

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

The Ministry of Education and Science of Ukraine
The Ukrainian State University of Science and Technologies

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ
НАУКОВІ ВІСТІ

MODERN PROBLEMS OF METALLURGY
SCIENTIFIC BULLETIN

№ 25

Дніпро 2022

Dnipro 2022

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №25, (2022). – Дніпро: УДУНТ – ІВК
«Системні технології», 2022. – 231 с.

ISSN 1991-7848 (Print)

ISSN 2707-9457 (Online)

Відповідальний редактор: член-кор. НАН України, проф. Гасик М.І.

Заступник відповідального редактора: д.т.н., доц. Селівьорстова Т.В.

Відповідальний секретар редакції: к.т.н., с.н.с. Власова Т.Є.

Редакційна колегія збірника:

Балакін В.Ф. д.т.н., проф.,
Гасик М.М. д.т.н., проф. (Фінляндія),
Губінський М.В. д.т.н., проф.,
Гуда А.І., д.т.н., доц.,
Єрьомін О.О., д.т.н., проф.,
Критська Т.В., д.т.н., проф.,
Пінчук В.О., д.т.н., проф.,
Пройдак Ю.С. д.т.н., проф.,
Саричев О.П., д.т.н., проф.,
Светличний Д.С. д.т.н., проф. (Польща),
Селівьорстов В.Ю., д.т.н., проф.,
Тараканов А.К. д.т.н., проф.,
Фролов Я.В., д.т.н., проф.

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 28.03.2022 р., № 5

Адреса редакції збірника:
49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4,
Український державний університет науки і технологій
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
кафедра Інформаційних технологій і систем,
e-mail: st@nmetau.edu.ua
+3 8 (097) 685 45 25

© Український державний університет науки і технологій
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
ІВК «Системні технології», 2022.

О.М. Гришин, А.А. Надточій, В.О. Петренко, В.С. Киричок

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЗНЕВУГЛЕЦЬОВУВАННЯ ПРОДУКТІВ ВУГЛЕЦЕВОТЕРМІЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ Cr_2O_3

Анотація. У роботі виконано термодинамічний аналіз процесу вуглецевотермічного відновлення сировини, що містить хром, для визначення умов отримання лігатури з низьким вмістом вуглецю. Виконаний шестифакторний експеримент математичного планування з використанням напіврепліки повного факторного експерименту. Отримано рівняння регресії, що дозволяє кількісно визначити оптимальне значення кожного фактора. За допомогою фазового аналізу систем Cr-O-C та Cr-Fe-O-C визначені умови, що забезпечують зниження вуглецю в кінцевому продукті. Розглянуто умови появи метастабільних карбідів. Визначено термодинамічні параметри, що забезпечують стабільність твердих фаз. Розглянуто особливості механізму карбідотермічного відновлення. Введення в шихту заліза створює передумови зниження вуглецю, а також інтенсифікує процес твердофазного відновлення.

Ключові слова: оксид хрому, лігатура, твердофазне відновлення, карбід, факторний аналіз.

Вступ

Губчасті легуючі матеріали мають вагомі переваги перед традиційними феросплавами. Одержувані за технологією твердофазного відновлення за участю вуглецю губчасті легуючі матеріали мають високий вміст вуглецю, що звужує сферу їхнього подальшого використання. Можливість регулювання вмісту вуглецю в губчастих легуючих матеріалах є актуальним завданням, вирішення якого можливе за двома напрямками: оптимізація технологічних параметрів процесу; доопрацювання отриманого високовуглецевого продукту.

Отже, метою даної роботи є аналіз термодинамічних та кінетичних параметрів процесу отримання низьковуглецевих хромовмісних лігатур.

Методика проведення досліджень

Розрахунок термодинамічних параметрів процесу твердофазного відновлення оксиду хрому виконано із застосуванням програмного комплексу

HSC Chemistry 5.1 (створено у Фінляндії компанією Outokumpu Research Oy). Застосували метод планування експерименту щодо побудови математичної моделі впливу параметрів на вміст вуглецю. Дослідження кінетики процесу проведено за допомогою термогравіметричної установки.

Загальний вуглець визначали спаленням навішування зразка у порцеляновому човнику в потоці кисню при температурі 1553 К. CO₂, що утворився при цьому, поглинався аскаритом і вміст вуглецю розраховували по зважуванню з урахуванням маси навішування. Вільний вуглець визначали шляхом спалення навішування в потоці кисню при 873 К. Карбідний вуглець визначали як різницю між загальним та вільним.

Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень

У технічній літературі є велика кількість робіт, присвячених питанням отримання низьковуглецевих губчастих лігатур. Серед таких робіт насамперед слід виділити такі огляди [1-3]. Наведені в цих роботах відомості, в основному, стосуються оптимізації деяких технологічних параметрів процесу з метою отримання кінцевого продукту, що задовольняє різним якісним показникам, у тому числі за вмістом вуглецю. Отже, в основному представлені рішення приватних технологічних завдань, що корисно на початковому етапі розробки умов процесу твердофазного відновлення. Для комплексного вирішення поставленого завдання необхідно визначити фізико-хімічні умови, за допомогою яких можна регулювати вміст вуглецю в кінцевому продукті твердофазного відновлення шихти.

Аналіз твердофазного відновлення хромовмісної шихти проведено з урахуванням таких факторів: температура, час, склад газової фази, відносини C/O, Cr/Fe та Fe/Ni. Виконаний шестифакторний експеримент, при математичному плануванні використовували напіврепліку повного факторного експерименту. В якості функції відгуку використано вміст вуглецю в кінцевому продукті.

Статистична обробка результатів дозволила отримати лінійне рівняння регресії для карбідного вуглецю, яке було перевірено на адекватність з використанням критерію Фішера

$$\%C = 4,701 + 1,430 \cdot X_1 + 1,54 \cdot X_2 - 1,479 \cdot X_3 - 0,547 \cdot X_4 - 0,582 \cdot X_5 - 0,008 \cdot X_6, \quad (1)$$

де X₁ - час ізотермічної видержки; X₂ - температура, К; X₃ - Cr/Fe; X₄ - Fe/Ni; X₅ - O/C; X₆ - водень у системі.

Аналіз одержаних результатів свідчить про можливість оптимізувати умови відновлення, які забезпечать одержання губчатого продукту з низьким вмістом вуглецю. Водночас слід зазначити, що у цих дослідах залишається значна кількість вільного вуглецю, який не бере участі в реакціях. Вирішити це питання можна, наприклад, введенням у шихту додаткової кількості оксидів.

Аналіз отриманого рівняння дозволяє зробити деякі висновки:

1. Вибір умов відновлення складної шихти, що дає можливість отримати багатокomпонентну лігатуру з низьким вмістом вуглецю.

2. Найбільше на підвищення вуглецю впливають зростання температури процесу і час відновлення.

3. Зниження вмісту вуглецю в лігатурі досягається за рахунок зменшення відношення Cr/Fe та збільшення Fe/Ni та O/C.

4. Введення в систему водню при O/C = const слабо впливає на вуглець у лігатурі.

Рівняння регресії для загального вуглецю має вигляд

$$\%C = 16,025 - 0,165 \cdot X_1 - 2,645 \cdot X_2 - 0,945 \cdot X_3 + 1,037 \cdot X_4 + 0,735 \cdot X_5 + 0,228 \cdot X_6. (2)$$

Порівняльний аналіз отриманих рівнянь (1) та (2) показує, що практично усі обрані фактори якісно та кількісно по-різному впливають на вільний та карбідний вуглець у лігатурі. Так, наприклад, підвищення температури призводить до зниження загального вуглецю і при цьому зростає карбідний вуглець.

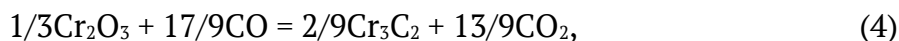
Процес вуглецевотермічного та комплексного відновлення оксидів хрому проходить за кількома паралельними реакціями, серед яких слід виділити реакції відновлення та реакції карбідоутворення. У межах обраних умов пріоритетний розвиток може мати та чи інша реакція. Слід також враховувати високу спорідненість хрому до вуглецю, можливе утворення оксикарбідів, взаємодію продуктів приватних реакцій між собою, існування проміжних та метастабільних фаз, що змінює термодинамічну картину процесу.

Деякі умови появи таких фаз дозволяє визначити термодинамічний аналіз взаємодій у системах Cr-O-C та Cr-O-C-H. Подібний аналіз таких систем був виконаний авторами [2, 4, 5], проте багатоваріантність реакцій, що розвиваються при відновленні Cr₂O₃, викликає певні труднощі. Якщо реакції твердофазного відновлення хрому досить детально описані в літературі, то карбідоутворення більшою мірою носить гіпотетичний характер.

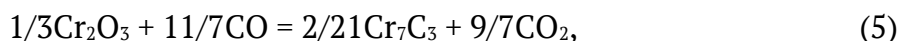
Дослідження проведено в діапазоні 1273-1773 К на основі сукупності реакцій газифікації твердого вуглецю його діоксидом та відновлення Cr_2O_3 монооксидом вуглецю:



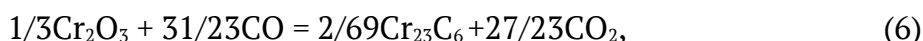
$$\lg K_3 = -20035/T + 20,569, \quad (3 \text{ a})$$



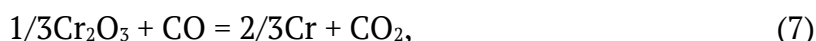
$$\lg K_4 = -301,96/T + 9,005, \quad (4 \text{ a})$$



$$\lg K_5 = -3232,9/T - 5,786, \quad (5 \text{ a})$$



$$\lg K_6 = -6152,5/T - 3,643, \quad (6 \text{ a})$$



$$\lg K_7 = -10716,3/T - 0,33. \quad (7 \text{ a})$$

Враховувалась також можливість взаємодії CO_2 з карбідами хрому, зокрема



$$\lg K_8 = -22270/T + 20,283. \quad (8 \text{ a})$$

Результати термодинамічних розрахунків, виконаних для тиску вуглецевих газів $P=1$ (або 0,1 МПа), графічно відображені на рисунку 1.

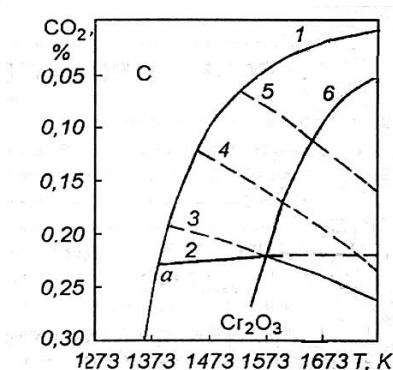
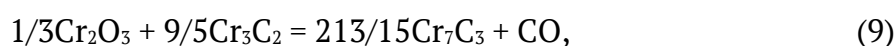


Рисунок 1 – Діаграма рівноваги у системі Cr-O-C, де лінії рівноваги реакцій 1-6 – реакції (3-8), відповідно

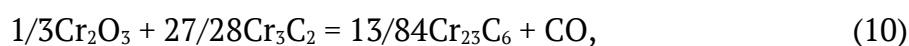
Використання діаграм рівноваги дозволяє отримати цінну інформацію про фазові зміни та температурні межі різних перетворень [2, 5, 6]. Однак це недостатньо для глибокого регулювання вмісту вуглецю продукту. За наявності у шихті надлишкового вуглецю буде витрачено весь Cr_2O_3 . Залишаться в

системі стабільно співіснувати $C_{\text{тв}}$, карбід Cr_3C_2 і газова фаза, для якої співвідношення CO_2 і CO у всьому діапазоні температур, що розглядаються, повинно відповідати рівновазі реакції (3) (лінія 1 на рис. 1). У разі строго стехіометричного співвідношення вихідних речовин по відношенню до реакції (4) у процесі відновлення витрачається і Cr_2O_3 , і $C_{\text{тв}}$. Система, що утворена твердими продуктами відновлення Cr_3C_2 і газами при фіксованому тиску останніх, має дві ступені свободи. Це дозволяє варіювати температурою та співвідношенням CO_2/CO в межах області, обмеженої лініями 1,2,6 на рис. 1, без порушення стабільності вищого карбіду хрому. Отже, аналіз системи Cr-O-C свідчить, що у зазначеної області температур стійкий карбід Cr_3C_2 . Про перевагу його утворення при відновленні Cr_2O_3 в умовах достатньої кількості вільного вуглецю в шихтовій суміші свідчить також зіставлення ΔG^0 для реакцій (4)-(7). Термодинамічна картина зазнає істотних коректив у разі дефіциту вуглецю в шихті. При фіксованих значеннях тиску і температури рівновага у системі встановлюється лише після зникнення $C_{\text{тв}}$. Але вищий карбід хрому Cr_3C_2 , як видно з рисунку 1, стабільно співіснує з надлишковим Cr_2O_3 та газами до $\sim 1570\text{ K}$ (за даними [4, 6] до 1540 або 1560 K).

Вище цієї температури термодинамічні переваги у присутності Cr_2O_3 переходять до проміжного карбіду Cr_7C_3 . Область його стійкості на рисунку 1 обмежена лініями 3 і 6. Він може рівноважно співіснувати лише з надлишковим оксидом хрому чи карбідом Cr_3C_2 . Істотно, що карбід набуває відновлювальної здатності по відношенню до Cr_2O_3 вище 1570 K з утворенням Cr_7C_3 , а вище 1741 K – з утворенням Cr_{23}C_6 :



$$\Delta G^0 = 264661 - 168,54 \cdot T, \quad (9 \text{ а})$$



$$\Delta G^0 = 283757 - 163,008 \cdot T. \quad (10 \text{ а})$$

За реакцією (10) поява метастабільного Cr_{23}C_6 принципове можливе вже за температури $\sim 1603\text{ K}$, але лише за умов досить високих концентрацій CO , що поставляється реакцією (3).

У такому випадку $C_{\text{тв}}$ розподіляється між процесами відновлення та карбідоутворення в енергетично найбільш вигідному співвідношенні (ΔG^0 , Дж/г-ат.С). Це співвідношення визначається термодинамічної перевагою витрачання вуглецю на утворення різних карбідів хрому в порівнянні з

витрачанням його на відновлення Cr_2O_3 : $\Delta G^0_{\text{карб}} < \Delta G^0_{\text{відн}}$. При дефіциті вуглецю в системі залишається невідновлений Cr_2O_3 , а також карбід.

Існування певних меж термодинамічної стійкості окремих твердих продуктів вуглецевотермічного відновлення оксиду хрому (Cr_3C_2 і Cr_7C_3 в області температур, що розглядаються) не виключає принципової можливості утворення за ходом процесу інших продуктів, але в нестабільному стані. Причиною цього повинні бути успішний розвиток реакції (3) (досить високі концентрації CO в об'ємі шихти – рис. 1) та уповільнений розвиток (гальмування) реакцій карбідоутворення. Нижче 1570 K найімовірніше поява, поряд з Cr_3C_2 , проміжного карбіду Cr_7C_3 за умови уповільненого перебігу реакції $3/15\text{Cr}_7\text{C}_3 + 2\text{CO} = 7/5\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{CO}_2$.

Вище 1570 K поруч із термодинамічно стійким Cr_7C_3 можливе утворення, насамперед, нестабільного карбіду Cr_3C_2 , умовою накопичення якого є загальмованість реакції (8). Підйом температури спричиняє термодинамічні зрушення, що ускладнюють утворення Cr_3C_2 (рис. 1). При цьому, природно, зберігається необхідність уповільненого розвитку супутніх реакцій, згаданих раніше.

Як зазначалося, за умов підвищених температур стає можливим участь Cr_3C_2 у відновленні оксиду хрому. Реалізація цієї можливості найбільш ймовірна у разі витрачання вільного вуглецю шихти, що сприяє зневуглецюванню продукту відновлення. Термодинамічні передумови розвитку процесу таким шляхом і відновлення Cr_2O_3 за допомогою вільного вуглецю істотно коригується у присутності металевго заліза.

Аналіз системи Cr-Fe-O-C був виконаний авторами [7] для випадку утворення металевих розчинів, що містять 7 та 25% хрому. Утворення змішаних карбідів $(\text{Fe,Cr})_x\text{C}_y$ при цьому не враховувалось через відсутність необхідних термохімічних відомостей. Встановлені термодинамічні зрушення показали значне збільшення можливостей вуглецевотермічного відновлення Cr_2O_3 під час введення у систему заліза. Подібний результат отримано нами стосовно процесів за участю $\text{C}_{\text{тв}}$ і Cr_3C_2 у широкому діапазоні співвідношень Cr/Fe у продукті відновлення.

Детальний термодинамічний аналіз системи Cr-Fe-O-C (не пов'язаний із процесом відновлення) здійснено авторами [8, 9] з урахуванням присутності як металевих розчинів, так і карбідних фаз різного складу. У цілому результати

аналізу свідчать, що у присутності заліза карбід Cr_3C_2 нестійкий. З металевою фазою стабільно співіснують змішані карбіди $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$, $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ та $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$. Перший утворюється при малих вмістах хрому у системі; останній – за підвищених концентрацій його. Найбільш широка сфера існування карбіду $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$. Характер фазових перетворень, що протікають у процесі теплової обробки суміші Cr_3C_2 із залізом експериментально вивчений у роботах [10, 11].

Наведені результати термодинамічного аналізу свідчать про можливість зниження рівня вуглецю в залізохромистій лігатурі за допомогою залучення у процес відновлення карбідної фази, а також введенням у систему металевого заліза, яке розчиняє в собі хром. Однак, можливості такого механізму обмежені температурою. Слід також враховувати кінетичні закономірності карбідотермічного відновлення та впливу на цей процес $\text{Fe}_{\text{мет}}$. Отримані експериментальні дані [12] свідчать, що характер впливу добавок $\text{Fe}_{\text{мет}}$ на кінетику відновлення Cr_2O_3 вільним вуглецем і карбідом Cr_3C_2 прямо протилежний. Значне прискорення процесу в останньому випадку вказує на додаткові можливості твердого продукту як за рахунок розведення його залізом, так і шляхом посиленого залучення карбідної фази відновлення оксиду хрому.

Введення $\text{Fe}_{\text{мет}}$ у шихту суттєво змінює кінетичну картину процесу. Насамперед, звертає на себе увагу той факт, що присутність $\text{Fe}_{\text{мет}}$ забезпечує відновлення Cr_2O_3 карбідом Cr_3C_2 вже при температурі 1473 К (рис. 2).

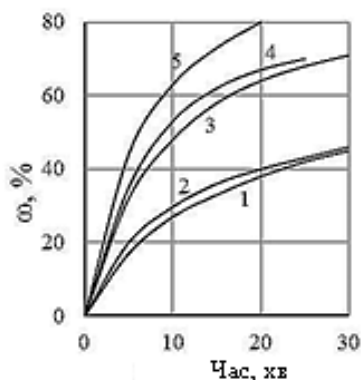


Рисунок 2 – Кінетика відновлення Cr_2O_3 карбідом Cr_3C_2 без добавок (2, 4) та у присутності металевого заліза (1, 3, 5) при атомному співвідношенні $\text{Fe/Cr}=1$:
1 – 1473K; 2,3 – 1573K; 4,5 – 1673K

Підйом до 1573 K, природно, форсував процес, а введення заліза збільшувало швидкість $\sim 1,3$ раз. Ступінь відновлення зразка, що досягається за 0,5 години, склала 70%. Подібні зрушення у присутності заліза мали місце і за 1673 K, а ступінь відновлення протягом 20 хв досягала 80%. Такий глибокий розвиток процесу при 1573 і 1673 K свідчить про появу твердого продукту на базі нижчого карбіду хрому Cr_{23}C_6 .

Цей висновок знаходить підтвердження у результатах досліджень [10, 11], які дозволяють деталізувати сутність змін, що відбуваються. Автори із застосуванням різноманітних методів фізико-хімічного аналізу досліджували фазові перетворення, що відбуваються при тепловій обробці пресованої суміші Cr_3C_2 та заліза у вакуумі. Встановлено, що взаємодія твердих реагентів починається з односторонньої дифузії атомів хрому і переважно вуглецю в металеве залізо. Карбід збіднюється вуглецем, а структура його розпушується. Відбувається перерозподіл атомів вуглецю у карбіді, орторомбічна структура Cr_3C_2 перебудовується на гексагональну Cr_7C_3 . Гексагональний карбід хрому, що утворився, здатний розчинити в собі до 60% заліза, перетворюючись таким чином на спільний хромозалістий карбід $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$. У свою чергу міграція C і Cr з кристалічної решітки вихідного Cr_3C_2 і розчиненням (заміщенням) їх у металевому залізі, може призводити до утворення складних карбідів на основі $\text{Fe}_{\text{мет}}$. На думку авторів [10, 11] при подальшому розвитку процесу можливе утворення спільних карбідів типу $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$. Присутність цього карбіду було встановлено при 1373 K. З урахуванням викладеного ймовірнісний механізм впливу $\text{Fe}_{\text{мет}}$ на кінетику вуглецевотермічного відновлення Cr_2O_3 є наступним. Як відомо, вищий карбід хрому дуже обмежено замінює атоми хрому атомами заліза. Дифузійний перехід атомів в металеве залізо утруднений, так як останній вже сильно науглецьований внаслідок перебігу реакцій (11) та (12):



Міграція атомів Cr з карбіду до $\text{Fe}_{\text{мет}}$ без супроводу (або дифузії, що випереджає) вуглецю розвиватися не може. Тому в присутності вільного вуглецю, що обмежує перебіг реакції (8) особливо в області не дуже високих температур, утворення твердих розчинів Fe-Cr-C і спільних карбідів $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ сильно утруднено. Вплив добавок заліза на шихту обмежується в основному тими напрямками, які були розглянуті вище.

Витрата $C_{\text{ТВ}}$ і вступ Cr_3C_2 у процес відновлення Cr_2O_3 кардинально змінює ситуацію. Завдяки розвитку реакції (8), на поверхні карбіду виникає дефіцит вуглецю і відбувається фазове перетворення $\text{Cr}_3\text{C}_2 \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3$. У відсутності вільного вуглецю перебіг реакцій (11) і (12) утруднюється і навіть не виключена можливість перебігу їх у зворотному напрямку. Отже, відкриваються шляхи для зустрічної дифузії атомів Cr і Fe з утворенням залізохромистого карбіду $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ і розчинів Fe-Cr-C. Менш імовірно в умовах перебігу реакції (3) поява карбіду $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$. На користь такого твердження свідчить значно більша міцність Cr_3C_2 проти Fe_3C – зменшення вільної енергії при утворенні останнього багаторазово поступається аналогічної величині для вищого карбіду хрому. Поява в кристалічній решітці Fe_3C до 20% Cr не може, мабуть, змінити зазначене співвідношення ΔG^0 на протилежне. У той самий час у ході подальшого розвитку процесу стає принципово можливі появи змішаного карбіду $(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$ [10,11].

Утворення розчинів Fe-Cr-C і змішаних карбідів викликає значні термодинамічні зрушення в системі. Зокрема, зниження активності хрому, зумовлене розчиненням їх у залізі, і зростання рівноважних концентрацій CO_2 створюють сприятливі передумови у розвиток реакції (7) [6-8]. Однак не ця ланка визначає швидкість процесу, що спостерігається. Виконані в цій роботі дослідження дозволяють стверджувати, що визначальна роль належить в основному реакції (3). Про це свідчить зростання швидкості відновлення Cr_2O_3 при подрібненні вуглецю, збільшенні його вмісту в шихті та у разі заміни графіту високореакційним деревним вугіллям або піролігніном. Але у присутності $\text{Fe}_{\text{мет}}$ переважає вплив негативних факторів на швидкість газифікації $C_{\text{ТВ}}$ та розвиток процесу в цілому.

Вступ Cr_3C_2 у відновлення Cr_2O_3 змінює характер впливу $\text{Fe}_{\text{мет}}$ на кінетику процесу. Перекристалізація Cr_3C_2 у Cr_7C_3 відкриває можливість утворення змішаного карбіду $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$. Останній можна розглядати як практично ідеальний розчин хрому і заліза в решітці заміщення спільного карбіду [14]. Утворення такого розчину сприяє розвитку реакцій (5) і (8) внаслідок зменшення активності карбідної фази, що з'являється. Тому прискорюється реакція (9), що описує відновлення Cr_2O_3 у цілому, але із заміною Cr_7C_3 на $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$.

Особливості впливу $Fe_{мет}$ на кінетику відновлення Cr_2O_3 вуглецем і зміни механізму цього впливу наочно ілюструється рисунком 3.

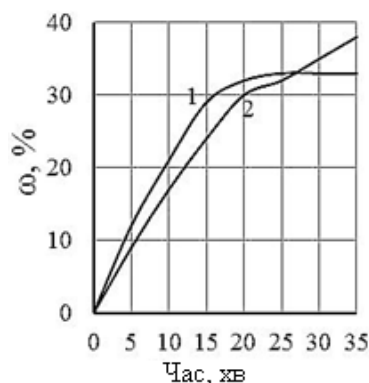


Рисунок 3 – Кінетика відновлення Cr_2O_3 графітом при 1573 К при атомному співвідношенні $Fe/Cr=1$ та $C/O=0,5$: 1 – без $Fe_{мет}$; 2 – з добавкою $Fe_{мет}$

У разі великого дефіциту $C_{тв}$ чітко проявляється перехід від ефекту гальмування до інтенсифікації процесу. Підйом температури до 1673 К полегшує перекристалізацію Cr_3C_2 з утворенням змішаного карбиду (рис. 4).

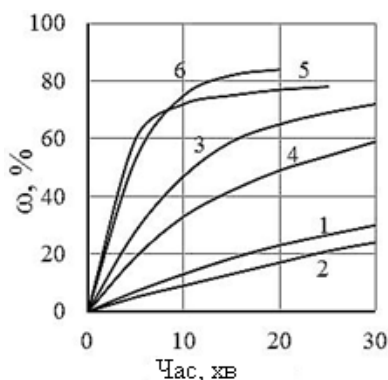


Рисунок 4 – Кінетика відновлення Cr_2O_3 графітом без добавок (1,3,5) та у присутності металевого заліза (2,4,6) при атомному співвідношенні $Fe/Cr=1$ та $C/O=1$; 1,2 – 1473 К; 3,4 – 1573 К; 5,6 – 1673 К

Більш того, як зазначалося раніше, глибина розвитку процесу рівня, що відповідає переходу $Cr_2O_3 \rightarrow Cr_7C_3$, і свідчить про появу залізохромистої карбідної фази на основі $Cr_{23}C_6$. Дифузійне перенесення атомів металу не носить, звичайно, односторонній характер. Тому за рахунок дифузії хрому в металеве залізо утворюється розчин $Fe-Cr-C$. У разі відновлення Cr_2O_3 Cr_3C_2 , що попередньо отриманий, розвиваються подібні процеси.

Отже, результати виконаних досліджень свідчать про принципову можливість досить швидко здійснювати повне відновлення Cr_2O_3 в присутності заліза, наприклад, при 1673 К. Отриманий у цих умовах металізований продукт значною мірою піддається зневуглецьовуванню. Розрахунки показують, що при співвідношенні Cr_2O_3 і $\text{C}_{\text{тв}}$ у шихті та атомному відношенні $\text{Cr}/\text{Fe} \approx 1$ вміст вуглецю в кінцевому продукті становить $\sim 4,5\%$. Шихтова суміш принципово дозволяє знизити концентрацію вуглецю до $\sim 2,8\%$.

Дуже суттєво, що заміна $\text{Fe}_{\text{мет}}$ оксидами заліза не знижує швидкісні характеристики процесу. Про це свідчать результати спільного відновлення заліза та хрому із суміші магнетитового та хромітого концентратів при 1673 К. Слід зазначити, що заміна Cr_2O_3 на природний матеріал супроводжується істотним зниженням швидкості відновлення.

