

УДК 681.5.015.23:681.5.015.24

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, О.М. СЕРБУЛІ, А.М. МАЦУЙ, О.К. ДІДИК
Центральноукраїнський національний технічний університет**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ СПРАЦЮВАННЯ
СТЕРЖНЕВОГО МОЛОЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ
В КАСКАДНОМУ РЕЖИМІ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ**

Виокремлено чинники, що впливають на спрацювання молольного завантаження в каскадному режимі подрібнення руди. Серед них – ковзання, удар, перекочування по абразиву, стирання і роздавлення абразиву, прикладена сила, прикладена швидкість переміщення. Моделювання виконано в межах розроблення теми «Оптимізація продуктивності стержневих млинів розімкнутого циклу по руді і готовому продукту за мінімальних енергетичних і матеріальних перевитрат», яка є складовою частиною наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. Тема статті актуальна. Метою роботи є розроблення критерію оцінювання спрацювання стержневого завантаження барабанного млина у вигляді математичної моделі шляхом аналізу дії впливових чинників. Застосовано методи аналізу, порівняння, математичного моделювання, теорії подрібнення руди в стержневих млинах, декомпозиції і композиції, методи теорії стійкості проти спрацювання, методи теорії спрацювання металевих тіл за взаємодії з незакріпленим абразивом. Дослідження проводилися на прикладі стержневого млина МСЦ-35-55, який нині використовують на залізрудних збагачувальних фабриках. Для нього найбільш характерним є каскадний режим роботи, за якого руда руйнується переважно роздавленням і стиранням. Використано оптимізоване стержневе завантаження з трьома діаметрами стержнів. У даному режимі роботи стержні найменшого діаметра відтісняються до стінки барабана, а найкрупніші зосереджуються у центральній області його поперечного перерізу. У стержневому млині молольне середовище формується укрупненими зонами зі стержнями наближено однакового діаметра, що дає змогу розглядати його як однорозмірне. Основна маса стержнів, притиснена до стінки барабана нерухомо із захопленою у нижній зоні рудою, переміщується до верхньої позначки, звідки скочується каскадом. Швидкість переміщення молольних тіл на прямій природного укосу стержнів знаходиться в межах 2,12...2,5 м/с. Установлено, що всі діючі чинники на спрацювання молольного середовища впливають на стержні різних діаметрів практично однаково. Тому можливо стверджувати, що стержні різних розмірів у діаметрі працюють практично в однакових умовах. За таких умов основним діючим чинником залишається площа контакту молольного середовища з абразивом у вигляді подрібненої руди, що рекомендовано як критерій оцінювання спрацювання стержнів. Запропоновано критерій оцінювання спрацювання стержневого молольного середовища у вигляді математичної моделі. Перспективою подальших досліджень є імітаційне моделювання спрацювання стержневого молольного завантаження в конкретних типах барабанних млинів.

Ключові слова: стержневе завантаження, спрацювання, умови, критерій оцінювання, математична модель.

V.O. KONDRATETS, O.M. SERBUL, A.M. MATSUI, O.K. DIDYK
Central Ukrainian National Technical University**MATHEMATICAL MODELING OF OPERATING CONDITIONS OF THE ROD
GRINDING LOAD IN THE CASCADE MODE OF ORE GRINDING**

The factors affecting the wear of the grinding load in the cascade mode of ore grinding are identified. Among them are sliding, impact, rolling on the abrasive, abrasion and crushing of the abrasive, applied force, and applied displacement speed. The modeling was performed as part of the development of the topic "Optimization of open-cycle rod mills productivity for ore and finished product with minimal energy and material overruns", which is part of the scientific theme of the Central Ukrainian National Technical University. The topic of the article is relevant. The aim of the work is to develop a criterion for assessing the wear of the rod loading of a tumbling mill in the form of a mathematical model by analyzing the effect of influencing factors. The methods used are analysis, comparison, mathematical modeling, the theory of ore grinding in rod mills, decomposition and composition, methods of the theory of resistance to wear, methods of the theory of wear of metal bodies in interaction with a loose abrasive. The research was carried out on the example of the МСЦ-35-55 rod mill, which is currently used at iron ore processing plants. It is most characterized by a cascade mode of operation, in which the ore is destroyed mainly by crushing and abrasion. An optimized rod loading with three rod diameters is used. In this mode of operation, the smallest diameter rods are pushed to the drum wall, and the largest ones are concentrated in the central area of its cross section. In a rod mill, the grinding media is formed by enlarged zones with rods of approximately the same diameter, which allows it to be considered as one-dimensional. The bulk of the rods

is pressed against the drum wall motionless, and the ore trapped in the lower zone moves to the upper mark, from where it rolls down in a cascade. The grinding media movement speed on the natural slope of the rods is in the range of 2.12...2.5 m/s. It was found that all the factors affecting the grinding media wear affect the rods of different diameters almost equally. Therefore, it can be argued that rods of different diameters operate under almost identical conditions. Under such conditions, the main operating factor is the area of contact between the grinding media and the abrasive in the form of crushed ore, which is recommended as a criterion for evaluating the wear of the rods. A criterion for evaluating the wear of the grinding media in the form of a mathematical model has been proposed. Prospect for further research is simulation modeling of the wear of the rod grinding media in specific types of tumbling mills.

Key words: core loading, operation, conditions, evaluation criterion, mathematical model.

