

вплив вологи на вміст загальної сірки, при перерахунку палива із сухого стану на робочий, оцінюється в середньому більш ніж у 20%, а максимальний вплив для окремих шахтопластів може перевищувати 60%;

вміст сірки в горючій та негорючій частинах палива, органічній масі та мінеральних домішках практично не залежить від ступеня метаморфічних перетворень шахтопластів. Можна лише констатувати деяку спрямованість зниження вмісту сірки з посиленням ступеня метаморфічних перетворень.

Список літератури

1. **Авгушевич И.В., Сидорук Е.И., Броневец Т.М.** Стандартные методы испытания углей. Классификации углей. М.: «Реклама мастер», 2019. 576 с.
2. **Onifade, M., and B. Genc.** A review of research on spontaneous combustion of coal. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(3), 303-311.
3. **Nosal, D., Kononov S., Shevchenko V.** Determination the injuries probability of coal mines workers. Mining of mineral deposits, 2021, 15(2), 47-53.
4. **Tarasov, V., Antoshchenko, M., Rudniev, Y., Zolotarova, O., Davidenko, N.** Metamorphism indicators for establishing the endogenic fire hazard of coal mining plants in mining. International Journal of Environmental Science and Development this link is disabled, 2021, 12(8), 242-248.
5. **Греков С.П., Всякий А.А.** Влияние содержания серы в углях на вероятность их самовозгорания / Уголь Украины. 2014. № 4. С. 18-21.
6. Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины: КД 12.01.402 - 2000. Донецк : НИИГД. 2000, 216 с.
7. Справочник по качеству и обогатимости каменных углей и антрацитов Украинской ССР (Донбасс в границах УСССР, Львовско-Волынский бассейн). Характеристика качества каменных углей и антрацитов Украинской ССР. М.: Недра. 1965. 204 с.
8. Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов. Донецкий научно-исследовательский угольный институт. М.: Недра. 1972. 168 с.
9. ГОСТ 27313-95 (ИСО 1170-77) Межгосударственный стандарт. Топливо твердое минеральное Обозначения показателей качества и формулы пересчета результатов анализа для различных состояний топлива. Издание официальное. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск. 2003. 15 с.
10. **Antoshchenko M., Tarasov V., Zakharova O., Zolotarova O., Petrov A.** Analysis of metamorphism and tendency of black coals to spontaneous combustion. Technology audit and production reserves, 2019, 1(50), 18-25

Рукопис подано до редакції 03.11.2021

УДК 669.162.267.6

О.С. ВОДЕННИКОВА, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет
Л.В. ВОДЕННИКОВА, асист., Запорізький державний медичний університет
Д.Ю. БАБОШКО, канд. техн. наук, ст. викл., Криворізький національний університет
П.В. ГОЛОВКОВ, студ., Запорізький національний університет

ПОЗАДОМЕННА ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ ЧАВУНУ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АНАЛІТИЧНО-РОЗРАХУНКОВА ОБРОБКА ПОКАЗНИКІВ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

Мета. Метою роботи є аналіз досвіду сучасних технологій позадоменної десульфуратії чавуну та на їх основі аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних показників десульфуратії чавуну.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями: визначити найбільш техніко-економічно ефективні реагент-десульфуратори для позадоменної десульфуратії чавуну; проаналізувати сучасні методи позадоменної десульфуратії чавуну; на основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропонувати аналітично-розрахункову обробку показників десульфуратії чавуну.

Методи досліджень. При узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку сучасного огляду українського та закордонного досвіду позадоменної десульфуратії чавуну використовувався комплексний підхід. Аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних залежності ступеня використання магнію на десульфуратію чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні в якості реагент-десульфуратору гранульованого магнію марки МГП-99 (згідно з ТУ 1714-004-43055164-2004) та суміші гранульованого магнію й флюїдизованого вапна (згідно з ТУ У 26.5-00193714-042-2001) проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

Наукова новизна. Показано залежність ступеня використання магнію на десульфуратію чавуну (на прикладі

природно-легованого та переробного чавунів) від концентрації сірки в металі при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію та суміші гранульованого магнію й флюїдизованого вапна. Здобула подальший розвиток аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних з оцінкою коефіцієнту детермінації, що показує на можливості збільшення ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну до 90 %.

Практичне значення. Результати теоретичного аналізу ефективності сучасних технологій позадоменної десульфурації чавуну можуть бути використані при викладанні спеціальних дисциплін для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія».