Висновки

Виконано термодинамічний та кінетичний аналіз участі карбідів у процесі відновлення оксиду хрому. Визначено умови можливого утворення метастабільних фаз у системі $\text{Cr}-\text{C}-\text{O}$. Досліджено вплив введеного в шихту металевого заліза на кінетику процесу твердофазного відновлення Cr_2O_3 . Отримано рівняння регресії, що описує вплив деяких параметрів вуглецевотермічного відновлення оксиду хрому на вміст вуглецю в цільовому продукті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григорьев С.М., Петрищев А.С., Ковалев А.М. Губчатые и плавленные лигатуры из рудного и техногенного сырья (термодинамика, фазовые и структурные превращения, технология получения и использования, повышение степени утилизации, экономика). Запорожье: Запорожский национальный университет, 2013. 306с. ISBN978-966-599-434-3
2. Острик П.Н., Гасик М.М., Пирог В.Д. Металлургия губчатых и порошковых лигатур. К.: Техніка, 1992. 128 с.
3. Гришин А.М., Иващенко В.П., Щеглова И.С., Дзююра Р.С. Термодинамические закономерности получения губчатых лигатур с низким содержанием углерода. ЭлектроМеталлургия. 2018. №9. С.16-23.
4. Попов А.А., Острик П.Н., Гасик М.М. Термодинамика восстановления и карбидообразования в системе $\text{Cr}-\text{O}-\text{C}$. Известие вузов, Черная металлургия. 1986. №10. С.1-3.
5. Симонов В.К., Золотарева В.В., Власенко В.Н. О механизме твердофазного восстановления Cr_2O_3 углеродом. Теория и практика металлургии. 1998. №2. С.17-20.
6. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов. М.: Металлургия, 1988. 228с.
7. Попов А.А., Острик П.Н., Гасик М.М. Термодинамика восстановления и карбидообразования в системе $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{O}-\text{C}$. Известия вузов, Черная металлургия. 1987. №4. С.1-4.
8. Термодинамический анализ системы железо-хром-углерод / Б.И. Леонович, В.Е. Серебряков, Н.Р. Фраго и др. Известия вузов, Черная металлургия. 1989. №1. С.4-10.

9. Термическая устойчивость фаз в сплавах железо-хром-углерод / Б.И. Леонович, О.И. Кочурина, Г.Г. Михайлов и др. Известия вузов, Черная металлургия. 1991. №3. С.4-7.
10. Растворение карбида Cr_3C_2 в железной матрице/ Власюк Р.З., Деймович В.Б., Мамонова И.А. и др. Порошковая металлургия. 1981. №10. С.26-30.
11. Власюк Р.З., Грипачевский А.Н., Родомыслевский И.Д. Изменение химического и фазового состава частицы Cr_3C_2 , находящейся в контакте с железной матрицей при спекании. Порошковая металлургия. 1984. №8. С.28-33.
12. Гришин О.М., Надточий А.А. Вплив добавок заліза на кінетику відновлення оксиду хрому вуглецем і карбідами. Вчені записки ТНУ ім. В.І.Вернадського. Серія Технічні науки. 2019. Т. 30(69). № 6. Ч.2. С.24-29. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/05>.
13. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. М.: Металлургия, 1988. 784с.
14. Гордиенко С.П., Маслюк В.А. Компьютерное моделирование фазовых превращений Cr_3C_2 в контакте с железом при нагреве. Порошковая металлургия. 1996. №42. С.69-73.

REFERENCES

1. Grigor'ev S.M., Petrishchev A.S., Kovalev A.M. Gubchatye i plavlenye ligatury iz rudnogo i tekhnogenogo syr'ya (termodinamika, fazovye i strukturnye prevrashcheniya, tekhnologiya polucheniya i ispol'zovaniya, povyshenie stepeni utilizatsii, ekonomika). Zaporozh'e: Zaporozhskij nacional'nyj universitet, 2013. 306s. ISBN978-966-599-434-3
2. Ostrik P.N., Gasik M.M., Pirog V.D. Metallurgiya gubchatykh i poroshkovykh ligatur. K.: Tekhnika, 1992. 128 s.
3. Grishin A.M., Ivashchenko V.P., Shcheglova I.S., Dzyuzyura R.S. Termodinamicheskie zakonomernosti polucheniya gubchatykh ligatur s nizkim soderzhaniem ugleroda. ElektroMetallurgiya. 2018. №9. S.16-23.
4. Popov A.A., Ostrik P.N., Gasik M.M. Termodinamika vosstanovleniya i karbidoobrazovaniya v sisteme Cr-O-S. Izvestie vuzov, Chernaya metallurgiya. 1986. №10. S.1-3.
5. Simonov V.K., Zolotareva V.V., Vlasenko V.N. O mekhanizme tverdogaznogo vosstanovleniya Cr_2O_3 uglеродом. Teoriya i praktika metallurgii. 1998. №2. S.17-20.
6. Kazachkov E.A. Raschety po teorii metallurgicheskikh processov. M.: Metallurgiya, 1988. 228s.
7. Popov A.A., Ostrik P.N., Gasik M.M. Termodinamika vosstanovleniya i karbidoobrazovaniya v sisteme Fe-Cr-O-S. Izvestiya vuzov, Chernaya metallurgiya. 1987. №4. S.1-4.
8. Termodinamicheskij analiz sistemy zhelezo-hrom-uglerod / B.I. Leonovich, V.E. Serebryakov, N.R. Frago i dr. Izvestiya vuzov, Chernaya metallurgiya. 1989. №1. S.4-10.
9. Termicheskaya ustojchivost' faz v splavah zhelezo-hrom-uglerod / B.I. Leonovich, O.I. Kochurina, G.G. Mihajlov i dr. Izvestiya vuzov, Chernaya metallurgiya. 1991. №3. S.4-7.
10. Rastvorenie karbida Cr_3C_2 v zheleznoj matrice/ Vlasjuk R.Z., Dejmovich V.B., Mamonova I.A. i dr. Poroshkovaya metallurgiya. 1981. №10. S.26-30.
11. Vlasjuk R.Z., Gripachevskij A.N., Rodomysel'skij I.D. Izmenenie himicheskogo i fazovogo sostava chasticy Cr_3C_2 , nahodyashchejsya v kontakte s zheleznoj matricej pri spekanii. Poroshkovaya metallurgiya. 1984. №8. S.28-33.
12. Grishin O.M., Nadtochij A.A. Vpliv dobavok zaliza na kinetiku vidnovlennya oksidu hromu vugleцем і карбідами. Vcheni zapiski TNU im. V.I.Vernads'kogo. Seriya Tekhnichni nauki. 2019. T. 30(69). № 6. CH.2. S.24-29. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/05>.
13. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov. M.: Metallurgiya, 1988. 784s.
14. Gordienko S.P., Maslyuk V.A. Komp'yuternoe modelirovanie fazovykh prevrashchenij Cr_3C_2 v kontakte s zhelezom pri nagreve. Poroshkovaya metallurgiya. 1996. №42. S.69-73.

Received 04.02.2022.

Accepted 19.02.2022.

PHYSICO-CHEMICAL PREREQUISITES FOR DECARBURIZATION OF CARBON-THERMAL REDUCTION PRODUCTS Cr_2O_3

The development of physicochemical bases for solid-phase reduction of ore and man-made materials makes it possible to obtain spongy ligatures with specified properties. The use of such materials in metallurgy can significantly save mineral and energy resources. The thermodynamic analysis of the process of carbon-thermal reduction of chromium-containing raw materials to determine the conditions for obtaining an alloy with low carbon content.

A six-factor mathematical planning experiment was performed using a half-replica of a complete factorial experiment. The analysis of solid-phase reduction of chromium-containing charge was carried out taking into account the following factors: temperature, time, gas phase composition, C/O, Cr/Fe and Fe/Ni ratios. A regression equation is obtained, which makes it possible to quantify the optimal value of each factor.

By phase analysis of the Cr-O-C and Cr-Fe-O-C systems, the conditions that ensure the reduction of carbon in the final product are determined. The conditions for the appearance of metastable carbides are considered. Thermodynamic parameters that ensure the stability of solid phases are determined. Thermodynamic analysis with the participation of carbides in the process of solid-phase reduction was performed. Features of the carbido-thermal reduction mechanism are considered.

The introduction of metallic iron into the charge creates the preconditions for the reduction of carbon, as well as intensifies the process of solid-phase reduction. The results of the performed researches testify to the fundamental possibility of complete reduction of Cr_2O_3 in the presence of iron rather quickly. The metallized product obtained under these conditions is largely susceptible to decarburization. Calculations show that at a ratio of Cr_2O_3 and carbon in the charge and an atomic ratio of Cr/Fe ≈ 1 , the carbon content in the final product is $\sim 4.5\%$. The charge mixture in principle allows to reduce the carbon concentration to $\sim 2.8\%$. Replacing iron with iron oxides does not reduce the speed characteristics of the process. It should be noted that the replacement of Cr_2O_3 by natural material is accompanied by a significant reduction in the rate of recovery. The influence of some parameters on the speed characteristics of carbido-thermal reduction of chromium-containing materials is analyzed.

Keywords: chromium oxide, ligature, solid-phase reduction, carbide, factor analysis.

Гришин Олександр Михайлович – доцент, к.т.н., доцент кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій.

Надточій Анжела Анатоліївна – доцент, к.т.н., доцент кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій.

Петренко Віталій Олександрович – професор, д.т.н., професор кафедри інтелектуальної власності та управління проектами, Український державний університет науки і технологій.

Киричок Владислав Сергійович – аспірант кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій.

Grishin Alexander – PhD, Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

Nadtochij Angela – PhD, Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

Petrenko Valery – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Intellectual Property and Project Management, Ukrainian State University of Science and Technology.

Kyrychok Vladislav – PhD Student, Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technology.

А.Ю. Зимогляд, А.І. Гуда, Н.Ю. Калініна, В.Ф. Балакін, Г.І. Ларіонов

ПРОЕКТУВАННЯ І АНАЛІЗ СХЕМОТЕХНІКИ ІНВЕРТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Анотація. У статті описана схема та конструкція виготовлення лабораторного інвертора, призначеного для індукційного нагріву та плавки. Інвертор може бути легко інтегрований в обладнання лабораторних установок (плавка металу у вакуумному посту). Він може також використовуватися автономно для загартування та плавлення невеликих зразків металів та сплавів. Потужність інвертора регулюється від 0 до 2 кВт, діапазон робочих частот від 50 кГц до 200 кГц, живлення від мережі 220В.

Ключові слова: інвертор, індукційне нагрівання, плавка металу, перетворювач із індуктором, плата управління інвертором.

Вступ

Індукційний метод нагрівання широко застосовується як у промисловому виробництві, так і в дослідницькій та лабораторній практиці [1, 4]. Застосування не обмежується процесами індукційної плавки. Широке розповсюдження отримала індукційна термообробка, зокрема загартування. Промислові задачі, завдяки широкому застосуванню феромагнітних сплавів, дозволяють обмежуватися живленням індукторів струмами промислової частоти. Також в цих умовах немає істотних вимог ні до управління, ні до мінімізації втрат на перетворення. З іншого боку, індукційна обробка кольорових металів, особливо у дослідницькій практиці, вимагає застосування вищих частот, і важливими умовами стають можливість практично довільного управління та мінімізація втрат [3]. Сучасна елементна база дозволяє створювати перетворювачі електричної енергії із відмінними характеристиками [4]. Однак, коректне використання цієї бази вимагає як використання правильних схемотехнічних рішень, так і застосування необхідних методів управління.

Принципово важливим схемотехнічним елементом у розглянутих задачах є інвертор. Інверторами називають пристрої що зворотні випрямлячам, тобто – перетворювачі постійної напруги в змінну. Зазвичай термін «інвертор» використовується більш вузько: генератор змінної напруги, що використовується як джерело живлення. Вихідна напруга інвертора може бути промислової частоти (50-400 Гц) і більш високої, до десятків мегагерц. Однією з найважливіших переваг джерел живлення підвищеної частоти є різке зменшення масогабаритних параметрів трансформаторів. Інший позитивний момент пов'язаний з тим, що перемикаючі силові елементи інверторів працюють у ключовому режимі, тобто основна частина втрат енергії відбувається лише у моменти перемикавання. Таким чином, сучасні швидкодіючі напівпровідникові ключі дозволяють суттєво збільшити ККД перетворювачів, наближаючи його в деяких конструкціях до 95 %.

Швидкий розвиток та здешевлення елементної бази силових електроніки призвело до того, що деякі класи інверторів міцно зайняли свої ніші вже навіть у побуті. Це потужні імпульсні блоки живлення сучасних персональних комп'ютерів, електронні баласты для люмінесцентних ламп, зварювальні інвертори та індукційні електроплитки. Доступність та помірна ціна транзисторних інверторів також могли б сприяти ширшому їх впровадженню в практику експериментів з термічного випаровування металів у вакуумі, плавлі металів у вакуумі та ін. Також можливе використання інверторів у лабораторії як:

1. Джерела живлення для печей із низькоомними трубчастими нагрівачами.

2. Джерела живлення дугових розрядів (плазмохімічні реактори з дуговим розрядом, електродугове плавлення).

3. Джерела живлення високовольтних нерівноважних розрядів (імпульсні розряди, високочастотні коронні та дугові розряди, бар'єрні розряди (озонатори)). Іонне очищення, травлення у вакуумній камері. Магнетронне напilenня металів у вакуумі.

4. Індукційне нагрівання (індукційні печі, загартування, плавка).

На жаль, сучасна економічна обстановка суттєво обмежує можливість використання універсального інвертора фабричного виготовлення потужністю кілька кіловат із регульованою частотою перетворення до двох сотень

кілогерців. З іншого боку, для дослідницької лабораторії універсальність і гнучкість устаткування – зазвичай одне із найважливіших критеріїв, часто переважає інші. Це дещо зміщує акценти у бік універсальних рішень.

З урахуванням цих міркувань було поставлено завдання розробити та виготовити прототип лабораторного інвертора. Результатам розробки та опису пристрою присвячено цю статтю. Інвертор може працювати у діапазоні частот 50-200 кГц, потужність (для півмосту) – до 2 кВт.

Основна частина

За топологію побудови інвертора був обраний напівміст, схема представлена на рис. 1. Напівмостовий силовий модуль включає 2 силових елементи, в даному випадку IGBT транзистора і конденсаторний дільник. Навантаження підключається до середніх точок силових елементів T1, T2 (далі ключів) та конденсаторів дільника. За допомогою плати управління ключі вмикаються і вимикаються поперемінно із заданою частотою, вмикаючи пов'язаний з ними вихід навантаження то до верхньої (за схемою) то до нижньої шини живлення. В результаті при навантаженні виходить змінна напруга з амплітудою, що дорівнює половині напруги живлення і з частотою, що дорівнює частоті перемикавання ключів.

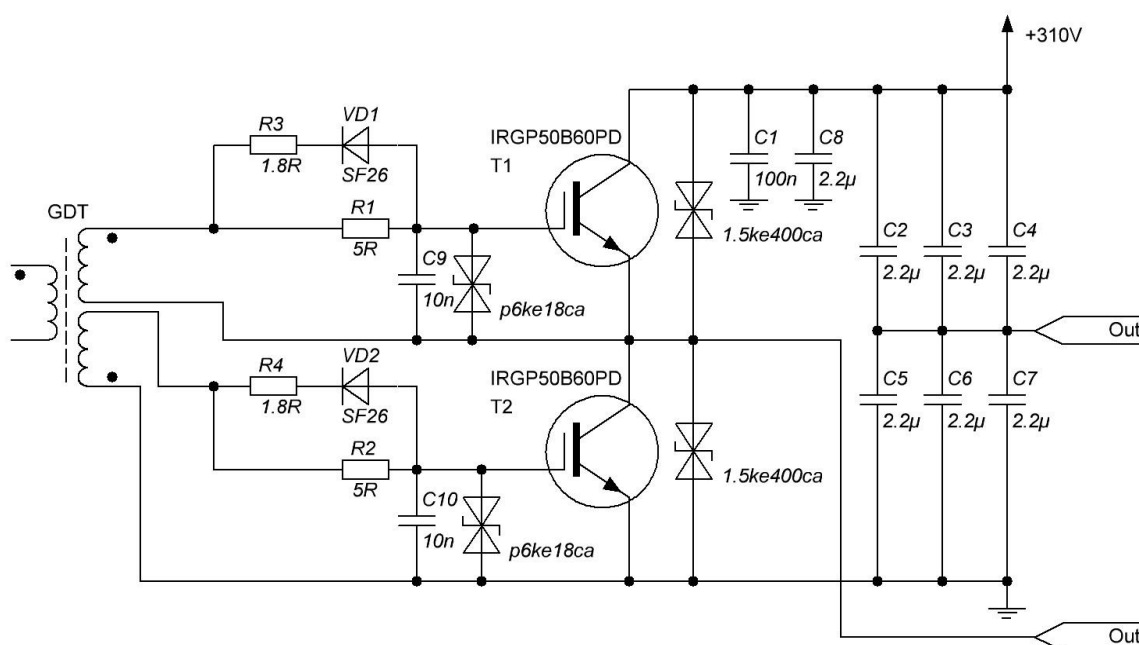


Рисунок 1 – Схема силового модуля за топологією напівміст

Під час роботи навіть на чисте активне навантаження при закритті ключів з'являються викиди напруги. Звичайно ці ефекти значно зростають при роботі на індуктивне навантаження, для якої і розроблявся даний інвертор.

Для вирішення цієї проблеми використовують так звані зворотні діоди, включені паралельно ключам. У сучасних IGBT транзисторах вже вбудовані UF діоди, проте для більшого придушення викидів було встановлено супресори 1.5KE400CA. Також з цією метою максимально близько до виходів ключів, встановлені блокуючі конденсатори C1 і C8.

Конденсаторний дільник виконаний з 6 конденсаторів для розподілу потужності на них і зменшення нагрівання, що виділяється на кожному плівковому конденсаторі.

Оскільки силовий модуль реалізовано по топології напівмосту, виникає відома проблема управління верхнім ключем, у разі – T1. Необхідно, щоб схема управління видавала керуючий імпульс не до потенціалу землі, а до рівня початку нижнього транзистора – T2. Цей рівень може змінюватись у процесі роботи приблизно від нуля до напруги живлення силового модуля. Існує кілька схемотехнічних рішень цієї проблеми, вони діляться, у свою чергу, на два класи: з гальванічною розв'язкою та без. Прикладами перших є схеми з розв'язкою на оптиці або трансформаторах керування затворами (GDT Gate Driver Transformer). Прикладом другої є різноманітні bootstrap схеми.

Незважаючи на наявність великої кількості готових мікросхем bootstrap драйверів та простоту реалізації, при згорянні ключів можливе вигорання і всієї схеми керування. Тому для керування було вибрано керування за допомогою трансформатора керування затворами (GDT). До переваг GDT можна віднести: легкість в інвертуванні фази сигналу (просто поміняти виходи трансформатора), легко отримати напруги управління вище/нижче (підвищує/знижує GDT), дешевизна, надійність, чудова гальванічна розв'язка, можливість відведення потенціалу затвора нижче нуля. Також GDT не може дозволити двом ключам відкритися одночасно. При цьому є можливість модернізації півмосту в міст без істотних витрат за рахунок додавання двох обмоток.

Для придушення викидів напруги на виході GDT паралельно IGBT затворам встановлені супресори P6KE18CA. Для придушення ефекту Міллера паралельно затворам встановлені конденсатори на 10 нФ. Також для

забезпечення повільного відкриття та швидкого закриття ключів встановлені RDR ланцюжки, що складаються з резисторів 1.8 Ом, 5 Ом та швидкісного діода SF26. Форма імпульсів, що управляють, представлена на рис. 2.

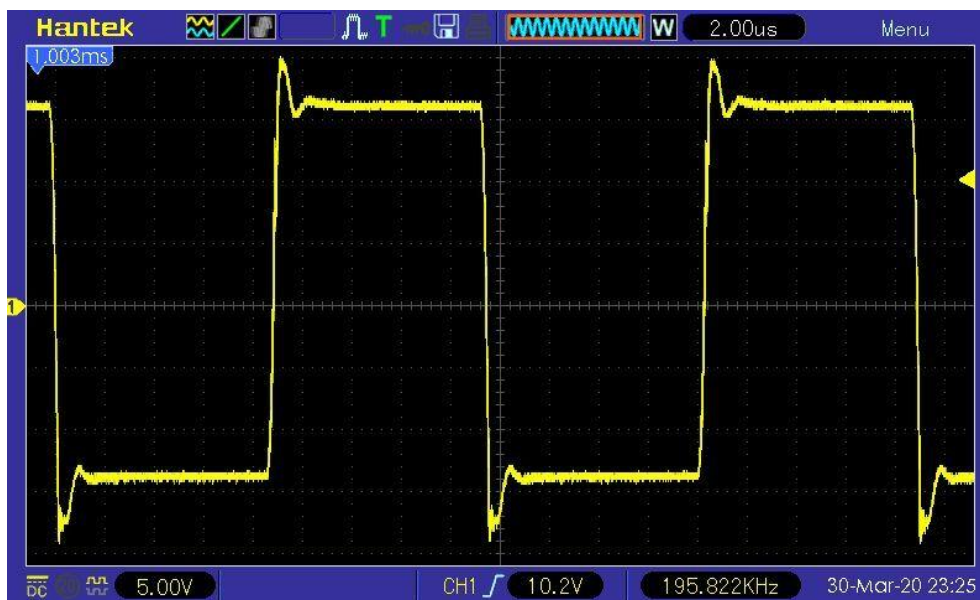


Рисунок 2 – Форма управляючих імпульсів на затворах IGBT

Для «розгойдування» трансформатора управління затворів на частотах 50 – 200 кГц з ємнісним навантаженням у вигляді затворів IGBT, а також конденсаторів по 10 нФ, для придушення ефекту Міллера потрібний значний струм. Для його забезпечення було зібрано схему драйвера GDT, яка представлена на рис. 3. Вона включає мікросхему MC34151 що має в собі два драйвера затворів з інверсією, яка в свою чергу управляє двома напівмостами на комплементарних парах польових транзисторів (IRF540/IRF9540).

Для забезпечення необхідного значення мертвого часу (коли обидва транзистори закриті) в парах комплементарних польових транзисторів, перед ними встановлені RD ланцюжки. Вони складаються з діода Шоттки SS24 та резистора номіналом 10 Ом. Завдяки цьому рішенню виключаються наскрізні струми в драйвері.

Конденсатор C11 і резистор R16 можна як снаббер, призначений для придушення викидів напруги під час роботи на індуктивне навантаження. Крім цього, C11 видаляє постійну складову.

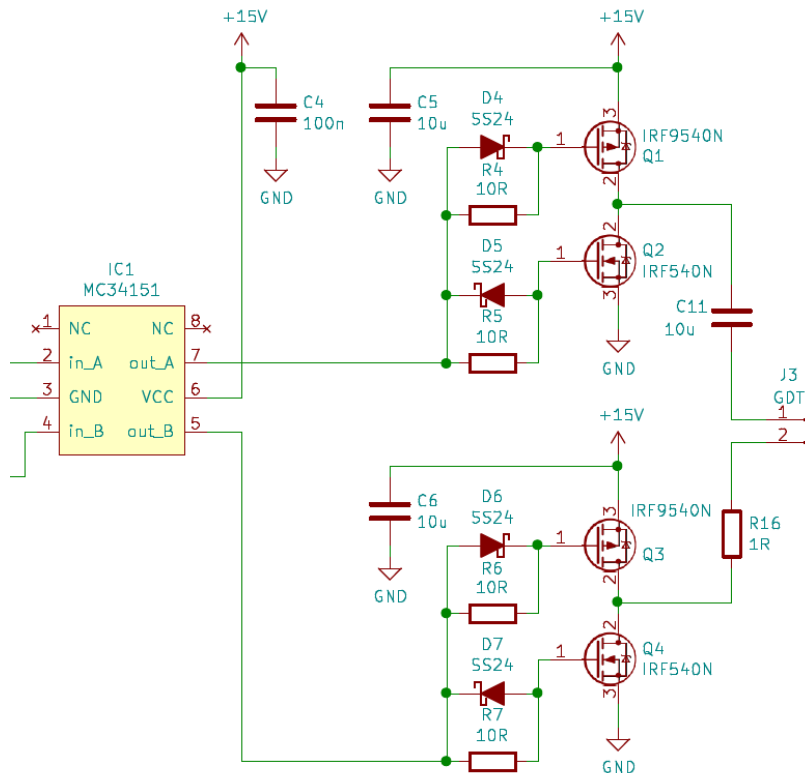


Рисунок 3 – Схема вузла драйвера GDT

Для того, щоб комплементарні пари польових транзисторів могли віддати миттєво великі струми, необхідні для управління затворами IGBT максимально поруч з їх виходами встановлені керамічні конденсатори по 10 мкФ. Оскільки вихідні транзистори драйвера можуть нагріватися у процесі роботи, на них встановлюється радіатор.

Для того, щоб IGBT транзистори працювали в ключовому режимі, і на них виділялася мінімальна кількість тепла необхідно, щоб напруга управління була більшою за 10 Вольт (згідно з документацією на IRGP50B60PD).

Для забезпечення цієї вимоги було зібрано вузол захисту від зниженої напруги або UVLO (Under voltage lock-out threshold) на мікросхемі ADM707 (рис. 4). Це спеціалізована мікросхема містить ІОН на 1.25 Вольт, компаратор, виходи для скидання (прямий та інверсний), а також таймер затримки включення 300 мс. З обв'язки було необхідно встановити лише зовнішній дільник напруги R13, R14 для встановлення бажаного порога по напрузі. При номіналах дільника як на схемі (рис. 4) спрацьовування буде при напрузі менше 11 Вольт. Щоб ввести гістерезис із спрацьовування захисту, за зниженою напругою введено резистор R15. Для цих параметрів величина

гістерези становить 1 Вольт. Як і всіх мікросхемах плати управління, максимально близько до виводів живлення мікросхеми встановлений блокуючий конденсатор 100 нФ.

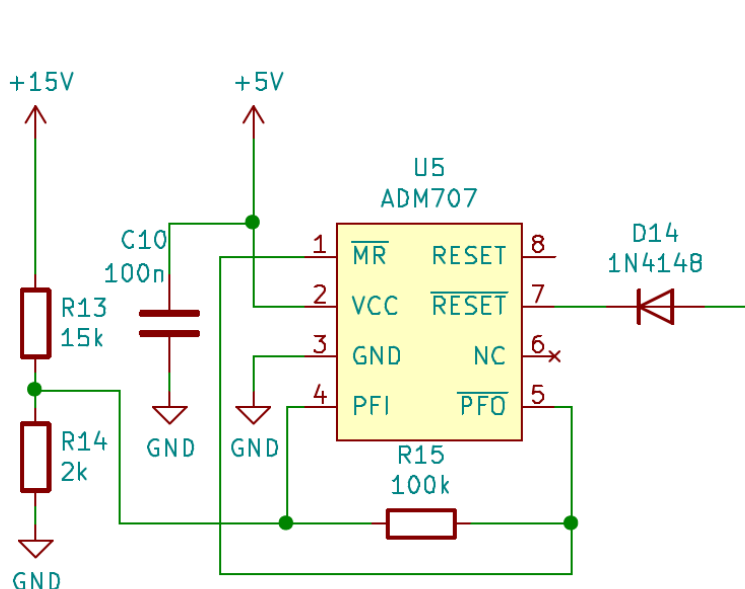


Рисунок 4 – Вузол захисту від зниженої напруги

Вузол захисту струму виконаний на компараторі LM311 і представлений на рис. 5. Сигнал для захисту струму знімається з струмового трансформатора 1:100 встановленого за змінною напругою 220 Вольт 50 Гц до випрямляча напруги силового модуля. Для того, щоб можна було виявити перевищення струму будь-якої напівхвилі, як позитивної, так і негативної, використаний мостовий випрямляч на діодах Шоттки. Шунт встановлений після діодного мосту для забезпечення більшої лінійності. Паралельно шунту стоїть керамічний конденсатор, який працює у ролі ВЧ фільтра. На інверсний сигнал компаратора надходить напруга з шунта, але в прямий – напруга з регульованого дільника напруги. Саме їм і задається рівень спрацьовування захисту струму. Завдяки підібраним номіналам, на кожні 10 Ампер струму, що проходить, через первинну обмотку трансформатора струму на шунті падає 1 Вольт, а регульованим дільником можна виставити захист по струму від 1 – 25 Ампер. Для того щоб після спрацьовування захисту по струму схема відключилася і чекала перезапуску введена «заскочка» на транзисторі АО3401А. Транзистор відкривається при спрацьовуванні компаратора, при цьому світиться світлодіод аварії по струму, а через діод D13 йде сигнал

скидання. Для скидання захисту струму на керуючій платі встановлена кнопка скидання SW1.

