

Ю.Г. ГОРБАЧОВ, канд. техн. наук, проф.,  
А.О. ХРУЦЬКИЙ, О.Ю. КРИВЕНКО, кандидати техн. наук, доценти,  
О.С. ЛІФЕНЦОВ, асистент  
Криворізький національний університет

## ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СХЕМИ ВІБРАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОЇ ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ СИРИХ ОКАТИШІВ

**Мета.** Метою роботи є підвищення міцності сирих окатишів, які внаслідок недостатньої механічної міцності суттєво руйнуються під час конвеєрного транспортування та численних перевантажувальних операцій на шляху до випалювальної печі. Існує необхідність у попередньому зміцненні сирих окатишів, що сприятиме значному скороченню обсягів утворення дріб'язку, який потрібно знову спрямовувати у процес огрудкування. Це забезпечить підвищення продуктивності усього технологічного ланцюга обладнання та загальні техніко-економічні показники роботи огрудкувального виробництва. Крім того, воно повинно зменшити руйнування гранул під час зміцнювального випалу. Таким чином, тема дослідження безсумнівно важлива та актуальна.

**Методи дослідження.** Проведені останнім часом у КНУ дослідження дозволили встановити, що поверхнева вібраційна обробка сирих окатишів забезпечує суттєве зміцнення зовнішнього шару гранул, підвищення їх загальної статичної і динамічної міцності, скорочення обсягу утворення дріб'язку. Отримані параметри необхідного режиму вібраційної зміцнювальної обробки, запропоновані можливі конструктивні варіанти пристроїв для їх реалізації. Але потрібно остаточне обґрунтування раціональної динамічної схеми такої машини. З огляду на це, зроблено висновок про доцільність проведення порівняльного аналізу запропонованих динамічних схем для виявлення найбільш досконалої.

**Наукова новизна.** Обґрунтовано найбільш досконалу динамічну схему установки для вібраційного поверхневого зміцнення сирих окатишів на основі порівняльного аналізу різних варіантів її реалізації з точки зору найбільш ефективного динамічного впливу на гранули.

**Практична значимість.** Практичне використання запропонованого конструктивного рішення пристрою дасть можливість підвищити міцність сирих окатишів безпосередньо після сходу їх з огрудкувального обладнання, що має забезпечити зниження ймовірності руйнування гранул на шляху їх транспортування до випалювальної машини та під час самого випалу. Це повинно суттєво скоротити відсоток некондиційного дріб'язку у готовому продукті.

**Результати.** Обґрунтовано та запропоновано раціональне технічне рішення для вирішення актуального питання попереднього підвищення міцності сирих окатишів за допомогою поверхневої вібраційної обробки гранул.

**Ключові слова:** технологічний процес огрудкування залізородної сировини, недостатня міцність сирих окатишів, поверхнєве зміцнення гранул, вібраційні пристрої для обробки сирих окатишів, обґрунтування раціональної динамічної схеми віброзміцнювальної установки.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-153-157

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Поступове вичерпування покладів багатих руд і вимушене розширення внаслідок цього мінерально-сировинної бази світової залізородної промисловості за рахунок бідніших родовищ викликали масове залучення у розробку та збагачення бідних залізних руд типу залістистих кварцитів. Такі руди від-різняються дуже тонким вкрапленням заліза – не більше 0,074 мм. Тому при підготовці до збагачення їх потрібно дробити та подрібнювати саме до такого практично пилоподібного стану. Звісно й кінцевий продукт збагачення – концентрат – має таку ж крупність, яка робить його непридатним для використання в агломераційному виробництві. Така тонкоподрібнена аглошихта (концентрат, флюси, паливо) має недостатню газопроникність і не забезпечує належного просмоктування повітря через її шар для просування вогнища горіння і спікання готового коржю в агломераційній машині [1,2].