Постановка проблеми

Гірничо-видобувна галузь України слугує сировинною базою вітчизняної чорної металургії та експортує цю сировину до низки інших країн. Більше половини даної сировини припадає на залізородний концентрат, який отримують шляхом збагачення бідних залізних руд. Збагачення передбачає подрібнення вихідної руди до достатньо дрібних фракцій. Міцні руди подрібнюють у перших стадіях у стержневих барабанних млинах. Нині стержневі млини досягли своїх найбільших (граничних) розмірів – 4 500 мм у діаметрі і довжиною 6 000 мм. Такі технологічні агрегати достатньо потужні й продуктивні, однак їх вузьким місцем є недостатня вивченість як керованих об'єктів, що гальмує розвиток автоматизованих систем керування технологічними процесами, одним з яких є спрацювання стержневого молоткового завантаження в каскадному режимі подрібнення руди. Дана стаття виконана в обсязі наукових досліджень за темою «Оптимізація продуктивності стержневих млинів розімкнутого циклу по руді і готовому продукту за мінімальних енергетичних і матеріальних перевитрат» (0123U102622), яка є складовою частиною наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. Ураховуючи, що розв'язання даного завдання дасть змогу підвищити рівень автоматичного керування спрацюванням стержневого молоткового завантаження під час подрібнення міцних залізних руд, тема даної статті є актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Спрацюванням стержневого завантаження барабанних млинів учені і практики займаються давно. Щодо визначення спрацювання стержнів можливо відзначити таке. Стержневе молоткове середовище під час подрібнення руди у барабанному млині спрацьовується. Проблематичність стержневого завантаження полягає у тому, що його неможливо додавати без зупинки технологічного агрегату. Тому за даними збагачувальних фабрик додавання стержнів здійснюють через п'ять діб роботи, а перекласифікацію стержнів – через 10 днів роботи [1]. Звідси витікає складність завдання, оскільки втрати часу на дані роботи та їх трудомісткість є вагомими. Як видно, розв'язання завдання довантаження стержнів на заміну спрацьованих включає два етапи – інформаційне забезпечення щодо завантаження і сам процес завантаження, тобто розроблення завантажувальних пристроїв.

Найбільш простим інформаційним забезпеченням спрацювання стержнів під час подрібнення руди є поточний час роботи технологічного агрегату. Тобто за пройдений час роботи барабанного млина оцінюють спрацювання стержневого завантаження і, відповідно, необхідну кількість стержнів, яку необхідно додати в барабан млина. Однак за зміни продуктивності млина, міцності та крупності руди похибка оцінювання спрацювання стержнів буде вагомою. Більш точним може бути підхід визначення спрацювання стержнів за кількістю подрібненої руди, що визначається конвеєрними вагами. Однак точність тут буде теж достатньо низькою, оскільки не враховуються міцність і крупність вихідної руди.

Із ростом розміру млинів і їх продуктивності завантажувальні пристрої повинні подавати в барабан млина значну кількість стержнів, що також ускладнює розв'язання даного завдання. Його вирішення можливо полегшити використанням стержнів більшої стійкості, що нині прагнуть здійснювати. У стержневому завантаженні менше гнучкості порівняно з кульовим, де

завантаження молотильних тіл здійснюють без зупинки технологічного агрегату. Стержні переважно завантажують у барабан за допомогою крана або стержнезавантажувальної машини.

Інформаційне забезпечення завантаження стержнів може бути більш різноманітним. Одним із підходів до його спрощення може бути вдосконалення рудного живлення стержневих млинів, які працюють у розімкненому циклі подрібнення вихідної руди [2]. Далі розвиваються електричні підходи інформаційного забезпечення спрацювання стержневого завантаження. Одним із перших таких підходів був метод вимірювання сили струму, який споживає приводний електродвигун стержневого млина. Згодом його замінює вимірювання активної потужності приводного електродвигуна. Цей підхід використовувався найдовше, і навіть нині є збагачувальні фабрики, де його застосовують. Серед таких засобів уважали більш ефективною оцінку, яка базується на вимірюванні прирощення середньої потужності в момент завантаження порції молотильних тіл. Однак такий підхід можливо застосовувати лише для куль. Запропонований підхід [3] також не підходить для стержневого молотильного завантаження.

Згодом почали реалізовувати підходи керування завантаженням барабанних млинів молотильним середовищем, який засновано на вимірюванні моменту обертання барабана. Відомо, що активна потужність і момент обертання барабана млина зв'язані функціонально залежністю. Змінна частка потужності, що непродуктивно витрачається під час обертання барабана, становить 75...90% від загальної потужності, що перетворюється у відносну похибку, що може становити, як відомо, 10...25%. Тому за даними параметрами автоматизоване керування може здійснюватися лише наближено. Слід також ураховувати, що вимірювання моменту, окрім того, ще внесе додаткову похибку.

В останній час на підвищення точності вимірювання спрямована нова характеристична змінна рівня заповнення барабана млина молотильним середовищем [4]. Однак її неможливо застосувати для оцінювання стержневого завантаження. Метод дискретного елемента DEM (Discrete element method) [5], як показав аналіз, також неможливо запропонувати для оцінювання стержневого молотильного завантаження. Така ж ситуація і з використанням нелінійного спостерігача [6], який може оцінити лише об'єднаний обсяг руди і молотильного завантаження у барабані млина.

Отже, з розглянутого видно, що спрацювання стержневого молотильного середовища в каскадному режимі роботи барабанного млина не оцінюється з необхідною для технологічних умов точністю. Це потребує здійснення математичного моделювання умов спрацювання стержнів під час подрібнення руди в каскадному режимі роботи барабанного млина.

Мета дослідження

Метою роботи є розроблення критерію оцінювання спрацювання стержневого завантаження барабанного млина у вигляді математичної моделі шляхом аналізу дії впливових чинників.

Виклад основного матеріалу дослідження

У каскадному режимі роботи стержні спрацьовуються в процесі ковзання по руді, удару по її шматках і прокочуванні по поверхні інших молотильних тіл, устелених частками абразивного матеріалу. Умови взаємодії молотильних тіл і руди можливо розглядати як суцільний абразив, оскільки простір між стержнями зайнятий рудою разом із водою. Тертя металу стержнів по абразиву призводить до спрацювання і руйнування самого абразиву шляхом викришування, роздавлювання та сколювання, що супроводжується відновлюванням його спрацьовуючої можливості відносно металу. Ефективний вплив суцільного абразиву на металеву поверхню визначається тим, що тверді включення в ньому у вигляді зерен діють на метал як багаточисельність ріжучих елементів. Притиснена до суцільного абразиву металева поверхня, рухаючись, сприймає його вплив у два етапи: на першому етапі тверді частинки, що виступають у вигляді

нерівностей з абразиву, втілюються в метал, на другому – рухома поверхня руйнує абразивну руду шляхом складного комплексу впливів, кінцевою стадією якого є знімання часток металу з його поверхні. Основною ознакою якісної картини спрацювання металевієї поверхні під час тертя по суцільному абразиву є наявність на ній добре видимих механічних мілких царапин і заглиблень різної протяжності, завжди орієнтованих у напрямку руху металу відносно абразиву. Створення на металевій поверхні царапин або заглиблень унаслідок деформування і витіснення металу на шляху руху абразивної частинки дає підстави стверджувати, що таку роботу руйнування можуть здійснювати частки абразиву, твердість і міцність яких перевищує такі показники металевієї поверхні. Царапини на поверхні тертя мають подвійне походження: вони створюються внаслідок зрізу металу у вигляді мікростружки, коли метал достатньо твердий і малопластичний, або витіснення металу абразивною частинкою у «відвали» царапини, коли різання металу не відбувається внаслідок його високої пластичності. Витіснення металу у «відвали» – перший етап руйнування пластичних матеріалів абразивними частинками. Під час руху сусідніх абразивних частинок поблизу раніше створених «відвалів» на бічних поверхнях царапини відбувається вторинне передеформування, переорієнтація металу «відвалів» у бік царапини або його кінцеве відділення від поверхні тертя шляхом одночасного розвитку різних деформацій.