Результати. Показано можливості українських та закордонних металургійних підприємств при використанні різних реагент-десульфураторів для позадоменної десульфурації чавуну досягти ступеня десульфурації чавуну в межах 50–99 % та вмісту сірки після десульфурації до 0,005 %.

Ключові слова: десульфурація чавуну, реагент-десульфуратор, ступінь десульфурації, ступінь використання магнію на десульфурацію.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-28-35

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Потенціал гірничо-металургійного комплексу України базується на наявності достатньої власної сировинної бази, великої кількості виробничих потужностей та високим рівнем науково-технічного потенціалу [1]. При цьому на металургійних підприємствах найважливішими завданнями є оптимізація технології отримання металу для забезпечення економічно-обґрунтованих та конкурентоспроможних на світовому ринку металопродукції якісних марок сталі, зниження енергетичних і матеріальних витрат на виробництво [2].

На сьогодні в умовах доменного виробництва не завжди можливо забезпечити стабільне отримання якісного чавуну при одночасному збереженні високої продуктивності та економічності процесу. Тому все більш широке застосування для підвищення якості переробного чавуну отримує позапічне рафінування, що забезпечує виплавку високоякісних сталей з вмістом сірки менше 0,01 % [3]. Так позадоменна десульфурація дає змогу використовувати для виробництва чавуну не лише вугілля з високим вмістом сірки, а й дешеву низькосортну високосірчасту руду, хоча і призводить до подорожчання 1 тонни чавуну [4]. Процес позадоменної десульфурації чавуну підпорядковується тим же термодинамічним закономірностям, що і процес десульфурації в доменній печі [5]. Використання технологічних комплексів «установка десульфурації чавуну – сталеплавильний агрегат» та «установка десульфурації чавуну – сталеплавильний агрегат – установка «під-ківш»» стає все більш пріоритетними шляхами для отримання низькосірчастої сталі [6, 7].

Тому проблема аналізу механізму десульфурації металу при використанні різних реагент-десульфураторів, зокрема пошук шляхів підвищення ефективності використання магнію для позадоменної десульфурації чавуну залишається актуальним напрямком досліджень в металургійному виробництві.

Аналіз досліджень і публікацій. Найбільш популярними у всьому світі методами десульфурації чавуну є процес «Kanbara Reactor» (в якості реагенту використовується тільки вапно), процес «Ukraine Desmag» (моновприск магнію) та процес «Co-injection» (процес спільної інжекції магнію та вапна або карбиду кальцію).

У процесі «Kanbara Reactor» (Японія) (рис. 1а) вапно використовується в якості основного реагент-десульфуратора, іноді вводять CaF_2 (близько 10 % потоку) і/або додають Al_2O_3 . Реагент або вводять в чавун через обертові фурми разом з газом-носієм (зазвичай азотом), або додають зверху.

У процесі «Ukraine Desmag» гранульований магній вводять через фурму (рис. 1б). Тонкий шар шлаку (у порівнянні з процесами «Kanbara Reactor» та «Co-injection») призводить до збільшення втрат заліза під час відкачування шлаку. Для того щоб стабілізувати шлак та уповільнити процес десульфурації на більшості металургійних підприємств в верхню частину шлаку додають вапно або флюс. Процес моновприску магнію є дуже швидким завдяки використанню в якості реагент-десульфуратора магнію, але не дає змоги досягти вмісту сірки менше 0,005 % та є шкідливим і високо небезпечним для виробничого середовища.

Процес «Co-injection» (рис. 1в) поєднує в собі переваги вище зазначених методів. Так застосування магнію дозволяє швидко видалити сірку, а вапна – досягти малих значень концентрації сірки. Вапно іноді замінюють карбідом кальцію, який є більш ефективним, але через про-

блеми безпеки виробничого середовища цей варіант практично не використовується на нових металургійних підприємствах. Процес спільної ін'єкції магнію та вапна є гнучким та рентабельним, тому розглядаються як стандартна практика у світі киснево-конверторного виробництва сталі [8].