Подібні обставини викликали свого часу появу нового технологічного процесу укрупнення концентратів залізних руд, необхідного для отримання доменної шихти потрібного гранулометричного складу – огрудкування, заснованого на ефекті утворення кулькоподібних гранул (окатишів) шляхом накочування вологої шихти на зародок за допомогою огрудкувального обладнання. В якості останнього у світовій гірничо-металургійній практиці широко використовуються установки чашкового і барабанного типів [3-5].

Сирі окатиші, що сходять з робочих органів огрудкувачів, відрізняються невеликою міцністю і потребують операцій зміцнення за рахунок температурного випалу або за допомогою інших безвипалювальних технологій. Лише достатньо зміцнені окатиші можуть добре переносити тривале зберігання та перевезення на далекі відстані у найнесприятливіших умовах. Сирі

ж гранули мають витримувати лише досить невеликий шлях транспортування від огрудкувача до випалювальної машини. Для цього вони повинні мати певні величини статичної та динамічної міцності.

Незважаючи на існуючі вимоги, відсоток руйнування недостатньо міцних сирих окатишів на стрічках доставкових конвеєрів та під час декількох операцій перевантаження й укладання гранул на візки випалювальної печі досить високий. Некондиційний дріб'язок потрібно відбирати з потоку окатишів, що завантажується у піч, і повертати знову у процес огрудкування. Певна кількість окатишів руйнується вже у печі, під час випалу внаслідок розриву при нагріванні. Усе це у край негативно позначається на продуктивності підприємства та його техніко-економічних показниках [1,3].

З огляду на це, задача забезпечення попереднього зміцнення сирих окатишів відразу після їх огрудкування є надзвичайно важливою та актуальною.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для усунення вказаних вище недоліків можна звернутися за допомогою вібраційних технологій, які в останні десятиліття широко розповсюдилися у багатьох галузях промисловості, у тому числі гірничій. Використання вібраційних коливань різної інтенсивності забезпечує суттєве підвищення ефективності виконання різноманітних транспортних та транспортно-технологічних процесів [6-9]. Для вирішення розглянутої проблеми в КГРІ свого часу було запропоновано уведення в технологічний процес виготовлення окатишів операції попереднього зміцнення сирих гранул відразу після їх сходу з огрудкувача [10-12].

У даному випадку ідея полягала у застосуванні ефекту поверхневого зміцнення деталей машин, який давно і з успіхом реалізується у машинобудуванні. Численні ударні впливи, нанесені по деталі (наприклад, шляхом дробоструминної обробки), утворюють на ній зміцнений поверхневий шар товщиною до 1 мм за рахунок певного впорядкування його кристалічної структури. Такий шар добре опирається діючим навантаженням і суттєво підвищує рівень протидії деталі згинальним і крутним напруженням, корозії, втомним явищам. У випадку сирих окатишів вібраційна поверхнева обробка гранул може принести подібний ефект [12].