Для абразивного спрацювання під час тертя ковзанням уздовж суцільного абразиву характерним є високий зовнішній силовий вплив на поверхню металу. За цих умов не всі частинки абразиву у вигляді виступів і нерівностей здатні руйнувати метал шляхом мікрорізання або багаторазового пластичного деформування: частина з них руйнується, не пошкоджуючи металу, але створюючи передумови до погіршення умов ковзання по них. Це погіршення зв'язано з дробленням абразиву і збільшенням поверхні тертя.

Інтенсивність спрацювання під час тертя металу по суцільному абразиву визначається співвідношенням міцнісних характеристик металу і абразиву: високі твердість і міцність абразиву визначають його здатність утілюватися в метал і руйнувати його під час переміщення шляхом різання або роздавлювання. Зрозуміло, якщо метал більш твердий і міцний – руйнується абразив.

Зносостійкість металів за абразивного спрацювання залежить від суцільного абразиву. Не кожен абразив здатний руйнувати метал шляхом мікрорізання або деформування, хоч тертя ковзання по суцільному абразиву завжди супроводжується спрацюванням, оскільки поверхня суцільного абразиву має нерівності, що спричиняє високий контактний тиск, деформацію металу в приповерхневому шарі, нагрівання, зміну форми і розмірів робочої поверхні металу. За високих навантажень тертя металу по суцільному абразиву може якісно змінювати механізм спрацювання і рельєф поверхонь тертя. У механізмі абразивного спрацювання під час тертя ковзанням велика роль відводиться не лише твердості та міцності, а й стійкості вихідних структур під час нагрівання.

За стержневого подрібнення руди в каскадному режимі тверде частково руйнується й ударом. Спрацювання сталей, сплавів під час удару по абразивному матеріалу вивчають порівняно недавно, оскільки тривалий час не знаходили відмінностей у його природі від абразивного спрацювання в умовах тертя ковзанням.

Удар по твердих частинках різної форми та розмірів становить сукупність ударно-абразивного спрацювання та його принципову відмінність від абразивного зносу інших видів. Удар – це особливий вид навантаження, його дія збільшується, коли в зоні співударяння поверхонь формується третє тіло у вигляді твердих часток, які уражають робочу поверхню за прямого втілення в неї. Пряме входження твердої частки в метал під дією удару по ній створює заглиблення у вигляді ямки, яке наближено копіює геометрію частинки твердого. Багаточисельність одиничних утілень часток за кожного чергового удару по них формує на поверхні тертя своєрідний макрорельєф у вигляді ямок, що чергуються, і перемичок між

ними без царапин спрямованої орієнтації, типових для абразивного спрацювання під час тертя ковзанням.

Абразивна частка на першому етапі свого втілення в метал під час удару повинна подолати опір металу цьому втіленню. Це відбувається лише тоді, коли її твердість і міцність більші, ніж у метала.

Коли рельєф поверхні тертя під час удару по абразиву стає очевидно вираженим, дія одиначної частки на метал і механізм руйнування поверхні співударяння ускладнюється явищами, які відбуваються у кожному співударянні. На цій стадії втілення частки складної форми у кратеровидну ямку можливо співставити з утіленням клиновидного пуансона в глухий отвір неправильної форми. У цьому разі на кінцевий результат утілення частинки абразиву в ямку впливають чисельні чинники: твердість і міцність абразивної частинки, твердість та пластичність металу, наявність сусідніх відкритих ямок, товщина і форма перемичок, що їх розділяють, енергія ударів та ін. Якщо співвідношення цих чинників буде на користь абразивної частинки, то, попавши в ямку, у мить удару вони деформують її, поглиблюючи і розширюючи. У разі коли краї ямки не міцні або легко деформуються, вони під дією частинок або витісняються у сусідні ямки, якщо метал в'язкий, або викришуються, якщо метал високої твердості. На цьому етапі впровадження частинки критерієм оцінки зносостійкості стали називати її опір зрізу.

Установлено подвійний вплив механічних характеристик металу на опір ударно-абразивному спрацюванню, включаючи опір прямому втіленню частинки на початковій стадії удару і опір деформації та руйнуванню контура ямки під час зсуву у другій стадії.

У механізмі цього виду спрацювання добре видна міцнісна основа, а зносостійкість металевих матеріалів визначається комплексом властивостей, основними з яких є твердість і опір зрізу. Однак різниця механічних характеристик сталей і сплавів в умовах удару покращується внаслідок наклепу та схильності до викришування структур за динамічного впливу. Особливо значні втрати металу під час подрібнення міцного абразивного матеріалу зумовлені інтенсивним спрацюванням молоткових тіл. Скажімо, форма куль під час спрацювання швидко змінюється. На поверхнях тертя проявляються царапини і ямки різної глибини, форми та орієнтації. Стержні в процесі подрібнення піддаються спрацюванню в потоці абразивних частинок і в умовах удару металу по абразиву.

Перекочування по абразиву є найбільш характерним під час подрібнення руди стержнями в каскадному режимі роботи млина. Тертя кочення по поверхні зі значним виступом у вигляді шару незакріпленого абразиву супроводжується співударянням, тому спрацювання в таких умовах ближче до свого механізму до ударно-абразивного. Вплив твердих часток абразиву на поверхню стержня циліндричної форми призводить до створення на ній ямковидного рельєфу без ознак царапання. Співставлення його з макрорельєфом поверхні ударно-абразивного спрацювання показує їх повну ідентичність.