Захист по перегріву реалізований на біметалевому термореле на 70 градусів, яке стоїть у ланцюзі живлення загального пускача живлення за зміною 220 Вольт 50 Гц.

Для того, щоб при спрацьовуванні захисту відключення проводилося в нулі генератора меандра, використовується вузол синхронного відключення (рис. 5). Основою вузла є D-тригер та елемент «І».

На вхід скидання тригера подається сигнал із датчиків захисту через діоди, а сам вхід підтягнутий до +5 Вольт через резистор 1 кОм. Вхід CLK тригер тактується від генератора меандра. Оскільки розглядалася можливість використовувати зовнішній генератор меандра, був доданий буфер на двох тригерах Шмітта, а також захисна діодна вилка з резистором R3, що гасить, і резистором підтяжки входу R8. Тригери Шмітта вирівнюють фронти та спади прямокутного сигналу, роблячи однозначною роботу логіки. Оскільки виходи "S" і "D" підтягнуті до +5 Вольт при спрацьовуванні захистів і появі нуля на виведенні скидання D тригера при найближчому переході через нуль на вході CLK сигнал пропадає. Що б зробити з одного керуючого сигналу два з протифазою, використані тригери Шмітта, що залишилися.

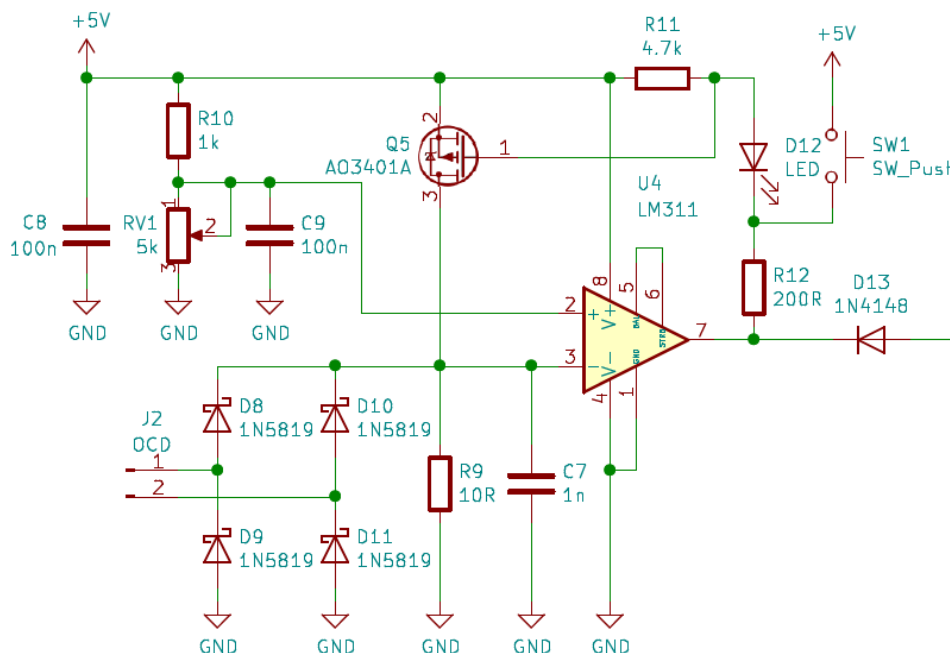


Рисунок 5 – Вузол захисту від підвищеного струму із «заскочкою»

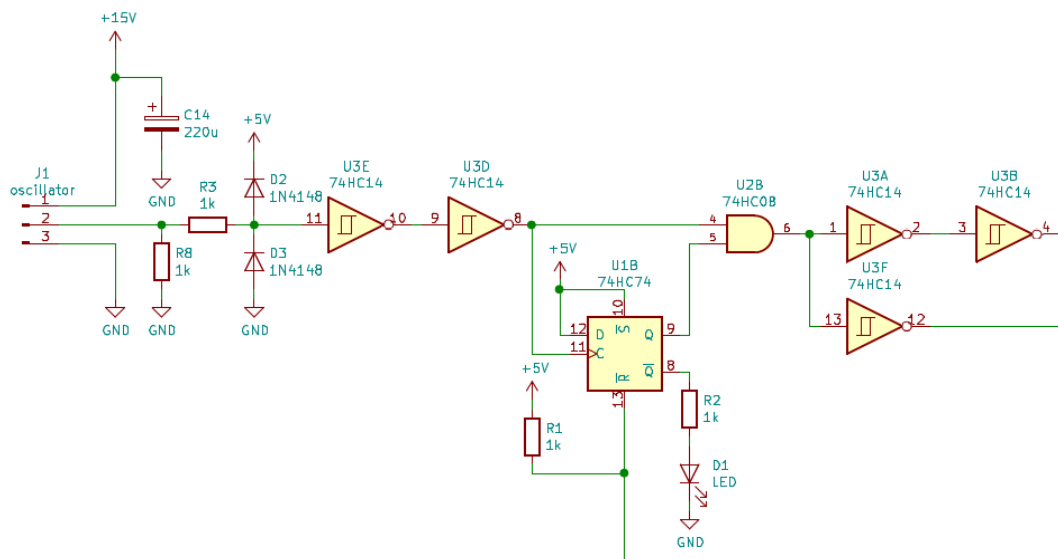


Рисунок 6 – Вузол синхронного відключення

Тимчасові діаграми роботи вузла синхронного відключення представлені рис. 7. На осцилограмі перший канал відповідає сигналу захисту (вхід скидання D тригера), а другий – сигнал меандра, який подається на вузол драйвера GDT. Виходячи з представленої осцилограми, можна сказати, що відключення дійсно відбувається в нулі генератора меандру. Синхронне відключення перевірялося як на низьких частотах (100 Гц), так і на високих (100 кГц), скрізь показавши свою працездатність. Синхронне відключення життєво необхідно, щоб не було коротких імпульсів на затворах IGBT, так званих глітчів, які можуть призвести до виходу з ладу останніх.

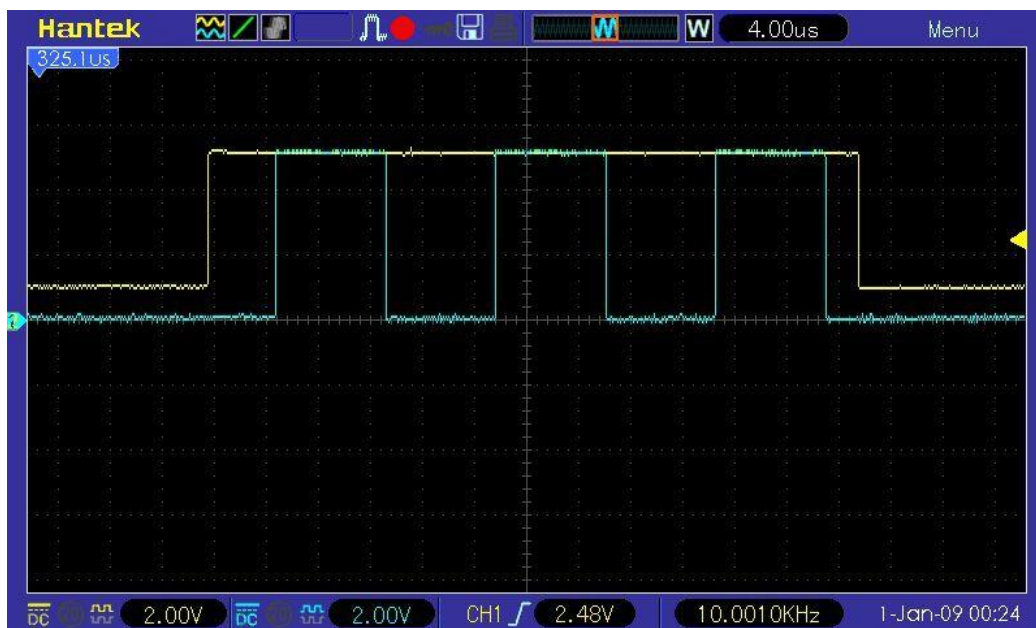


Рисунок 7 – Осцилограма роботи вузла синхронного відключення

Схема управління була зібрана на окремій платі, спроектованій серед KiCAD. На рис. 8 представлена 3D модель плати керування.

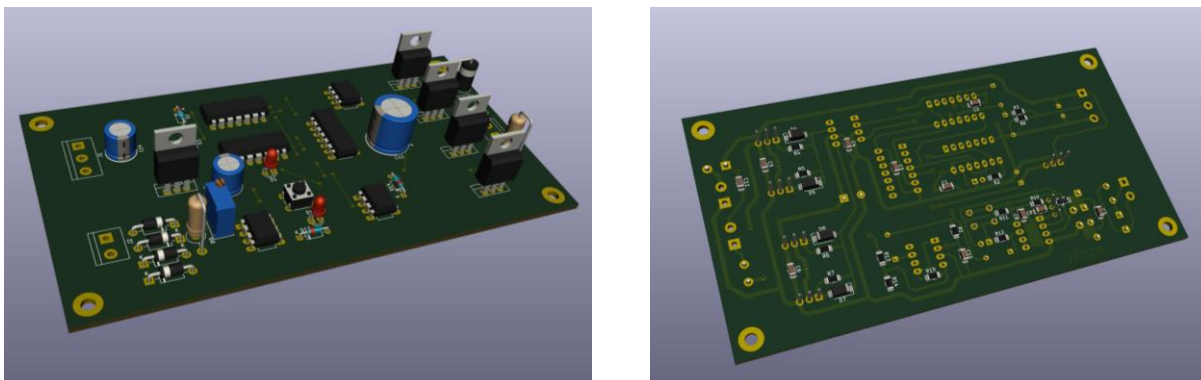


Рисунок 8 – Плата управління 3D модель: зліва вид зверху, справа вид знизу

Як і всі плати в цьому інверторі, плата керування (рис.9, 10) зроблена на односторонньому фольгованому склотекстоліті товщиною 1.2 мм. По краях зроблені отвори кріплення під стійки з гвинтами М3.

Генератор, що задає, під цю плату управління можна взяти готовий, але для реалізації різних методів управління, він був зібраний на мікросхемі TL494 (рис. 11). До генератора висунуто наступні вимоги: вихідна амплітуда має бути від 5 – 12 вольт, можливість регулювання частоти у заданому діапазоні, вихідна форма сигналу – меандр. Для цього завдання важливо, щоб тривалість імпульсу дорівнювала тривалості паузи.

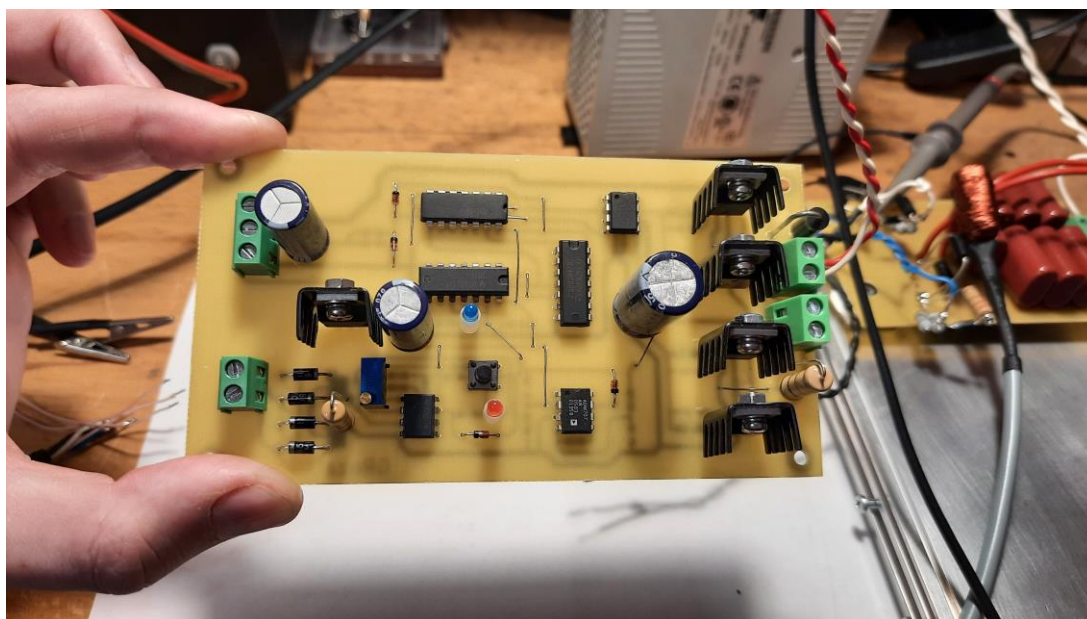


Рисунок 9 – Плата управління – фото зверху

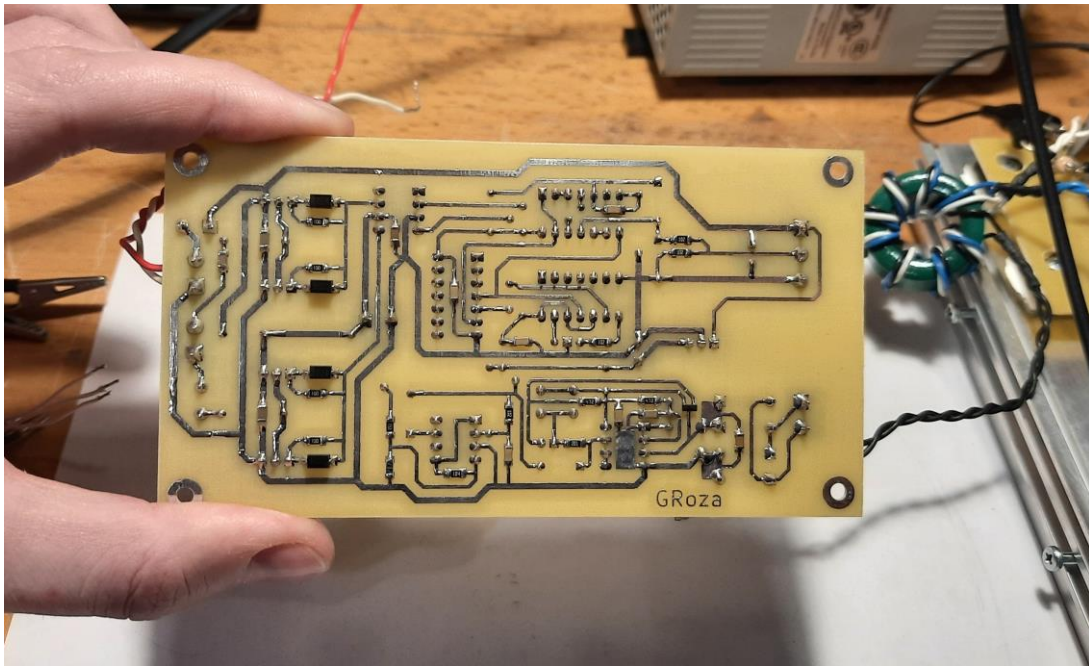


Рисунок 10 – Плата управління – фото знизу

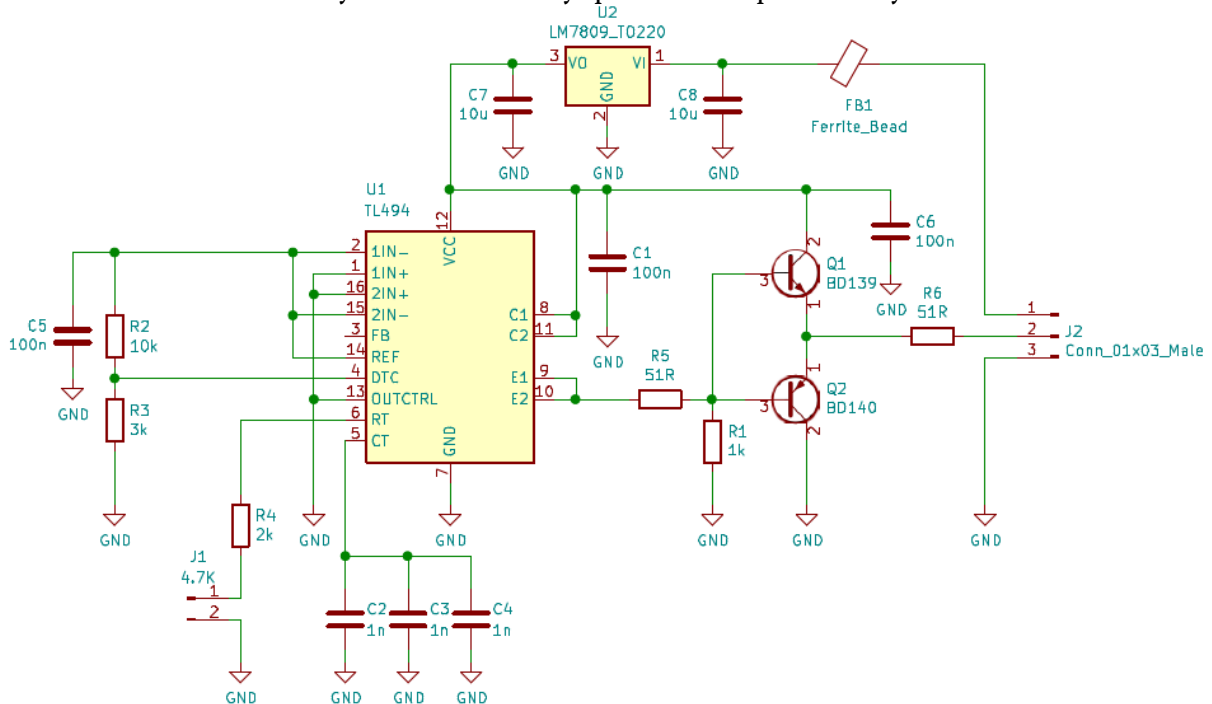


Рисунок 11 – Регульований за частотою генератор меандру

Генератор меандра збудований на мікросхемі TL494 в одноканальному режимі. Для того, щоб підвищити стабільність частоти, живлення мікросхеми виготовлено від окремого стабілізатора на 9 Вольт. Оскільки живлення йде від імпульсного БП, для придушення ВЧ «голок» встановлено феритову бусинку FB1. Щоб на виході був меандр, в ланцюзі установки шпаруватості встановлені резистори R2 і R3. При їх номіналах на 4 виході мікросхеми буде напруга 1.15

Вольта. При цій напрузі на виході 4 TL494 видає тривалість імпульсу рівну тривалості паузи. Оскільки силовий модуль зібраний на транзисторах IRGP50B60PD, а «м'якому» режимі перемикач при роботі на резонансне навантаження ці транзистори, згідно з документацією, працездатні до 200 кГц. Виберемо цю частоту як верхню межу. Нижня межа 50 кГц обумовлена нижніми межами частот для трансформаторного управління затворів IGBT. Власне під цей діапазон 50 - 200 кГц встановлені частотні елементи: C2, C3, C4, R4. Через роз'єм J1 підключається потенціометр на 4.7 кОм, бажано використовувати прецизійний багатооборотний змінний резистор. Особливо це важливо, якщо використовуватиметься частотний спосіб регулювання потужності інвертора. Оскільки генератор меандра зроблено самостійним модулем, на його виході було додано комплементарний емітерний повторювач на транзисторах BD139 та BD140. Він забезпечує вихідний опір генератора близько 50 Ом.

Блок живлення напівмоста є нерегульованим джерелом постійної напруги, що складається з діодного мосту відповідної потужності і конденсатора великої ємності для фільтрації пульсацій напруги. Підключити його до мережі можна через звичайний побутовий автомат, розрахований на струм 10А, який відіграватиме роль і вимикача, і запобіжника. Однак у такого простого рішення є одна проблема. В момент увімкнення конденсатор споживає занадто великий струм (якщо він був розряджений). У кращому випадку це спричинить спрацювання автомата при першому включенні.

Найпростіший варіант усунення цієї проблеми – поставити на вході випрямляча струмообмежуючий резистор. Після того як конденсатори фільтра зарядяться, цей резистор слід замкнути.

Для того, щоб включення відбувалося м'яко, застосована система плавного пуску, реалізована лише на одному транзисторі (рис. 12). При подачі 12 вольт на схему запуску відразу спрацьовують два потужних реле по 30 Ампер і комутують нуль і фазу, працюючи у своїй свого роду контактором. Тоді заряд перші 3 секунди йде через резистори R3, R4. Після цього транзистор VT1 відкривається і третє реле своїми контактами шунтує ці резистори. Для того щоб в мережу 220 вольт 50 Гц, від якої живиться інвертор, не йшли перешкоди, встановлений класичний фільтр із синфазного дроселя T1 і конденсаторів C1, C2, C3. Для захисту від сплесків напруги та викидів встановлено варистор VDR1. Щоб після відключення інвертора конденсатори розряджалися, схемою

встановлені розрядні резистори R2, R5, R6. Оскільки з електролітів споживається струм, з частотою понад 100 кГц, для поліпшення їх режиму роботи встановлений плівковий конденсатор C10.

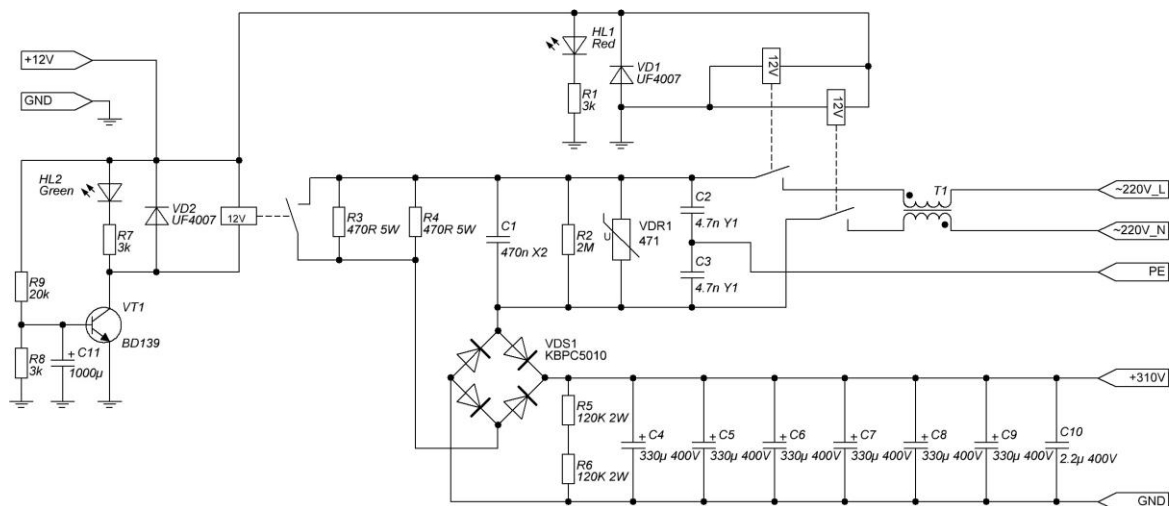


Рисунок 12 – Схема блока живлення напівмосту

Блок схема напівмостового інвертора представлена на рис. 13 а. В якості навантаження підключена первинна обмотка узгоджуючого трансформатора. Через цей трансформатор енергія вкачується в контур індукційного нагріву (рис. 13 б).

Трансформатор узгодження виготовлений на фериті марки ТР4А 50х30х20, типорозмір якого розрахований на 2 кВт, а матеріал – на частоти до 500 кГц. Первинна обмотка – 18 витків дротом у склотканині діаметром 2 мм. Ця обмотка приєднується безпосередньо до виходу інвертора. Роль вторинної обмотки, що складається з одного витка, виконує одна з трубок відвідних індуктора (мідь, діаметр 6 мм), що проходить через центр кільця трансформатора. Індуктор є котушкою, що містить кілька витків (мідна трубка діаметром 6 мм). Індуктор разом із конденсатором С утворює послідовний коливальний контур, на резонансну частоту якого має бути налаштований інвертор. Зразок, що нагрівається, поміщений в індуктор на еквівалентній схемі можна представити як активний опір, індуктивно пов'язаний з індуктором.

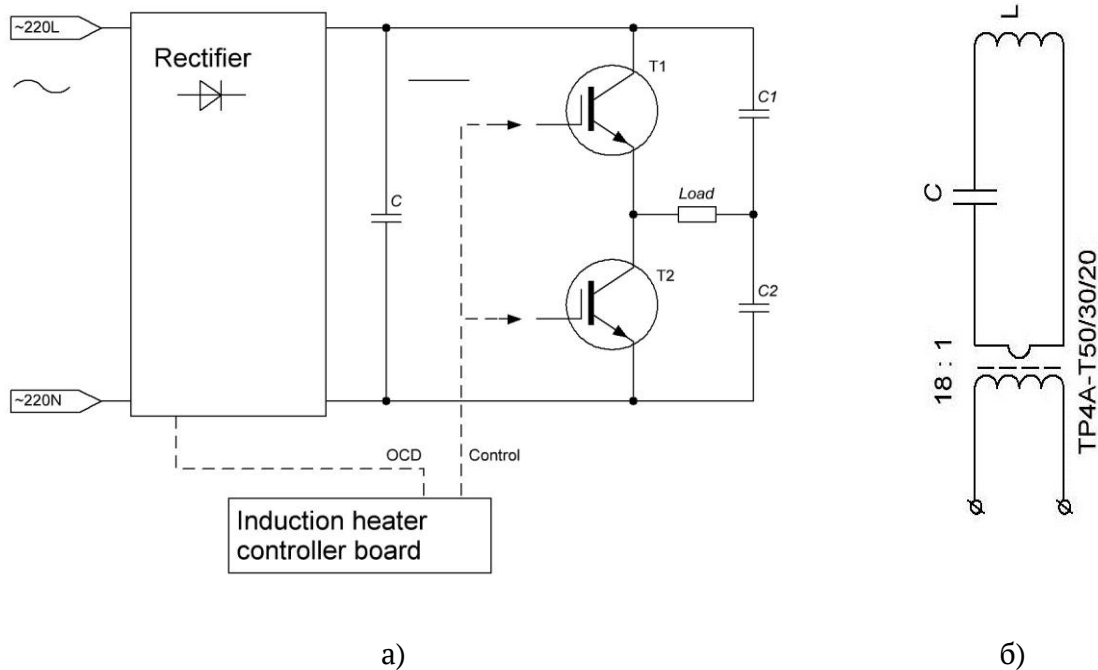


Рисунок 13 – а) блок схема напівмостового інвертору;
б) узгоджувальний трансформатор з контуром індукційного нагрівання

У коливальному контурі спостерігаються дуже великі струми, а саме сотні ампер. Тому мідні трубки, що утворюють індуктор та підводи до нього, при великих потужностях сильно нагріваються. Їх треба обов'язково охолоджувати. Найпростіше використовувати водяне охолодження безпосередньо з водопроводу, але оскільки контур має високу напругу, необхідно передбачити електричну розв'язку індуктора від водопроводу або застосувати охолодження за допомогою насоса і окремих ємностей з водою. Останній варіант і було реалізовано. Як ємність виступало відро ємністю 10 л. Для циркуляції використовувався насос від склоочисника автомобіля. Його продуктивності вистачало для ефективного відведення тепла від контуру.

Бажано також контролювати і температуру води, що охолоджує. Це легко зробити за допомогою металевої вставки у зливальний тракт. До неї можна прикріпити термопару, підключену до тестеру, де є режим вимірювання температури.

