

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.187

Тарасов В.К.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Румянцев В.Р.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Мосейко Ю.В.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Панова В.О.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

Макушина Т.В.

Інженерний інститут Запорізького національного університету

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗНИЖЕННЯ ПОЛОМОК ГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

У статті розглянуто проблеми роботи діючих сталеплавильних електродугових печей, пов'язані з поломок графітових електродів. Проаналізовано відомі заходи та конструкції для зниження рівня вібрації електродотримачів. Вдосконалено компактний гаситель коливань динамічного типу. Проведено теоретичні дослідження гасителя на математичній та фізичній моделі електродотримача, вибрано раціональні параметри пристрою. Досягнуто зниження амплітуди коливань електродів до допустимих меж.

Ключові слова: дугова піч, електрод, поломки, гаситель, інерційна маса.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем електросталеплавильного виробництва є недостатня стійкість графітових електродів. Внаслідок поломок та місцевих пошкоджень виходять з ладу 5–7% електродів. Їхня аварійна заміна й невиробничі простої печі негативно впливають на собівартість продукції, а також конкурентоспроможність підприємства на міжнародному ринку сталі.

Вивчення причин пошкоджень електродів на виробництві під час здійснення наукових досліджень показало, що на поломки впливає не стільки вигорання бічної поверхні електродів внаслідок високих температур у робочій зоні печі, що іноді відбувається через недостатню якість електродів, скільки їхня вібрація. Остання виникає внаслідок дії електромагнітних сил між електродами в горизонтальній площині та пружності елементів системи електродотримачів. Особливо сильно ці недоліки проявляються у зв'язку із сучасною тенденцією підвищення введеної енергії в піч, тобто під час використання надпотужних дугових печей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для зменшення рівня вібрації електродів у горизонтальній площині застосовуються гасителі на основі інерційної маси [1–4].

Так, автори роботи [1] пропонують використовувати інерційну масу у вигляді катка, розташовану в полуму рукаві електродотримача в радіальній напрямній, яка жорстко закріплена на кінці рукава на боці головки електродотримача. В інерційній масі зроблені повздовжні пази, що створені вгнутими та з шорсткими поверхнями різних радіусів. Пази розташовані концентрично щодо один одного й заповнені в один шар кульками, що мають стійке положення в нижній частині пазів, причому пази розташовані у верхній частині маси.

Під час здійснення роботи дугової печі в разі виникнення коливань електродотримача маса під впливом інерційних сил звершує обкатку в радіальній напрямних. Кульки періодично зміщуються відносно вгнутих шорстких поверхонь.

В результаті періодичного складного руху інерційної маси виникає відцентрова реакція, яка передається системі електродотримача та врівноважує зовнішнє збудження. Власні коливання інерційної маси компенсуються силами тертя кульок між собою та зі вгнутими шорсткими поверхнями. При цьому витрачається енергія, зменшується амплітуда коливань усієї системи з електродом.

Використання пристрою розширює частотний діапазон демпфування коливань, однак докази ефективності гасіння коливань недостатньо підтверджені дослідженнями та теоретичними розрахунками, немає визначень ефективності впливу величини маси катка.

В роботі [2] запропоновано вдосконалення конструкції гасіння коливань. Виявлено недоліки інерційної маси циліндричної форми, що має різні швидкості кочення на повздовжніх краях маси. Це обумовлене різними радіусами руху катку відносно осі стояка, тобто центру коливань. Виникають гальмування та проковзування рухомого катку, що знижують ефективність процесу гасіння. У зв'язку з цим інерційна маса виконана у вигляді усіченого конуса з вершиною, розташованою на перетині осі рукава й стояка, а також сферичними торцями. Напрямна поверхня має конусоподібну форму та радіальні пази з кульками, розташованими в один шар, а також дугоподібними боковими гранями (рис. 1).