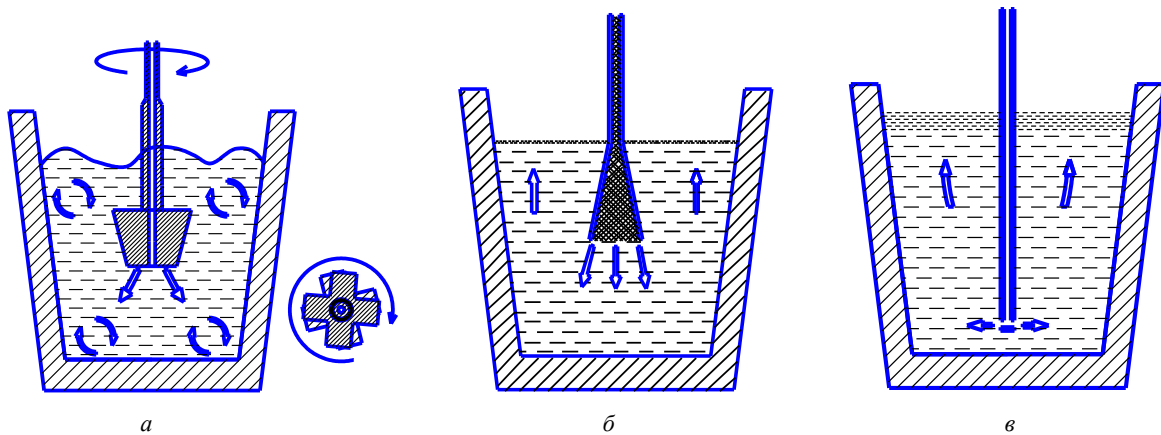


Рис. 1. Сучасні методи ковшової десульфурзації чавуну: *a* – процес Kanbara Reactor; *b* – процес Ukraina Desmag (з випарною камерою); *в* – процес спільної ін'єкції магнію та вапна (Т-подібна фурма)

Теоретичні основи десульфурзації базуються на хімічних реакціях між сіркою та реагентами, традиційними з яких (у порядку ефективності десульфурзації) є магній (Mg), карбід кальцію (CaC₂) та вапно (CaO) (табл. 1) [9].

На сьогодні магній є найбільш дорогим зі застосовуваних в промислових умовах реагент-десульфураторів та його використання дозволяє знижувати вміст сірки після десульфурзації до 0,005 % [10]. Зазвичай використовують для десульфурзації чавуну гранульований магній марок МГП-99 та МГС-99 (99,7–99,9 % Mg; до 0,04 % Fe; до 0,009 % Si, до 0,001 % Ni; до 0,02 % Al; до 0,03 % Mn; до 0,01 % Na; до 0,004 % Cu) [11].

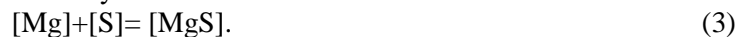
При обробці магнієм десульфурация чавуну може протікати в результаті взаємодії пароподібного магнію з розчищеною в металі сіркою за реакцією [12]



а також шляхом розчинення магнію в чавуні



і подальшої взаємодії з сіркою в обсязі металу



Таблиця 1

Реагент-десульфуратори для позадоменної десульфурзації чавуну [9]

Гранульований магній та магнійвмісні суміші	Інші види сумішей
Шматки магнію зі спеціальними ізоляційними обмазками, що вмішують глину, рідке скло та оксиди	Суміш з обпаленого вапна (90 %), плавикового шпату (5 %) та нафтового коксу (5 %)
Гранульований магній в струмені природного газу	Шлаки позапічної обробки сталі
Суміш вапна та магнію	Ціанамід кальцію
Порошок магнію, покритий шаром, що складається з хлоридів натрію, калію, магнію та кальцію	Вдування флюсів на основі вапняку
Спосіб обробки чавуну введенням дроту, що вміщує в порожкоподібному стані магній та рідкоземельні метали	Суміш на основі оксиду кальцію, карбїду кальцію та карбонату кальцію. Кальцинована сода
Введення магнію сумісно з коксом	Карбід кальцію
Суміш магнію з карбїдом кальцію або алюмінієм та глиноземом	Вапно та вапняк
Суміш гранул магнію з гранульованим основним шлаком	Розкислення металу гранулами алюмінію

В металургійних умовах вапно доступно практично в необмежених кількостях, але основними його недоліками при використанні в якості реагент-десульфуратора для поза доменної десульфурзації чавуну є високі витрати (до 15 кг/т чавуну), великі втрати чавуну зі шлаком, який видаляється з ковша після обробки, та великі втрати температури чавуну.

Кальцинована сода (Na₂CO₃) також є порівняно дешевим реагентом, після обробки чавуну нею шлаки мають малу в'язкість, в результаті чого втрати чавуну з ковшовим шлаком практич-

но повністю відсутні [10]. Але при обробці содою в атмосферу виділяється значна кількість летючих речовин, тому цей метод вимагає обов'язкової наявності стендів, які обладнані добре діючими газоуловлюючими пристроями [13].