Конденсатор С коливального контуру має бути розрахований на досить велику реактивну потужність. Необхідно використовувати або спеціальні конденсатори для індукційного нагріву, або набирати батарею з досить великої кількості плівкових конденсаторів меншої ємності, включених паралельно. В

даному контуру батарея складається з конденсаторів типу СВВ81 і ємністю 22 нФ з робочою напругою 2 кВ загальною ємністю 1 мкФ, а також, з конденсаторів К78-2 ємністю 56 нФ і напругою 2 кВ загальною ємністю 0.8 мкФ з'єднаних. В результаті формується загальна ємність 1.8 мкФ. Конденсатори змонтовані з достатнім інтервалом та добре охолоджуються конвективними потоками повітря. Тому навіть після півгодини роботи на максимальній потужності вони нагріваються несуттєво, не більше 10-20 градусів.

Загальний вигляд усієї конструкції представлений на рис. 14. Регулювання потужністю виконується за допомогою регулювання частоти накачування контуру.

Для перевірки працездатності інвертора та можливості його роботи на навантаження у вигляді контуру індукційного нагрівача через трансформатор накачування було проведено серію експериментів з нагрівання металу. Для цього всередину контуру поміщався метал, і частота опускалася з 200 кГц до 140 кГц. При цьому потужність споживання від мережі сягала 1.5 кВт (рис. 15).

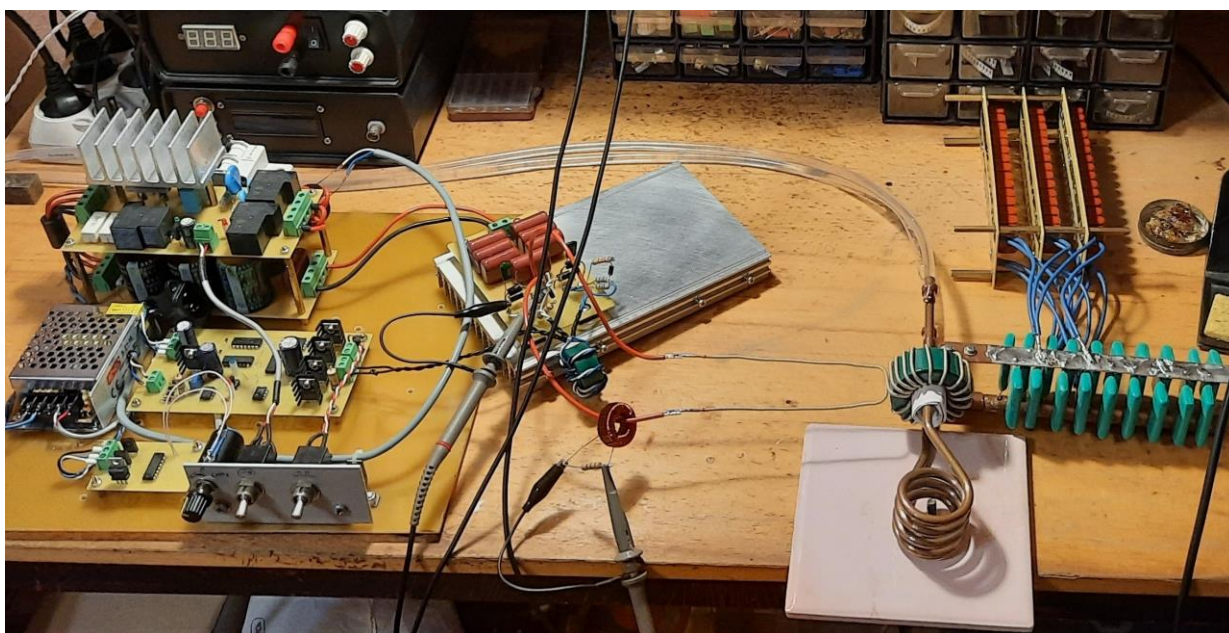


Рисунок 14 – Загальний вигляд усієї конструкції перетворювача з індуктором

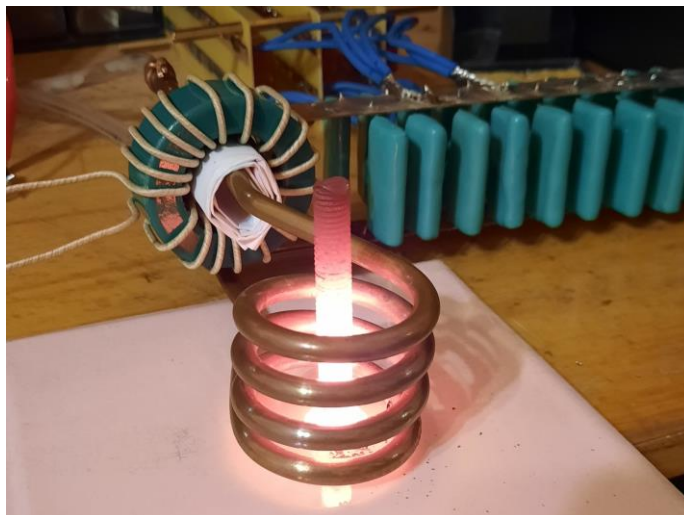


Рисунок 15 – Тестування інвертора навантаженого на контур індукційного нагрівача

Висновки

Описаний інвертор показав свою працездатність. Завдяки захищеності від перевищення струму, перегріву, зниженому напрузі живлення у схемі управління він добре підходить для лабораторних досліджень з плавки та нагрівання металу. Застосування сучасної елементної бази, разом із схемотехнічними рішеннями, дозволило досягти необхідних параметрів щодо ефективності, діапазону робочих частот і потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бодажков В.А. Объёмный индукционный нагрев. СПб: Политехника, 1992. 72 с.
2. Глуханов Н.П. Основы высокочастотного нагрева. М.-Л., «Машиностроение», 1965. 80 с.
3. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л., «Энергия», 1974 – 264 с.
4. Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond L. Cook. Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing) CRC Press; 2nd edition – 2017. 750 p. ISBN-13: 978-1138748743

REFERENCES

1. Bodazkov V. Volumetric induction heating. St. Petersburg: Politekhnik, 1992. 72 p.
2. Gluhanov N. Fundamentals of high-frequency heating. M.-L., Engineering, 1965. 80 p.
3. Sluhosky A. Riskin S. Inductors for induction heating. L., Energy, 1974 – 264 p.
4. Valery Rudnev, Don Loveless, Raymond L. Cook. Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing) CRC Press; 2nd edition – 2017. 750 p. ISBN-13:978-1138748743

Received 06.12.2022.

Accepted 20.12.2022.

UDC 621.365.5.

A. Zimoglyad, A. Guda, N. Kalinina, V. Balakin, H. Larionov

DESIGN AND ANALYSIS OF CIRCUIT TECHNIQUE OF INVERTER CONVERTER FOR INDUCTION HEATING

For a research laboratory, the versatility and flexibility of equipment is usually one of the most important criteria. For these reasons, the task was to develop and manufacture a prototype of a laboratory inverter, capable to drive powerfull laboratory devices, like an induction heather, magnetic stress device, and so on. Among the required power leveled, the wide frequency operationg range and durability are the inavoidable requirements.

The article describes the schematics and design of a laboratory inverter designed for induction heating and melting. The inverter can be easily integrated into the equipment of laboratory installations (for example, intended to melt of metal in a vacuum post). It can also be used autonomously to harden and melt small samples of metals and alloys, including the color metals. The inverter power inverter is adjustable from 0 to 2 kWt, the operating frequency range from 50 kHz to 200 kHz, power supply from 220 V.

A half-bridge topology was chosen as the core of the inverter construction. Was developed an undervoltage protection unit, overheat protection, a control circuit on a separate board, a voltage generator were assembled, and water cooling to the copper tubes of the oscillatory circuit was assembled.

To test the efficiency of the inverter and the possibility of its operation on the load in the form of a circuit of the induction heater through the pump transformer, a series of experiments on metal heating was performed. To achieve this results, metal sample was placed inside the inductor coil, and the frequency was lowered from 200 kHz to 140 kHz. The power consumption from the network reached 1.5 kW. During these tests, no essentail overheating of the electornic componets was detected.

The inverter has proved its efficiency during numerios tests. Due to the protection against overcurrent, overheating, low supply voltage in the control circuit, it is well suited for laboratory research on melting and heating of metal. The usage of modern element base, together with circuit solutions, allowed us to achieve the necessary parameters in terms of efficiency, operating frequency range and power.

Keywords: inverter, induction heating, metal melting, converter with inductor, inverter control board.

Зимогляд Андрій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Гуда Антон Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій і систем, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Калініна Наталія Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Балакін Валерій Федорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теорії, технології та автоматизації металургійних процесів, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Ларіонов Григорій Іванович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-механічних основ гірничого транспорту, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.

Zimoglyad Andrey – candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Guda Anton – doctor of engineering's sciences, professor, Department of information technology and systems, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Kalinina Nataliia – candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Balakin Valery – doctor of engineering's sciences, professor, Department of theory, technology and automation of metallurgical processes, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Larionov Hryhorii – doctor of technical sciences, senior research fellow, department of physical and mechanical fundamentals of mining transport, Institute of Geotechnical Mechanics. M. Polyakova NAS of Ukraine.

МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ФРАКТАЛЬНОГО ТЕПЛО І МАСОПЕРЕНОСУ В ДВОХФАЗНІЙ ЗОНІ РОЗПЛАВУ МЕТАЛУ

Анотація. В статті наведені результати аналізу процесів переносу в розплаві. Представлені результати експериментальних досліджень, що свідчать про фрактальний характер затвердіння притаманній більшості ливарних сплавів. Наведений математичний апарат опису процесу затвердіння з позиції тепло та масопереносу в двофазній зоні та дифузії у фрактальних середовищах. Показано, що математичний апарат дробового обчислення дозволяє ефективно описувати фрактальний характер дифузійних процесів.

Ключові слова: тепло, маса, дифузія, фрактал, модель, розплав, затвердіння, двофазна зона.

Вступ

Проблема вдосконалення прогресивних та створення нових технологій у металургії та ливарному виробництві є актуальною для отримання якісного литого металу і виливків. Вирішенню цієї проблеми сприяє розробка методик визначення температурних полів у процесі затвердіння виливків для отримання практичних рекомендацій щодо управління структурою та властивостями литого металу [1]. Мікроскопічні та макроскопічні властивості темплетів виливків істотно залежать від теплофізичних параметрів системи виливок та ливарна форма, а саме, ширини двофазної зони затвердіння розплаву, початкової температури розплаву, швидкості охолодження виливка, градієнту охолодження розплаву, температури на поверхні ливарної форми [2]. З метою отримання дрібнокристалічної структури металу, зокрема, можливо застосовувати технологію легування [3] або, наприклад, газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі [4]. В роботі [5] наведені результати експериментальних досліджень, які свідчать про фрактальний характер структуроутворення в двофазній зоні металевого розплаву, що твердіє.

Аналіз моделей тепло і масопереносу в двофазній зоні розплаву металу

В роботах [6, 7] наведена термодинамічної постановка задачі нестационарного затвердіння бінарних систем. Розглянемо затвердіння бінарної суміші вздовж просторової осі z (рисунок 1).

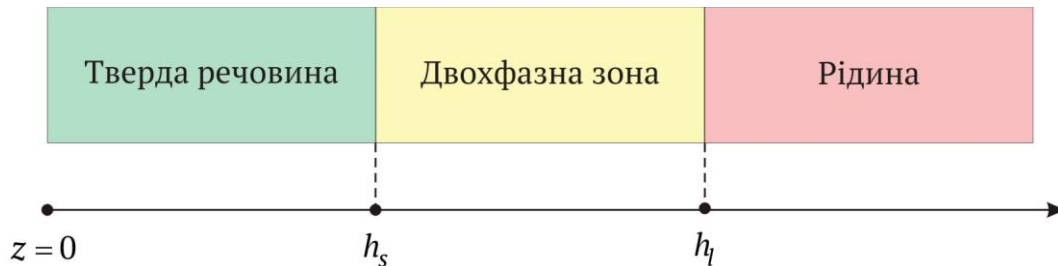


Рисунок 1 – Схематичне представлення компонентів суміші

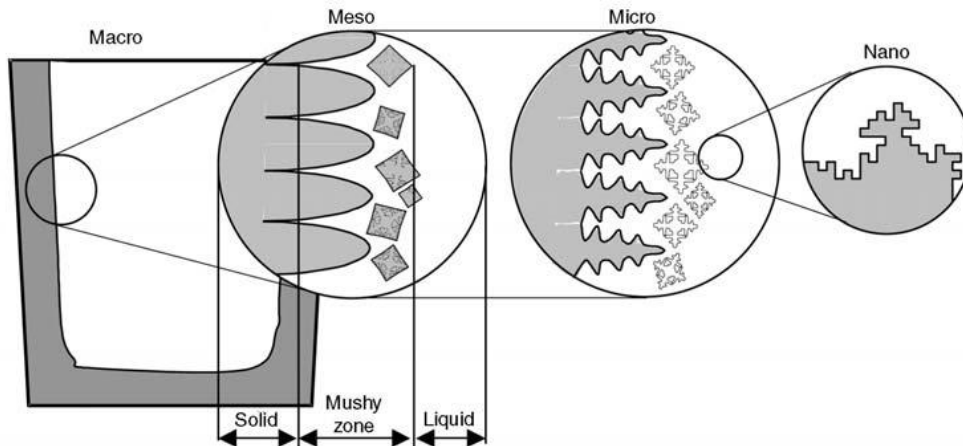


Рисунок 2 – Шкала зон затвердіння [8]

На границі $z=0$, системи що розглядається підтримується постійна температура $T_{const} = T_B$. Границя h_l розділяє рідину і двофазну зону, h_s між двофазною зоною і твердою речовиною. Індеси l , m , s позначають відповідно значення в рідкій, двофазній зоні та твердій фазі.

Температурне поле T в твердій фазі задовольняє рівнянню переносу тепла

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \kappa_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}, \quad 0 < z < h_s(t), \quad (1)$$

де t – час, κ_s – коефіцієнт теплопровідності.

Рівняння тепло і масопереносу в двофазній зоні без врахування дифузії в твердій фазі має вигляд:

$$\rho_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) + \rho_s L \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad h_s(t) \leq z < h_l(t), \quad (2)$$

$$\chi \frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_l \chi \frac{\partial C_m}{\partial z} \right) + (1-k) C_m \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad h_s(t) \leq z < h_l(t), \quad (3)$$

$$T_m = T_* - \Gamma C_m, \quad h_s(t) \leq z < h_l(t), \quad (4)$$

де ρ_m та ρ_s – щільності, C_m – теплоємність, k_m – коефіцієнт теплопровідності, L – прихована теплота затвердіння, D_l – коефіцієнт дифузії, k – коефіцієнт розподілу домішки, T_* – температура фазового перетворення речовини, Γ – нахил лінії ліквідус, φ та $\chi = 1 - \varphi$ – частка твердої та рідкої фаз, відповідно.

Процеси тепло та масопереносу в рідкій фазі описується наступними рівняннями:

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = \kappa_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2}, \quad z > h_l(t), \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = D_l \frac{\partial^2 C_l}{\partial z^2}, \quad z > h_l(t). \quad (6)$$

Граничні умови на границях h_s та h_l мають вигляд:

$$\rho_s L \chi_a \frac{dh_s}{dt} = k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \Big|_{h_s^-} - k_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \Big|_{h_s^+}, \quad z = h_s(t), \quad (7)$$

$$(1-k) C_m \chi_a \frac{dh_s}{dt} = -D_l \chi_a \left(\frac{\partial C_m}{\partial z} \right) \Big|_{h_s^-}, \quad z = h_s(t), \quad (8)$$

$$\rho_s L (1 - \chi_b) \frac{dh_l}{dt} = k_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \Big|_{h_l^-} - k_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial z} \right) \Big|_{h_l^+}, \quad z = h_l(t), \quad (9)$$

$$(1-k) C_m \varphi_b \frac{dh_l}{dt} = D_l \chi_b \left(\frac{\partial C_m}{\partial z} \right) \Big|_{h_l^-} - D_l \left(\frac{\partial C_l}{\partial z} \right) \Big|_{h_l^+}, \quad z = h_l(t), \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial T_l}{\partial z} \right) \Big|_{h_l^+} = -\Gamma \left(\frac{\partial C_l}{\partial z} \right) \Big|_{h_l^+}, \quad z = h_l(t). \quad (11)$$

Значення кількості рідкої фази $\chi_b(\varphi_b)$ на границі h_l та кількості твердої фази $\chi_a(\varphi_a)$ на границі h_s є розв’язком задачі [9]. Аналітичний розв’язок для наведеної вище постановки задачі твердіння неведений в роботах [10, 11].

Зважаючи на значний розвиток питань пов'язаних з твердінням двохфазної зони, слід зазначити що дана постановка не враховує питання фрактального тепло і масопереносу на границі затвердіння розплаву металу.

Метою статті є аналіз процесів термо та масопереносу, що властиві розплаву металу, який перебуває в рідко-твердому стані, та їхній опис із застосуванням математичного апарату дробового обчислення.

Особливості математичних моделей фрактального тепло і масопереносу в двохфазній зоні розплаву металу

Дендритна кристалізація один із найпоширеніших видів затвердіння металів і сплавів [12, 13] (рисунок 2, 3). В роботах [14 – 16] для опису процесів в фрактальних середовищах рівняння переносу набуває вигляд:

$$a_2 D_{0t}^{\alpha} u(x, t) = - \frac{\partial q(x, t)}{\partial x}, \quad (12)$$

де a_2 та α – додатні величини, які залежать від структури хаусдорфової розмірності фрактального середовища, D_{0t}^{α} – оператор дробового диференціювання по t порядку α з початком в початковий момент часу $t = 0$, $u(x, t)$ – дифузія, $q(x, t)$ – тепловий потік, $a \leq x \leq b$ – одновимірне фрактальне середовище, $t \in [0, T]$ – розрахунковий час.

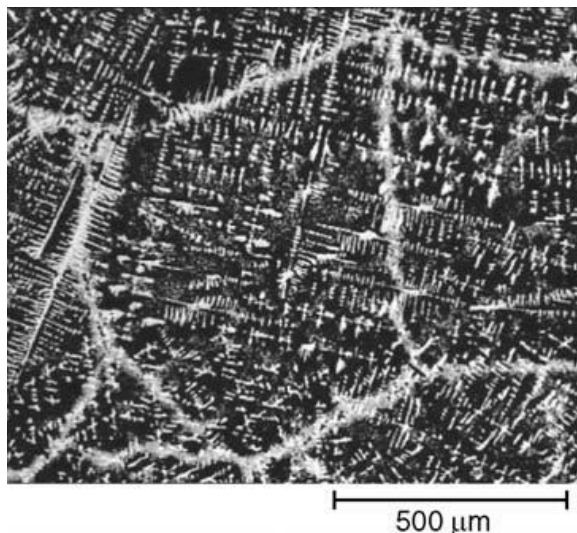


Рисунок 2 – Структура литого алюмінієво-кремнієвого сплаву [12]

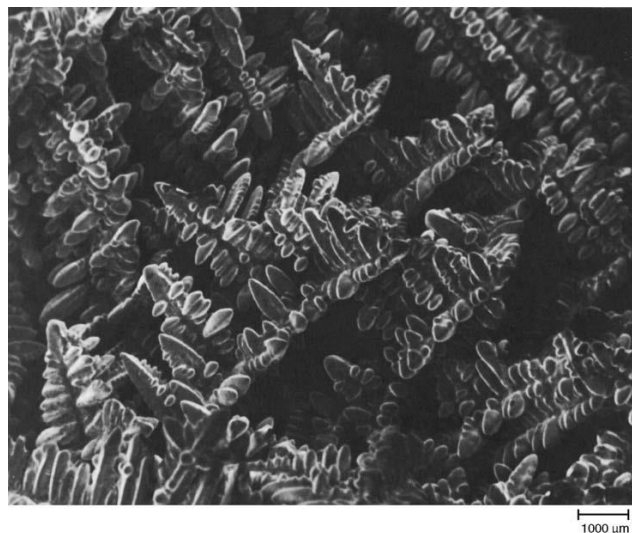


Рисунок 3 – Електронна мікрофотографія центру литого злитка низьковуглецевої сталі з дендритними шипами [13]

З врахуванням закону Фіка (13) рівняння (12) набуває вигляд (14), (15):

$$q(x, t) = -\alpha_1 \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \alpha_1 = \text{const} > 0, \quad (13)$$

$$a_2 D_{0t}^\alpha u(x, t) = a_1 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}, \quad (14)$$

$$D_{0t}^\alpha u(x, t) = D_a \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}, \quad (15)$$

де $D_a = a_1/a_2 > 0$.

Вважається припустимим, що в середовищах із фрактальною геометрією порушується закон (13), тоді замість (13) можливо розглядати рівняння вигляду

$$q(x, t) = -\alpha_1 \frac{\partial u}{\partial x} + b_1(t) \int_a^x u(\xi, 0) d\xi + b_2(t) \int_x^b u(\xi, 0) d\xi, \quad (16)$$

де $b_1(t)$ та $b_2(t)$ – характеристики середовища та процесу переносу, ξ – координата поточної точки.

Припущення (14) та (16) призводять до розгляду навантаженого рівняння переносу

$$D_{0t}^\alpha u(x, \eta) = a_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b_{12}(t) u(x, 0), \quad (17)$$

де $a_{12} = a_1/a_2$, $b_{12}(t) = (b_1(t) - b_2(t))/a_2$.

Рівняння (12) відноситься до класу математичних моделей

$$A_0 D_{0t}^\alpha u(x, \eta) + \sum_{k=1}^m A_k D_{0t}^{\alpha_k} u(x_k, \eta) = -D_{ax}^\beta q(\xi, t) \quad (18)$$

з потоком

$$q(x, t) = -B_0 D_{ax}^{\beta_0} u(\xi, t) - \sum_{k=1}^n B_k D_{ax}^{\beta_k} u(\xi, t_k), \quad (19)$$

де A_k , B_k , α , α_k , β , β_k , a – характеристики фрактального середовища, $a \leq x_1 < x_2 < \dots < x_m$, $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$.

Рівняння переносу в середовищах із фрактальною часовою та просторовою структурою набувають вигляд

$$A_0 D_{0t}^\alpha u(x, \tau) - D_{ax}^\beta B_0 D_{a\xi}^{\beta_0} u(\xi, t) = \sum_{k=1}^n D_{ax}^\beta B_k D_{a\xi}^{\beta_k} u(\xi, t_k) - \sum_{k=1}^n B_k D_{ax}^{\beta_k} u(\xi, t_k), \quad (20)$$

Якщо $0 < \beta_k < 1$, $B_k = B_k(t)$, $D_{ax}^{\beta_k-1} u(\xi, t) = 0$ при $x = a$ для будь-якого $k = 0, 1, 2, \dots, n$ та $t \geq 0$, то рівняння (20) перетворюється на навантажене диференціальне рівняння переносу дробового порядку

$$A_0 D_{0t}^\alpha u(x, \tau) - B_0 D_{ax}^{\delta_0} u(\xi, t) = \sum_{k=1}^n B_k D_{ax}^{\delta_k} u(\xi, t_k) - \sum_{k=1}^n A_k D_{at}^{\alpha_k} u(x_k, \eta), \quad (21)$$

де $\delta_k = \beta + \beta_k$.

Таким чином, дифузійно-релаксаційні процеси в середовищах з фрактальною геометрією для одновимірного випадку можуть бути описані рівнянням

$$D_{0t}^\alpha u(x, \eta) = B_\beta D_{0x}^\beta u(\xi, t) + c(x, t) u(x, t), \quad (22)$$

де $B_\beta = \text{const} > 0$, $c(x, t) = -\tau^{-\beta/2}$, $0 < \alpha \leq 1$, $1 < \beta \leq 2$ або безперервним диференціальним рівнянням осередненим по α та β

$$\int_0^1 D_{0t}^\alpha u(x, \eta) d\alpha = \int_1^2 B_\beta D_{0x}^\beta u(\xi, t) d\beta + c(x, t) u(x, t). \quad (23)$$

Висновки

В роботі наведені результати аналізу процесів переносу в розплаві, що перебуває в процесі затвердіння, встановлений фрактальний характер дифузійних процесів, наведені математичні основи дробового обчислення, яке застосовується для більш коректного опису дифузійних процесів у фрактальних середовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Соколовская, Л. (2013). О выборе рациональных тепловых режимов отливки стальных слитков с дробью. *Металл и литье украины*, 9(244), 32–35.
2. Bohacek, J., Kharicha, A., Ludwig, A., Wu, M., & Karimi-Sibaki, E. (2018). Heat transfer coefficient at cast-mold interface during centrifugal casting: Calculation of Air Gap. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 49(3), 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1220-0>
3. Dotsenko, Y., Dotsenko, N., Tkachyna, Y., Fedorenko, V., & Tsybulskyi, Y. (2018). Operation optimization of holding furnaces in special casting shops. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1(44)), 18–22. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.150585>

4. Селівьорстов, В.Ю., Доценко, Ю.В., Хричиков, В.Є., Носко, О.А., & Куцова, В.З. (2010). Особливості газодинамічного впливу на структуроутворення литої інструментальної штампової сталі. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, 1(57), 59–67. Вилучено із <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/46636>
5. Иванова, В. С., Баланкин, А. С., Бунин, И. Ж., & Оксогоев, А. А. (1994). Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука.
6. Hills, R. N., Loper, D. E., & Roberts, P. H. (1983). A thermodynamically consistent model of a mushy zone. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 36(4), 505–540. <https://doi.org/10.1093/qjmam/36.4.505>
7. Furmański, P. (2000). Modeling of transport phenomena during solidification of binary systems. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 7(3), 391–402.
8. Stefanescu, D. M. (n.d.). Numerical macro-modeling of solidification. *Science and Engineering of Casting Solidification, Second Edition*, 1–30. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74612-8_6
9. Worster, M. G. (1986). Solidification of an alloy from a cooled boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 167(-1), 481. <https://doi.org/10.1017/s0022112086002938>
10. Alexandrov, D. V., Nizovtseva, I. G., Malygin, A. P., Huang, H.-N., & Lee, D. (2008). Unidirectional solidification of binary melts from a cooled boundary: Analytical solutions of a nonlinear diffusion-limited problem. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(11), 114105. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/11/114105>
11. Alexandrov, D. V., Alexandrova, I. V., & Ivanov, A. A. (2017). The role of nonlinear mass transport on directional crystallization with a mushy layer. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5012481>
12. Stefanescu, D. M., & Ruxanda, R. (2004). Fundamentals of Solidification. *Metallography and Microstructures*, 71–92. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003724>
13. Stefanescu, D. M., & Ruxanda, R. (2004). Solidification structures of steels and cast irons. *Metallography and Microstructures*, 97–106. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003725>
14. Нахушев, А.М. (2003). Дробное исчисление и его применение. М.: Физматлит.
15. Beybalayev, V. D. (2010). Mathematical model of heat transfer in fractal structure mediums. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2(1), 91–97. <https://doi.org/10.1134/s2070048210010096>
16. Kovalenko, A. N., Zarichnyak, Y. P., Ivanov, V. A., & Bolshev, K. N. (2021). Fractal characterization of heat and mass transfer processes in nanostructured materials. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series*, , 2096(1) doi:10.1088/1742-6596/2096/1/012168

REFERENCES

1. Sokolovskaya, L. (2013). On the choice of rational thermal regimes for casting steel ingots with shot. *Metal and casting of Ukraine*, 9(244), 32–35.
2. Bohacek, J., Kharicha, A., Ludwig, A., Wu, M., & Karimi-Sibaki, E. (2018). Heat transfer coefficient at cast-mold interface during centrifugal casting: Calculation of Air Gap. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 49(3), 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1220-0>
3. Dotsenko, Y., Dotsenko, N., Tkachyna, Y., Fedorenko, V., & Tsybul'skyi, Y. (2018). Operation optimization of holding furnaces in special casting shops. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1(44)), 18–22. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.150585>
4. Selivorstov, V.Iu., Dotsenko, Yu.V., Khrychikov, V.Ie., Nosko, O.A., & Kutsova, V.Z. (2010). Osoblyvosti hazodynamichnoho vplyvu na strukturoutvorennia lytoi instrumentalnoi shtampovoi stali. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh, 1(57), 59–67. Vylucheno iz <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/46636>
5. Ivanova, V. S., Balankin, A. S., Bunin, I. Zh., & Oksogoev, A. A. (1994). *Synergetics and fractals in materials science*. M.: Science.
6. Hills, R. N., Loper, D. E., & Roberts, P. H. (1983). A thermodynamically consistent model of a mushy zone. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 36(4), 505–540. <https://doi.org/10.1093/qjmam/36.4.505>
7. Furmański, P. (2000). Modeling of transport phenomena during solidification of binary systems. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 7(3), 391–402.
8. Stefanescu, D. M. (n.d.). Numerical macro-modeling of solidification. *Science and Engineering of Casting Solidification*, Second Edition, 1–30. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74612-8_6
9. Worster, M. G. (1986). Solidification of an alloy from a cooled boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 167(-1), 481. <https://doi.org/10.1017/s0022112086002938>
10. Alexandrov, D. V., Nizovtseva, I. G., Malygin, A. P., Huang, H.-N., & Lee, D. (2008). Unidirectional solidification of binary melts from a cooled boundary: Analytical solutions of a nonlinear diffusion-limited problem. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(11), 114105. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/11/114105>
11. Alexandrov, D. V., Alexandrova, I. V., & Ivanov, A. A. (2017). The role of nonlinear mass transport on directional crystallization with a mushy layer. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5012481>
12. Stefanescu, D. M., & Ruxanda, R. (2004). Fundamentals of Solidification. *Metallography and Microstructures*, 71–92. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003724>
13. Stefanescu, D. M., & Ruxanda, R. (2004). Solidification structures of steels and cast irons. *Metallography and Microstructures*, 97–106. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v09.a0003725>
14. Nakhushev, A.M. (2003). *Fractional calculus and its application*. Moscow: Fizmatlit.