Під час виникнення горизонтальних коливань електрода 3 і, відповідно, рукава 1 розвиваються крутильні коливання щодо вертикального стояку 4. Інерційна маса 6 перекочується в протилежний бік по кулях 7, розташованих в пазах конусоподібної напрямної 8. Зміщення інерційної маси поздовжньою віссю рукава обмежується дугоподібними бічними упорами 9.

При цьому кінетична енергія інерційної маси компенсує енергію вимушених коливань рукава електродотримача. Амплітуда переміщень електрода суттєво знижується, а коливання електрода швидко загасають.

Впровадження такої конструкції стримувалося через істотні недоліки, а саме значні габарити й масу електродотримача, що збільшує витрати енергії на переміщення електрода й точність позиціонування електричної дуги, а також недостатні дослідження динаміки руху маси.

В роботі [3] представлена вдосконалена конструкція гасителя задля скорочення габаритів рукава та підвищення ефективності гасіння коливань (рис. 2). Пристрій містить рукав 1 з головкою

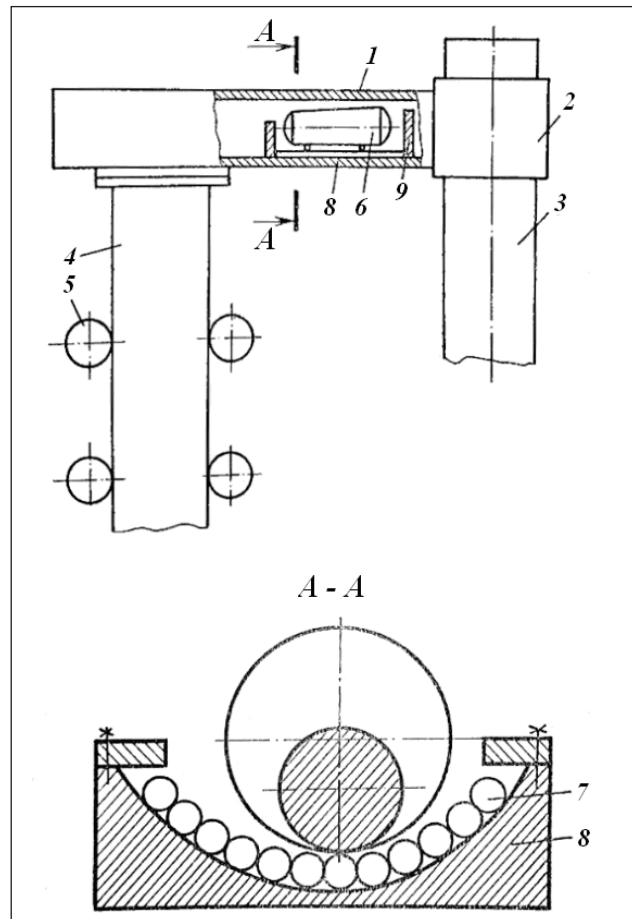


Рис. 1. Електродотримач зі вбудованим гасителем всередині рукава

електродотримача 2 та електродом 3. Рукав жорстко закріплений на стояку 4, що переміщується в напрямних опорних роликах 5. До головки 2 приварений корпус 6 виносного гасителя коливань. Усередині корпусу розташовані канавки, в які вставлені труби 7, вигнуті у вертикальній площині та заповнені кулями 8. На торцях труб зверху приварені накладки 9, до яких шарнірно підвішені кришки 10. Передбачено можливість зміни зазору для регулювання руху куль за допомогою спеціальних гвинтів 11. На нижньому кінці кришок встановлені виступи з пазами та кріпильними елементами 12, які шарнірно приєднані до накладок 13.

Під час виникнення коливань електрода рукав з гасителем повертається відносно стояка на деякий кут. Металеві кульки переміщуються до протилежного боку, різко вдаряючись об стінки кришок гасителя. Енергія удару, що виникає, суттєво зменшує енергію коливань електродотримача. Аналогічний процес відбувається під час повороту рукава в інший бік.