Усі елементи механізму формування макрорельєфу, розглянуті стосовно ударно-абразивного спрацювання, справедливі для випадку впровадження твердої частинки в циліндричну поверхню під час кочення по абразиву. Низка специфічних особливостей зовнішнього силового впливу під час тертя кочення не вносить принципової різниці в механізм формування рельєфу і майбутнє відділення часток металу.

В умовах тертя кочення по абразиву рівень зовнішнього навантаження на частинку визначається багатьма чинниками. До основних можливо віднести швидкість кочення стержня по абразиву, його діаметр, товщину шару абразиву, густину частинок у шарі та їхній розмір, механічні характеристики матеріалу молоткового тіла.

Вид абразиву, наприклад незакріплений, і його розташування на металевій основі впливають на динаміку взаємодії, рельєф, глибину ямок і спрацювання стержнів, які працюють у даних умовах.

Динамічний вплив абразивної частинки під час кочення зумовлює прояв частинних особливостей руйнування металу, притаманних удару. Мається на увазі схильність до в'язкого чи крихкого руйнування, здатність до структурних змін за деформації, до зміни початкових властивостей, температурних явищ.

Спрацювання під час кочення по абразиву є різновидом ударно-абразивного зношення з усіма особливостями, притаманними руйнуванню під час удару. Відомо, що інтенсивність спрацювання суттєво залежить від природи абразиву, його фізико-механічних властивостей, співвідношення твердостей абразиву і матеріалу стержнів. Під час випробувань в умовах удару встановлена найменша здатність абразивних часток спрацювати метал.

Не закріплені на металевій основі шматки руди під час удару по них стержня дробляться на більш дрібні, які мають меншу спрацьовуючу здатність порівняно з їхніми початковими розмірами.

У процесі спрацювання макро- і мікрорельєф поверхні, що зношується, формуються під дією багатьох чинників, основні з яких – рівень зовнішнього силового впливу на поверхні тертя, характеристики рудного матеріалу, фізико-механічні властивості матеріалів, що взаємодіють, можливість змащення та ін. В основі механізму ударно-абразивного спрацювання лежать пряме динамічне втілення в метал твердої частинки і зв'язана з ним деформація, що є наслідком руйнування мікроб'ємів металу і відділення частинок металу. У таких умовах взаємодії твердої частинки з поверхнею металу зріз стає провідним процесом створення часток спрацювання, а опір зрізу або відриву – основним критерієм оцінки стійкості проти спрацювання. За зменшення енергії удару зсувні процеси в зоні тертя, які створюють частинки спрацювання, поступово слабшають.

За одношарового розташування абразиву частинки знаходяться між двома металевими поверхнями. Під час удару окремі частинки втілюються безпосередньо в поверхню стержнів. Початкова форма шару і розміри частинок руди до моменту наближення стержнів не змінюються, оскільки відносного переміщення частинок у шарі не відбувається. У момент удару всі частинки знаходяться в безпосередньому контакті з поверхнею спрацювання, а під час удару по них – активно її уражають.

Руда може розташовуватися в кілька шарів. При цьому верхній шар її контактує з поверхнею одного стержня, а нижній – із поверхнею іншого стержня. У момент удару початкова форма загального шару порушується, частинки руди в шарі переміщуються одна відносно іншої, що викликає їх дроблення і порушує початкове розташування частинок у шарі. У зоні співударяння початкова товщина шару руди змінюється – відбувається ущільнення. Взаємне розташування частинок у шарі при цьому відрізняється від вихідного. Під час удару частинки переміщуються, прагнучи зайняти більш стійке положення. Зміна форми шара руди відповідно відображається на спрацюванні. При цьому частина сумарної енергії одиночного удару витрачається на ущільнення і дроблення часток руди в шарі. Збільшення товщини шару руди призводить до зменшення інтенсивності спрацювання і сприяє створенню своєрідного рельєфу на поверхнях співударяння із зоною максимального руйнування металу.

За одношарового розташування руди поверхня стержнів спрацьовується рівномірно, а величина спрацювання виходить максимальною. Тобто ціною ефективного руйнування руди виступає ефективне спрацювання стержнів.

Абсолютне спрацювання прямо пропорціональне тривалості подрібнення руди. Спрацювання під час удару по руді в присутності рідини супроводжується створенням специфічного рельєфу.

Енергія удару впливає на спрацювання. Залежність спрацювання від прикладеної енергії за ударно-абразивного руйнування шляхом удару по незакріпленій руді має три характерних ділянки: 1 – спрацювання зростає пропорційно енергії удару; 2 – збільшення спрацювання відбувається менш інтенсивно; 3 – за збільшення енергії удару спрацювання зменшується. Цей

характер залежності вказує на те, що зі зміною енергії удару зв'язаний механізм формування ямок за динамічного втілення твердих часток незакріпленої руди.

Таким чином, інтенсивність і механізм ударно-абразивного спрацювання за інших однакових умов визначають розміри, форма, міцність і твердість абразиву, тобто подрібнюваної руди.

Відомо, що за абразивного спрацювання різні схеми зовнішнього силового навантаження можливо систематизувати за характером впливу абразивних частинок на поверхню тертя: тертя ковзання, тертя кочення, співударяння металу з абразивом і часткове різноспрямоване роздавлювання. Силовий чинник у розкритті механізму абразивного спрацювання молоткового середовища має виняткове значення, оскільки визначає критерій оцінювання стійкості його проти спрацювання. Як показано, стержні в каскадному режимі піддані спрацюванню різною мірою за всіма схемами. Тому під час дослідження приймати будь-який відомий критерій, притаманний одному з механізмів спрацювання, недоцільно внаслідок сильного викривлення результатів. Тому в процесі дослідження необхідно запропонувати новий критерій оцінювання стійкості проти спрацювання стержнів, який відповідає даним умовам їхньої роботи.

Силовий чинник у механізмі абразивного спрацювання молоткового середовища має велике значення, тому розглянемо його під час роботи стержнів у каскадному режимі. Ураховуючи, що в каскадному режимі подрібнюючі тіла безупинно циркулюють усередині барабана по замкнених траєкторіях, то це підтверджує, що вони в каскадному русі перебувають певною мірою у розпушеному стані, коли на них практично відсутній вплив із боку інших тіл. Тоді силовий чинник визначається лише масою кожного стержня, і його можливо не враховувати.