15. Beybalayev, V. D. (2010). Mathematical model of heat transfer in fractal structure mediums. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2(1), 91–97. <https://doi.org/10.1134/s2070048210010096>
16. Kovalenko, A. N., Zarichnyak, Y. P., Ivanov, V. A., & Bolshev, K. N. (2021). Fractal characterization of heat and mass transfer processes in nanostructured materials. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series*, , 2096(1) doi:10.1088/1742-6596/2096/1/012168

Received 15.12.2022.

Accepted 27.12.2022.

UDC 004.942:536.24:66.021.3:517.982:515.127

T. Selivyorstova, V. Selivyorstov, L. Yvanova

MATHEMATICAL FOUNDATIONS OF FRACTAL HEAT AND MASS TRANSFER IN THE TWO-PHASE ZONE OF THE METAL MELT

The problem of improving progressive and creating new technologies in metallurgy and foundry production is relevant for obtaining high-quality cast metal and castings. The microscopic and macroscopic properties of casting templates significantly depend on the thermophysical parameters of the casting system and the casting mold, namely, the width of the two-phase zone of melt solidification, the initial temperature of the melt, the cooling rate of the casting, the cooling gradient of the melt, and the temperature on the surface of the casting mold. In order to obtain a fine-grained metal structure. The article presents the results of experimental studies, indicating the fractal nature of structure formation in a two-phase zone of the solidifying metal melt. The thermodynamic statement of the non-stationary problem solidifying of binary systems is considered. Transfer equations are described that are adequate for media with fractal geometry. The mathematical apparatus for describing the curing process from the standpoint of heat and mass transfer in a two-phase zone and diffusion in fractal media is presented. It is shown that the mathematical apparatus of fractional calculation makes it possible to effectively describe the fractal nature of diffuse processes. The analysis of the thermal and mass transfer processes in the melt of the metal, which is in the rare state, and their description using the mathematical apparatus of fractional calculation, have been carried out.

Keywords: heat, mass, diffusion, fractal, model, melt, solidification, two-phase zone.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, Кафедра інформаційних технологій і систем, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Селівьорстов Вадим Юрійович – доктор технічних наук, професор, кафедра ливарного виробництва, декан факультету електромеханіки та електрометалургії,

ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Іванова Людмила Харитонівна – доктор технічних наук, професор, Кафедра ливарного виробництва, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Selivyorstova Tatjana, candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Selivyorstov Vadim, doctor of engineering's sciences, professor, Department of casting production, Dean of the Faculty of Electromechanics and Electrometallurgy, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Yvanova Lyudmyla, doctor of engineering's sciences, professor, Department of casting production, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Ю.Ю. Зубко, Я.В. Фролов, О.М. Кузьміна, А.А. Самсоненко, О.С. Бобух

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОНИ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ БАГАТОКАНАЛЬНІЙ КУТОВІЙ ЕКСТРУЗІЇ

Анотація. В роботі наведено результати досліджень сучасного процесу багатоканальної кутової екструзії. Метою дослідження є визначення особливостей зони деформації та пластичного плину металу в даному процесі. Експериментальну частину дослідження здійснено шляхом аналізу викривлення координатної сітки в зоні деформації після закінчення процесу. Аналіз сітки дозволив виокремити певні елементи зони деформації. Розроблений інструмент, що забезпечує проведення багатоканальної кутової екструзії. Особливістю розробленого інструменту є те, що матриця інтегрована у контейнер і виконується розбірною. Встановлено, що центральні шари металу деформуються легше, а шари, потік яких сповільнюється внаслідок контактного тертя між інструментом та заготовкою, деформуються із затримкою. За допомогою експериментальних даних підтверджено адекватність розробленої в програмі QForm © математичної моделі процесу. Дану математичну модель буде використано для подальших досліджень.

Ключові слова: обробка тиском, багатоканальна кутова екструзія, подрібнення зерна, нерівномірна деформація, зона деформації, координатна сітка, метод скінченних елементів, математична модель.

Постановка проблеми

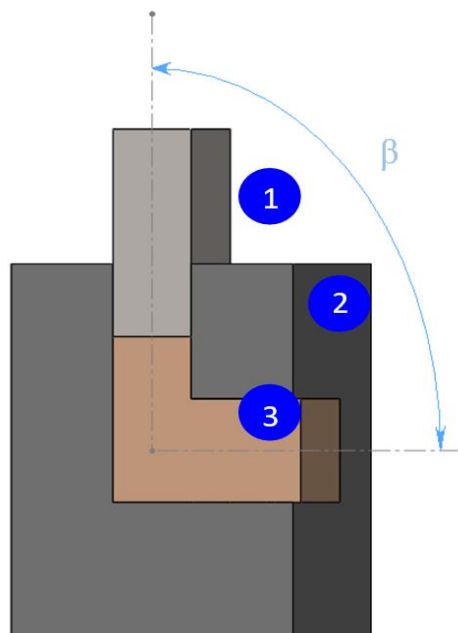
Основною конкурентною перевагою продукції, виготовленої за допомогою процесів обробки металів тиску, є сполучення високих міцнісних властивостей з досить високим рівнем ударної в'язкості. Деформація структури металу, яка після відповідної термічної обробки забезпечує однорідну дрібнозернисту структуру металу, відбувається саме в процесі обробки тиском [1]. Ця деформація структури є необхідною умовою для досягнення необхідного поєднання міцнісних та пластичних властивостей виробу [2]. Аналіз вимог до виробів показує, що із зменшенням питомої товщини виробу для більшості відомих матеріалів зростає відношення між

граничною міцністю на розрив та межею текучості [3, 4]. Це пояснюється тим, що збільшення ступеня деформації призводить до зменшення розміру зерна для більшості технологічних процесів обробки тиском.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Необхідність отримання дрібнозернистої структури виробів з відносно великою товщиною (площею поперечного перерізу) сприяв розвитку методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Такі методи завдяки сприянню пластичному зсуву в зоні деформації призводять до інтенсивної деформації структури. Найпоширенішими методами інтенсивної пластичної деформації є асиметрична прокатка [5] та кутова екструзія [6]. Дане дослідження має за мету розвиток останнього з названих процесів.

Кутова екструзія може бути виконана як із зменшенням площі перерізу в зоні деформації, так і без неї. У цьому випадку річ іде про рівноканальне кутове пресування (РККП). РККП є одним з методів інтенсивної пластичної деформації [7]. На відміну від інших методів ІПД, РККП досить рівномірно подрібнює зерна та змінює їх форму [6]. Цей метод може бути використаний для отримання ультрадисперсної [8] деформованої структури. Інтенсифікація процесів пластичного зсуву зумовлена зміною кута β між вхідним та вихідним каналами матриці (рис. 1).



1 - пуансон; 2 - матриця; 3 –заготовка

Рисунок 1 – Схема рівноканальної кутової екструзії

Останнім часом рівноканальна кутова екструзія перейшла від екзотичного методу обробки металів до звичного та визнаного методу отримання дуже дрібних зерен у широкому діапазоні металів та сплавів. Завдяки цьому на сьогоднішній день РККП є найбільш розвиненим з усіх можливих методів інтенсивної пластичної деформації. Крім того, РККП демонструє потенціал для промислового застосування [9].

Зменшення розміру зерен під час РККП забезпечує прояв ефекту надпластичності металів, що становить великий інтерес для сучасної авіаційної та аерокосмічної промисловості [10]. Важливою особливістю процесу РККП є так звана адитивність подрібнення зерна зі збільшенням ступеня деформації. Ця особливість дозволяє використовувати метали та сплави з низькою пластичністю та значною анізотропією властивостей у процесах інтенсивної пластичної деформації [11, 12].

На рис. 2 показано мікроструктуру стрижня діаметром 100 мм зі сплаву $MgCa_{0,8}$, отриманого за допомогою одно- та двопрхідного РККП. Світлини були зроблені в поперечному напрямку на відстані 25 мм від осі стрижня [10].

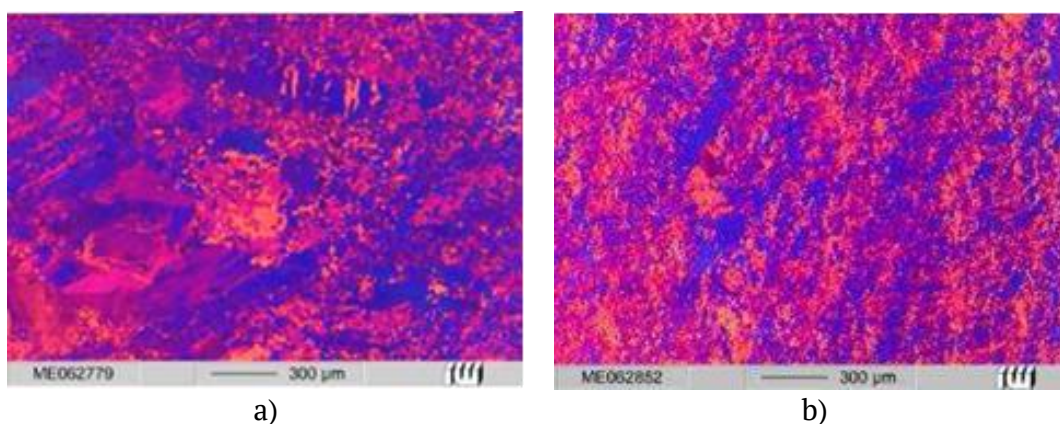


Рисунок 2 – Фотографії структури сплаву $MgCa_{0,8}$ після першого (a) та другого (b) проходу РККП [10]

Було досліджено вплив РККП на механічні властивості алюмінієвого сплаву в роботі "Structure and mechanical properties of commercial Al–Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing" [11] авторів V.M. Markushev, M.Yu. Murashkin. Мікрокристалічна структура з середнім розміром зерна 0,4 мкм була досягнута в результаті інтенсивної пластичної деформації за допомогою РККП. Було виявлено, що структура значно відрізняється нерівновісним станом внутрішніх зерен, а також асиметричною текстурою

деформації. Обробка зазначеного сплаву за допомогою РККП призвела до збільшення міцності на розрив і пластичності порівняно з більш традиційними методами обробки.

В результаті розвитку РККП з'явився новий напрямок — нерівноканальне кутове пресування (НРККП). Arman Hasani був одним із перших, хто описав цей процес у своїй роботі "Principles of Non-equal Channel Angular Pressing" [12]. Суть процесу полягає у зменшенні діаметра вихідного каналу порівняно з вхідним каналом. Аналіз режиму деформації під час процесу проводили для випадку, коли кут перетину каналів становив 90 градусів. Автори визначили, що в цьому випадку основним механізмом деформації був простий зсув, і тому заготовка отримала таку ж дрібнозернисту структуру, що і в РККП. Однією з основних цілей цієї роботи було передбачити еволюцію кристалографічної структури в процесі екструзії. Головною особливістю режиму деформації при НРККП є те, що площа зсуву наближається до площини процесу, сприяючи появі та розвитку зсувних текстур, які мають більшу пластичність. Інший важливий аспект процесу НРККП пов'язаний з гідростатичним тиском. Застосування протитиску, здійсненого за допомогою опори у вихідному каналі [13], показало хороші результати. Цей тиск реалізується в НРККП за рахунок зменшення діаметру вихідного каналу. Це робить НРККП значніше ефективним методом для отримання об'ємних наноструктурних матеріалів [14].

У роботі La'szlo' S. To'th., Rimma Lapovok, Arman Hasania й Chengfan Gub "Non-equal channel angular pressing of aluminum alloy" [15] показано, що досі НРККП не було досліджено експериментально. У названій роботі автори представили порівняльне експериментальне дослідження процесів РККП та НРККП. Вони використовували алюмінієвий сплав AA2124, оброблений за 1 прохід кожним з методів. Для НРККП матрицю модернізували таким чином, що співвідношення діаметрів вхідного та вихідного каналів було рівним 2. Всі випробування проводили при кімнатній температурі та постійній швидкості екструзії 1 s^{-1} . Дослідження зразків структури (рис. 2) показало, що після одного проходу НРККП (рис. 3, b) зерно дістає більше відносне подовження порівняно з зернами зразка, обробленого РККП (рис. 3, c).

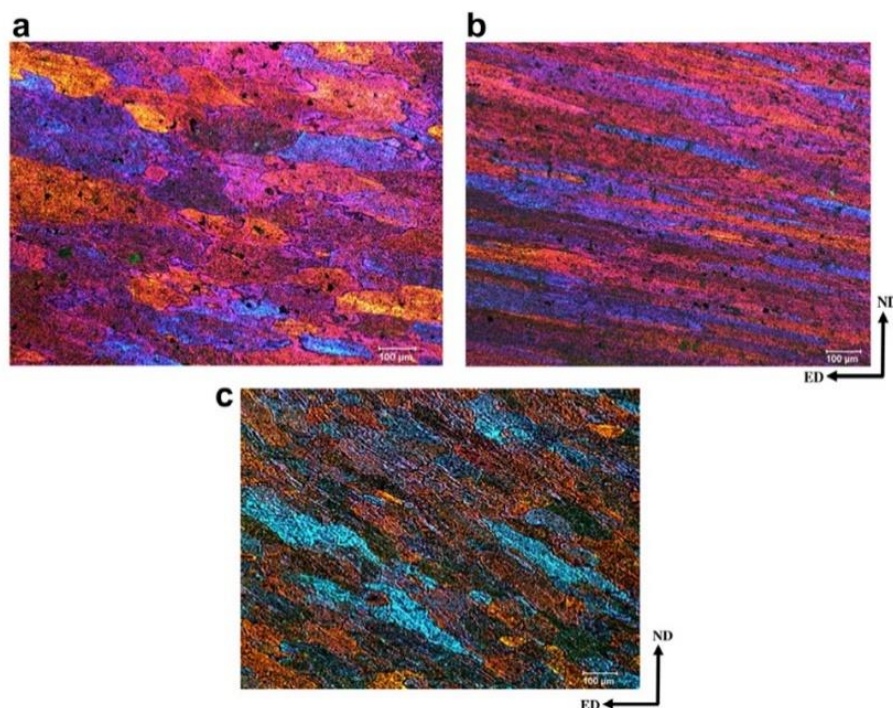


Рисунок 3 – Мікроструктура алюмінієвого сплаву AA2124:
а) оригінальна; б) після НРККП; в) після ПДПВ;
ED - напрямок екструзії, ND - нормальний напрямок[15]

Мета дослідження

Результати, представлені в цій роботі, показують, що НРККП призводить до отримання більш дрібної мікроструктури за один прохід, ніж РККП. Таким чином, можна зробити висновок про те, що НРККП добре підходить для формування і розвитку дрібнозернистої структури металу, а також значно збільшує його міцність, пластичність і ударну в'язкість в результаті деформації зсуву. Однак відомі методи з НРККП мають великий недолік. Ці процеси виготовлення напівпродукту (пруток, смуга) є такими, що вимагають додаткової обробки. Однак термічний або деформаційний вплив при такій додатковій обробці може негативно вплинути на структуру. Отже, завдання використання інтенсивної пластичної деформації (ІПД) як операції кінцевої деформації у виробництві готового виробу є актуальним.

Однак, як буде показано нижче, значна нерівномірність напружень і деформацій в пластичній частині зони деформації (ПЧЗД) при екструзії є типовим для процесів НРККП.

**Експериментальне та теоретичне дослідження течії металу
під час багатоканальної кутової екструзії**

Багатоканальне НРККП (далі БНРККП) може стати новим напрямком у виробництві дрібнозернистих металів і сплавів. Як і в усіх розглянутих методах, суть полягає в протисканні заготовки через матрицю, яка має 2 і більше вихідних каналів, розташованих під кутом 90° до осі екструзії. Ця конфігурація матриці дозволяє забезпечити деформацію зсуву, необхідну для подрібнення зерна, а також достатнє гідростатичне навантаження, необхідне для інтенсифікації процесів двійникування [14]. Перевагою БНРККП в цьому випадку є отримання готового виробу, наприклад, маточини зі спицями (рис. 4). При цьому виріб отримують із відносно дешевої штаби, яка може мати вихідну литу структуру.

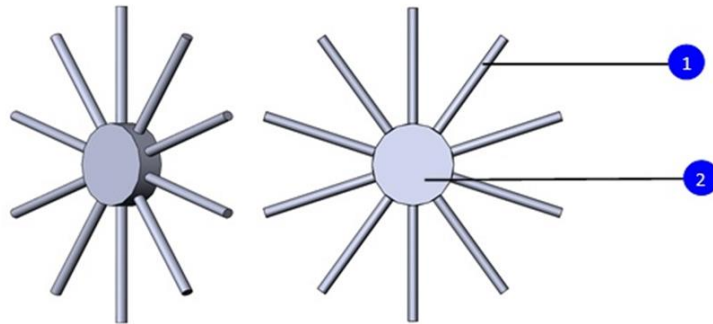
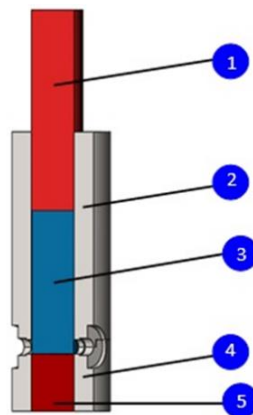


Рисунок 4 – Маточина зі спицями: 1 - спиці; 2 - частина маточини

Інструмент для виготовлення деталей типу маточини методом кутової екструзії був розроблений на кафедрі обробки металів тиском Національної металургійної академії України (рис. 5).



1 - пуансон, 2 - верхня частина контейнера,
3 - заготовка, 4 - нижня частина контейнера, 5 – опора
Рисунок 5 – Інструмент для БНРККП у зборі

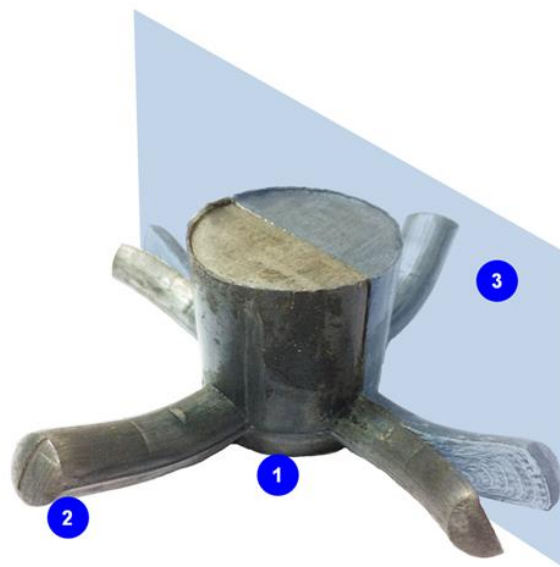
Особливістю розробленого інструменту є те, що його матриця інтегрована з контейнером і виконується розбірною. Така конструкція забезпечує видалення екструдованої частини після закінчення процесу. Таким чином, інструмент складається з двох основних частин: контейнера для заготовки з половиною вихідного каналу матриці і опори з другою половиною вихідного каналу матриці. Щоб запобігти небажаному відділенню деталей інструменту, на місці їх з'єднання передбачений замок, який можна затягнути гвинтами (не показано на рис. 5).

Розроблений інструмент дозволяє проводити деякі експерименти з вивчення течії металу всередині інструменту, а також можливості управління геометричними параметрами.

Як модельний матеріал для БНРККП був використаний свинець класу С1. Експериментальне дослідження з використанням цього матеріалу та розробленого інструменту (рис. 5) полягав у наступному:

- П'ять циліндричних заготовок діаметром 42 мм і довжиною 100 мм були попередньо розрізані вздовж.
- На площину з'єднання сталевую голкою наносилася координатна сітка з розміром комірок 2×2 мм.
- Пресування проводилось на лабораторному пресі номінальною силою 160 т кафедри ОМТ Національної Металургійної академії України.
- Пресування проводили без попереднього підігріву, при кімнатній температурі.

Були отримані зразки продукції типу "маточина зі спицями". Виріб, отриманий в експерименті, був розділений вздовж площини, яка проходила посередині двох протилежних спиць (рис. 6). Таким чином, деформація клітин сітки в процесі пресування чітко видна на відокремленій після пресування площині. Подальше дослідження течії металу проводили шляхом моделювання методом скінченних елементів, реалізованим в програмному пакеті QForm V8. Головною метою дослідження на цьому етапі було отримання геометричної подібності процесу та виробу типу "маточина зі спицями" і результатів експерименту за наступними критеріями:



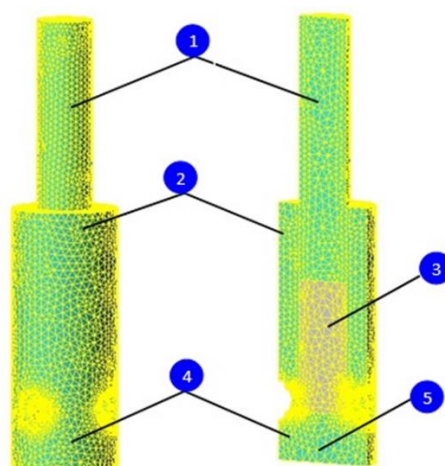
1 - витікання металу з матриці протягом часу, 2 - напрямок вигину спиць,
3 - зміна віртуальної координатної сітки

Рисунок 6 – Розділ експериментального зразка вздовж осі двох протилежних спиць

У процесі моделювання також оцінювались тиск і температурні умови процесу, а також тертя. Процес моделювання був таким:

1. Створення двовимірних креслень інструменту та заготовки в редакторі QDraft, інтегрованому в програмний продукт QForm.

2. Розробка геометричної моделі інструменту та заготовки відповідно кресленню та розбивка на сітку кінцевих елементів, виконана за допомогою модуля QShare (рис.7). У процесі моделювання сітка була автоматично перебудована в більш дрібну, що покращує точність розрахунків.



1 - пуансон, 2 - верхня частина контейнера,
3 - заготовка, 4 - нижня частина контейнера, 5 – опора
Рисунок 7 - Вихідна сітка скінчено-елементної моделі

3. Завдання граничних умов, які включають коефіцієнт тертя між інструментом та заготовкою, матеріал заготовки та інструменту, напрямок руху та силу, що впливає на пуансон, а також умови зупинки процесу.

4. Розрахунок процесу.

Перевірка адекватності моделі. При зазначенні граничних умов використовувались дані, отримані в результаті експерименту, отже перевірка адекватності моделі проводилася шляхом порівняння результатів моделювання та експерименту.

Оцінка результатів експерименту та моделювання

Зразок, отриманий в результаті моделювання, за характером та розміром вигину спиць подібний до експериментального. Крім того, моделювання показало, що характер течії металу протягом процесу ідентичний експериментальному. Головна відмінність - менший вигин спиць. Можливо, це спричинено умовами тертя та реологічними властивостями матеріалу. Вивчення цих параметрів є предметом подальших досліджень.

Екструзія натурного зразка з сіткою довела, що зміна координатної сітки у процесі моделювання якісно підтвердила експеримент (рис. 8). Кількісне порівняння змін координатної сітки в даній роботі не проводиться. Визначивши розмір сітки у комп'ютерній моделі та порівнявши її з розмірами сітки експериментального зразка, отримали граничне відхилення на рівні 4,5%, що є досить високим результатом для скінченно-елементних моделей. Таким чином, програмний пакет QForm V8 добре підходить для вивчення процесу БНРККП, а також для вивчення можливості використання цього виду екструзії при виробництві елементів типу “маточина зі спицями”.

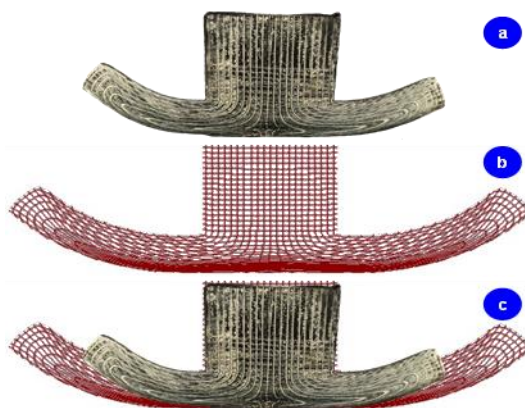


Рисунок 8 – Площина з'єднання зразка після БНРККП: а) - експеримент, б) моделювання в програмі QFormV8, с) накладання зображень а і б

Аналіз площини з'єднання зразка дозволяє виділити на ньому кілька основних ділянок (рис.9):

1. Всебічна зона стиснення, без зони пластичної деформації.
2. Ділянка зовнішньої поверхні заготовки, яка не була деформована і була виштовхнута внутрішніми шарами металу під час екструзії.
3. Область стабільного процесу; ця зона містить ділянки, які отримали різне співвідношення деформації зсуву і розтягнення.
4. Пластична частина осередку деформації (ПЧОД) характеризується плавним переходом від основних напружень зсуву через стискаючі до розтягуючих.

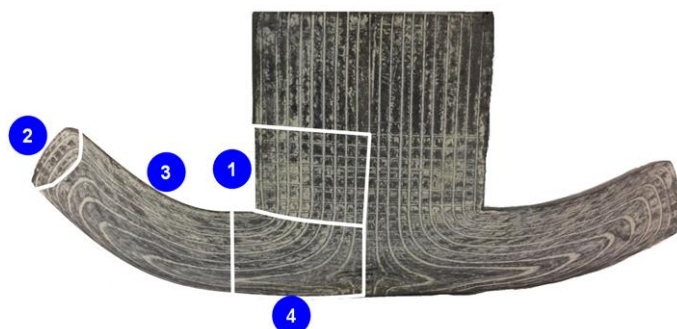


Рисунок 9 - Розташування типових ділянок на площині з'єднання зразка

Аналіз пластичної частини осередку деформації (ПЧОД) довів, що вона складається з певних зон і класифікується на основі переваги зсуву, стиснення або розтягнення. Таким чином, ПЧОД складається з наступних зон (рис. 10):

1. Площа поверхневих шарів, які деформуються чистим зсувом без розтягнення (площа чистого зсуву).
2. Область посилення впливу стискаючих напружень, характеризується деформаціями зсуву та розтягнення.
3. Площа стискаючих напружень при максимальному розтягненні внутрішніх шарів заготовки.
4. Область посилення впливу розтягуючих напружень. У цій зоні розтягнення шарів зменшується.
5. Область переважно розтягуючих напружень. Завдяки дії розтягуючих напружень в центральній частині заготовки утворюються дефекти. Межі цієї зони можна визначити критерієм повного зникнення поперечних дефектів поверхні (в даному випадку ліній сітки, що перетинаються).

