt , необхідно враховувати специфічну геометрію ріжучої кромки молотка, виконаної у вигляді спіралі Архімеда. Саме змінність локального кута атаки (або кута різання) вздовж спіральної кромки є ключовою особливістю, яка впливає на механізм взаємодії із зерном та розподіл сил [10, 11]. Цей кут відрізняється від кута α , який описує загальне відхилення тіла молотка від радіального положення. Для моделювання приймаємо такі параметри:

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Початковий радіус	a	0.015	м
Крок спіралі	b	0.005	м/рад
Кутова швидкість ротора	ω	150	рад/с
Маса частинки сировини	m	1×10^{-4}	кг
Початкова швидкість зерна	v_0	0–5	м/с
Тривалість удару	Δt	1×10^{-3}	с

Результати та обговорення.

Математична модель зміни навантажень на робочий орган зі спіралеподібною кромкою, яка б враховувала динаміку контакту та геометричні особливості леза. Модель базується на принципах механіки деформованого твердого тіла та теорії контакту [11, 12]. Робоча частина ріжучої кромки починається з кута $\phi_1 = \pi/8$ і закінчується на $\phi_2 = 7\pi/16$. В межах цього діапазону відбувається основна взаємодія із сировиною. Форма спіралі Архімеда:

$$\rho(\phi) = \alpha \cdot \phi$$

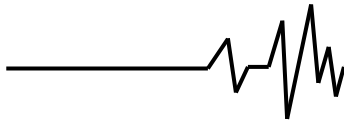
$$dL(\phi) = \sqrt{(\alpha\phi)^2 + \alpha^2} d\phi$$

Нехай $F_k(\phi, t)$ – миттєва сила, що виникає в точці контакту сировини з ріжучою кромкою в момент часу t , коли ця точка відповідає куту ϕ на спіралі. Ця сила є функцією багатьох параметрів, включаючи: властивості сировини, швидкість відносного руху між кромкою та зерном $v_b(\phi, t)$, кута атаки леза $\theta(\phi)$, який змінюється вздовж спіральної кромки. Також присутній коефіцієнт тертя μ між матеріалом робочого органу та сировиною й впливом дискретної структури поверхні (профільного отвору), який може змінювати локальний тиск контакту та умови руйнування сировини. Також впливати на відведення подрібненого матеріалу з зони різання. Тому інтегральна контактна сила на молоток, буде:

$$F_m(t) = \int_{\phi_1}^{\phi_2} F_k(\phi, t) \cdot \sqrt{(\alpha\phi)^2 + \alpha^2} d\phi$$

Миттєва потужність, що витрачається на подрібнення в точці контакту, може бути виражена як $P_n(\phi, t) = F_k(\phi, t) \cdot v_b(\phi, t) \cdot \cos(\psi)$,

де ψ – кут між напрямком сили та напрямком швидкості.



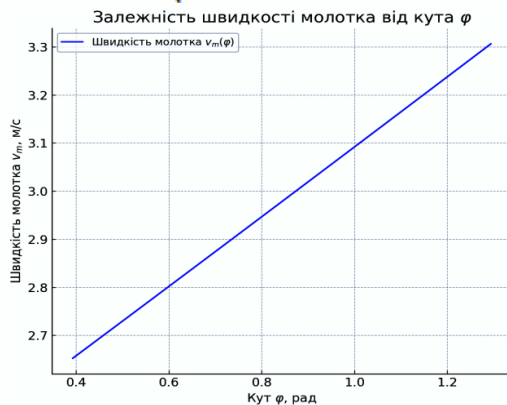
Загальна сила, що діє на молоток, $F_m(t)$, є інтегралом або сумою всіх контактних сил, що діють вздовж робочої частини кромки в певний момент часу:

$$F_m(t) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F_k(\varphi, t) \cdot dL(\varphi)$$

де $dL(\varphi)$ – елемент довжини спіральної кромки

Для спіралі Архімеда елемент довжини dL можна виразити як:

$$dL = \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\varphi}\right)^2} d\varphi$$



Оскільки $\rho = a\varphi$, то $d\varphi/d\rho = a$.