На коловій траєкторії руху стержнів вони знаходяться в нерухомому положенні відносно барабана і руди. У нижній частині барабана, де формується стержневе навантаження для такого переміщення, діють зони зі стержнями наближено однакового розміру з однаковими проміжками між ними, які заповнюються дробленою рудою. Практично у вільному формуванні такого масиву без особливого тиску шматки руди практично вільно заповнюють пустоти між молотковими тілами. Під час повороту барабана стержні ущільнюються, деякий обсяг сипкого матеріалу може бути захопленим надлишково, але значним він бути не може. Під час піднімання стержні ущільнюються, займаючи у просторі найменший об'єм. При цьому на коловій траєкторії руху сипкий матеріал ущільнюється загальною масою стержнів, відбувається часткове різноспрямоване роздавлювання шматків руди. Однак кількість зруйнованого матеріалу незначна, а знос стержнів при цьому ще менший. Тому таким руйнуванням і зносом сталі внаслідок цього можливо знехтувати. Тоді спрацювання стержнів можливо розглядати лише в процесі їх каскадного руху перекошуванням.

Як було вказано, в умовах кочення стержнів по абразиву їх спрацювання визначається багатьма чинниками. До основних із них відносять: швидкість кочення стержня по абразиву, густину частинок у шарі та їх розмір, механічні характеристики матеріалу молоткового тіла. Розглянемо вплив цих чинників на величину спрацювання стержнів.

Вид абразиву і його розташування на металевій основі впливають на динаміку взаємодії, рельєф, глибину ямок і в цілому на спрацювання стержнів, яке буде певним у разі незакріплення абразиву на металевій основі. Інтенсивність спрацювання суттєво залежить від природи абразиву, його фізико-механічних властивостей, співвідношення твердості абразиву і матеріалу стержнів. Вид абразиву, його природа, фізико-механічні властивості та густина в процесі подрібнення не змінюються, оскільки нині все частіше переходять на подрібнення конкретного технологічного різнотипу руди в настроєному на нього стержневому млині [7]. Тому всі стержні будуть працювати в однакових технологічних умовах із конкретним впливом на них абразиву. Абсолютне спрацювання молоткових тіл за цим чинником буде прямо пропорційним тривалості подрібнення руди.

Щодо механічних характеристик металу молоткових тіл та співвідношення твердостей абразиву і матеріалу стержнів, то вони також на інтенсивність спрацювання будуть впливати

однозначно, оскільки їх використовують у збагачувальному виробництві однотипними – однакового класу, матеріалу, технології виробництва, і вони відповідають конкретним вимогам за своїми характеристиками.

У процесі стержневого подрібнення матеріалу в каскадному режимі можливо відзначити таке. Барабанний млин в оптимальному режимі роботи повинен мати повністю заповненими дробленою рудою проміжки між стержнями. Ці проміжки між стержнями становлять 21,5% відносно об'єму сталі стержнів [8]. Під час паралельного руху стержнів на каскадній ділянці одне рухоме молотильне тіло може взаємодіяти лише з тонким абразивним шаром, товщина якого сумірна з розміром частинки руди. Це буде за стержнів будь-яких діаметрів, оскільки в процесі роботи барабанного млина молотильні тіла в ньому групуються за наближено однаковими розмірами. Отже, і за цим чинником стержні різних діаметрів працюють в однакових умовах.

Нині фахівці дійшли висновку про доцільність переробки одного технологічного різно-типу руди в конкретних, налагоджених на нього стержневих млинах [2]. При цьому збурюючим параметром на вході стержневого млина буде лише середньозважена крупність руди. Однак і це збурення можливо ліквідувати спеціальними прийомами в бункерному відділенні [2]. Тоді середньозважена крупність вихідної руди буде лише мати занадто незначну тенденцію повільного зростання даного параметра, викликану повільним спрацюванням робочих поверхонь дробильного обладнання. Отже, розмір частинок руди на вході стержневого млина вагомо змінюватися не буде, що засвідчує практичну незмінність умов роботи стержневого завантаження в процесі експлуатації.

Силовий чинник у розкритті механізму абразивного спрацювання металів має виняткове значення. Відчутний вплив навантаження на спрацювання зумовлений тим, що від цього показника залежить, насамперед, глибина проникнення твердої частинки в поверхню металу. Зовнішній силовий вплив, окрім того, викликає зміни стану мікроструктури поверхневих шарів і відбивається на кінцевому спрацюванні.

Залежність спрацювання від питомого навантаження досліджувалася експериментально для порівняння на сталі 45 і сплаві 80ГСЛ, який використовують для виготовлення футерівки стержневих млинів. Випробування проводили при терті на шліфувальному крузі марки 39А40СТ за швидкості ковзання 2,5 м/с із подачею в зону тертя мастильно-охолоджуючої емульсії. Результати експериментів приведено на рис. 1.

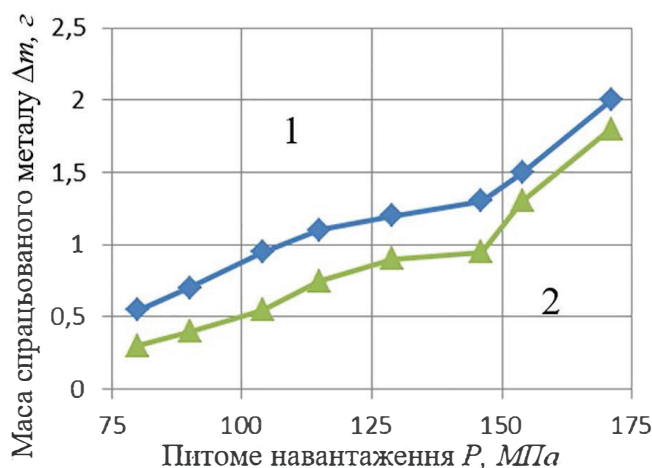


Рис. 1. Залежність спрацювання від питомого навантаження для матеріалів: 1 – сталь 45; 2 – сплав 80ГСЛ

Як видно із залежностей (рис. 1), за спрацювання сталі і сплаву можливо виокремити три зони. Для першої і третьої зон характерні лінійні залежності між спрацюванням та питомим

навантаженням. Однак на першій ділянці чутливість набагато менша порівняно з третьою. Друга ділянка залежностей характеризується тим, що в ній спостерігається незмінність спрацювання у певному інтервалі питомих навантажень. З отриманих залежностей на рис. 1 також слідує, що зносостійкість сплаву 80ГСЛ значно вище порівняно зі сталлю 45. Як показав аналіз, питомі навантаження в стержневому млині достатньо низькі, а їх спрацювання також будуть достатньо невеликими і не будуть залежати від діаметра молоткових тіл. Отже, усі молоткові тіла незалежно від діаметра будуть стосовно зносу знаходитися практично в однакових умовах, тому цим чинником у стержневих млинах можливо знехтувати і не враховувати питомих навантажень молоткових тіл.