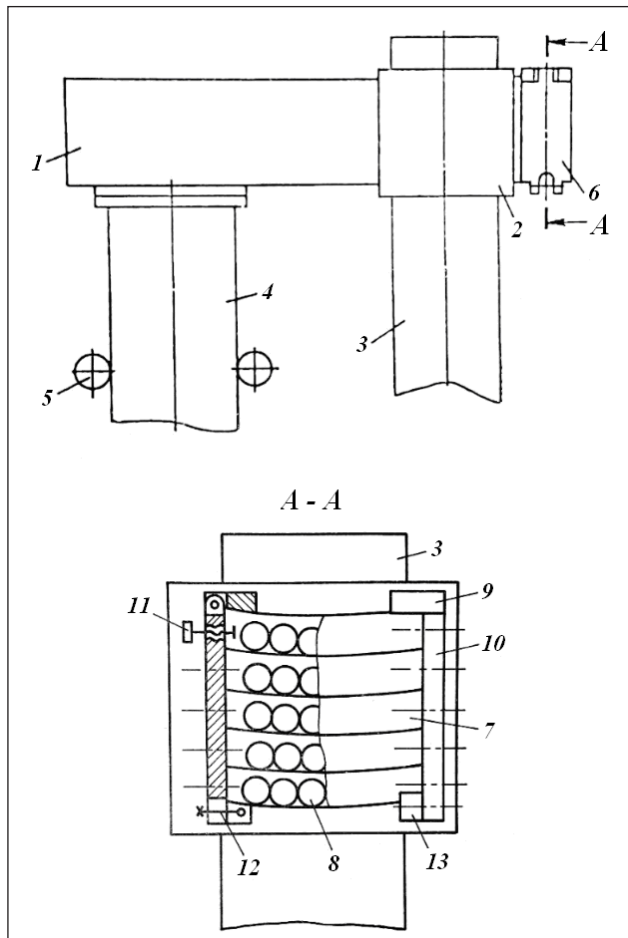


Рис. 2. Електродотримач з виносним гасителем ударної дії

Такий гаситель компактний, має меншу масу та є більш ефективним через його розташування на більшому радіусі за головою рукава. Проте необхідні подальші теоретичні та експериментальні дослідження для вдосконалення конструкції гасителя й визначення його раціональних параметрів.

В роботі [5] розглянуто динамічну систему балансірного електродотримача на основі подвійного фізичного маятника з пружно-дисипативними зв'язками. Визначено параметри динамічної моделі та електродинамічного збудження коливань. Складено диференціальні рівняння змущених коливань дисипативної системи із двома ступенями свободи. Виконано математичне моделювання змущених та вільних коливань електрода в горизонтальній площині. Доведено можливість зменшення амплітуд коливань електродів у системі балансірного електродотримача під час дії електродинамічного збудження та скидання навантаження. У статті представлені дослідження оригінальної конструкції електродотримача з балансірним закріпленням рукава. Отримано важливі результати, проте це не відміння про-

дження пошуку й дослідження альтернативних рішень з гасителями ударної дії.

Автори статті [6] приводять результати теоретичного дослідження впливу основних конструктивних та силових параметрів на швидкість переміщення електродів дугових сталеплавильних печей за допомогою гідроприводу поступальної дії. Дослідження проводилося з урахуванням основних параметрів гідроприводу, а саме діаметра поршня й робочого ходу, діаметра скалки розподільчого золотника, довжини трубопроводу та маси рухомих частин. Визначено, що на час нестійкого перехідного процесу впливає час згасання коливань. Отримані дані мають значення для оптимальної роботи автоматичних систем керування технологічним процесом. Для підвищення ефективності вводу електричної енергії до ванни печі доцільно продовжити пошук засобів зменшення амплітуди коливань електродів.