Отже,

$$dL = \sqrt{(\alpha\varphi)^2 + \alpha^2} d\varphi = \alpha\sqrt{\varphi^2 + 1} d\varphi$$

Таким чином, інтегрування сил по довжині кромки стає інтегруванням по куту φ :

$$F_m(t) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F_k(\varphi, t) \cdot \alpha\sqrt{\varphi^2 + 1} d\varphi$$

На рис.2 подано графік зміни лінійної швидкості робочої кромки молотка в залежності від кута повороту φ .

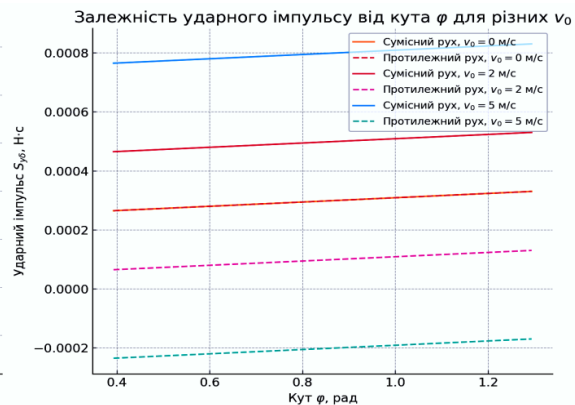


Рис.2. Залежність швидкості робочого елемента від кута повороту φ

Лівий графік показує залежність швидкості молотка v_m від кута φ (за формою спіралі Архімеда). Правий графік демонструє зміну ударного імпульсу S_{φ} залежно від кута φ для трьох різних початкових швидкостей зерна $v_0 = 0, 2, 5$ м/с. Суцільні лінії — випадок, коли сировина рухається у напрямку руху молотка (швидкість додається). Пунктирні лінії — коли рух сировини спрямований проти молотка (швидкість віднімається). Для традиційного молотка (пластинчатого типу): швидкість змінюється рівномірно по колу — тобто $v = R\omega$, де R — постійне плече. Швидкість залишається

сталого по довжині молотка [13]. Для молотка у вигляді спіралі Архімеда: швидкість зростає зі збільшенням кута φ , оскільки радіус кривої (а значить і плече сили) поступово збільшується за законом $r = a\varphi$. Це означає, що кінець молотка рухається швидше, ніж у випадку сталого радіуса. Форма Архімеда дозволяє досягнути вищої кінцевої швидкості при тому самому куті обертання, що збільшує енергію удару та покращує роздільнення.

На рис.3 подано залежність швидкості вздовж траєкторії сировини.

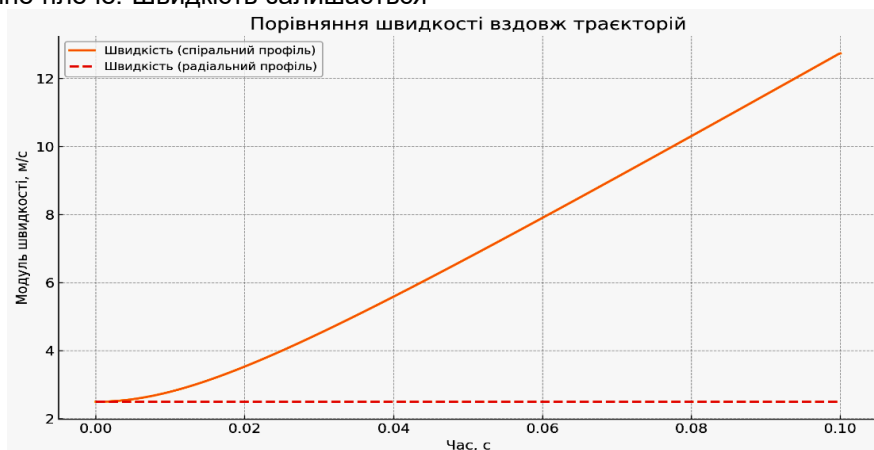
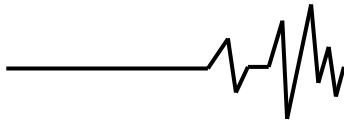


Рис. 3. Залежність модуля швидкості робочого органу від часу при різних профілях молотків



На графіку представлено порівняння модуля лінійної швидкості точки робочої поверхні робочого органу при обертанні, залежно від часу, для двох різних профілів: Спірального (архімедова спіраль) – представлено суцільною помаранчевою лінією; радіального (прямолінійна пластина) – пунктирна червона лінія. У випадку радіального профілю швидкість точки молотка залишається сталою протягом обертання. Це відповідає характерному режиму роботи традиційних молотків з постійним радіусом, коли швидкість удару не змінюється незалежно від положення профілю.