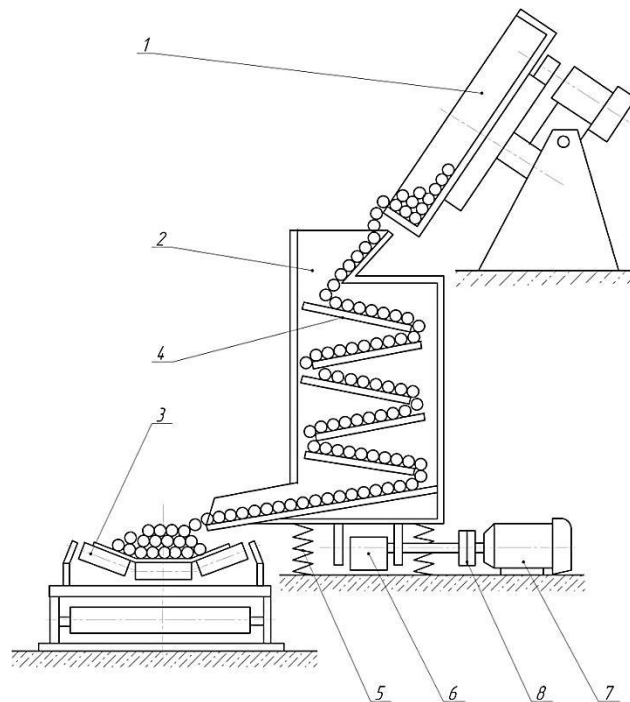
Проведені дослідження показали, що для отримання очікуваного результату сирі окатиші потрібно протягом певного часу піддавати обкатуванню на робочому органі спеціального вібраційного пристрою. При цьому поверхневий шар окатиша у процесі вібротранспортування у режимі з підкиданням буде сприймати численні мікроудари при зустрічі з цим робочим органом, які й спричинятимуть його зміцнення. Потрібно розуміти, що ці динамічні впливи будуть проникати й вглиб гранул, тому тут можна говорити не лише про поверхневу, але й про частково об'ємну зміцнювальну обробку сирих окатишів. Режим вібраційної обробки має бути наступним: частота коливань робочого органу – у середньому 25 Гц, амплітуда коливань – 2-4 мм, час обробки – 2-3 хвилини [10,13]. Оскільки сирій окатиш протягом усього процесу зміцнення повинен котитися по робочому органу вібраційного пристрою, довжина його шляху буде залежати від швидкості вібротранспортування та тривалості перебування на ньому. Зі звичайною у таких випадках швидкістю пересування 0,1 м/с за 120-180 с окатиш подолає відстань від 12 до 18 м. Зробити пристрій такої довжини доволі проблематично, але реально виконати робочий орган у вигляді каскаду з декількох плоских похилих лотків, розташованих один над іншим, або за рахунок реалізації певного напрямку коливань забезпечити зигзагоподібне переміщення гранули у лотку півкруглого перетину.

Зміцнений вібраційним способом окатиш отримує багат шарову структуру із зовнішнім шаром у вигляді ущільненої кірки товщиною 0,17-0,20 діаметру гранули. Випробування таких окатишів показало, що вони мають підвищену на 10-15% міцність (у першу чергу динамічну) у порівнянні зі звичайними зразками. Подібний ефект поширюється й на гранули після випалу. Їх міцність зростає на 15-23% [11,12].

Такий результат пояснюється зменшенням пористості віброущільнених окатишів на 26,5%. Крім того, внаслідок вібраційної обробки знижується вологість гранул на 19,3% [11]. Останній показник сприяє кращому зберіганню цілісності окатиша у процесі термічного випалу через меншу ймовірність його руйнування внаслідок перетворення внутрішньої вологи на пар і розриву гранули. Залишається додати про суттєве скорочення виходу дріб'язку (класу –3 мм) – не менше, ніж у 2 рази.

Для практичної реалізації запропонованого способу було розроблено технічне рішення лінії для виробництва залізородних окатишів у складі послідовно встановлених чашкового огу-

дквача, вібраційної зміцнювальної установки та приймального стрічкового конвеєра (рис. 1) [10, 14].



**Рис. 1.** Схема лінії для виробництва сирих окатишів: 1 – огрудкувач чашковий; 2 – установка віброзміцнювальна; 3 – конвеєр стрічковий; 4 – лотки; 5 – пружні опори; 6 – вал дебалансний; 7 – електродвигун; 8 – муфта

Випробування у лабораторних умовах експериментального зразку машини для вібраційного зміцнення сирих окатишів МВОК продемонструвало ефективність використання такої операції обробки сирих окатишів та її режимних параметрів [11]. Під час проведення подальших досліджень на її базі було розроблено декілька варіантів конструктивного виконання віброзміцнювального пристрою (моделі ОЛВ, ОЖВ, ОВЛ, ВОК), які відрізнялися динамічною схемою і показниками економного використання енергії та матеріалів. Технічні характеристики цих конструкцій разом із згаданою вище моделлю МВОК приведені у табл. 1 [15].