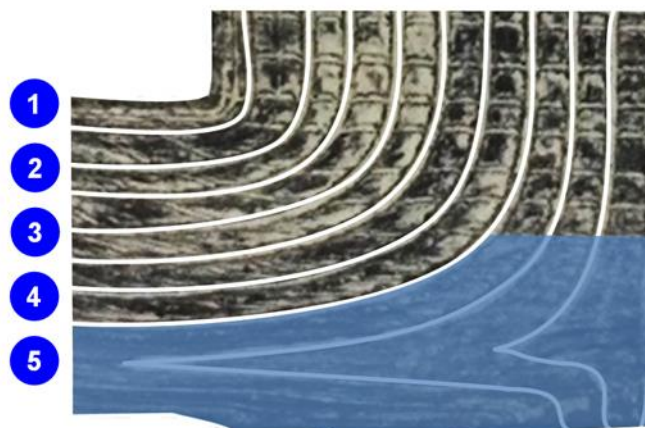


Рисунок 10 – Типові зони ПЧОД

Таким чином, експериментальна екструзія зразка з координатною сіткою дозволила визначити течію металу в площині з'єднання в цілому і в пластичній частині зони деформації зокрема. Результати цього дослідження можуть бути корисними для подальшого комп'ютерного моделювання, а також для необхідного пояснення перетворення структури в процесі БНРККП (у цій роботі не передбачено). Крім того, проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої конструкції інструменту для БНРККП.

Висновки

1. Процес багатоканальної екструзії становить інтерес для промисловості, оскільки дозволяє отримати готову деталь з потенційно високими механічними властивостями із циліндричної литої заготовки за один перехід.

2. Завдяки деформації зсуву та розтягування процес БНРККП має потенціал для керування механічними властивостями готового продукту.

3. Розроблено інструмент для БНРККП типу "маточина зі спицями", який було перевірено під час екструзії свинцевого сплаву С1.

4. В результаті екструзії були отримані якісні результати нерівномірності потоку матеріалу під час БНРККП. Встановлено, що центральні шари матеріалу деформуються легше, а шари, течія яких сповільнюється внаслідок контактного тертя, деформуються із затримкою.

5. Експериментальна екструзія з координатною сіткою, нанесеною на площину з'єднання двох симетричних частин заготовки, дозволила візуалізувати течію металу у площини стикування загалом і в пластичній частині зони деформації зокрема.

6. Вперше створена й перевірена скінченно-елементна модель процесу багатоканальної кутової екструзії в програмному пакеті QForm V8.

7. Результати моделювання процесу БНРККП показали хорошу збіжність з експериментальними результатами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Askeland D. The Science and Engineering of Materials : 6th Edition / Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. - CL Engineering, 2010. - 944 p. - ISBN 10 : 0495296023. - ISBN-13 : 978-0495296027.
2. Клименко П.Л. Упрочнение стали при горячей деформации / П.Л. Клименко. — Днепропетровск: Пороги, 2009. — 103 с.
3. Handbook of comparative world steel standards : 2 ed. p.cm / John E. Bringas, editor. - ASTM data series Publication, DS 67A, 2004. - 669 p. - ISBN 0-8031-3042-2.
4. EN 1090-2:2008. Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures.
5. Grydin O. Evolution of Microstructure, Properties and Texture of a Two-Phase Low-Carbon Steel at Cold Asymmetric Rolling / O. Grydin, A. Andreiev, A. Briukhanov, Z. Briukhanova, M. Schaper // Steel Research Int. - 2017. - V. 88. - I. 8. - <https://doi.org/10.1002/srin.201600397>.
6. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Валиев Р.З., Александров И.В. — М.: Логос, 2000. — 272 с.
7. Huang Y. Advances in ultrafine-grained materials / Huang, Yi, Langdon, Terence G. // Materials Today. - 2013. - V. 16. - № 3. - P. 85-93. - <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.004>.
8. Valiev R. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // Progress in Materials Science. - 2006. - V. 51. - I. 7. P. 881-981. - <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
9. Валиев Р.З. Развитие равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов / Валиев Р.З. // Металлы. - 2004. - № 1. - С. 15-22.
10. Угловое прессование магниевых сплавов на горизонтальном прессе / А.Н. Головкин, В.Н. Данченко, К. Краузе, Фр.-В. Бах // ДонНТУ. Наукові праці. "Металургія". - 2008. - Вип. 10 (141). - С. 231-235.
11. Markushev M. Structure and mechanical properties of commercial Al-Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing / Michael V. Markushev, Maxim Yu. Murashkin // Materials Science and Engineering: A. - 2004. - V. 367. - I. 1-2. - P. 234-242. - <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.237>.
12. Hasani A. Principles of Nonequal Channel Angular Pressing, Arman Hasani, László S. Tóth, Benoît Beausir // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. - 2010. - No. 132(3). - 031001 (9 pages). - <https://doi.org/10.1115/1.4001261>.
13. Lapovok R. The Role of Back-Pressure in Equal Channel Angular Extrusion / R. Ye. Lapovok // Journal of Materials Science. - 2005. - Vol. 40. - Iss. 2. - P. 341-346. - DOI:10.1007/s10853-005-6088-0.
14. Tóth L. Non-equal channel angular pressing of aluminum alloy / László S. Tóth, Rimma Lapovok, Arman Hasani, Chengfan Gu // Scripta Materialia. - 2009. - V. 61. - Iss. 12. - P. 1121-1124. - <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.09.006>.
15. Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes / I. Frolov, M. Schaper, O. Grydin, V. Andreiev, A. Tereschenko // Metallurgical and Mining Industry. - 2016. - No. 9. - P. 72-79. - http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2016_9/011FrolovIaroslav.pdf

REFERENCES

1. Askeland D. The Science and Engineering of Materials : 6th Edition / Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. - CL Engineering, 2010. - 944 p. - ISBN 10 : 0495296023. - ISBN-13 : 978-0495296027.
2. Klimenko P.L. Uprochnenie stali pri goryachey deformatsii / P.L.Klimenko. —Dnepropetrovsk: Porogi, 2009. - 103 s.
3. Handbook of comparative world steel standards : 2 ed. p.cm / John E. Bringas, editor. - ASTM data series Publication, DS 67A, 2004. - 669 p. - ISBN 0-8031-3042-2.
4. EN 1090-2:2008. Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures.
5. Grydin O. Evolution of Microstructure, Properties and Texture of a Two-Phase Low-Carbon Steel at Cold Asymmetric Rolling / O. Grydin, A. Andreiev, A. Briukhanov, Z. Briukhanova, M. Schaper // Steel Research Int. - 2017. - V. 88. - I. 8. - <https://doi.org/10.1002/srin.201600397>.
6. Valiev R.Z. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei / Valiev R.Z., Aleksandrov I.V.. - M.: Logos, 2000. - 272 s.
7. Huang Y. Advances in ultrafine-grained materials / Huang, Yi, Langdon, Terence G. // Materials Today. - 2013. - V. 16. - № 3. - P. 85-93. - <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.03.004>.
8. Valiev R. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // Progress in Materials Science. - 2006. - V. 51. - I. 7. P. 881-981. - <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>
9. Valiev R.Z. Razvitie ravnokanalnogo uglovogo pressovaniia dlia polucheniia ultramelkozernistykh metallov i splavov / Valiev R.Z. // Metally. - 2004. - № 1. - S. 15-22.
10. Uglovoe pressovanie magnievykh splavov na gorizontálnom presse / A.N. Golovko, V.N. Danchenko, K. Krauze, Fr.-V. Bakh // DonNTU. Naukovi pratsi. "Metalurgii". - 2008. - Vip. 10 (141). - S. 231-235.
11. Markushev M. Structure and mechanical properties of commercial Al-Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing / Michael V. Markushev, Maxim Yu. Murashkin // Materials Science and Engineering: A. - 2004. - V. 367. - I. 1-2. - P. 234-242. - <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.237>.
12. Hasani A. Principles of Nonequal Channel Angular Pressing, Arman Hasani, László S. Tóth, Benoît Beausir // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. - 2010. - No. 132(3). - 031001 (9 pages). - <https://doi.org/10.1115/1.4001261>.
13. Lapovok R. The Role of Back-Pressure in Equal Channel Angular Extrusion / R. Ye. Lapovok // Journal of Materials Science. - 2005. - Vol. 40. - Iss. 2. - P. 341-346. - DOI:10.1007/s10853-005-6088-0.
14. Tóth L. Non-equal channel angular pressing of aluminum alloy / László S.Tóth, Rimma Lapovok, Arman Hasani, Chengfan Gu // Scripta Materialia. - 2009. - V. 61. - Iss. 12. - P. 1121-1124. - <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.09.006>.
15. Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes / I. Frolov, M. Schaper, O. Grydin, V. Andreiev, A. Tereschenko // Metallurgical and Mining Industry. - 2016. - No. 9. - P. 72-79. - http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2016_9/011FrolovIaroslav.pdf

Received 10.12.2022.

Accepted 27.12.2022.

**INVESTIGATION OF DEFORMATION ZONE PARAMETERS
AT MULTICHANNEL ANGULAR EXTRUSION**

The paper presents the results of research on the modern process of multichannel angular extrusion. Analysis of the literature has shown that the use of non-equal angular extrusion leads to a smaller size of microstructure in one pass than equal-angular compression. Accordingly, non-uniform angular extrusion is well suited for the formation and changing of fine-grained metal structure, and also significantly increases its strength, ductility and toughness due to shear deformation. However, the known methods of non-uniform angular pressing are mostly used for the manufacture of intermediate products (rods, strip), which to achieve the required level of properties require additional processing. Additional thermal or deformation processing could have a negative impact on the structure and properties of the product. Thus, the urgent task is to develop and study processes in which intense plastic deformation is the final operation. One of these processes is multichannel angular extrusion. The aim of the study is to determine the characteristics of the deformation zone and plastic flow of the metal in this process. The analysis of the grid has allowed to identify certain elements of the deformation zone. A special tool has been developed to provide multi-channel angular extrusion. The peculiarity of the developed tool is the matrix integrated into the container and made collapsible. This design provides removal of the extruded profile after processing. It has been found that the central layers of metal deform more easily, and the layers, the flow of which slows down due to contact friction between the tool and the workpiece, deform with a delay. The adequacy of the mathematical model of the process developed in the QForm © program was also confirmed with the help of experimental data.

Keywords: metal forming, multichannel angular extrusion, grain grinding, non-uniform deformation, deformation zone, grid, finite element method, mathematical model.

Зубко Юрій Юрійович – провідний фахівець управління науково-дослідних робіт ТОВ «ІНТЕРПАЙП Україна»

Фролов Ярослав Вікторович – докт. техн. наук, завідувач кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Кузьміна Ольга Михайлівна – канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Самсоненко Андрій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Бобух Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Українського державного університету науки і технологій.

Zubko Yurii – Leading Specialist of the Research Department of INTERPIPE Ukraine LLC.

Frolov Yaroslav – Doctor of Technical Sciences, Head of the Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Kuzmina Olha – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Samsonenko Andrii – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Bobukh Oleksandr – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Metal Forming Department named after. acad. O.P. Chekmariov, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Л.В. Камкіна, Я.В. Мянoвська, Ю.С. Пройдак, А.П. Мішалкін

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ШУНГІТОВОЇ ПОРОДИ ПРИ ОДЕРЖАННІ МАРГАНЦЕВОГО АГЛОМЕРАТУ

Анотація. Промисловий досвід виробництва марганцевого агломерату показує, що відомі технологічні пропозиції не забезпечують зростання продуктивності агломашин та необхідних властивостей міцності офлюсованого марганцевого агломерату. Відомі способи спікання офлюсованого марганцевого агломерату, що відрізняється підвищеною механічною міцністю та високою вологостійкістю. Недоліком цих заходів є значне ускладнення технологічної лінії агловиробництва та збільшення енергетичних витрат. У зв'язку з цим одним із головних напрямів є розробка складів шихт та параметрів процесу агломерації марганцевої сировини. Мета дослідження – аналіз фізико-хімічних процесів, експериментальні дослідження та розробка інноваційних технологічних рішень та рекомендацій щодо залучення у металургійне виробництво шунгітової породи для розширення сировинної бази гірничо-металургійного комплексу. Виконано розрахунки термодинамічної рівноваги оксидних систем, адекватних агломераційним, проведено дослідження хімічного складу фазових складових мікроструктур марганцевого агломерату. Встановлено раціональний вміст шунгіту в аглошихті, який забезпечує одержання агломерату із заданими характеристиками (міцністю, виходом придатного, вмістом марганцю) становить 12...13% від маси вихідної шихти. Подальше підвищення його частки в аглошихті призводить до зниження міцності та виходу придатного спеку. Збільшення ступеня дисперсності шунгіту до 0-2мм дозволяє збільшити рівень використання вуглецю шунгіту як паливо без збільшення на процес кількості традиційного палива – коксу.

Ключові слова: марганцевий агломерат, міцність, шунгітова порода, кількість компонентів шихти, вуглець шунгіту.

Постановка задачі дослідження

У загальній структурі марганцевих феросплавів, що виплавляються на вітчизняних та зарубіжних заводах, найбільш великотоннажним є феросилікомарганець (ДСТУ 3548-97). Як комплексний розкислювач та

легуючий феросплав феросилікомарганець широко застосовується при виплавці сталі в кисневих конвертерах, дугових електропечах, у тому числі і дугової електропечі на заводі «ІНТЕРПАЙП СТАЛЬ», продуктивністю 1 млн. 300 тис. т трубної та колісної електросталі. Потреба світової сталеплавильної промисловості у феросилікомарганці зростає практично пропорційно зростанню виплавки сталі. Відповідно до прогнозів виробництво сталі в 2030 р. становитиме 1 млрд. 776 млн. т, у тому числі в Китаї 655, Північній Америці 470, Європейському Союзу 282, Південній Америці 120, Росії, інших країнах 164 млн. т. Так що, незважаючи на економічні кризи, періодичні спади та підйоми, обсяг виплавки сталі до 2030 р. зросте, що вимагатиме певного збільшення та виробництва марганцевих феросплавів і, насамперед, феросилікомарганцю.

Враховуючи вичерпність ресурсів, зростання цін на ресурси та збільшення чисельності населення, постає питання про темпи зростання виробництва, розвиток знань, технологій, які значною мірою визначаються раціональним та ефективним використанням мінеральних руд, необхідністю реалізації програми їх ресурсозбереження та пошуку нових видів матеріалів для використання у виробництві продукції, у тому числі продукції металургійних підприємств [1-3].

Так, для отримання якісної сталі обов'язково використовують феросплави. Традиційна технологія виплавки силікомарганцю передбачає застосування різних компонентів, які задаються в електроплавильний агрегат та необхідні для проведення рудовідновлювальної плавки з отриманням готового продукту та супутнього шлаку. Основними компонентами є вуглецевий відновник, кварцит і сировина (концентрати) різного виду, що містить марганець, а також всілякі супутні добавки в малих кількостях для підвищення техніко-економічних показників. Перед рудовідновлювальним плавленням дрібнодисперсні концентрати, що містять марганець, піддають укрупненню шляхом брикетування або окускування методом агломерації. Цей спосіб підвищує ступінь наскрізного вилучення марганцю, а також дозволяє використовувати всілякі техногенні марганецьвмісні відходи - шлаковий пісок, шлами, високодисперсний пил газоочищення марганцевих феросплавних печей та ін. Шихта для виплавки силікомарганцю містить компоненти при наступному співвідношенні: агломерат марганець містить 63-70%, кварцит до

10-12%, вуглецевий відновник до 15-17%. При цьому у виробництві силікомарганцю застосовується марганцевий агломерат, виготовлений з шихти, що складається з матеріалів, що містять марганце, вапняку і аглопалива, яка у своєму складі містить, % мас.: аглопаливо у вигляді коксика – 7,0...10,0; вапняк – 6...7, інше – марганцеве сировину, кількість якого залежить від виду марганцевої сировини (руда оксидна, карбонатна або це хвости збагачення або шлами газоочищення) і запланованих металургійних характеристик одержуваного агломерату. Підвищення вилучення марганцю та кремнію, а також зниження питомої витрати електроенергії пов'язане з інтенсифікацією процесу відновлення кремнію та марганцю в металевий розплав. Це вимагає пошуку компонентів агломераційної шихти, присутність яких в агломераті, що містить марганець, забезпечить підвищення швидкості відновлювального процесу.

Аналіз останніх публікацій

Найбільш відомим освоєним промисловим способом окускування вітчизняної марганцеворудної сировини, що має розвиток в останнє десятиліття, є агломерація [4-7]. Використання марганцевого агломерату в шихті електропечей вивчалось багатьма авторами [8-11] та має економічну доцільність. Збільшення міцності агломерату є однією з важливих його властивостей. Зміна останніми роками хімічного, мінералогічного та гранулометричного складу марганцевих концентратів призвела до зниження якості агломерату та показників його виробництва. Досвід виробництва марганцевих феросплавів у потужних закритих або герметичних електропечах свідчить, що підвищення кількості дрібних фракцій (<5 мм) у шихтових матеріалах призводить до порушення стабільності режиму плавки, підвищення питомих витрат сировини та електроенергії. Кількість дрібниці в шихті значною мірою визначається характеристиками міцності агломерату. Промисловий досвід виробництва марганцевого агломерату [12-14] показує, що відомі технологічні пропозиції не забезпечують зростання продуктивності агломашин та необхідних властивостей міцності офлюсованого марганцевого агломерату. Підвищення основності в агломераті шляхом добавки до нього оксидів кальцію в процесі спікання до величини, що перевищує відношення $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ більш ніж 1,1, призводить до різкого погіршення механічної міцності готового агломерату. Це відбувається внаслідок зниження

вологостійкості матеріалу за рахунок залишків у ньому неофлюсованого вапна, а також німічних, саморуїнівних при кімнатній температурі дво- та трикальцієвих силікатів, що утворюються в процесі термообробки після термічної дисоціації карбонатів кальцію, карбонатів та силікатів марганцю. Такий матеріал малопридатний для використання в технології прямого легування марганцем або при виплавці феросплавів. Відома шихта для виробництва даних офлюсованих марганцевих агломератів, що містить концентрат марганцевої руди, вапняк, повернення і вуглецевмісне паливо у вигляді коксика [15].

Відомі способи спікання офлюсованого марганцевого агломерату, що відрізняється підвищеною механічною міцністю та високою вологостійкістю. Особливістю технології є використання в аглошихті обпаленого при 1600-1800°C доломіту та використання обпаленого доломіту при виробництві офлюсованого марганцевого агломерату [7]. Недоліком цих заходів є значне ускладнення технологічної лінії агловиробництва та збільшення енергетичних витрат. Крім того, необхідно вводити до складу аглошихти високоякісний концентрат марганцевий з вмістом кремнезему менше 10%. Спікання марганцевого офлюсованого агломерату має особливості. Аналіз діаграм стану систем $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$ та $\text{CaO-Mn}_2\text{O}_3$ показує, що при спіканні марганцевого агломерату однотипні реакції протікають за більш високих температур (на 150-200°C). Проте досягнення високих температур який завжди вирішує завдання отримання міцного вологостійкого агломерату, оскільки CaO в повному обсязі асимілюється розплавами оксидів марганцю і SiO_2 . Однією з причин цього є утворення на частинках CaO силікатів кальцію (2CaO SiO_2 , 3CaO SiO_2), що сильно гальмують процеси масообміну. У разі спікання залізорудного офлюсованого агломерату ці шари розриваються оксидами заліза, тоді як оксиди марганцю при температурах агломерації властивості порушення суцільності орто- та трисилікату кальцію виявляють слабо.

В даний час у різних сферах та галузях промисловості зарубіжних країн досить широко використовуються шунгіти - природна комплексна мінеральна сировина. Шунгіти застосовуються як: відновники у високотемпературних металургійних та хімічних процесах; комплексної сировини - заміника коксу та кварциту при електротермічному виробництві феросплавів та синтетичного чавуну, виробництві фосфору та кольорових металів; каталізатора при

гідрометалургійних способах переробки важкозбагачуваних руд; природного очищувача та мінералізатора біоактивних природних вод, вод господарського та питного призначення.

При виплавці висококремнистих чавунів [16] в шихту включають шматковий шунгіт крупністю не більше 100 мм, змішуючи його при завантаженні в доменну піч із залізорудними матеріалами і завантажуючи його в кільцеву зону колошника, обмежену радіусами 0,98-0,4 радіусу колошника. Наявність у шихті шунгіту, що містить дрібнодисперсні вуглець і кремнезем у співвідношенні, близькому до стехіометричного для реакції відновлення кремнію вуглецем з кремнезему, сприяє першочерговому відновленню кремнію з цього матеріалу. Завантаження шунгіту в суміші із залізорудними матеріалами полегшує відновлення кремнію завдяки можливості утворення силіцидів заліза при контактах свіжовідновленого губчастого заліза із залізорудних матеріалів із шунгітом у зоні відновлення. В якості твердої вуглецевмісної добавки використовують кусковий шунгіт з вмістом вуглецю 20-36%, змішуючи його при завантаженні в піч з коксом і завантажуючи в кільцеву зону колошника, розташовану в межах, обмежених радіусами 0,1 і 0,95 радіуса колошника, причому кількість шунгіта, що завантажується, підтримують в межах 0,5-15% від сумарної маси вуглецю коксу та паливної добавки. Рішення даної технічної задачі досягається також тим, що кількість шунгіта, що завантажується, переважно підтримують в межах 3-7% від сумарної маси вуглецю завантажуваного в піч коксу і паливної добавки.

Межа вмісту вуглецю в шунгіті (20-36%) обумовлені мінімально прийнятним за економічними критеріями значенням коефіцієнта заміни коксу шунгітом (20%) і граничним вмістом вуглецю (36%) у родовищі шунгіту, що розробляється (єдиному у світі). При використанні шунгіту із вмістом вуглецю менше 20% застосування його стає економічно недоцільним через підвищення собівартості чавуну у зв'язку зі зниженням коефіцієнта заміни коксу шунгітом до рівня 0,25-0,3 кг коксу/кг шунгіту. При такому коефіцієнті заміни застосування шунгіту стає невигідним, оскільки ціна його видобутку та транспортування до споживача, включаючи ПДВ, становить не менше ніж 30% від собівартості коксу. Крім того, застосування шунгіту із вмістом вуглецю менше 20% збільшує вихід шлаку, що призводить до ще більшого зниження коефіцієнта заміни коксу шунгітом.

При виплавці передільного чавуну речовина шунгіту в результаті хімічних реакцій утворює сильні відновники (кремній та карбід кремнію) по відношенню до закису заліза [17], що приводить до інтенсифікації процесу відновлення кремнію та покращення техніко-економічних показників доменної печі. Кремнійвмісна добавка містить вуглецевий матеріал, причому відношення вуглецю до кремнезему в добавці становить 0,5-2,5, що забезпечує одержання в чавуні необхідного вмісту кремнію при витратах коксу на рівні, характерному для виплавки чавуну. При введенні в шихту доменної плавки кремнійвмісної добавки у вигляді суміші кремнезему та вуглецевого матеріалу (брикети, котуни, шматки) та при нагріванні до 1300-1400⁰С (зона шахти) відбувається відновлення кремнію кремнезему до карбиду. Реакція утворення карбиду кремнію інтенсифікується зі зростанням температури. Таким чином, введення суміші кремнезему з вуглецем забезпечує термодинамічно сприятливіші умови відновлення кремнію за рахунок утворення карбиду кремнію та його подальшого руйнування залізом (чавуном). Для отримання стандартних за вмістом кремнію марок ливарного чавуну та сплавів кремнію із залізом співвідношення вуглецю та кремнезему в суміші повинно становити 0,5-2,5.

Мета дослідження – металургійна технологія застосування шунгітової породи як заміник частини вуглецю коксиду у складі шихти для агломерації при отриманні марганцевого агломерату.

Виклад основного матеріалу

Фізико-хімічні властивості шунгіту досить добре вивчені [18, 19]. Щільність шунгіту становить 2,1...2,4 г/см³; пористість – до 5%; міцність на стиск - 100 ... 120 МПа; коефіцієнт електропровідності – 1500 см/м; коефіцієнт теплопровідності – 3,8 Вт/м·К, адсорбційна ємність до 20 м²/г. Вміст вуглецю в пробах шунгіту коливається від 10% мас. до 50%, а кремнезему змінюється не більше 5-75% . У більшості проб вміст вуглецю становить 25-30%, а кремнезему 45-55%.

Властивості шунгіту визначаються наноструктурою і складом елементів, що його утворюють. Шунгітовий вуглець рівномірно розподілений у силікатному каркасі з дрібнодисперсних кристалів кварцу, розмірами 1–10 мкм, що підтверджено дослідженнями ультратонких шліфів шунгіту методом просвічуючої (трансмисійної) електронної мікроскопії (ПЕМ) та растрової електронної мікроскопії.

**Методика, обладнання та умови
проведення лабораторних досліджень**

Дослідження проводились у лабораторії каф. ТОМП на періодично діючої агломераційної установки. Основне обладнання лабораторії - агломераційна установка складається з агломераційної чаші, невеликого пиловловлювача та екстаустера з електродвигуном потужністю 2кВт.

Також у роботі використовували набір сит для визначення фракційного складу компонентів вихідної аглошихти та отриманого агломерату, установки для випробування агломерату на міцність та ін. Площа перетину аглочаші становила 0,005 м². Для виміру температури в зоні спікання та постійного контролю температури газів, що відходять, використані термопари з гальванометром, відповідно ВР20/5 і ХА. Для контролю розрядження під колосниковими ґратами аглоустановка обладнана V-подібним рідинним вакуумметром та іншим обладнанням.

По закінченні процесу спікання агломерат розвантажується на залізний лист, розбивається ломиком на кілька шматків, або, за аналогією з розвантажувальним кінцем машини, скидається з висоти 1 м на чавунну плиту, зважується і записується в журнал. Після цього робиться ситовий аналіз агломерату з визначенням виходу: шматкового придатного агломерату крупністю більше 25 мм, ліжка крупністю 25...12 або 25...10 мм і повернення крупністю 12...0 або 10...0 мм.

Як параметри для порівняння результатів дослідних спікань були прийняті: гранулометричний склад обкомкованого матеріалу, газодинамічні характеристики вихідного шару, технологічні характеристики процесу спікання і якість готового агломерату.

Одержуваний в лабораторії дослідний агломерат піддається всебічним дослідженням його якостей: гранулометричного складу, міцності, пористості, відновлюваності та хіміко-мінералогічного складу. Перед проведенням спікання підготовленої аглошихти проводяться хімічні та ситові аналізи вихідних компонентів аглошихти.

Термодинамічний аналіз системи аналогічний до складу марганцевих агломератів. Для визначення оптимальних параметрів процесу випалювання продуктів збагачення марганцевої руди (температури, кількості відновника, складу газової фази) виконали термодинамічний аналіз

системи Mn-P-Si-Fe-Ca-K-Na-H-C-O-N при використанні як відновник вуглецю. Розрахунок рівноважного складу зазначеної системи робили з використанням комп'ютерної програми HSC Chemistry 5.11, вихідне газове середовище – повітря при тиску 0,1 МПа в інтервалі температур 400-1400K.