В роботі [7] проаналізовано стан напружень у з'єднанні графітових електродів, що зазвичай має конусоподібну форму з різьбою. За необхідної затяжки ніпеля секції величина напруги у з'єднанні перебуває в допустимих межах. Під час послаблення з'єднання зменшується несуча площа перерізу ніпелю, відповідно, підвищується напруга в контакті. Однією з основних причин виникнення такого стану є вібрація електродів внаслідок дії між ними взаємних електромагнітних сил, тобто також підтверджується необхідність проведення досліджень щодо зниження рівня коливань електродів у горизонтальній площині.

Постановка завдання. Метою статті є проведення теоретичного та експериментального дослідження розробки авторів, викладеної в роботі [3], на моделі та стенді з урахуванням жорсткості й динаміки системи «електрод – рукав – стояк», величини зазору в гасителі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Лабораторні та теоретичні дослідження показали, що створення вказаної системи гасіння зводиться до розрахунку маси гасителя та величин симетричних зазорів між кулями й кришками корпусу гасителя. Параметри гасителя розраховували на основі розрахункової схеми з двох мас, а саме гасителя й системи «електрод – рукав – стояк», з'єднаних за допомогою пружних ланок. Структурна схема системи представлена на рис. 3 [8].

Рукав прийнятий у вигляді абсолютно твердого тіла, оскільки його жорсткість набагато більше жорсткості на стояку. Розрахункова схема системи електродотримача представлена такими рівняннями:

$$J_1\phi = M_F - C\phi - M_R;$$

$$J_2\phi_2 = M_R,$$

де M_F – момент електродинамічної сили $F(t)$.

Розв'язання диференціальних рівнянь дало змогу визначити необхідні параметри для вибору гасителя. Так, формула максимальної амплітуди повороту рукава ϕ_{\max} зі встановленим гасителем така:

$$\phi_{\max} = (M_F)_{\max} \sqrt{\frac{(C_r - J_2\omega^2)^2 + b_r^2\omega^2}{\beta_1^2 + \beta_2^2}};$$

де $(M_F)_{\max}$ – максимальне значення моменту від електродинамічної сили; β_1, β_2 – динамічні коефіцієнти:

$$\beta_1 = (C - J_1\omega^2)(C_r - J_2\omega^2) - C_r J_2\omega^2;$$

$$\beta_2 = b_r\omega(C - J_1\omega^2 - J_2\omega^2);$$

де ω – кутова швидкість; b_r – приведений коефіцієнт тертя дисипативної сили.

Обчислено раціональну масу гасителя m_g та необхідний зазор Δ :

$$m_r = \frac{4\Delta(1-r^2) - \pi^2\phi_{\max}}{\pi^2 l_{2l}^2 \phi_{\max}} J_1;$$

$$\Delta = \frac{\pi^2(J_1 + m_g J_2^2)}{4(1-r^2)J_1} \phi_{\max},$$

де r – коефіцієнт відновлення швидкості під час удару.

Отримано залежності, які пов'язують між собою динамічні та конструктивні параметри системи електродотримача й гасителя. На підставі проведених розрахунків побудовано графіки амплітуди коливань відносно параметрів системи (рис. 4).

Як видно з рис. 4, величина максимальної амплітуди відхилень електрода суттєво залежить від маси гасителя й частоти вимушених коливань системи. Збільшення загальної маси гасителя від 100 кг до 400 кг знижує амплітуду коливань в 1,5–2,8 разів. Водночас при раціональній масі гасителя близько 200 кг досягається досить значне зниження амплітуди (на 46,9%) порівняно з електродотримачем без гасителя. За зменшення маси гасителя до 100 кг зниження амплітуди електрода складе 23,3%.