Вплив швидкості ковзання на спрацювання може бути відчутним. Вплив швидкості ковзання на спрацювання також досліджували експериментально на зразках зі сталі 45 під час тертя на шліфувальному крузі та диску зі сталі 45. У зону тертя подавалася мастильно-охолоджувальна емульсія. Тобто умови дослідження практично повністю відповідали роботі стержневого завантаження.

Результати дослідження представлено на рис. 2. Із залежностей рис. 2 видно, що в умовах тертя ковзання по абразиву з підвищенням швидкості ковзання в межах 1,4...10,0 м/с інтенсивність спрацювання підвищується мало. При цьому спостерігається спрацювання абразивне і теплове. В інтервалі швидкостей ковзання 1,4...4,0 м/с відбувається абразивне спрацювання, в інтервалі 4,0...10,0 м/с – теплове. При цьому інтенсивність спрацювання незначно збільшується.

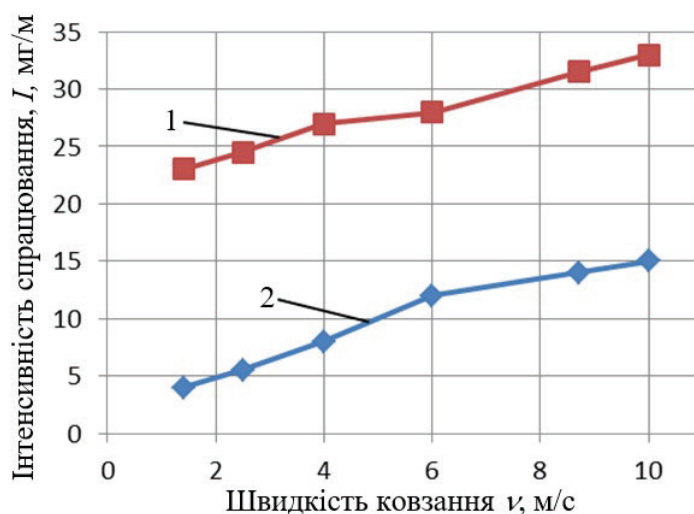


Рис. 2. Залежності інтенсивності спрацювання від швидкості ковзання при терті:
1 – по абразиву; 2 – по сталі

Інтенсивність спрацювання під час тертя сталі по сталі в два рази менша порівняно з тертям сталі по абразиву, однак такі режими у процесі роботі стержневого млина допускати недоцільно. При цьому витрачаються енергія і сталь, а корисна робота не здійснюється. Тому стержневий млин необхідно нормально завантажувати рудою.

Отже, підвищення швидкості відносного переміщення мало впливає на глибину втілення абразивної частинки, тому спрацювання за зміни швидкості ковзання змінюється незначно, особливо враховуючи швидкості переміщення стержнів на прямій природного укусу в межах 2,12...2,5 м/с.

Подрібнення руди в стержневому млині здійснюється за рахунок руху стержневого завантаження. Стержні в каскадному режимі подрібнення здійснюють переміщення відповідно замкненим

траєкторіям, як показано на рис. 3. У центральній частині молоткового середовища утворюється малорухоме «ядро», яке складається зі стержнів найбільшої крупності. За ним до периферії розміщуються стержні із середнім розміром діаметра, а периферію займають подрібнюючі тіла найменшого діаметра. Стержні циркулюють по замкнених траєкторіях. У «ядрі» стержні приводяться в рух фрикційним зв'язком із шаром молоткових тіл, що рухаються разом із барабаном. Основна маса стержнів притиснена до стінки барабана, нерухомо із захопленою рудою переміщується до верхньої відмітки, звідки вона скочується каскадом. «Ядро» – це та перехідна область, де відбувається розділення двох видів руху стержнів – біля стінки барабана і вільного перекочування. Там, де тиск стержнів великий, вони у відносному нерухомому стані піднімаються до верхньої відмітки. Однак зі зменшенням стержневих шарів, у міру наближення до центру завантаження, тиск стає меншим. Виникає граничний шар стержнів, який рухається без ковзання за рахунок зчеплення з нерухомими шарами. Цей граничний шар стержнів впливає на сусідні верхні і, обертаючись разом із барабаном за рахунок фрикційного зв'язку, починає обертати стержні граничного шару «ядра». Обертаючись, вони піднімаються до певної верхньої відмітки і потім, де фрикційне зчеплення практично зникає, вони можуть попадати в середину «ядра», заповнюючи його, а коли воно заповниться, створюється схил під кутом, близьким до кута природного укосу. При цьому стержні найкрупнішого діаметра скочуються вниз, поступаючи на свою траєкторію знизу, де рух продовжується відповідно до траєкторії навколо «ядра». Тут рух буде з невеликими швидкостями, а у вищих шарах «ядра» (якщо вони будуть) переміщення будуть гальмуватися розташованим вище шаром завантаження, який циркулює по неперервній траєкторії.

Із рис. 3 видно, що замкнені траєкторії мають різну протяжність як по загальній довжині, так і по окремих частинах: коловій разом із барабаном і по прямій під кутом, близьким до природного укосу.