Карбід кальцію (CaC_2) є ефективним реагент-десульфуратором чавуну, застосування якого дозволяє знижувати вміст сірки в металі до $\leq 0,005\%$ [10].

Значний інтерес представляє для позадоменної десульфурації чавуну також і використання вторинних магнієвих сплавів. Так при заміні чистого магнію вторинним сплавом, що містить 12,2 % алюмінію, рівень використання магнію на десульфурацію чавуну збільшується з 35,8 до 46,6 % [14].

Дослідження роботи [15] показують можливість застосування екзотермічних брикетів, що містять магнезит, для десульфурації чавуну замість магнію. Авторами встановлено позитивний вплив на процес десульфурації чавуну використання пошарового складання брикетів із сумішей оксиду магнію з алюмінієм та оксиду заліза з алюмінієм, а також застосування у складі брикету до 10 % інертного наповнювача (металевої стружки).

В промислових умовах зазвичай використовують наступні способи введення реагент-десульфуратору для десульфурації чавуну [10]:

міксерна інжекція – глибоке вдування через фурму, футеровану вогнетривкими матеріалами, в сигароподібному чавунувозному ковші міксерного типу;

ківшева інжекція – глибоке вдування через фурму, футеровану вогнетривкими матеріалами, в заливальному чавунувозному ковші;

механічне перемішування – додавання реагент-десульфуратору з послідовним механічним перемішуванням.

Аналіз існуючих технологій позапічної десульфурації різними видами реагент-десульфураторів (табл. 2), представлений у роботі [16], показав, що найбільш ефективними є технології інжекції сумішей на основі одного магнію (ступінь десульфурації 95–99 %), суміші гранульованого магнію з вапном (ступінь десульфурації 95–98 %), технологія дугового глибинного відновлення (ступінь десульфурації 90–98 %), а також обробка екзотермічними брикетами (ступінь десульфурації 65–85 %). Автори зазначають, що більшість технологій пов'язані з використанням додаткового устаткування, розміщення якого потребує наявності вільного місця безпосередньо біля робочої ділянки для встановлення додаткового устаткування та проведення часткової модернізації виробничого циклу. Тому для виробництв, де використання зазначених вище технологій утруднене, запропоноване використання технології обробки розплаву екзотермічними брикетами та використання порошкового дроту з магнієм.

Постановка задачі. Метою роботи є аналіз сучасного досвіду технології позадоменної десульфурації чавуну та на її основі аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних показників десульфурації чавуну.

Викладення матеріалу та результати. Ефективність результатів видалення сірки з розплаву визначається наступними показниками: концентрацією сірки в розплаві; швидкістю процесу десульфурації; коефіцієнтом розподілу сірки між шлаком і металом; ступенем десульфурації, ступенем використання реагент-десульфуратору на десульфурацію чавуну.

У роботі приведено аналітично-розрахункову обробку відомих експериментальних та розрахункових даних залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки при застосуванні в якості реагент-десульфуратору гранульованого магнію та суміші гранульованого магнію й флюїдизованого вапна.

Обробку аналітичних залежностей проводили кореляційно-регресійним методом в програмі Excel з оцінкою коефіцієнту детермінації R^2 за допомогою логарифмічної регресії. Величина достовірності апроксимації відображала близькість значення лінії тренду до фактичних даних.

У роботах [12, 17] проаналізовано результати промислових досліджень десульфурації передільного та природно-легованого чавуну з використанням у якості реагент-десульфуратору гранульованого магнію. Аналіз теоретичних, лабораторних та промислових досліджень десульфурації чавуну магнієм показав, що змінення розчинності магнію у чавуні не має суттєвого впливу на ефективність десульфурації металу, при цьому при інжектуванні гранульованого магнію у чавун з використанням в якості газа-носія аргону або азоту підвищення ефективності використання десульфуратору може бути досягнуте в результаті зниження концентрації магнію у транспортувальному газі [12].