В результаті термодинамічних розрахунків було встановлено, що за відсутності відновника в газовій фазі присутні тільки кисень, азот і пари води, а конденсована фаза представлена такими сполуками, що містять марганець, як MnO_2 , Mn_2O_3 і Mn_3O_4 . Додавання відновника вносить зміни до рівноважного складу як газової, так і конденсованих фаз системи. Введення у шихту недостатньої кількості відновника призводить лише до часткового відновлення діоксиду марганцю з утворенням Mn_2O_3 . При подальшому збільшенні кількості вуглецю, що додається, в конденсованій фазі поряд з Mn_2O_3 з'являється гаусманіт (Mn_3O_4), максимальна кількість якого спостерігається при додаванні 9,5% вуглецевого відновника. Подальше підвищення вмісту вуглецю в шихті призводить до утворення MnO у конденсованій фазі. Максимальний рівень відновлення досягається при додаванні відновника в кількості 12 – 15%.

При оптимальній концентрації відновника в шихті вивчався вплив температури на рівень відновлення марганцевсодержащих сполук. Термодинамічні розрахунки показали, що при низьких температурах поряд з частково відновленим Mn_3O_4 є також оксид MnO . Рівноважний склад марганцевсодержащих продуктів різко змінюється у разі підвищення температури. При температурі 800-900K відновлювальний процес суттєво активізується. У конденсованій фазі при цьому залишається лише незначна кількість Mn_3O_4 , основна частина марганцевсодержащих сполук представлена цільовим продуктом MnO .

На основі досліджень металургійних характеристик різної марганцевої сировини, а також шихт для виплавки марганцевих феросплавів слід, що вони легкоплавки та температури їх плавлення (1000-1200°C) істотно нижче температури початку відновлення марганцю (1310°C). Отже, процеси шлакообразования технології сплавів марганцю значно випереджають за часом процеси відновлення заліза, марганцю і кремнію. У більшості випадків процеси виплавки сплавів марганцю за валовим речовинним складом їх шихт можна розглядати як процес відновлення заліза, марганцю та кремнію з оксидних розплавів системи $FeO-MnO-CaO-SiO_2-Al_2O_3$. Елементи з розплавів

зазначеної складної системи відповідно до термодинамічної міцності їх оксидів відновлюються в наступному порядку: залізо, марганець, кремній, алюміній та кальцій. У рудотермічних процесах виплавка феросплавів залізо починає відновлюватися у верхніх горизонтах печі ще до розплавлення шихтових матеріалів. Відновлення ж марганцю і кремнію здійснюється з оксидів вже за розплавлення шихти. Загалом при відновленні складного за складом оксидної сировини за його розплавленням слід орієнтуватися на нормативний фазовий склад відносно рідких розплавів – на речовинний склад, обумовлений сполуками, стабільними при високих температурах.

Досліни спікання агломерату з додаванням шунгіту провели у лабораторних умовах. Хімічний аналіз проб дослідного шунгіту, мас.

C	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	S	H ₂ O
28	57	0.2	4.3	2.8	1.2	0.3	0.2	1.5	1.5	3.0

Спікання марганцевого агломерату АМНВ-2 у лабораторних умовах виконали із застосуванням шихтових складових, прийнятих на НЗФ під час виробництва АМНВ-2.

Моделювали вплив заміни вуглецю коксу на вуглець, що міститься в шунгіті в наступних співвідношеннях: % вуглецю коксу/% вуглецю шунгіту: 20/80; 30/70; 40/60; 50/50; 60/40; 80/20. Спікання проводили в лабораторних умовах з контролем температури газів, що відходять і розрядження газів агломераційного процесу. Визначали міцність дослідного агломерату та продуктивність агломераційної установки.

№ опыта	Співвідношення, %, вуглець коксу/вуглець шунгіту	SiO ₂	Mn	Fe	C	SiC
1	20/80	31,4	37,9	2,9	1,31	0,86
2	30/70	30,73	38,1	2,89	1,12	0,82
3	40/60	28,96	38,42	2,87	0,96	0,781
4	50/50	28,98	38,56	2,93	0,82	0,76
5	60/40	28,86	38,42	2,92	0,57	0,74
6	80/20	25,86	39,3	2,99	0,49	0,72

Міцність агломерату визначали за стандартною методикою: скидання з висоти 2 м на сталеву плиту і кількість фракції, що утворилася (5-0) мм у %.

У таблиці представлені результати визначень:

№ дослідного агломерату	1	2	3	4	5	6
Міцність, % (кількість фракції 5-0 мм)	9,1	8,6	7,4	6,8	7,2	7,6

Питома продуктивність спікання на лабораторній установці склала близько 0,8 т/(м²·год).

Таким чином, при додаванні у вихідний склад шихти для отримання марганцевого агломерату 11,5% шунгіту, що відповідає заміні 50% вуглецю коксу вуглецем шунгіту, забезпечуються умови отримання заданого складу агломерату достатньої міцності та питомої продуктивності.

Проведенням базового спікання визначили мінімальну кількість палива (коксіка), необхідного для отримання достатньої кількості рідкої оксидної фази для забезпечення необхідної міцності аглоспеку при внесенні ззовні із шунгітом мінімальної кількості кремнезему. В результаті проведення базового спікання отримано такі результати:

№ опыта	Вміст вуглецю:					Степень використання вуглеця шунгіту	Відношення $C_{ш}/C_{к}$	$\Sigma_{C(ш+к)}$ гр
	в шунгіті		В придатному агломераті		У сухому агломераті			
	гр	%	гр	%	%			
1	10,8	30,0	3,05	0,50	2,39	73,30	0,1	119
2	21,6	30,0	3,10	0,57	4,71	85,65	0,27	102,6
3	27,0	30,0	4,61	0,96	5,77	82,93	0,4	94,5
4	60,0	30,0	2,65	0,42	12,1	95,58	1,0	120

Подальше збільшення маси шунгіту ($MC_{ш}$) того ж фракційного складу (1-3мм), що вводиться у вихідну аглошихту, яке характеризується збільшенням параметра $C_{ш}/C_{к} > 1,0$ призвело до зниження ступеня використання вуглецю шунгіту як паливо. При $C_{ш}/C_{к} = 1,3$ це зниження становило 9%, при $C_{ш}/C_{к} = 1,6$ – 12%. При повній заміні вуглецю коксу аглоспек характеризується практичною відсутністю рідкої оксидної фази, яка скріплює структуру агломерату, що пов'язано з порушенням теплового балансу в зоні спікання. Додаткова кількість теплоти від окислення вуглецю коксу та частини шунгіту було використано на нагрівання кремнезему шунгіту, що призвело до очікуваного зниження температури в зоні спікання та зниження тієї частини теплової енергії, яка використовується на утворення рідкої оксидної фази відповідної кількості. Зниження температури сповільнило і дифузійний

перехід вуглецю до поверхні шматочків шунгіту, що є реакційною зоною взаємодії кисню повітря та вуглецю шунгіту. До того ж шунгіт має досить високу температуру розм'якшення. Ці чинники і стали причиною зниження коефіцієнта використання вуглецю шунгіта як палива зі збільшенням частки шунгіту в аглошихті понад 12%.

Висновки

Отримані результати підтверджують, що при залученні у вихідну шихту шунгіта основним фактором, що впливає на міцність спеку, є кількість вуглецю коксу. Як параметр, що визначає доцільність використання шунгіту та його раціональну кількість в аглошихті, можна використовувати відношення: $C_{\text{ш}}/C_{\text{к}} \leq 1,0 \div 1,2$.

Можливо використовувати відношення маси шунгіту до загальної маси вихідного аглоспеку (з шунгітом та коксиком), яке має вигляд: $M_{\text{ш}}/M_{\text{вихідн.аглошихт}} \leq 0,12$. У цьому випадку шихта повинна містити не більше 12% шунгіту. Вуглець шунгіту є вторинним фактором, вплив якого на міцність мінімальний. Його роль, мабуть, зводиться до отримання теплової енергії, необхідної для розігріву кварцу шунгіта до необхідних температур спікання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Resource saving in manganese ferroalloy production using low-grade manganese ore concentrates / Proydak Yu.S., Mianovskaya Ya.V. // Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry: Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress INFACON XIV. May 31–June 4, 2015, Kiev, Ukraine. – P. 27-31.
2. Состояние и перспективы развития ферросплавной промышленности. Грищенко С.Г., Куцин В.С., Кравченко П.А., Солошенко В.С., Кудрявцев С.Л., Власюк Е.А. // Экология и промышленность. - №3. - 2013. - С. 4-9.
3. Рециклінг вторинних матеріалів видобутку та виробництва марганцевих феросплавів. Мянговська Я.В., Пройдак Ю.С., Камкіна Л.В., Анкудінов Р.В. «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». Матеріали Четвертої міжнародної науково-практичної конференції: у 2 т. 6-10 листопада 2017 р., м. Трускавець. - К.: ДКЗ, 2017. - Т.2. - С. 307-313.
4. Ю.С.Пройдак, Я.В.Мяновская, В.Ю.Камкин, А.В.Бабенко. Комплексный подход к использованию мелкозернистого марганцевого концентрата в процессах производства марганцевых сплавов. Politechnika częstochowska. Wydział inżynierii produkcji i technologii materiałowych. Inżynieria procesów produkcji. Wybrane aspekty. Praca zbiorowa. Redakcja naukowa Artur Hutny, Marek Warzecha. Seria: Monografie. № 65. Częstochowa 2016, pp. 60-65.
5. Металургія марганцю України. Б.Ф. Величко, В.О. Гаврилов, М.І. Гасик та інш.; Під загальною та наук. Ред. акад. НАН України М.І. Гасика. К.: Техніка, 1996. - 472 с.
6. Manganese Ore Thermal Treatment Prior to Smelting. Yakov Gordon, Johannes Nell, Yuri Yaroshenko. TIM'2018. DOI: 10.18502/keg.v3i5.2656.
7. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. / Гасик М.И., Лякишев Н.П. // СП Интермет Инжиниринг, 1999. - 764 с.

8. Manganese Ore Thermal Treatment Prior to Smelting. Yakov Gordon, Johannes Nell, Yury Yaroshenko. TIM'2018. DOI: 10.18502/keg.v3i5.2656.
9. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. / Гасик М.И., Лякишев Н.П. // СП Интермет Инжиниринг, 1999. - 764 с.
10. Оптимизация технологических параметров агломерации /А.Г.Ященко, С.Г.Грищенко, Е.М.Мангатов, В.М.Сиваченко, И.Г.Кучер, А.А.Чайченко // Сб. АН СССР. “Теория и практика металлургии марганца”. - М.: Наука, 1990. – С. 135-140.
11. Освоение технологии производства агломерата с уплотнением аглоспека. / В.М. Сиваченко, А.Г. Ященко, В.Я. Щедровицкий, Н.Д. Черняев, В.П. Маляренко // Сталь. – 1990. - № 11. – С.45-47.
12. Оптимизация технологических параметров агломерации /А.Г.Ященко, С.Г.Грищенко, Е.М.Мангатов, В.М.Сиваченко, И.Г.Кучер, А.А.Чайченко // Сб. АН СССР. “Теория и практика металлургии марганца”. - М.: Наука, 1990. – С. 135-140.
13. Освоение технологии производства агломерата с уплотнением аглоспека. / В.М. Сиваченко, А.Г. Ященко, В.Я. Щедровицкий, Н.Д. Черняев, В.П. Маляренко // Сталь. – 1990. - № 11. – С.45-47.
14. Проїдак Ю.С., Стовба Я.В., Камкина Л.В., Гогенко О.А., Гечу К.Н. Выбор рационального состава шихты и способа подготовки с целью повышения использования в металлургическом переделе при получении марганцевых сплавов низкосортного концентрата. // Series: Monografie. -№ 40. “New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering”. Czestohowa, 2014. - С. 98-104.
15. Миллер В.Я., Утков В.А. Результаты лабораторных и полупромышленных опытов по агломерации концентрата карбонатных марганцевых руд Полуночного месторождения. Труды института металлургии. 1961. вып.7. С.69-78.
16. МПК C21B5/02(1995-01-01). Заявка 98107543/02, 1998-04-21. Туктамышев И.Ш., Некрасов Г.Е., Рубин З.Е., Брусенко С.В., Титов В.И., Шепилов С.В., Курунов И.Ф., Калинин Ю.К., Туктамышев И.И., Бродский М.Л. Способ выплавки высококремнистого чугуна.
17. RU2 186 855C1. МПК C21B5/00(2000-01-01). Заявка 2001110948/02. Курунов И.Ф., Мизин В.Г., Зарапин А.Ю., Чернов П.П., Кукарцев В.М., Захаров Д.В., Яриков И.С., Туктамышев И.Ш., Калинин Ю.К., Емельянов В.Л. Способ выплавки пердедельного чугуна.
18. Парфенева Л.С., Волконская Т.И., Тихонов В.В. Теплопроводность, теплоемкость и термоэдр шунгитового углерода // Физика твердого тела. 1994. Т. 36. № 4. С. 1150–1153.
19. Ignatov I., Mosin O.V. The structure and composition of natural carbonaceous fullerene containing mineral shungite // International Journal of Advanced Scientific and Technical Research. 2013. V. 6. № 11–12. P. 9–21.

REFERENCES

1. Resource saving in manganese ferroalloy production using low-grade manganese ore concentrates / Proydak Yu.S., Mianovskaya Ya.V. // Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry: Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress INFACON XIV. May 31–June 4, 2015, Kiev, Ukraine. – P. 27-31.
2. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya ferrosplavnoy promyshlennosti. Grishchenko S.G., Kutsin V.S., Kravchenko P.A., Soloshenko V.S., Kudryavtsev S.L., Vlasyuk E.A. // Ekologiya i promyshlennost. - №3. - 2013. - S. 4-9.
3. Retsyklinh vtorynnnykh materialiv vydobutku ta vyrobnyystva marhantsevykh ferosplaviv. Myanovs'ka YA.V., Proydak YU.S., Kamkina L.V., Ankudinov R.V. «Nadrokorystuvannya v Ukraini. Perspektyvy investuvannya». Materialy Chetvertoyi mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi: u 2 t. 6-10 lystopada 2017 r., m. Truskavets'. - K.: DKZ, 2017. - T.2. - S. 307-313.
4. Yu.S.Proydak, Ya.V.Myanovskaya, V.Yu.Kamkin, A.V.Babenko. Kompleksnyy podkhod k ispol'zovaniyu melkozernistogo margantsevogo kontsentrata v protsessakh proizvodstva margantsevykh splavov. Politechnika czestochowska. Wydział inżynierii produkcji i technologii

- materiałuw. Inżynieria procesuw produkcji. Wybrane aspekty. Praca zbiorowa. Redakcja naukowa Artur Hutny, Marek Warzecha. Seria: Monografie. № 65. Częstochowa 2016, rr. 60-65.
5. Metalurhiya marhantsyu Ukrayiny. B.F. Velychko, V.O. Havrylov, M.I. Hasyk ta insh.; Pid zahal'noyu ta nauk. Red. akad. NAN Ukrayiny M.I. Hasyka. K.: Tekhnika, 1996. - 472 s.
 6. Manganese Ore Thermal Treatment Prior to Smelting. Yakov Gordon, Johannes Nell, Yury Yaroshenko. TIM'2018. DOI: 10.18502/keg.v3i5.2656.
 7. Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov. / Gasik M.I., Lyakishev N.P. // SP Internet Inzhiniring, 1999. - 764 s.
 8. Manganese Ore Thermal Treatment Prior to Smelting. Yakov Gordon, Johannes Nell, Yury Yaroshenko. TIM'2018. DOI: 10.18502/keg.v3i5.2656.
 9. Teoriya i tekhnologiya elektrometallurgii ferrosplavov. / Gasik M.I., Lyakishev N.P. // SP Internet Inzhiniring, 1999. - 764 s.
 10. Optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov aglomeratsii /A.G.Yashchenko, S.G.Grishchenko, Ye.M.Mangatov, V.M.Sivachenko, I.G.Kucher, A.A.Chaychenko // Sb. AN SSSR. “Teoriya i praktika metallurgii margantsa”. - M.: Nauka, 1990. – S. 135-140.
 11. Osvoeniye tekhnologii proizvodstva aglomerata s uplotneniyem aglospeka. / V.M. Sivachenko, A.G. Yashchenko, V.YA. Shchedrovitskiy, N.D. Chernyayev, V.P. Malyarenko // Stal'. – 1990. - № 11. – S.45-47.
 12. Optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov aglomeratsii /A.G.Yashchenko, S.G.Grishchenko, Ye.M.Mangatov, V.M.Sivachenko, I.G.Kucher, A.A.Chaychenko // Sb. AN SSSR. “Teoriya i praktika metallurgii margantsa”. - M.: Nauka, 1990. – S. 135-140.
 13. Osvoeniye tekhnologii proizvodstva aglomerata s uplotneniyem aglospeka. / V.M. Sivachenko, A.G. Yashchenko, V.YA. Shchedrovitskiy, N.D. Chernyayev, V.P. Malyarenko // Stal'. – 1990. - № 11. – S.45-47.
 14. Proydak Yu.S., Stovba Ya.V., Kamkina L.V., Gogenko O.A., Gechu K.N. Vybor ratsional'nogo sostava shikhty i sposoba podgotovki s tsel'yu povysheniya ispol'zovaniya v metallurgicheskoy peredele pri poluchenii margantsevykh splavov niz'kosortnogo kontsentrata. // Series: Monografie. -№ 40. “New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering”. Czestohowa, 2014. - C. 98-104.
 15. Miller V.Ya., Utkov V.A. Rezul'taty laboratornykh i polupromyshlennykh opytov po aglomeratsii kontsentrata karbonatnykh margantsevykh rud Polunochnogo mestorozhdeniya. Trudy instituta metallurgii. 1961. vyp.7. S.69-78.
 16. MPK C21B5/02(1995-01-01). ZAYAVKA 98107543/02, 1998-04-21. Tuktamyshev I.SH., Nekrasov G.Ye., Rubin Z.Ye., Brusenkov S.V., Titov V.I., Shepilov S.V., Kurunov I.F., Kalinin YU.K., Tuktamyshev I.I., Brodskiy M.L. Sposob vyplavki vysokokremnistogo chuguna.
 17. RU2 186 855C1. MPK C21B5/00(2000-01-01). Zayavka 2001110948/02. Kurunov I.F., Mizin V.G., Zarapin A.YU., Chernov P.P., Kukartsev V.M., Zakharov D.V., Yarikov I.S., Tuktamyshev I.SH., Kalinin YU.K., Yemel'yanov V.L. Sposob vyplavki peredel'nogo chuguna.
 18. Parfeneva L.S., Volkonskaya T.I., Tikhonov V.V. Teploprovodnost', teployemkost' i termoeds shungitovogo ugleroda // Fizika tverdogo tela. 1994. T. 36. № 4. S. 1150–1153.
 19. Ignatov I., Mosin O.V. The structure and composition of natural carbonaceous fullerene containing mineral shungite // International Journal of Advanced Scientific and Technical Research. 2013. V. 6. № 11–12. P. 9–21.

Received 10.01.2022.

Accepted 21.01.2022.

**ASSESSMENT OF USING SHUNGITE ROCK TECHNOLOGICAL FEASIBILITY
IN THE PRODUCTION OF MANGANESE AGGLOMERATE**

Industrial experience in the production of manganese sinter shows that the known technological proposals do not provide an increase in the productivity of sintering machines and the necessary strength properties of fluxed manganese sinter. Known methods of sintering fluxed manganese agglomerate, characterized by increased mechanical strength and high moisture resistance. The disadvantage of these measures is a significant complication of the technological line of sinter production and an increase in energy costs. In this regard, one of the main directions is the development of charge compositions and parameters of the sintering process of manganese raw materials. The purpose of the study is the analysis of physical and chemical processes, experimental research and the development of innovative technological solutions and recommendations for attracting shungite rock to the metallurgical production to expand the raw material base of the mining and metallurgical complex. Calculations of the thermodynamic equilibrium of oxide systems adequate to sinter systems have been performed, and the chemical composition of the phase components of manganese agglomerate microstructures has been studied. The rational content of shungite in the sinter charge has been established, which ensures the production of agglomerate with specified characteristics (strength, usable yield, manganese content) is 12...13% of the mass of the initial charge. A further increase in its particles in the sinter mixture leads to a decrease in strength and the release of suitable heat. Increasing the degree of dispersion of shungite to 0-2 mm allows increasing the level of use of shungite carbon as a fuel without increasing the amount of traditional fuel - coke - for the process.

Keywords: manganese agglomerate, strength, shungite rock, amount of charge components, shungite carbon.

Камкіна Людмила Володимирівна – доктор технічних наук, професор, декан факультету металургійних процесів та хімічних технологій, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Мяновська Яна Валеріївна – доктор технічних наук, доцент, кафедра теоретичних основ металургійних процесів, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Пройдак Юрій Сергійович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Мишалкін Анатолій Павлович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра теоретичних основ металургійних процесів, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Kamkina Lyudmila, doctor of technical sciences, professor, dean of the faculty of metallurgical processes and chemical technologies, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

Mianovska Yana, doctor of technical sciences, assistant professor, department of theoretical foundations of metallurgical processes, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

Projdak Yuri, doctor of technical sciences, professor, vice-rector for scientific work, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

Mishalkin Anatoliy, candidate of technical science, assistant professor, department of theoretical foundations of metallurgical processes, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

МОЖЛИВОСТІ ЗМЕНШЕННЯ ОБСЯГІВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ РУДНОТЕРМІЧНОЮ ПІЧЧЮ

Анотація. В даній статті представлений аналіз існуючих моделей розподілу електричного струму в руднотермічній печі. Запропонована комплексна алгоритмічна модель роботи такої печі. За допомогою цього математичного опису стає можливим прогнозування витрат електричної енергії при одержанні різних видів феросплавів. Також модель дозволяє за зпрогнозованою кількістю необхідно утвореного розплаву зупинити процес та почати злив феросплавів, що в свою чергу зменшить час плавки та кількість споживаної електричної енергії.

Ключові слова: руднотермічна піч, електрична енергія, комплексна модель, електричний опір шихти, елементарний об'єм.

Вступ

Сучасний рівень розвитку електротермії сприяє інтенсивному використанню існуючих електропечей установок та введенню в експлуатацію нових електродугових печей змінного струму. При цьому актуальним залишається питання застосування енергозберігаючих технологій. Так завдяки комплексному підходу цього математичного моделювання з врахуванням того, що у ванні одночасно протікають безпосередньо пов'язані між собою електричні, теплові та хімічні процеси стає можливим досягти економії енергоресурсів. Синтезувавши та удосконаливши існуючі математичні моделі стає можливим за допомогою обчислювальних методів вирішувати наступні задачі:

- технологічна оптимізація за вибраним критерієм ефективності;
- прогнозування споживання електричної енергії в динаміці;
- розподіл енергії в об'ємі ванни печі;
- розрахунок температурного поля ванни;
- визначення об'єму утвореного розплаву та шлаку і т.п.

Розглянемо існуючі математичні моделі електричних печей змінного струму та проаналізуємо можливість їх використання для вирішення поставлених задач.

Аналіз досягнень та постановка задачі

Розтікання електричного струму в руднотермічній ванні було предметом вивчення на протязі багатьох минулих років. Цьому питанню присвячено багато теоретичних і експериментальних досліджень. М. С. Максименко, Ф. Я. Цибакін, Д. А. Діомідовський, Р. А. Сисоян, П. В. Сергієв і Г. Ф. Платонов [1, 2] вивчали розподіл струму в однофазній та трифазній ваннах на електролітичних моделях. В. Т. Жердев більшого значення надає вивченню розподілу струму безпосередньо у діючих печах [3-5]. Проведено математичне моделювання електричних полів трифазних руднотермічних печей [6]. Багатьма науковцями проводилось математичне моделювання електричних полів трифазних руднотермічних печей, також розроблена методика для проведення теоретичних досліджень за допомогою конформних відображень щодо визначення фізичних полів в руднотермічній плавильній печі [7]. Відомі математичні моделі розподілу енергії в об'ємі ванни останньої [6, 8] спираються на метод вторинних джерел, який має ряд недоліків, зокрема, складні інтегральні рівняння, що впливають на об'єм обчислювальних операцій. Якісно електричне поле печі висвітлено достатньо, проте наявних відомостей замало для проведення точного розрахунку потужності, електричних перетворень і температур в кожній точці об'єму ванни.

В працях науковців [9-11], що присвячені математичному моделюванню розподілу енергії в ванні руднотермічної печі розглядаються аспекти, що пов'язані з розрахунками оптимальних геометричних і електричних показників роботи останньої при майбутньому проектуванні чи реконструкції існуючих та визначенні втрат енергії в металоконструкціях печей.

Вище згадані математичні моделі роботи руднотермічної печі описують лише один процес, що відбувається в ній. Тому при комплексному моделюванні необхідно враховувати всі процеси та взаємозв'язок між ними для отримання повної інформації про електроспоживання печі, утворення розплаву та шлаку впродовж всього часу виплавки феросплавів.

Викладення матеріалу

В працях [12-14] розглядаються елементи динамічної алгоритмічної моделі роботи круглої трьохелектродної руднотермічної печі, яка враховує

специфіку протікання електричних, теплових та хімічних процесів, що безпосередньо взаємопов'язані між собою, при одержанні феросплавів. На рисунку 1 представлена повна узагальнена структура такої моделі.

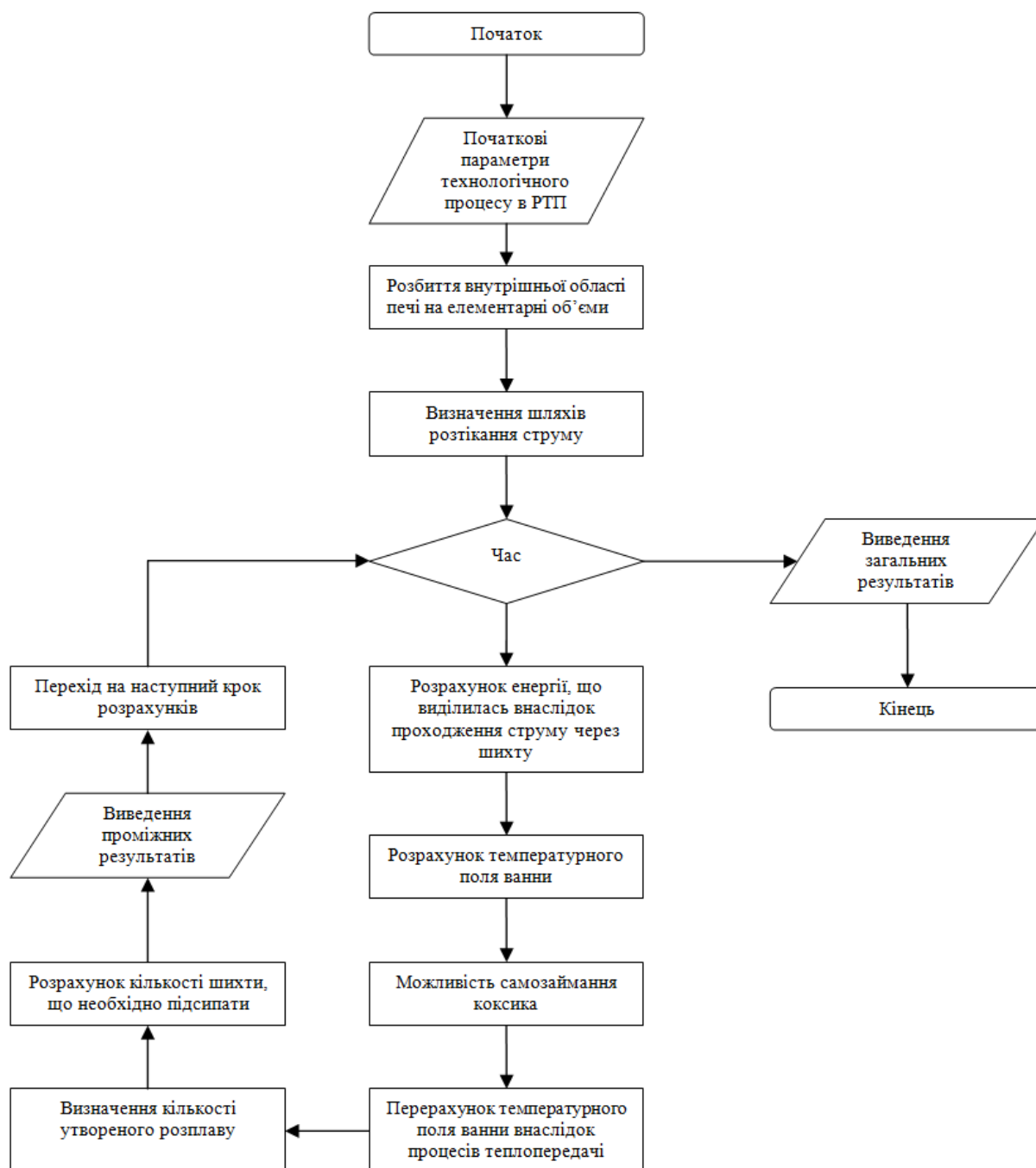


Рисунок 1 – Узагальнений алгоритм роботи руднотермічної печі в динаміці

Головною метою її створення є можливість контролю та впливу на технологічний процес задля зменшення питомих витрат електричної енергії на одиницю готової продукції.