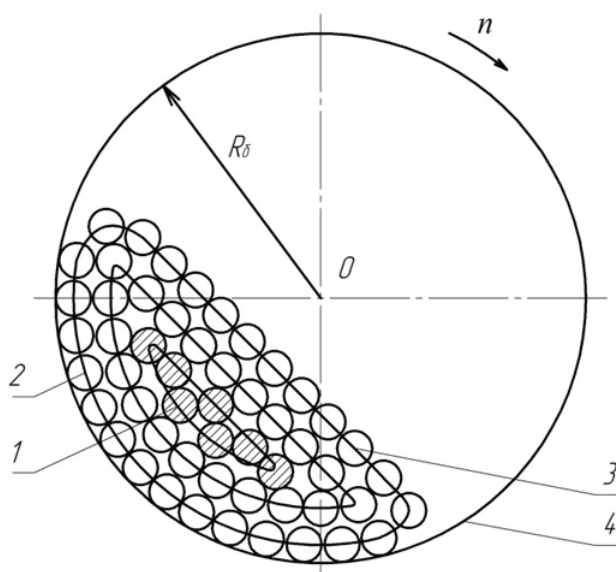


Рис. 3. Схема руху стержнів у центральному перерізі барабана млина в каскадному режимі роботи:
 1 – малорухоме «ядро» з крупних стержнів; 2 – колова частина траєкторії руху стержнів;
 3 – каскадна ділянка руху стержнів по прямій; 4 – барабан млина; O – центр поперечного перерізу барабана; R_{δ} – радіус барабана; n – швидкість обертання барабана

У визначенні каскадного режиму відзначено, що рух молоткового середовища відбувається безупинно по замкнених траєкторіях. Стержні у будь-якій траєкторії руху на пряму ділянку подаються з відповідної колової траєкторії, а стержні в окремих верхніх шарах повинні бути дещо зваженими і мати можливість більш-менш вільного переміщення. За таких умов рух стержнів може бути неперервним як на коловій, так і на прямій ділянці траєкторії.

Визначимо умови руху стержнів у неперервних траєкторіях за каскадного режиму подрібнення руди на конкретному типі стержневого млина МСЦ-35-55, який нині використовують на залізорудних збагачувальних фабриках. Він має такі основні параметри: діаметр барабана – 3 500 мм; довжина барабана – 5 500 мм; робочий об’єм – 49 м³; швидкість обертання барабана – 13,5 об/хв.; вага стержневого навантаження – 142 т.

Колова частота обертання барабана:

$$\omega = 2\pi \cdot n = 84,78 \text{ хв}^{-1}, \quad (1)$$

де $\pi = 3,14$; n – швидкість обертання барабана.

Лінійна швидкість переміщення точки на барабані дорівнює:

$$v = \omega \cdot R_{\phi} = 148,365 \text{ м/хв.} = 2,473 \text{ м/с}, \quad (2)$$

де R_{ϕ} – внутрішній радіус барабана, м.

Стержні по похиленій прямій будуть перекочуватися, спрацювуючи за один оберт довжину:

$$l_{nc} = \pi \cdot d_c, \quad (3)$$

де d_c – діаметр стержня, м.

Число обертів стержня під час перекочування по прямій природного укусу буде дорівнювати:

$$n_c = \frac{l_y}{l_{nc}} = \frac{l_y}{\pi \cdot d_c}, \quad (4)$$

де l_y – довжина прямої природного укусу, м.

За один прохід стержнем прямої природного укусу спрацюванню по абразиву буде піддана довжина:

$$l_y = l_{nc} \cdot n_c. \quad (5)$$

Площа стержня, яка піддавалась абразивному спрацюванню за один прохід прямої природного укусу, буде:

$$S_{cl} = l_y \cdot L_c, \quad (6)$$

де L_c – довжина стержня в стержневому завантаженні, м.

На більш близьких до центру барабана млина траєкторіях радіус R_{km} колових ділянок буде зменшуватися. Наприклад, один із них прийме значення $R_{km} = 1,5$ м. Тоді лінійна швидкість руху стержнів на цій коловій траєкторії прийме значення:

$$V_{km} = \omega \cdot R_{km} = 2,1195 \text{ м/с.}$$

Отже, лінійна швидкість руху стержнів на прямій природного укусу також зменшиться. Як видно, діапазон зміни швидкості не виходить за межі 1,4...4,0 м/с, і зміною лінійної швидкості

руху стержнів можливо знехтувати. Із розглянутого слідує, що ні силовий, ні швидкісний чинники не роблять суттєвого впливу на роботу різнорозмірного стержневого завантаження. Це дає змогу стверджувати, що спрацювання стержнів переважно визначається їхньою площею, що контактує з абразивом.

Для оптимального різнорозмірного стержневого завантаження барабанного млина, яке складається з трьох діаметрів стержнів, можливо записати вираз критерію оцінювання спрацювання молольного середовища у вигляді математичної моделі:

$$J_{cc} = (l_{укс} \cdot n_{укс} + l_{усс} \cdot n_{усс} + l_{удс} \cdot n_{удс}) \cdot L_c \cdot N_{ц}, \text{ м}^2, \quad (7)$$

де $l_{укс}$, $l_{усс}$, $l_{удс}$ – відповідно довжина прямої природного укусу стержнів, м; $n_{укс}$, $n_{усс}$, $n_{удс}$ – відповідно кількість шарів крупних, середніх і дрібних стержнів у молольному завантаженні млина; L_c – довжина стержнів, м; $N_{ц}$ – кількість повних циклів руху стержнів у траєкторіях.

Таким чином, запропонована математична модель (7) дає змогу визначати площу стержневого завантаження, яка взаємодіяла з абразивом у низці циклів роботи барабанного млина і однозначно характеризує його спрацювання в даних умовах подрібнення руди. Для цього необхідно знати параметри молольного середовища, довжину стержнів у ньому та кількість повних циклів руху молольних тіл у траєкторіях.

Висновки

Таким чином, виокремлено і досліджено вплив чинників спрацювання стержневого молольного середовища в каскадному режимі подрібнення руди. Серед основних чинників – ковзання, удар, перекочування по абразиву, прикладена сила та швидкість переміщення. Установлено, що швидкість переміщення молольних тіл на прямій природного укусу стержнів знаходиться в межах 2,12...2,5 м/с, що суттєво не впливає на їх спрацювання. Також установлено, що всі діючі на спрацювання молольних тіл чинники виявляють практично однаковий вплив незалежно від їхнього діаметра. Тобто умови роботи стержнів практично не залежать від їхнього діаметра. Тому основним діючим на спрацювання стержнів чинником залишається площа контакту молольного середовища з незакріпленим абразивом у вигляді подрібненої руди. Цей параметр рекомендовано як критерій оцінювання спрацювання стержнів. Запропоновано критерій оцінювання спрацювання стержневого молольного середовища у вигляді математичної моделі, фізичний зміст якої – площа стержневого завантаження, що знаходилася в контакті з абразивом у вигляді подрібненої руди впродовж кількості повних циклів руху стержнів у траєкторіях. Така кількість циклів може відповідати роботі стержневого млина, наприклад упродовж однієї доби. Критерій оцінювання спрацювання стержневого завантаження визначається довжинами прямих природного укусу стержнів за розміром їхніх діаметрів, кількістю рухомих шарів у середовищі за діаметрами, довжиною стержнів та кількістю повних циклів руху стержнів у траєкторіях.