Порівняльний аналіз сучасних технологій позадоменної десульфурзації чавуну [16]

Технологія	Особливості технологічного процесу	Хімічний склад реагент-десульфуратору, %	Витрата реагент-десульфуратору, кг/т розплаву	Ступінь десульфурзації, %
Обробка твердими шлаковими сумішами	Вводять на поверхню розплаву при наповненні заливного ковша	CaO = 65–85; CaF ₂ = 10–25; Al = 5–10	15–20	30–75
Обробка рідкими синтетичними шлаками	Вводять в рідкому стані в ківш перед його наповненням	CaO = 50–65; SiO ₂ < 3; CaF ₂ < 10 Al ₂ O ₃ = 30–45; MgO = 3–5; FeO < 1;	10–50	60–80
Обробка Na ₂ CO ₃	Порошок Na ₂ CO ₃ вдувають в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці газу-носія	Na ₂ CO ₃ = 100	5–10	80–90
Обробка порошкоподібною сумішшю, що містить вапно	Суміш подають на поверхню розплаву, який перемішується роторною мішалкою та інертним газом	CaO = 90; CaF ₂ = 5; кокс = 5	5–10	60–80
Інжекція сумішей на основі вапна та магнію	Реагент інjektують в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці інертного газу-носія.	Mg = 30; CaO = 70	5–8	95–98
Інжекція сумішей на основі магнію	Гранульований магній, покритий солями натрію, інjektують в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці природного газу	Металевий магній = 100	0,3–0,5	95–99
Введення магнію в кусках	Куски магнію вводять у випарниках дзвоноподібної форми в об'єм рідкого розплаву	Металевий магній = 100	1,08,0	50–60
Обробка за технологією дугового глибинного відновлення	Активний реагент вводять у формі оксиду, який відновлюється безпосередньо в об'ємі розплаву за рахунок теплоти електричної дуги	Al = 15–25; MgO = 25–65; CaO = 25–50	1,53,0	90–98
Обробка магнієм, що відновлений за рахунок тепла суміжних хімічних реакцій у об'єм рідкого металевого розплаву.	Із суміші, що містять оксиди магнію, оксиди кальцію, оксиди заліза та металевий алюміній, формують брикети, які вводять у ківш при наповненні	MgO = 10–20; CaO = 5–10; Al = 20–30; FeO = 40–65	1,5–2,0	65–85
Обробка порошковим дротом	Порошковий дріт, що містить активний реагент, вводять безпосередньо в об'єм розплаву за допомогою трайбапарату	Mg = 78; CaC ₂ = 22	0,3–0,6	50–60

Результати залежності ступеня використання магнію на десульфуріацію природного хромонікелевого чавуну (електропічного феронікелю ТОВ «Побузький феронікелевий комбінат» (1,9–3,0 % С; 1,2–2,2 % Cr; 1,6–6,6 % Si; 3,9–6,0 % Ni; 0,2–0,4 % Co; 0,09–0,14 % P; 0,2–0,3 % Mn; 0,024–0,119 % S)) в 30-тонних заливальних ковшах при обробці гранульованим магнієм, який вводили в метал через фурму з випарною камерою з одночасною незалежною подачею в неї азоту [12, 17], описують модель «Logarithmic-X» (рис. 2, крива 1).

Запропонована нами аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфуріацію чавуну від концентрації сірки в металі показала можливість досягнення значення ступеня використання магнію в межах до 0,74 (рис. 2, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 97,57 % лінію логарифмічної регресії (рис. 2, крива 3).

Результати обробки переробного чавуну з вдуванням повітря в випарну камеру та без нього показано на рис. 3, крива 1. Автори роботи [12] стверджують, що при більш високих значеннях вмісту сірки середні значення ступеня використання магнію при вдуванні повітря у випарну камеру та без нього практично не відрізняються, тобто обробка чавуну сумішшю пара

магнію та азоту не лише не погіршувала ефективність використання десульфуратору, але і дозволяла компенсувати окислення частини магнію киснем повітря.

Запропонована нами аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну від концентрації сірки показала можливість досягнення значення ступеня використання магнію в межах до 0,83 (рис. 3, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 99,34 % лінію логарифмічної регресії (рис. 3, крива 3).

Для умов киснево-конвертерного цеху ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» при продувці чавуну в 300-тонному заливальному ковші в потоці аргону сумішшю гранульованого магнію марки МГП-99 (згідно з ТУ 1714-004-43055164-2004) фракції 200–1000 мкм та порошкоподібного вапна (≥ 94 % CaO та $\leq 0,04$ % S) (згідно з ТУ У 26.5-00193714-042-2001) фракції менше 100 мкм, флюїдизованого силіконовим маслом у процесі помелу, в роботах [18, 19] показано, що при глибокій десульфурації чавуну з вихідним вмістом сірки 0,020–0,030 % вапно, що вдувається спільно з магнієм в метал, не має суттєвого впливу на результати обробки. Представлена у роботі [19] залежність ступеня використання магнію на десульфурації чавуну при вдуванні суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна від концентрації сірки в металі описує модель «S-curve» (рис. 4, крива 1).