Натомість спіральний профіль демонструє поступове зростання швидкості точки по мірі обертання. Така поведінка зумовлена збільшенням радіуса траєкторії (архімедова спіраль) і відповідним зростанням кутової швидкості в точці контакту. Це забезпечує зростання імпульсу перед ударом та дозволяє ефективніше передавати енергію частинці сировини. Профіль молотка у вигляді архімедової спіралі формує удар з більшим імпульсом на пізнішій стадії контакту, що: покращує подрібнення в'язких або вологих частинок; знижує втрати енергії; забезпечує стабільнішу та ефективнішу роботу дробарки.

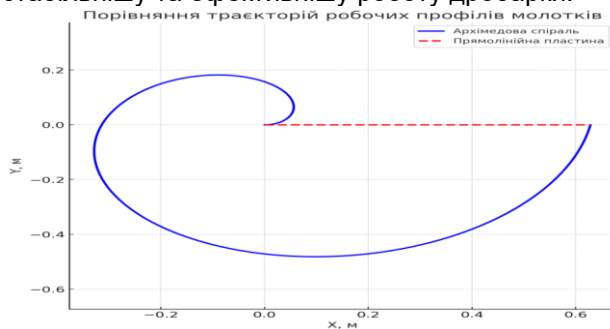


Рис.4. Порівняння траєкторій робочих профілів молотків

На рисунку (4) представлено порівняльний аналіз траєкторій руху точок двох типів робочих профілів молотків: традиційної прямолінійної пластини та профілю у вигляді архімедової спіралі. Графік побудований у системі координат (X, Y), що відображає реальне положення точок робочої кромки в просторі під час обертання ротора. Крива відповідає траєкторії точки на профілі молотка у формі архімедової спіралі. Такий контур забезпечує поступове збільшення радіуса відносно центру обертання, що дозволяє досягти більш рівномірного і контрольованого контакту з матеріалом. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності подрібнення та зниженню пікових навантажень на конструктивні елементи дробарки. Пунктирна лінія ілюструє рух точки на прямолінійному профілі, що є характерним для традиційних конструкцій робочих органів. Така траєкторія

характеризується різкими змінами напрямку сили удару, що може призводити до локалізованих перевантажень, зниження ефективності подрібнення та нерівномірного зносу робочих поверхонь [16].

Порівняльний аналіз свідчить, що форма профілю молотка істотно впливає на характер взаємодії з подрібнюваним матеріалом. Застосування профілю у формі архімедової спіралі дає змогу покращити динамічні характеристики процесу та зменшити енерговитрати.

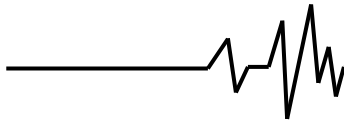
Математичне моделювання [14,15], що базується на цих деталізованих рівняннях та враховує специфічні геометричні параметри леза (зокрема, змінний локальний кут атаки вздовж спіралі Архімеда, який визначається діапазоном кутів ϕ та змінністю ρ , а також вплив дискретної структури поверхні на характер взаємодії), дозволяє прогнозувати поведінку молотка, оцінювати розподіл навантажень по ріжучій кромці та оптимізувати параметри дробарки для досягнення бажаної продуктивності, енергоефективності та, що найважливіше, підвищення її надійності та довговічності.

Таким чином, результати теоретичних досліджень підтверджують, що модифікація геометрії робочих органів молоткових дробарок шляхом застосування дискретної структури з рельєфом спіралі Архімеда є обґрунтованим напрямком для досягнення поставленої мети – підвищення ефективності та надійності функціонування даного обладнання. Подальші експериментальні дослідження дозволять верифікувати отримані теоретичні положення та підтвердити практичну доцільність запропонованих рішень.