Перспективою подальших досліджень у цьому напрямі є імітаційне моделювання спрацювання стержневого молольного завантаження в конкретних типах барабанних млинів.

Список використаної літератури

1. Виробництво залізорудного концентрата. Технологічна інструкція ПІ-03-01-13 / ВАТ «Полтавський ГЗК». Комсомольськ : ВАТ «ПГЗК», 2013. 70 с.
2. Кондратець В.О., Мацуї А.М., Сербул О.М. Удосконалення рудного живлення кульових млинів щодо ліквідації збурюючих впливів при подрібненні сировини : монографія. Кропивницький : КОД, 2024. 216 с. ISBN 978-617-653-089-3.

3. Спосіб визначення кульового завантаження барабанного млина: пат. 100616 Україна МПК F23K 1/00, B02C 17/00. №а 201109094; заявл. 20.07.2011; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1. 3 с.
4. Huang H., Jia M.-P., Zhong B.-L. Investigation on measuring the fill level of an industrial ball mill based on the vibration characteristics of the mill shell. *Minerals Engineering*. 2009. Vol. 22. Iss. 14. P. 1200–1208. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.06.08.
5. Frequency domain characterizations of torque in tumbling ball mills using DEM modeling: Application to filling level monitoring /Pedraes F. and other. *Powder Technology*. 2018. Vol. 323. P. 433–444. DOI: 10.1016/j.powtec.
6. Le Roux J.D., Craing L.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC – Paper On Line*, 2017. Vol. 50. Iss. 1. P. 1169–1174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.403.
7. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання підходів подрібнення різнотипів руд конкретного родовища у кульових млинах замкненого циклу. *Математичне моделювання*. 2017. № 2(37). С. 43–49.
8. Кондратець В.О., Мацуї А.М., Сербул О.М. Математичне моделювання базових параметрів стержневого завантаження циліндричних млинів як керованих об'єктів. *Математичне моделювання*. 2023. № 2(49). С. 76–85.

References

1. Vyrobnystvo zalizorudnoho kotsentrata. Tekhnolohichna instruktsiia (2013). [Production of iron ore concentrate. Technological instruction]. TI-03-01-13. Komsomolsk: VAT «PHZK» [in Ukrainian].
2. Kondratets, V.O., Matsui, A.M., & Serbul, O.M. (2024). *Udoskonalennia rudnoho zhyvlennia kulovykh mlyniv shchodo likvidatsii zburuiuyuchykh vplyviv pry podribnenni syrovyny [Improvement of ore feeding of ball mills to eliminate disturbing effects during grinding of raw materials]*. Кривенький: «KOD» [in Ukrainian].
3. Sposib vyznachennia kulovoho zavantazhennia barabannoho mlyna: pat. 100616 Ukraina: МПК F23K 1/00, B02C 17/00. №а 201109094 [The method of determining the ball loading of the drum mill: pat. 100616 Ukraine IPC F23K 1/00, B02C 17/00. No. 201109094]. zaiavl. 20.07.2011; opubl. 10.01.2013, Biul. № 1. 3 s. [in Ukrainian].
4. Huang, H., Jia, M.-P., & Zhong B.-L. (2009). Investigation on measuring the fill level of an industrial ball mill based on the vibration characteristics of the mill shell. *Minerals Engineering*, 22(14), 1200–1208 [in English].
5. Pedrayes, F., Norriella, J. G., Melero, M. G., Menéndez-Aguado, J. M., & del Coz-Díaz, J. J. (2018). Frequency domain characterizations of torque in tumbling ball mills using DEM modeling: Application to filling level monitoring. *Powder Technology*, 323, 433–444 [in English].
6. Le Roux, J.D., & Craing, L.K. (2017) Requirements for estimating the volume of rocks and ball in a grinding mill. *IFAC – Paper On Line*, 50(1), 1169–1174 [in English].
7. Matsui, A.M., & Kondratets, V.O. (2017). Modeliuvannia pidkhodiv podribnennia riznotypiv rud konkretnoho rodovyshcha u kulovykh mlynakh zamknenoho tsykladu [Modeling of approaches to grinding different types of ores of a particular deposit in closed-cycle ball mills]. *Matematychni modeliuвання. Naukovyi zhurnal*. 2 (37), 43–49 [in Ukrainian].
8. Kondratets, V.O., Matsui, A.M., & Serbul O.M. (2023). Matematychni modeliuвання bazovykh parametriv sterzhnevoho zavantazhennia tsylindrychnykh mlyniv yak kerovanykh ob'ektiv [Mathematical modeling of basic parameters of rod loading of cylindrical mills as controlled objects]. *Matematychni modeliuвання. Naukovyi zhurnal*. 2 (49), 76–85 [in Ukrainian].

Кондратець Василь Олександрович – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету. E-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1411-168X.

Сербул Олександр Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету. E-mail: serbulan@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1836-5529.

Мацуй Анатолій Миколайович – д.т.н., професор, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету. E-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5544-0175.

Дідик Олександр Костянтинівич – к.т.н., доцент, завідуючий кафедрою автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету. E-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5544-0175.

Kondratets Vasiliy Oleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Production Process Automation of the Central Ukrainian National Technical University. E-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1411-168X.

Serbul Oleksandr Mykolaiovych – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Production Process Automation of the Central Ukrainian National Technical University. E-mail: serbulan@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1836-5529.

Matsui Anatolii Mykolaiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Lecturer at the Department of Production Process Automation of the Central Ukrainian National Technical University. E-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5544-0175.

Didyk Oleksandr Kostiantynovych – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Production Process Automation of the Central Ukrainian National Technical University. E-mail: didyk_s79@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1454-0828.