Таблиця 1

Технічні характеристики віброзміцнювальних установок КГРІ

Показник	Тип віброзміцнювального пристрою				
	ОЛВ	ОЖВ	ОВЛ	ВОК	МВОК
Продуктивність, т/г	40	80			
Частота коливань, Гц	15-25				
Амплітуда коливань, мм	2-4				
Час віброобробки, хв.	2-3				
Потужність приводу, кВт	30				22
Маса, кг	3760	3000	5000		3200

Таким чином, необхідність практичного впровадження попереднього вібраційного зміцнення сирих окатишів у технологічному процесі огрудкування залізорудної сировини представляється цілком доведеною, але питання вибору раціональної динамічної схеми пристрою для його промислової реалізації досі залишається на порядку денному.

**Постановка задачі.** Для вирішення цього питання потрібно провести порівняльний аналіз динамічних схем існуючих конструкцій установок для вібраційного зміцнення сирих окатишів для обґрунтування найбільш досконалої з них з точки зору виконання поставленої у роботі мети та забезпечення необхідних техніко-економічних показників.

**Викладення матеріалу та результати досліджень.** Представлені у табл. 1 машини мають однакові режими коливань робочих органів (частоту, амплітуду, час обробки), рекомендовані викладеними вище результатами дослідження процесу вібраційного зміцнення сирих окатишів, але виконані за різними конструктивними схемами. Насамперед, це стосується робочих органів та вібраційних приводів, що генерують їх коливання. Для реалізації потрібного режиму вібраці-

йного транспортування сипкого матеріалу, у тому числі окатишів, окрім частотно-амплітудних характеристик, важливе значення мають кут нахилу робочого органу віброустановки, кут вібрації (кут між напрямком дії змушеного зусилля віброприводу та площиною робочого органу), траєкторія коливань робочого органу, його форма тощо.

Аналіз конструктивних схем цих установок показує, що вони мають різні кути нахилу робочого органу (від 6° у ВОК до 20° в ОЖВ), різні кути вібрації (від 45° в ОВЛ до 96° у ВОК), його довжину (до 5 м), ширину (від 1,1 до 2 м), кількість (від 5 в ОЛВ до 14 у ВОК) і форму (плоску у ВОК, де для набору необхідної довжини транспортування декілька лотків розташовуються один над іншим у вигляді каскаду, та півкруглу у решті конструкцій для забезпечення зигзагоподібної траєкторії руху окатишів).

Що стосується траєкторії коливань робочих органів, то у більшості конструкцій вона має кругову форму, яка забезпечується одновальним дебалансним віброприводом. Площа цих коливань по різному зорієнтована в них відносно площі робочого органу (під тим чи іншим згаданим вище кутом вібрації). І лише в пристрої ВОК використовується двовальний самобалансний вібропривод, що реалізує більш-менш спрямовані коливання лотків (сильно витягнутий еліпс).

Для вибору найбільш раціональної динамічної схеми у розглянутих установках доцільно визначити величини коефіцієнтів режиму вібрації, які в них реалізуються. Цей універсальний показник ефективності роботи вібротранспортної установки визначається за наступною формулою [2,8,9]

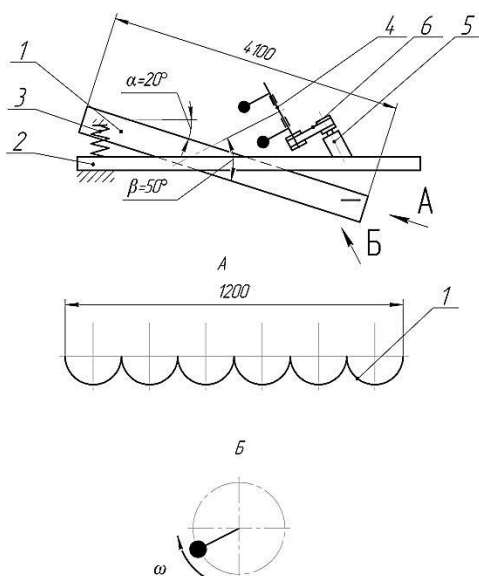
$$k_p = \frac{A\omega^2 \sin \beta}{g \cos \alpha}, \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда коливань робочого органу, м;  $\omega = \frac{\pi n}{30}$  – кругова частота коливань робочого органу (змінення величини змушеного зусилля), рад/с ( $n$  – частота коливань у кол/хв.);  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння;  $\alpha$  – кут нахилу робочого органу до горизонту, град.;  $\beta$  – кут вібрації, град.