Висновки. Проведені теоретичні дослідження та математичне моделювання процесу подрібнення сировини в молоткових дробарках, з особливою увагою до впливу геометрії робочих органів, дозволили сформулювати наступні ключові висновки:

1. Підтверджено, що забезпечення радіального рівноважного положення молотка під час обертання ротора є критично важливою умовою для якісного та ефективного подрібнення зернової сировини. Відхилення від цього положення призводить до зниження продуктивності, підвищених динамічних навантажень та прискореного зносу.

2. Розроблена математична модель динаміки взаємодії молотка із сировиною дозволяє кількісно оцінювати ударний імпульс та розподіл сил, що виникають під час контакту. Включення у модель початкової швидкості сировини дозволяє точніше прогнозувати величину ударного імпульсу та його вплив на процес руйнування.



3. Запропонована геометрія ріжучої кромки у вигляді спіралі Архімеда (з кутом загострення 16° , визначеними кутовими параметрами робочої частини від $\phi=\pi/8$ до $\phi=7\pi/16$ та змінною величиною радіус-вектора r в поєднанні зі специфічною дискретною структурою робочої поверхні (наявність профільного отвору), є перспективною для оптимізації процесу подрібнення. Встановлено, що параметри спіралі та дискретність суттєво впливають на геометрію контакту, розподіл навантажень вздовж кромки та ефективність передачі енергії.

4. Аналіз розподілу навантажень по поверхні робочого органу показав, що застосування дискретної структури та рельєфу спіралі Архімеда має потенціал не тільки для підвищення ефективності подрібнення, але й для покращення зносостійкості та довговічності робочих елементів. Така конфігурація може сприяти більш рівномірному розподілу навантажень та реалізації ефекту самозаточування, зменшуючи інтенсивність корозійно-механічного зношування та забезпечуючи краще відведення подрібненого матеріалу.

Список використаних джерел

1. Гавриш Ю.І., Махонько П.М. Теорія та розрахунок подрібнювального обладнання. К.: Техніка, 2017. 248 с.
2. Zhang Y., Liu Y., & Xie Y. Dynamic analysis and optimization of hammer crusher rotor based on FEM. *Applied Mechanics and Materials*, 876. 2018. P. 102–109.
3. Шевченко А.Г., Кисіль О.П. Аналіз факторів зношування робочих органів дробарок. *Наукові праці ОНАХТ*, 2020, №2, с. 45–52.
4. Singh A. & Prasad B. Influence of material and geometry of hammers on energy consumption and product fineness. *Journal of Engineering Research and Applications*, 2020. 10(3), P. 34–39.
5. Орлов А.С. Поверхнева інженерія в машинобудуванні: Монографія. Х.: ХНАДУ, 2019. 316 с.
6. Халатов А.А. Теплообмін і знос деталей з мікрорельєфом. К.: Наук. думка, 2016.
7. Романюк В.П., Стецюк І.М. Нові підходи до оптимізації ударних елементів машин подрібнення. *Вісник НТУУ «КПІ»*, 2021, №3, с. 60–66.
8. Cheng J., & Yang W. Influence of surface texturing on particle breakage: Experimental and numerical insights. *Powder Technology*, 2021. 389, P. 1–10.

9. Білоус В.Г. Вплив мікропрофілю на ефективність подрібнення в молоткових дробарках. *Науковий вісник НУХТ*, 2023, №4, с. 88–94.

10. Слюсар І.В. Моделювання руху частинок по поверхнях зі спіраллю Архімеда. *Механіка і машинобудування*, 2022, №5, с. 73–78.

11. Бондаренко М.М. Вплив геометрії ударних поверхонь на формування шляху руху частинок. *Вісник машинобудування та транспорту*, 2021, №2, с. 40–45.

12. Назаренко В.І. Експериментальні дослідження впливу мікроструктури поверхні на зношування. *Технічна механіка*, 2022, №1, с. 51–56.