Для перевірки ефективності гасителя проводилась серія досліджень на лабораторному стенді у вигляді фізичної моделі, що імітує геометричні розміри електродотримача сталеплавильної печі ДСП-50Н2 в масштабі 1:10, а також основні динамічні параметри, такі як жорсткість та маса. Вимушені коливання системи електродотримача з електродом та гасителем задавались електромагнітним імпульсом. Контроль за коливаннями

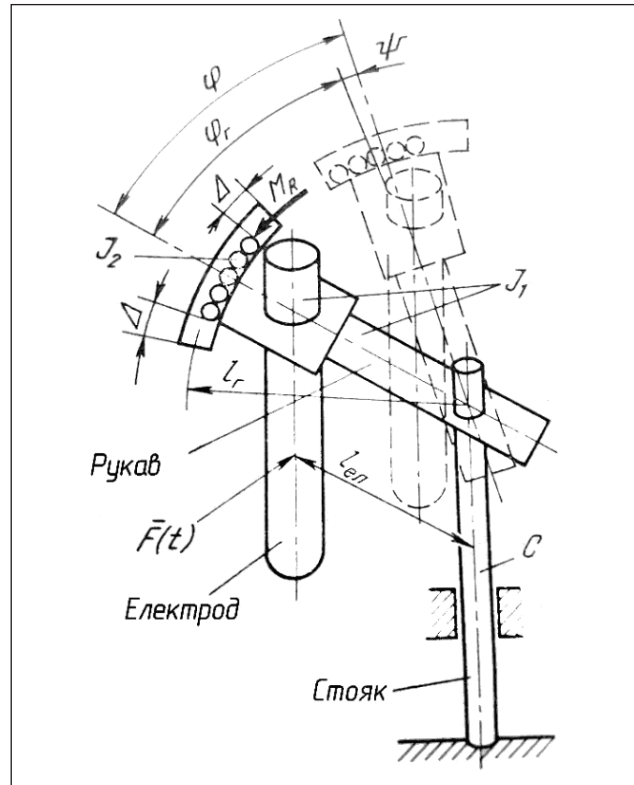


Рис. 3. Структурна схема електродотримача з гасителем ударної дії

(ϕ, ϕ_r – узагальнені координати рухомої системи та маси гасителя, відповідно; Δ – зазор між кулями й торцевою заглушкою; ψ – кут повороту маси гасителя; l_r – відстань від осі гасителя до осі стояка; l_{2l} – відстань від осі електрода до осі стояка; $F(t)$ – електродинамічна сила між електродами; M_R – реактивний момент сили взаємодії між рухомою масою куль та корпусом гасителя; J_1 – приведена розрахункова маса системи «електрод – рукав – стояк»; J_2 – момент інерції маси гасителя щодо осі стояка; C – приведена жорсткість системи електродотримача та її вузлів, а саме стояка та опорних роликів)

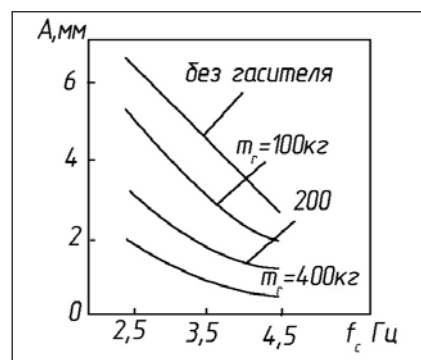


Рис. 4. Вплив параметрів гасителя на амплітуду коливань електрода

електрода й рукава проводився за допомогою тензодатчиків з одночасною фіксацією на осцилограмах. Використовувалися кулі різної фракції,

змінювалися ступінь заповнення гасителя й положення стояка та рукава щодо жорстких та пружних опорних роликів (рис. 5).

Отримано такі результати: без використання засобів захисту від коливань та жорсткого закріплення опорних роликів стояка електродотримача час затухання коливань $t_{зам}$ складає 4,9 с (рис. 5, а). За встановлення в рукаві електродотримача інерційного гасителя $t_{зам}$ зменшується, становлячи 3,15 (рис. 5,б) Найбільш ефективним є використання гасителя ударної дії. Встановлено, що за повного заповнення гасителя та наявності пружних опор час затухання коливань складає 1,2 с за початкової амплітуди 7,0 мм та частот 4–10 Гц (рис. 5,в).

Похибка розрахункових залежностей становить до 15–20%, що перебуває в межах, допустимих для інженерних розрахунків.