Виберемо з табл. 1 середні значення режиму вібрації пристроїв:  $A = 3$  мм;  $n = 20$  Гц = 1200 кол/хв., звідки  $\omega = 125,6$  рад/с. Тоді значення коефіцієнту  $k_p$  за формулою (1) становитимуть: для установок МВОК, ОЛВ та ВОК – близько 5, ОВЛ та ОЖВ – 3,5-4. Перша величина представляється занадто великою, адже для забезпечення режиму вібротранспортування з підкиданням частинок вантажу оптимальне значення коефіцієнту режиму вібрації  $k_p$  має знаходитися у межах від 1 до 3,3. Для підвищення інтенсивності процесу бажано було б мати його ще більшим, але тут починають сильно зростати динамічні навантаження на підшипникові вузли, які є найвідповідальнішими конструктивними елементами вібраційних приводів інерційного типу [2,8,9]. Крім того, слід відзначити недостатньо велику продуктивність пристрою ОЛВ.

Отже, найбільш раціональні динамічні схеми мають пристрої ОВЛ та ОЖВ. Але, з огляду на те, що перша установка має суттєво більшу масу, беззаперечну перевагу потрібно віддати конструкції ОЖВ. Для зниження коефіцієнту  $k_p$  у ній до рекомендованої максимальної величини можна трохи зменшити частоту  $n$  або амплітуду  $A$  (відповідно до приблизних величин у 18 Гц чи 1080 кол/хв. та 2,5 мм).

Динамічна схема установки ОЖВ показана на рис. 2. Вона має нахилений під кутом 20° до горизонту робочий орган 1 довжиною 4100 мм, що спирається на опорну раму 2 за допомогою амортизаторів 3 і складається з шести поздовжніх лотків півкруглого поперечного перетину загальною шириною 1200 мм. Вібропривод машини закріплений над робочим органом і має вигляд одновального дебалансного вібратора 4 з двома периферійними дебалансами. Вал вібратора отримує крутний момент від електродвигуна 5 через клинопасову передачу 6 і забезпечує кругові коливання робочого



**Рис. 2.** Динамічна схема установки ОЖВ для віброзміцнювальної обробки сирих окатишів: 1 – орган робочий; 2 – рама опорна; 3 – амортизатори; 4 – вібратор дебалансний; 5 – електродвигун; 6 – передача клинопасова

органу у площі, яка утворює з останнім кут  $50^\circ$ . Завдяки цьому гранули під час поступального пересування від завантажувального кінця робочого органу здійснюють зигзагоподібні рухи у кожному з шести його лотків і знаходяться на них протягом часу, не-обхідного для зміцнення їх поверхневого шару.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Отримані результати дають змогу зупинитися на найбільш досконалій конструкції установки для вібраційного поверхневого зміцнення сирих окатишів, провести повномасштабні промислові випробування і на основі їх результатів зробити висновок про доцільність її практичного використання на вітчизняних огрудкувальних виробництвах у технологічному процесі виготовлення залізородних окатишів.