13. Gupta R., & Pandey M. Surface engineering strategies in particle comminution: Review and trends. *Advanced Manufacturing*, 2019. 7(1), P. 15–26.

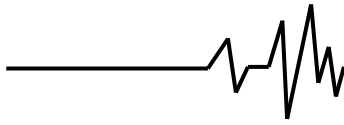
14. Гордієнко С.О. Розрахунок контактної сили між частинкою та рельєфною поверхнею. *Машинобудування і інженерія*, 2021, №3, с. 34–39.

15. Liu Z., & Sun Y. Particle motion on spiraled surfaces: Discrete modeling approach. *Granular Matter*, 2022. 24, Article 88.

16. Черновол М.І., Ворона Т.В. Умови експлуатації і основні причини виходу з ладу ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин. *Збірник наукових праць «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*. Кіровоград: КДТУ. 2011. Вип. № 24. С. 344–351.

References

1. Havrysh, Yu. I., Makhonko, P. M. (2017). Teoriia ta rozrakhunok podribniuvalnoho obladdnannia, 248 s. [in Ukrainian].
2. Zhang, Y., Liu, Y., & Xie, Y. (2018). Dynamic analysis and optimization of hammer crusher rotor based on FEM. *Applied Mechanics and Materials*, 876. P. 102–109. [in English].
3. Shevchenko, A. H., Kysil, O. P. (2020). Analiz faktorivznoshuvannia robochykh orhaniv drobarok. *Naukovi pratsi ONAKhT*, №2, S. 45–52.[in Ukrainian].
4. Singh, A. & Prasad, B. (2020). Influence of material and geometry of hammers on energy consumption and product fineness. *Journal of Engineering Research and Applications*, 10(3), 34–39. [in English].
5. Orlov, A. S. (2019). Poverkhneva inzheneriia v mashynobuduvanni: Monohrafiia. KhNADU, 316 s. [in Ukrainian].
6. Khalatov, A. A. (2016). Teploobmin i znos detalei z mikroreliefom. *Nauk. dumka*, [in Ukrainian].



7. Romaniuk, V. P., Stetsiuk, I. M. (2021). Novi pidkhody do optymizatsii udarnykh elementiv mashyn podribnennia. *Visnyk NTUU «KPI»*, №3, S. 60–66. [in Ukrainian].

8. Cheng, J., & Yang, W. (2021). Influence of surface texturing on particle breakage: Experimental and numerical insights. *Powder Technology*, 389, 1–10. [in English].

9. Bilous, V. H. (2023). Vplyv mikroprofilu na efektyvnist podribnennia v molotkovykh drobarkakh. *Naukovyi visnyk NUKhT*, №4, S. 88–94. [in Ukrainian].

10. Sliusar, I. V. (2022). Modeliuvannia rukhu chastynok po poverkhniakh zi spiralliu Arkhimeda. *Mekhanika i mashynobuduvannia*, №5, S. 73–78. [in Ukrainian].

11. Bondarenko, M. M. (2021). Vplyv heometrii udarnykh poverkhon na formuvannia shliakhu rukhu chastynok. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, №2, S. 40–45. [in Ukrainian].

12. Nazarenko, V. I. (2022). Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu mikrostruktury poverkhni na znoshuvannia. *Tekhnichna mekhanika*, №1, S. 51–56. [in Ukrainian].

13. Gupta, R., & Pandey, M. (2019). Surface engineering strategies in particle comminution: Review and trends. *Advanced Manufacturing*, 7(1), 15–26. [in English].

14. Hordiienko, S. O. (2021). Rozrakhunok kontaktnoi syly mizh chastynkoiu ta reliefnoi poverkhnei. *Mashynobuduvannia i inzheneriia*, №3, S. 34–39. [in Ukrainian].

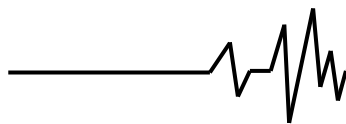
15. Liu, Z., & Sun, Y. (2022). Particle motion on spiraled surfaces: Discrete modeling approach. *Granular Matter*, 24, Article 88. [in English].