Запропонована нами аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну від концентрації сірки в металі показала можливість досягнення значення ступеня використання магнію в межах до 0,68 (рис. 4, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 95,11 % лінію логарифмічної регресії (рис. 4, крива 3).

Висновки та напрямок подальших досліджень. В умовах сучасних металургійних підприємствах для ковшової десульфурації чавуну найбільш затребуваним є процес «Co-injection», при якому здійснюється спільна інжекція в розплав гранульованого магнію та вапна або карбиду кальцію в потоці азоту.

Аналіз існуючих технологій позапічної десульфурації різними видами реагент-

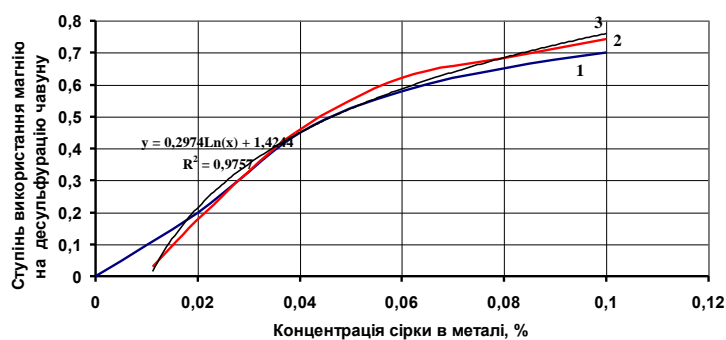


Рис. 2. Залежність ступеня використання магнію на десульфурацію природно-легованого чавуну при застосуванні гранульованого магнію від концентрації сірки в металі: 1 – дослідження роботи [12, 17]; 2 – запропонована аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

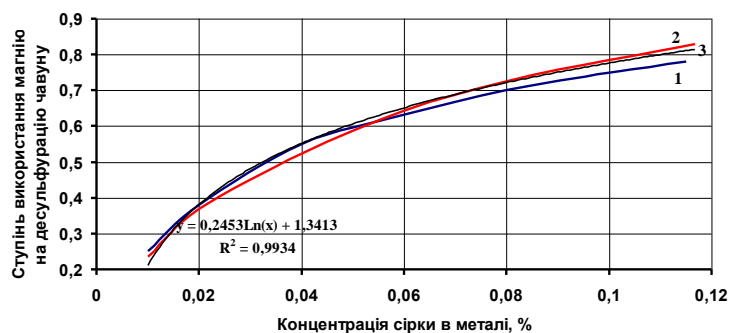


Рис. 3. Залежність ступеня використання магнію на десульфурацію переробного чавуну при застосуванні гранульованого магнію від вмісту сірки в металі: 1 – дослідження роботи [12, 17]; 2 – запропонована аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

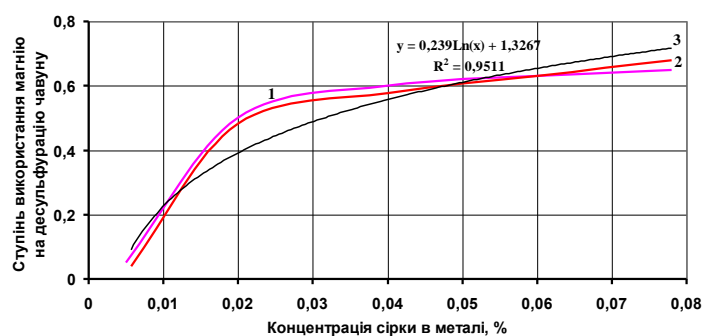


Рис. 4. Залежність ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну в 300-т заливальних ковшах при вдуванні суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна від концентрації сірки в металі: 1 – промислові дослідження роботи [19] (в умовах ВАТ «Алчевський металургійний комбінат»); 2 – запропонована аналітично-розрахункова модель [20]; 3 – лінія тренду кривої 2

десульфураторів показав, що найбільш ефективними є технології інжекції сумішей на основі одного магнію (ступінь десульфурації 95–99 %), суміші магнію з вапном (ступінь десульфурації 95–98 %), технологія дугового глибинного відновлення (ступінь десульфурації 90–98 %), а також обробка екзотермічними брикетами (ступінь десульфурації 65–85 %).

На основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропоновано аналітично-розрахункову обробку показників десульфурації чавуну при застосуванні різних реагент-десульфураторів та показано, що:

при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію природно-легованого хромонікелевого чавуну в 30-тонних заливальних ковшах при обробці гранульованим магнієм отримана аналітично-розрахункова модель описує на 97,57 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,74;

при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію переробного чавуну з вдуванням повітря в випарну камеру та без нього отримана аналітично-розрахункова модель описує на 99,34 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,83;

при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну в 300-т заливальних ковшах при вдуванні суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна отримана аналітично-розрахункова модель описує на 95,11 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,68.

Подальший розвиток дослідження полягає в аналізі залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації при використанні різних технологій позадоменної десульфурації чавуну (зокрема, технології введення порошкоподібного магнієвого дроту, вдування порошкоподібних магнійвмісних сумішей, вдування суміші гранульованого магнію та вапна).

Список літератури

1. **Фурдичко Л.Є.** Сучасний стан та перспективи металургійної галузі України: фінансові показники розвитку, експорт-імпорт продукції / Л.Є. Фурдичко, Ю.В. Скварко // Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України. – 2016. – Вип. 3. – С. 102–106.
2. **Богушевський В.С.** Ковшове рафінування чавуну магнієвмісними реагентами / В.С. Богушевський, М.В. Каленчук // Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6 : Міжнародна наукова конференція (Київ, 1–2 грудня 2016 р.). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С. 354–357.
3. **Чуйко Н.М., Перевазко А.Т., Даничек Р.Е., Иванов В.Г., Козак В.В.** Внепечные способы улучшения качества стали. – К.: Техніка, 1978. – 128 с.
4. Газета Кабінету Міністрів України Урядовий кур'єр. Металурги повинні працювати на українському вугіллі [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/metallurgi-povinni-pracuyuvati-na-ukrayinskomu-vugil/>
5. Роль и задачи внепечной обработки чугуна [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://uas.su/books/2011/pigiron/211/razdel211.php>
6. **Вергун А.С.** Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер» / А.С. Вергун, В.Г. Кисляков, В.Ф. Поляков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. научн. тр. – 2007. – Вип. 14. – С. 112–119.
7. **Вергун А.С.** Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер–КП» / А.С. Вергун, В.Г. Кисляков, В.Ф. Поляков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. научн. тр. – 2007. – Вип. 15. – С. 99–110.
8. **Франк Шрама.** Сравнение ведущих методов десульфурации чугуна / Франк Шрама, Барт Ван Дер Берг, Гвидо Ван Хаттум // Теория и технология металлургического производства. – 2015. – № 1(16). – С. 38–43.
9. **Потапова М.В.** Современные технологии внедоменной десульфурации чугуна / М.В. Потапова, Р.А. Ишмурастов, Т.М. Насыров // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 1(14). – С. 26–27.
10. **Робей Р.** Внедоменная обработка чугуна с учётом конкретных производственных условий / Р. Робей, М. Уайтхед // МРТ. Металлургическое производство и технологии металлургических процессов. – 2014. – № 1(2014). – С. 16–24.
11. Гранулированный магний МГП-99 [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://ferrolabs.ru/products/magniy/granulirovanny-magniy-mgp-99/>
12. **Зборщик А.М.** Пути повышения эффективности использования магния для внедоменной десульфурации чугуна / А.М. Зборщик, П.С. Харлашин, Н.В. Косолап // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць. 2014. – Вип. 28. – С. 7–17.
13. **Сігарьов Є.М.** Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Позаагрегатна обробка розплавів» освітньо-професійної програми підготовки магістрів за напрямом 136 Металургія. – Кам'янське : ДДТУ, 2016. – 42 с.
14. Внедоменная десульфурация чугуна вторичным магниевым сплавом / **В.А. Дворянинов и др.** // *Металлург.* – 1979. – № 9. – С. 14–17.
15. Технология обработки чугуна магниезиодержащими брикетами / **Б.М. Бойченко, К.Г. Низяев, А.Н. Стоянов и др.** // Инновационные технологии внепечной обработки чугуна и стали : научно-практическая конференция. – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011.
16. Позапічна десульфурація рідкого чавуну в контексті завдань вітчизняної металургії / **Л. С. Молчанов,**

К. Г. Нізяєв, Б. М. Бойченко та ін. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. – № 2. – С. 38–41.

17. **Зборщик А.М.** Влияние условий растворения магния в чугуна на эффективность десульфурации металла / А.М. Зборщик // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах : материалы VIII Международной научно-технической конференции (Мариуполь, 7–9 сентября 2010 г.). – Мариуполь : ПГТУ, 2010. – С. 102–107.