З урахуванням досліджень та розрахунків встановлена раціональна маса гасителя за умови, що момент інерції гасителя становить 0,1–0,2 частки

відповідного моменту маси рухомих елементів системи «електрод – рукав – стояк». Для підвищення ефективності гасителя необхідно забезпечити високу жорсткість торцевих упорів корпусу й кріплення до голівки рукава.

Висновки. Проведено теоретичні й експериментальні дослідження відомої розробки гасителя на моделі та стенді з урахуванням динамічних параметрів системи «електрод – рукав – стояк», а також величини внутрішнього зазору. Визначено допустимі маси рухомих елементів в діапазоні реальних частот вимушених коливань електродів.

З урахуванням результатів розрахунків та експериментів визначено доцільність вдосконалення конструкції гасителя. Результати досліджень використані під час модернізації сталеплавильних печей ДСП 80т і 100т. При цьому підвищена жорсткість гасителя, визначені параметри внутрішнього зазору гасителя для його оптимального налаштування.

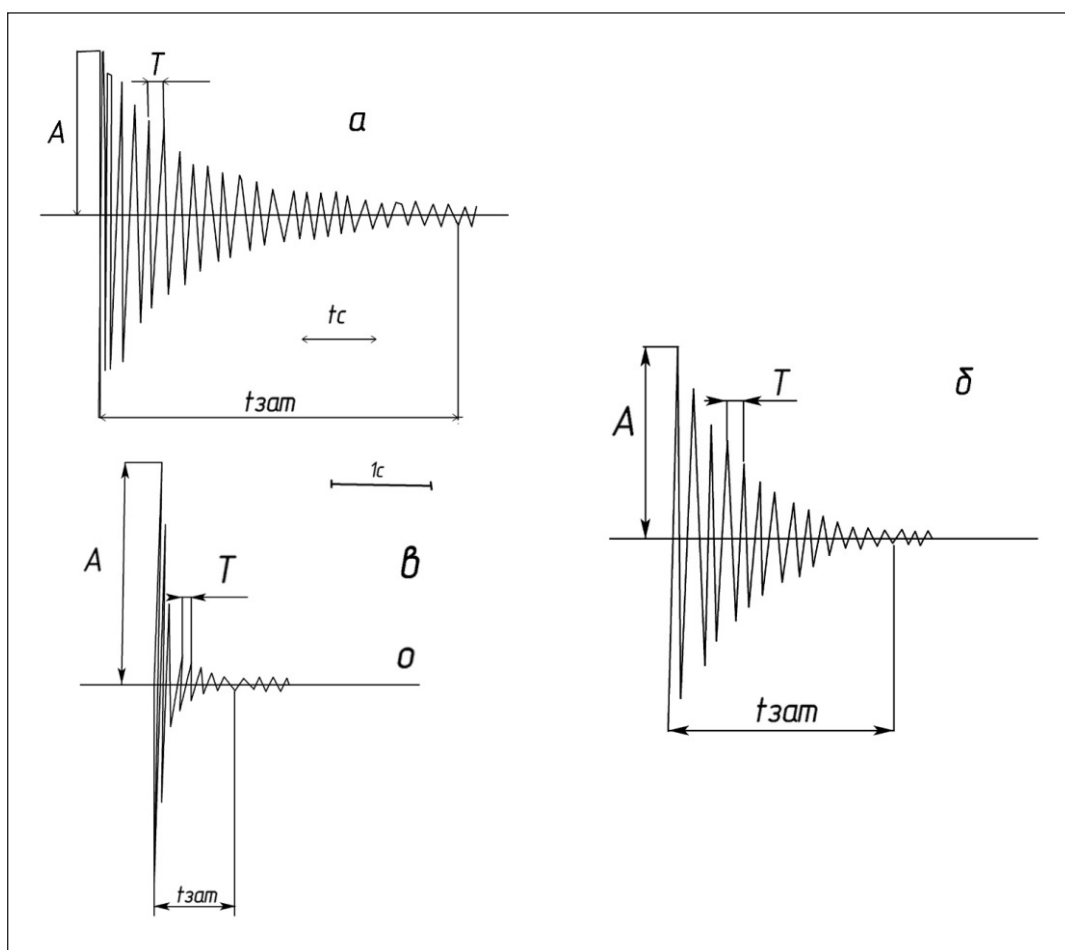


Рис. 5. Осцилограми досліджень коливань електродів різних конструкцій електродотримача (а – електродотримач із жорстким кріпленням опорних роликів; б – з інерційним гасителем; в – з гасителем ударної дії; А – максимальна амплітуда вимушених коливань, мм; Т – цикл коливань, с; $t_{зам}$ – час затухання коливань, с)

Список літератури:

1. Коваль Н.В., Абросимов В.Н., Сапко А.И. и др. А.с. SU №1346884 МКИ А1 Н05 В 7/10. Инерционная масса для гашения колебаний / заявл. 24.12.1985; опубл. 23.10.87, бюл. № 39.
2. Тарасов В.К., Резников О.Л., Лапиков И.А. А.с. SU №1758915 МКИ А1 Н05 В 7/10. Электрододержатель дуговой электропечи / заявл. 22.05.1991; опубл. 30.08.92, бюл. № 32.
3. Тарасов В.К., Резников О.Л., Жук А.Я. и др. А.с. SU №1769387 МКИ А1 Н05 В 7/10. Электрододержатель дуговой электропечи / заявл. 06.08.1992; опубл. 15.10.92, бюл. № 38.
4. Про підвищення надійності роботи електродів дугових сталеплавильних печей / М.В. Коваль, В.К. Тарасов, С.С. Пилипенко, Ю.П. Єгоров, А.О. Власов. *Металургія*. 2016. Вип. 35. С. 58–62.