#### Список літератури

1. Громадський А.С. Машини допоміжних процесів переробки руд / А.С. Громадський, Ю.Г. Горбачов, А.С. Ліфенцов. – Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2012. – 276 с.
2. Громадський А. С. Проектування гірничих машин і комплексів для видобутку та переробки руд: Навч. посіб. для студ. вищих і серед. спец. навч. закладів / А.С. Громадський, Ю.Г. Горбачов, А.О. Хруцький, О.С. Ліфенцов. – Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2017. – 528 с.
3. Бережний М.М. Збагачення та окускування сировини / М.М. Бережний, В.П. Мовчан. – Кривий Ріг: 2000. – 365 с.
4. Маерчак М. Производство окатышей. Пер. со словацкого / М. Маерчак. – М.: Metallurgiya, 1982. – 232 с.
5. Кожевников И.Ю. Окускование и основы металлургии / И.Ю. Кожевников, Б.М. Равич. – М.: Metallurgiya, 1991. – 304 с.
6. Іскович-Лотоцький Р.Д. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій / Р.Д. Іскович-Лотоцький, Р.Р. Обертюх, І.В. Севостьянов // – Вінниця: Універсум, 2006, - 291 с.
7. Blechman I.I. Revisiting the models of vibration screening process / I.I. Blechman, L.I. Blechman, L.A. Vaisberg, K.S. Ivanov. – Vibroengineering PROCEDIA, 2014, V. 3, PP. 169-174.
8. Гончаревич И.Ф. Вибротехника в горном производстве / И.Ф. Гончаревич. – М.: Недра, 1992. – 319 с.
9. Вибрации в технике: Справочник. Вибрационные процессы и машины, т. 4 / Под ред. Э.Э. Лавендела. - М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
10. Разработка способов и средств повышения качества окатышей на Центральном ГОКе ГПО «Южруда». Проведение экспериментальных исследований и разработка по их результатам экспериментального образца машины для повышения качества окатышей/Отчет о НИР № 11-191-88/рук. А.М. Кальницкий. – Кривой Рог: КГРИ, 1988. – 47 с.
11. Разработка технологии и техники для повышения технического уровня окатышей ЦГОКа / Отчет о НИР № 11-279-89 / рук. А.М. Кальницкий. – Кривой Рог: КГРИ, 1990. – 45 с.
12. Каварма И.И. Повышение качества сырых окатышей виброупрочнением / В кн.: Разработка рудных месторождений, вып. 74 / И.И. Каварма, И.В. Кулик. – Кривой Рог: 2001. – С. 128-131.
13. А.с. СССР № 1678063 «Способ получения сырых окатышей», С22В 1/24, 1992 / И.И. Каварма, А.М. Кальницкий, В.Ф. Кондратенко, Ю.Г. Горбачев.
14. А.с. СССР № 1617962 «Линия для производства железородных окатышей», С22В 1/24, 1992 / И.И. Каварма, А.М. Кальницкий, В.Ф. Кондратенко, Ю.Г. Горбачев, А.Л. Мондрус, В.Н. Кумченко.
15. Сорочинська А.Р. Аналіз вібраційних технологій і техніки підвищення якості окатишів в умовах ЦГЗК / А.Р. Сорочинська / Кваліфікаційна робота магістра. Рукопис. – Кривий Ріг: КНУ, 2020. – 86 с.

Рукопис подано до редакції 18.03.24

УДК 658.562.64:622.3

А.А. АЗАРЯН, д-р техн.наук, проф., Криворізький національний університет  
О.В. ШВИДКИЙ, інженер-програміст, ТОВ «Рудпромгеофізика»

## ПОШУК ШЛЯХІВ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ТА ЗУБОЖІННЯ ПІДРВАНОЇ ГІРСЬКОЇ МАСИ

**Мета.** Підвищення точності оперативного контролю якості залізородної сировини та зниження втрати руд при видобутку.

**Методи дослідження.** Безперервний контроль за становищем експлуатаційної свердловини в масиві гірських порід з урахуванням Ейлерового, зенітного та азимутального кутів електронного інклінометра.

**Наукова новизна** Використання електронного інклінометра у поєднанні з результатами ядерно-фізичного каротажу вибухових свердловин дозволяє оптимізувати просторове положення зонда в гірському масиві із зазначенням точних зенітних та азимутальних кутів, що запобігає переходу датчика в контактну зону.

**Практична значимість.** Відомо, що вміст корисного компонента гірських порід є важливим параметром при видобутку та переробці мінеральної сировини. Встановлено, що підвищення вмісту корисного компонента на один