18. **Зборщик А.М.** Эффективность использования флюидизированной извести для десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах / А.М. Зборщик, С.В. Куберский, Г.Я. Довгалюк, В.Н. Беломера // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Металургія. – 2011. – Вип. 13 (194). – С. 53–60.

19. Десульфурация чугуна в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Алчевский металлургический комбинат» / **А.М. Зборщик, С.В. Куберский, Г.Я. Довгалюк и др.** // Металлы и литье Украины. – 2010. – № 7. – С. 9–12.

20. **Грибоводов С.С.** Аналітично-розрахункова обробка показників позадоменної десульфуратії чавуну /С.С. Грибоводов, О.С. Воденнікова, Л.В. Воденнікова // Молоді вчені 2019 – від теорії до практики: збірник матеріалів Х Міжнародної конференції молодих вчених. Секція 1 «Металургія, машинобудування, металообробка» (Дніпро, 7 березня 2019 р.). – Дніпро: НМетАУ, ІНІФН, 2019. – С. 20–23.

Рукопис подано до редакції 03.11.2021

УДК 622.74: 621.928.235

В.В. ЯЦУН, канд. техн. наук, доц., Центральноукраїнський національний технічний університет
О.Д. ПОЧУЖЕВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., В.Ю. ТИЩЕНКО, наук. співроб.
Криворізький національний університет

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОТА, ЩО ПРАЦЮЄ В РЕЗОНАНСНОМУ РЕЖИМІ

Метою роботи є дослідження процесу збудження двочастотних резонансних вібрацій короба грохоту пасивними автобалансирами.

Створено імітаційну модель модернізованого грохоту інерційного, у якому в якості віброзбудника використовується кульовий автобалансир, що дозволяє створювати двочастотні резонансні вібрації. Був виділений ряд основних параметрів, що впливають на стійкість двочастотних резонансних вібрацій. Установлено, що області існування двочастотних резонансних вібрацій мають великі межі, що дозволяє змінювати характеристики двочастотних резонансних вібрацій зміною багатьох параметрів. Зроблено висновок про можливість отримання позитивного ефекту від заміни інерційного віброзбудника на двочастотний резонансний.

Методи дослідження. Дослідження проводилися з використанням комп'ютерної САПР Solidworks для створення імітаційної моделі і модуля Cosmos Motion для моделювання динаміки вібромашини. Обробка отриманих даних проводилась в системі комп'ютерної алгебри Mathcad.

Наукова новизна. Визначені області зміни основних параметрів, що забезпечують швидке і гарантоване настання двочастотних резонансних вібрацій. Сформульовані та перевірені припущення щодо дії механізму виникнення двочастотних резонансних вібрацій.

Практична значимість. Поєднання переваг резонансної вібромашини із двочастотним віброзбудником дозволить одержати енергоефективну машину з підвищеною продуктивністю. Методика імітаційного моделювання, реалізована для вібраційного грохоту, може бути використана й для інших вібраційних машин.

Результати. В розробленій імітаційній моделі, що має ідентичні геометричні, масово-інерційні параметри й повністю відповідає натурному грохоту, установлено, що в широкій області зміни параметрів системи гарантовано наступають двочастотні резонансні вібрації. До цих параметрів віднесено: масу короба, масу коригувальних вантажів, масу дебалансу, частоту обертання дебалансу, жорсткість опор та сили в'язкого опору. Збільшення маси короба сприяє зменшенню нижчої частоти коливань. При цьому коригувальні вантажі автоматично підлаштовуються під зміну маси короба. Збільшення маси коригувальних вантажів прямопропорційно сприяє збільшенню амплітуди повільних коливань короба. Збільшення маси дебалансу в корпусі автобалансира прямопропорційно збільшує амплітуду швидких коливань короба. Збільшення частоти обертання ротора прямопропорційно збільшує швидкість швидких коливань короба. Був визначений ряд параметрів, що впливають на значення амплітуди повільних коливань.

Ключові слова: резонанс, двочастотний віброзбудник, дебаланс, автобалансир, грохот, імітаційне моделювання.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-35-40

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. У резонансних вібромашинах віброзбудники приводять у рух досить значні по площі робочі органи (сита, короби) з мінімальними витратами енергії [1-3].

Значне підвищення ефективності вібромашин забезпечується використанням у них дво- і більше частотних віброзбудників [4]. У таких машинах при коливаннях короба (решета, сита й