5. Власов А.А., Зданевич С.В. Исследование динамической системы балансирующего электрододержателя дуговой сталеплавильной печи. *Системні технології*. 2018. Вип. 4 (117). С. 10–18.
6. Жук А.Я., Власов А.А., Буканова М.В., Туан Май Фьюк. Исследование влияния параметров механизмов перемещения электродов печей ДСП на их быстродействие. *Металургія*. 2010. Вип. 21. С. 171–176.
7. Piekio J., Maj M. Analysis of the state of stress in the connection of graphite electrodes. *Archives of foundry engineering*. 2015. Vol. 15. Special Is. 1. P. 85–88.
8. Тарасов В.К., Резников О.Л., Беленко В.Н., Жук А.Я. Расчет виброгасителя ударного действия для ДСП. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1992. № 5. С. 32–35.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ СНИЖЕНИЯ ПОЛОМОК ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

В статье рассмотрены проблемы работы действующих сталеплавильных электродуговых печей, связанные с поломками графитовых электродов. Проанализированы известные меры и конструкции для снижения уровня вибрации электрододержателей. Усовершенствован компактный гаситель колебаний динамического типа. Проведены теоретические исследования гасителя на математической и физической модели электрододержателя, выбраны рациональные параметры устройства. Достигнуто снижение амплитуды колебаний электродов до допустимых границ.

Ключевые слова: дуговая печь, электрод, поломки, гаситель, инерционная масса.

IMPROVEMENT OF SYSTEM TO DECREASE BREAKAGES OF THE GRAPHITE ELECTRODES OF ARC STEEL-SMELTING FURNACES

In the article the problems of operating steel-smelting arc furnaces related to breakages of graphite electrodes are considered. The well-known facilities and constructions to decrease vibration of electrode holders are analyzed. The compact vibration damper of dynamic type was improved. Theoretical and experimental studies of the damper on a mathematical and physical model were conducted and the rational parameters of device were chosen. The decrease of electrode vibration amplitude to the acceptable level was achieved.

Key words: arc furnace, electrode, breakage, damper, inertia mass.