16. Chernovol, M. I., Vorona, T. V. (2011). Umovy ekspluatatsii i osnovni prychyny vykhodu z ladu rizhuchykh elementiv robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn. *Zbirnyk naukovykh prats «Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia»*. Vyp. № 24. S. 344–351. [in Ukrainian].

INCREASING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF WORKING BODIES OF CRUSHING EQUIPMENT IN THE PROCESSING INDUSTRY

This study examines the improvement of efficiency and reliability of hammer crushers in the processing industry by applying working surfaces with a discrete structure and relief in the form of an Archimedean spiral. The wear mechanisms of crushing elements were analyzed, and design solutions were proposed to reduce wear intensity and provide a self-sharpening effect. A mathematical model of the interaction between the working elements and raw material was developed, and experimental studies on its comminution were conducted. A model of load variation on a working element with a spiral-shaped edge was proposed, taking into account contact dynamics and blade geometry. The model is based on the principles of deformable solid mechanics and contact theory. Comparative analysis demonstrated that the hammer profile shape significantly influences the interaction with the material. It was found that the use of a profile in the form of an Archimedean spiral improves the dynamic characteristics of the process and reduces energy consumption. Modeling has confirmed that the equilibrium position of the hammer during the rotation of the rotor is a critical condition for effective grinding of grain raw materials. Deviation from this position causes a decrease in productivity, an increase in dynamic loads and accelerated surface wear. The proposed configuration provides a uniform distribution of loads, reduction of contact stresses and increase the durability of the working bodies. The results can be used to modernize crushers to increase their reliability and reduce service costs. In addition, the analysis showed the possibility of optimizing the geometric parameters of the rotor, which reduces the power consumption of the installation and improve the quality of the final product. This creates the basis for further research in the direction of improving the structures of rotary crushers and the introduction of energy efficient technological solutions in the processing industry.

Keywords: discrete structure, wear resistance, self-sharpening, hammer crusher, Archimedean spiral, mathematical modeling.

**Відомості про авторів**

Стадник Ігор Ярославович – доктор технічних наук, професор кафедри обладнання харчових технологій факультету машин, технологій і споруд Тернопільського національного технічного університету (вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001, e-mail: igorstadnykk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>).

Піддубний Володимир Антонович – доктор технічних наук, академік Національної академії аграрних наук, професор, директор Державна наукова установа «Український науково-дослідний інститут спирту і біотехнологій продовольчих продуктів» (пров. Сеньківський, 3, м. Київ, Україна, 03190, e-mail: profpod@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1497-7133>).

Михайлик Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри ресторанних і крафтових технологій Державний торговельно-економічний університету (вул. Кіото, 19, м. Київ, Україна, 02156, e-mail: v.mykhaylyk@knute.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7604-4403>).

Захарук Іван Іванович – провідний інженер ТДВ «Івано-Франківськзалізобетон», (вул. Мостовича 21, Івано-Франківська обл., м. Коломия, Україна, 78300, <https://orcid.org/0000-0001-7604-4403>).

Полевода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Stadnik Igor – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Food Technologies Faculty of Machines, Technologies and Structures of Ternopil National Technical University (Ruska st., 56, Ternopil, Ukraine, 46001, e-mail: igorstadnykk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>).

Piddubnyi Volodymyr – Akademik of the National Academy of Agrarian Sciences, Doctor of technical sciences professor, director State Scientific Institution Ukrainian Research Institute for Alcohol and Biotechnology of Food Products (Lane Senkivsky 3, Kyiv, Ukraine, 03190, e-mail: profpod@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1497-7133>).

Mihailik Vitalii – PhD, assistant Department of restaurant and craft technologies State University of Trade and Economics (Kyoto st., 19, Kyiv, Ukraine, 02156, e-mail: v.mykhaylyk@knute.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7604-4403>).

Zakharuk Ivan – Leading Engineer, PJSC «Ivano-Frankivskzalizobeton» (Mostovycha st., 21, Kolomyia, Ivano-Frankivsk region, Ukraine, 78300, <https://orcid.org/0000-0001-7604-4403>).

Polievoda Yurii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies Faculty of Production Technology, Processing and Robotics in Animal Husbandry of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna st., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).