Алгоритм розбитий на основні блоки:

- введення початкових параметрів;
- розбиття внутрішньої області печі на елементарні об’єми (для проведення в них розрахунків);
- визначення шляхів розтікання струму;
- розрахунок енергії, що виділилась в елементарних об’ємах внаслідок проходження струму через шихту;
- розрахунок температурного поля ванни;
- визначення моменту самозаймання коксика;
- перерахунок температурного поля ванни внаслідок процесів теплопередачі;
- визначення кількості утвореного розплаву;
- розрахунок кількості шихти, що необхідно підсипати у ванну;
- виведення параметрів роботи печі.

До початкових параметрів відноситься:

- геометричні параметри печі: радіус ванни; висота заповнення ванни шихтою; діаметр електродів; глибина занурення електродів у ванну; відстань між електродами; радіус на якому розташовані електроди відносно центру ванни печі;
- електричні параметри печі: напруга між електродами з фазами А та В; напруга між електродами з фазами В та С; напруга між електродами з фазами С та А;
- початкові параметри шихти: її температура та компонентний склад;
- фізичні параметри шихти: питомий електричний опір, питома теплота згорання коксика, масова теплоємність, питома щільність розрахункового об’єму, коефіцієнт теплопровідності, густина рідкого розплаву, густина шлаку, коефіцієнт отримання чистих феросплавів з шихтових матеріалів, коефіцієнт отримання шлаку з шихтових матеріалів.

Для розбиття внутрішньої області РТП на елементарні об’єми її ванну представляємо у вигляді циліндра поділеного на однакові елементарні об’єми в системі циліндричних координат, тобто за радіусом, кутом та глибиною. В отриманих комірках здійснюються всі математичні розрахунки. Кількість останніх можна змінювати. Шляхи розтікання струму

представляються як дуги, що проходять через центри електродів в напрямку до країв, центру та подини ванни печі [14].

Після цього, завдяки циклічній частині алгоритму модель дозволяє в динаміці відслідковувати параметри плавки на заданих проміжках часу. Розрахунок енергії, що виділилась внаслідок проходження струму через шихту здійснюється на основі її електричного опору [13].

Так як піч поділена на елементарні об’єми, то шихта в кожній однооб’ємній елементарній складовій ΔV за певної температури має свій питомий електричний опір [15]. Тоді розрахувати усереднений електричний опір можна як:

$$X_{R,\phi,z} = \rho_{R,\phi,z}(t) \cdot \Delta V, \quad (1)$$

де $X_{R,\phi,z}$ – усереднене значення електричного опору елементу, Ом; ΔV – значення об’єму останнього, м³; $\rho_{R,\phi,z}(t)$ – питомий опір елементарного об’єму, Ом·м³;

Маючи шляхи розтікання струму в робочому просторі РТП можна розрахувати кількість введеної в них електричної енергії за певний проміжок часу. Для цього необхідно виділити конкретну траєкторію протікання струму і розрахувати її повний електричний опір. Останній може бути визначений як сумарний опір всіх ділянок шихти через які проходить зазначений струм:

$$X_t = \sum X_{R,\phi,z}, \quad (2)$$

де $X_{R,\phi,z}$ – усереднене значення електричного опору кожного елементарного об’єма, Ом.

Очевидно, що в подальшому у заданій системі координат необхідно вибрати тільки ті елементарні об’єми де пройшов струм та підсумувати їхній результуючий опір, який розраховується для конкретної температури шихти. В результаті отримуємо величину струму, що протікає за розглядуваною траєкторією:

$$I_i = \frac{U}{X_t}, \quad (3)$$

де U – напруга між відповідними фазами, В; X_t – повний електричний опір i -го шляху, Ом.

Отже, підставивши в формулу (3) вирази (1, 2), отримаємо залежність для знаходження величини струму за певною траєкторією його розтікання:

$$I_i = \frac{U}{\sum \rho_{R,\phi,z}(t) \cdot \Delta V}, \quad (4)$$

де $\rho_{R,\phi,z}(t)$ – питомий опір елементарного об’єму, Ом·м³.

В результаті кількість енергії, що виділилась в елементарному об’ємі за рахунок електричного струму за проміжок часу $\Delta\tau$ може бути визначена як:

$$Q_{e(R,\phi,z)} = I_i^2 \cdot X_{R,\phi,z} \cdot \Delta\tau, \quad (5)$$

Якщо ж через один і той самий елементарний об’єм проходить декілька різних траєкторій розтікання струму, то результуюче значення останнього визначається як сума складових за кожною з них. Тоді формула (5) прийме вигляд:

$$Q_{e(R,\phi,z)} = (\sum I_i)^2 \cdot X_{R,\phi,z} \cdot \Delta\tau, \quad (6)$$

де $\sum I_i$ – сума струмів за i -тими шляхами розтікання, які проходять через елементарний об’єм, що розглядається.

Отже, знаючи кількість енергії, що виділилась в кожному елементарному об’ємі за рахунок проходження через нього електричного струму та підсумувавши їх, можна визначити кількість спожитої електричної енергії піччю за певний проміжок часу:

$$W_f(\Delta\tau) = \sum Q_{e(R,\phi,z)}, \quad (7)$$

де $W_f(\Delta\tau)$ – кількість споживаної електричної енергії піччю за проміжок часу $\Delta\tau$, кВт·год.

Після цього температурне поле ванни можна визначити за допомогою формули зміни теплоємності [12]. Знаючи температури в кожному елементарному об’ємі ванни, необхідно зробити перевірку на можливість додаткового виділення в ньому теплоти за рахунок самозаймання коксика. Якщо це має місце, то робиться перерахунок температурного поля. Далі, модель враховує процеси теплопередачі між елементарними об’ємами [12]. Після знаходження остаточного значення температури на даному кроці розрахунків стає можливим визначити кількість утвореного розплаву та розрахувати об’єм шихти, що необхідно підсипати [16]. Після чого всі розраховані на даному кроці параметри печі можуть бути виведені. В подальшому алгоритм працює циклічно.

Універсальність цього алгоритму полягає у можливості переривання циклу розрахунків за різними поставленими умовами, наприклад, такі як:

- значення витраченої кількості електричної енергії (з показником часу);
- значення утвореного розплаву (з показником часу);
- та інше.

Висновки

Отже використовуючи розроблену комплексну модель роботи руднотермічної печі стає можливим за заданими вхідними параметрами спрогнозувати кількість спожитої електричної енергії для кожної плавки, визначити кількість утвореного розплаву та шлаку. А це, в свою чергу, дає можливість розрахувати питомі витрати електроенергії на тону готової продукції.

Також модель дозволяє за спрогнозованою кількістю утвореного розплаву зупинити плавку та почати злив феросплавів, що в свою чергу може зменшити час плавки та кількість споживаної електричної енергії.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев П.В. Энергетические закономерности руднотермических электропечей, электролиза и электрической дуги [Текст] / П. В. Сергеев. – Изд. АН КазССР, 1963. – 184с.
2. Платонов Г.Ф. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей [Текст] / Г. Ф. Платонов. – М.: Энергия, 1965. – 224 с.
3. Струнский Б.М. Руднотермические плавильные печи. / Б.М. Струнский. – М.: Металлургия, 1972. – 368 с.
4. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи [Текст] / Г. А. Сисоян. – М.: Металлургиздат, 1961. – 216 с.
5. Альтгаузен А.П. Электротермическое оборудование. Справочник [Текст] / А. П. Альтгаузен. – М.: Энергия, 1967. – 216 с.
6. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии / С. А. Ольдзиевский, В. А. Кравченко, В. И. Нежурин, И. А. Борисенко. – Москва: Металлургия, 1990. – 112 с.
7. Левченко С. А. Електромагнітне та теплове поля руднотермічної плавильної печі / С. А. Левченко. // Вісник НТУ«ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2016. – №17. – С. 76–80.
8. Миронов Ю. М. Комплексное математическое моделирование энергетических процессов в электрических цепях и ваннах электропечей смешанного нагрева / [Ю. М. Миронов и др.] // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2001. – № 2. –С. 82–90.
9. Куваев В. Ю. Математическое моделирование распределения энергии в объеме рабочего пространства трехфазной рудовосстановительной печи. / В.Ю. Куваев, В.И. Нежурин, А.В. Николенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (121). - Дніпро, 2019. – С. 49-55.
10. Деревянко Д.В. Визначення втрат енергії в металоконструкціях феросплавної електропечі шляхом математичного моделювання. / Д.В. Деревянко, В.Ю. Куваєв, В.І. Неружін // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2017): матеріали III

- Міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, 1-3 листопада 2017 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2017. – С. 43-45.
11. Дереза В.А. Математическое распределение энергии в объеме рабочего пространства трехфазной рудовосстановительной электропечи. / В.А. Дереза, В.Ю. Куваев, В.И. Неружин // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». – Дніпро: Баланс-клуб, 2018. – С. 63-66.
12. Качан Ю.Г. Алгоритм розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі / Ю.Г. Качан, Ю.Б. Ліуш, В.Ю. Міщенко // Вісник ХНУ. – 2018. – № 3 (261). – С. 19-22.
13. Kachan Yu. H. Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. / Yu.H. Kachan, V.Yu. Mishchenko // Naukovyi Visnyk NHU. – 2019. – № 3. – 138-145
14. Mishchenko V.Yu. Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace. / V.Yu. Mishchenko, Yu.H. Kachan // Electrical Engineering And Power Engineering. – №2. – 2019. – 51-57
15. Бакиров А.Г. Исследование удельного электрического сопротивления шихтовых смесей для выплавки ферросиликоалюминия / А.Г. Бакиров, А.К. Жунусов, А.Ф. Чекимбаев, Ж. Шошай // Нау-ка и техника Казахстана. – Павлодар. – 2018. – №2. – С.14-18.
16. Качан Ю.Г. Визначення обсягів розплаву та шлаку під час плавки в феросплавній печі / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №23, (2020). – Дніпро: НМетАУ –ІБК «Системні технології», 2020. – с. 53-62

REFERENCES

1. Sergeev P.V. Energy laws of ore-thermal electric furnaces, electrolysis and electric arc [Text] / P. V. Sergeev. – Ed. AN KazSSR, 1963. - 184p.
2. Platonov G.F. Parameters and electrical modes of metallurgical electrode furnaces [Text] / G. F. Platonov. – M.: Energy, 1965. – 224 p.
3. Strunsky B.M. Ore-thermal melting furnaces. / B.M. Strunsky. - M.: Metallurgy, 1972. - 368 p.
4. Sisoyan G.A. Electric arc in an electric furnace [Text] / G. A. Sisoyan. – M.: Metallurgizdat, 1961. – 216 p.
5. Althausen A.P. Electrothermal equipment. Handbook [Text] / A.P. Althausen. – M.: Energy, 1967. – 216 p.
6. Mathematical modeling of electric fields of ore electrothermal furnaces / S. A. Oldzievsky, V. A. Kravchenko, V. I. Nezhurin, I. A. Borisenko. - Moscow: Metallurgy, 1990. - 112 p.
7. Levchenko S.A. Electromagnetic and thermal fields of ore-thermal smelting furnace / S.A. Levchenko. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. - 2016. - №17. - P. 76–80.
8. Mironov Yu. M. Complex mathematical modeling of energy processes in electric circuits and baths of electric furnaces of mixed heating / [Yu. M. Mironov and others] // Proceedings of the Academy of Electrical Sciences of the Chuvash Republic. - 2001. - No. 2. -S. 82–90.
9. Kuvaev V. Yu. Mathematical modeling of energy distribution in the volume of the working space of a three-phase ore reduction furnace. / V.Yu. Kuvaev, V.I. Nezhurin, A.V. Nikolenko // System Technologies. Regional inter-university collection of science practices. - Issue 2 (121). - Dnipro, 2019. - S. 49-55
10. Derevyanko DV Determination of energy losses in ferroalloy electric furnace metal structures by mathematical modeling. / D.V. Derevyanko, V.Yu. Kuvaev, VI Neruzhin // Computer modeling and optimization of complex systems (KMOSS-2017): materials of the III International Scientific and Technical Conference (Dnipro, November 1-3, 2017) / Ministry of Education and Science of Ukraine, State Higher Educational Institution "Ukrainian State University of Chemical Technology". - Dnipro: SHEI UDKHTU, 2017. - P. 43-45.

11. Dereza V.A. Mathematical distribution of energy in the volume of the working space of a three-phase ore reduction electric furnace. / V.A. Dereza, V.Yu. Kuvaev, V.I. Neruzhin // Computer modeling and optimization of folding systems (KMOSS-2018): materials of the IV International Scientific and Technical Conference (Dnipro, 1-2 leaf fall, 2018) / Ministry of Education and Science of Ukraine University of Chemistry and Technology". - Dnipro: Balance Club, 2018. - P. 63-66
12. Kachan Yu.H. Algorithm for calculating the temperature field of the bath of the ore thermal furnace / Yu.H. Kachan, Yu.B. Liush, V.Yu. Mishchenko // Bulletin of KhNU. - 2018. - № 3 (261). - P. 19-22.
13. Kachan Yu. H. Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. / Yu.H. Kachan, V.Yu. Mishchenko // Naukovyi Visnyk NHU. - 2019. - № 3. - 138-145
14. Mishchenko V.Yu. Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace. / V.Yu. Mishchenko, Yu.H. Kachan // Electrical Engineering And Power Engineering. - №2. - 2019. - 51-57
15. Bakirov A.G. Investigation of the specific electrical resistance of charge mixtures for the smelting of ferrosilicoaluminum / A.G. Bakirov, A.K. Zhunusov, A.F. Chekimbaev, Zh. Shoshai // Science and technology of Kazakhstan. - Pavlodar. - 2018. - No. 2. - S.14-18.
16. Kachan Yu.H. Determination of melt and slag volumes during melting in a ferroalloy furnace / Yu.H. Kachan, V.Yu. Mishchenko // MODERN PROBLEMS OF METALLURGY. Scientific news. №23, (2020). - Dnipro: NMetAU - IEC "System Technologies", 2020. - p. 53-62.

Received 23.02.2022.

Accepted 07.03.2022.

UDC 669:621

Yu. Kachan, V. Mishchenko

POSSIBILITIES OF REDUCING ELECTRICITY CONSUMPTION BY ORE-THERMAL FURNACE

Analysis of recent research and publications. The spread of electric current in the ore bath has been the subject of study for many years. Many scientists have performed mathematical modeling of electric fields of three-phase ore thermal furnaces, and also developed a method for conducting theoretical research using conformal mappings to determine the physical fields in the ore thermal melting furnace. Known mathematical models of energy distribution in the volume of the bath of the latter are based on the method of secondary sources, which has a number of disadvantages, in particular, complex integral equations that affect the volume of computational operations. Qualitatively, the electric field of the furnace is sufficiently illuminated, but the available information is not enough to accurately calculate the power, electrical transformations and temperatures at each point in the volume of the bath.

The aim of the study. The above-mentioned mathematical models of the operation of the ore-thermal furnace describe only one process that takes place in it. Therefore, in complex modeling it is necessary to take into account all the processes and the relationship between them to obtain complete information about the power consumption of the furnace, the formation of melt and slag throughout the smelting of ferroalloys.

Presentation of the main research material. The elements of the dynamic algorithmic model of operation of a round three-electrode ore thermal furnace are considered, which takes into account the specifics of electrical, thermal and chemical processes that are directly interconnected in the production of ferroalloys. Shows the complete generalized structure of such a model. The main purpose of its creation is the ability to control and influence the technological process to reduce the specific cost of electricity per unit of finished product.

The algorithm is divided into basic blocks: input of initial parameters; division of the inner region of the furnace into elementary volumes (for calculations in them); determination of current flow paths; calculation of energy released in elementary volumes due to the passage of current through the charge; calculation of the temperature field of the bath; determination of the moment of self-ignition of coke; recalculation of the temperature field of the bath due to heat transfer processes; determining the amount of melt formed; calculation of the amount of charge that must be poured into the bath; output parameters of the furnace.

The universality of this algorithm is the ability to interrupt the cycle of calculations under various conditions, such as: the value of the amount of electricity consumed (with time); the value of the formed melt (with time); and other.

Conclusions. The model allows to stop melting and start draining of ferroalloys according to the predicted amount of formed melt, which in turn can reduce the melting time and the amount of electric energy consumed.

Keywords: ore-thermal furnace, electric energy, complex model, electrical resistance of the charge, elemental volume.

Качан Юрій Григорович – д.т.н., професор кафедри електропостачання промислових підприємств, Національний університет «Запорізька політехніка».

Мищенко Владислав Юрійович – асистент кафедри електропостачання промислових підприємств, Національний університет «Запорізька політехніка».

Kachan Yuriy, doctor of technical sciences, professor of the department of power supply of industrial enterprises, National university "Zaporizhzhya Polytechnic".

Mishchenko Vladyslav, assistant lecturer of the department of power supply of industrial enterprises, National university "Zaporizhzhya Polytechnic".

ДРЕСИРУВАННЯ ГАРЯЧЕКАТАНОГО ОСОБЛИВОТОНКОГО ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Анотація. Дресування - кінцева операція технологічного процесу виробництва автолистової сталі – впливає на її якість поверхні, властивості та штампованість. Застосування малих обтискувань при дресуванні дозволяє здійснити наклеп поверхневого шару металу і зберігти недеформованими внутрішні шари. В результаті вдається запобігти утворенню ліній зсуву при штампуванні та забезпечити оптимальне поєднання механічних характеристик прокату. Дресування здійснюється з метою усунення різнотовщинності і хвилястості гарячекатаних листів. На дресувальних станах докатують лист до заданої товщини. Дресування травлених листів забезпечує їм більш гладку поверхню. Перевагами дресування є підвищення здатності матеріалу до глибокої витяжки, зменшення відношення σ_t/σ_b і витрат енергії при штампуванні. Проведення дресування на заключній стадії обробки особливотонких штаб і листів дозволить випускати гарячекатаний прокат з показниками якості, які відповідають вимогам стандартів до холоднокатаного листа. Актуальним є аналіз впливу дресування на показники якості гарячекатаного прокату товщиною 1,5 мм для автомобільної промисловості із низьковуглецевої сталі. Мета роботи - встановлення впливу дресування за різними технологічними схемами виробництва на структуру і механічні властивості гарячекатаного особливотонкого листового прокату із низьковуглецевої сталі 08пс. Встановлено, що механічні властивості металу, обробленого за різними технологічними схемами, повністю відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 як до гарячекатаного, так і до холоднокатаного прокату. Відпал травленого особливотонкого листового прокату із сталі 08пс суттєво покращує його пластичність в зрівнянні з гарячекатаним станом та сприяє формуванню рівномірної структури металу відповідно до ДСТУ 2834-94. Вибір параметрів та оптимізація процесу дресування дозволять попередити зниження пластичності матеріалу, покращити механічні властивості гарячекатаної особливотонкої листової низьковуглецевої сталі та підвищити якість дресированих штаб та листів.

Ключові слова: низьковуглецева сталь; листовий прокат; дресування; механічні властивості; травлення.

Постановка проблеми

Дресування є кінцевою операцією технологічного процесу виробництва автолистової сталі та впливає на її якість поверхні, властивості та штампованість. Застосування малих обтискувань при дресуванні дозволяє здійснити наклеп поверхневого шару металу і зберігти недеформованими внутрішні шари, в результаті вдається запобігти утворенню ліній зсуву при штампуванні та забезпечити оптимальне поєднання механічних характеристик прокату. Дресування здійснюється з метою усунення різнотовщинності і хвилястості гарячекатаних листів. В деяких випадках на дресувальних станах докатують лист до заданої товщини. Дресування травлених листів забезпечує їм більш гладку поверхню. Перевагами дресування є підвищення здатності матеріалу до глибокої витяжки, зменшення відношення σ_t/σ_b і витрат енергії при штампуванні.

Питанням удосконалення процесу дресування листової сталі для автомобільної промисловості присвячено роботи [1; 2], дані стосовно формування структури та властивостей тонколистових сталей, а також впливу дресування на якість особливотонкої низьковуглецевої сталі представлено в джерелах [3 - 7]. Актуальними є подальші розробки у цьому напрямі.

Мета досліджень

Встановлення впливу дресування за різними технологічними схемами виробництва на структуру і механічні властивості гарячекатаного особливотонкого листового прокату із низьковуглецевої сталі 08пс.

Матеріали та методи дослідження

В роботі застосовували наступні технологічні схеми виробництва гарячекатаного листового прокату із сталі 08пс товщиною 1,5 мм:

– схема 1 (гаряча прокатка на безперервному тонколистовому стані, наступне дресування із ступенем обтискування 1% та розрізання на листи в агрегаті поперечного різання);

– схема 2 (гаряча прокатка на безперервному тонколистовому стані, травлення на безперервній травильній лінії та наступне дресування із ступенем обтискування 1,0-1,2 % на окремо розташованому дресувальному стані);

– схема 3 (гаряча прокатка на безперервному тонколистовому стані, травлення на безперервній травильній лінії, світлий відпал рулонів в газовій ковпаковій печі, розрізання штаб на листи в агрегаті поперечного різання та наступне дресирування із ступенем обтискування 0,8% на стані полистового дресирування);

– схема 4 (гаряча прокатка на безперервному тонколистовому стані, розрізання на листи в агрегаті поперечного різання, травлення листів в агрегаті періодичного травлення та наступне дресирування із ступенем обтискування 0,8-1,6 % на стані полистового дресирування).

Викладення основного матеріалу дослідження

Після гарячої прокатки ($T_{\text{кп}} = 770-790\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{зм}} = 580-610\text{ }^{\circ}\text{C}$, охолодження на повітрі) і кожної з наступних технологічних операцій здійснювали випробування механічних властивостей штаб із сталі 08пс та порівнювали отримані результати з вимогами ДСТУ 2834-94 до гарячекатаного і холоднокатаного прокату товщиною 1,5 мм (таблиця 1).

Аналіз мікроструктури штаб із сталі 08пс показав, що в гарячекатаному металі формується нерівномірна структура: в поверхневих зонах товщиною 0,25-0,30 мм спостерігаються феритні зерна величиною 40-85 мкм, розмір зерн в структурі центральних зон складає 15-30 мкм.

Механічні властивості штаб із сталі 08пс на різних етапах обробки представлено в таблиці 2.

Таблиця 1

Вимоги ДСТУ 2834-94 до тонколистового прокату із якісної вуглецевої сталі

Спосіб виробництва	Тимчасовий опір, σ_b , МПа	Відносне видовження, δ , %	Твердість HRB	Глибина лунки, мм
гарячекатаний	270-410	≥ 24	–	–
холоднокатаний	270-410	≥ 25	≤ 65	$\geq 11,2$

Встановлено, що механічні властивості гарячекатаного особливотонкого листового прокату після дресирування з порізкою (схема 1) повністю відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 до гарячекатаного і холоднокатаного металу для сталі глибокої витяжки групи міцності K270B (табл. 2).

Для видалення окалини з поверхні гарячекатані штаби із сталі 08пс перед дресируванням на окремо розташованому стані протравили на

безперервній лінії травлення (схема 2). Незважаючи на зниження пластичності металу після травлення і дресирування при обробленні штаб за цією схемою, їх механічні властивості повністю відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 до гарячекатаного і холоднокатаного металу для сталі глибокої витяжки групи міцності K270B (табл. 2).

Обробка гарячекатаної сталі 08пс за схемою 3 дозволила встановити спільний вплив травлення, відпалу та дресирування на комплекс механічних властивостей прокату. Аналіз даних табл. 2 показав, що відпал дозволяє підвищити пластичність металу після травлення.

Відомо, що нагрів деформованого листового прокату сприяє протіканню процесів старіння та зниженню пластичності і підвищенню міцностних властивостей.

Таблиця 2

Механічні властивості особливотонкого листового прокату із сталі 08пс

Номер схеми	Етапи обробки	Межа текучості, σ_T , МПа	Тимчасовий опір, σ_B , МПа	Відносне видовження, δ , %	Твердість HRB	Глибина лунки, мм
1	гаряча прокатка	225-235	340-350	35-37	38-40	11,94
	дресирування	235-245	340-350	32-36	44-49	11,92
2	гаряча прокатка	215-225	310-320	35-37	40-42	12,10
	травлення	245-255	340-350	31-32	52-54	11,80
	дресирування	265-275	340-350	29-30	55-59	11,76
3	гаряча прокатка	245-255	350-360	35-36	-	11,85
	травлення	295-315	390-400	31-32	-	11,51
	відпал	235-245	350-360	39-40	-	11,70
	дресирування	275-285	380-390	37-38	-	11,50
4	гаряча прокатка	245	340	32	55	11,60
	травлення	275	350	30	59	11,42
	дресирування	295	360	28	61	11,30

При обробленні гарячекатаних штаб на безперервній травильній лінії метал піддається наклепу та деформації. В процесі травлення температура металу підвищується та в поєднанні з попередньою деформацією сприяє інтенсивному протіканню процесів старіння. Дослідження показали, що після травлення температура рулону, який змотаний на безперервній травильній

лінії, складає 80-90°C. Рулон зберігає підвищену температуру тривалий час, протягом якого процес старіння продовжується. В результаті погіршуються механічні властивості штаб після обробки на безперервній травильній лінії. Відпал дозволяє ліквідувати небажані наслідки травлення гарячекатаних штаб та підвищити пластичність металу [6].

Відомо, що відпал сприяє підвищенню здатності листової сталі до глибокої витяжки.

Режим відпалу рулонів у ковпакових печах встановлюють в залежності від заданих властивостей готового листа із врахуванням впливу хімічного складу сталі та технології попередньої обробки. Відпал низьковуглецевих сталей супроводжується розчиненням карбідів і нітридів в фериті при нагріві та наступному їх виділенні при охолодженні. Інтенсивність і завершеність цих процесів визначаються швидкістю нагріву, температурою рекристалізації, тривалістю витримки при цій температурі і швидкістю охолодження. Раціональний вибір цих параметрів є основою виробництва відпаленого листа з низьковуглецевих сталей із заданими властивостями. Відпал рулонів в ковпаковій печі характеризується повільним нагрівом металу до температури рекристалізації та тривалим його охолодженням, що для більшості низьковуглецевих сталей відповідає рівноважному стану твердого α -розчину [6].

Рулони гарячекатаних штаб товщиною 1,5 мм із сталі 08пс піддавали світлому відпалу в одностопній газовій ковпаковій печі в атмосфері захисного газу HN_3 . Застосували наступні режими відпалу: нагрів до температури 600°C, витримка 2 години, нагрів до 680°C, витримка 6 годин. Загальна тривалість нагріву і витримки складала 16 годин, охолодження під муфелем до температури 160°C тривало 30 годин.

Відпалені штаби на агрегаті різки розрізали на листи, які на однокліттьовому стані Кварто піддавали дресируванню із ступенем деформації 0,8% і травленню в 17-ти роликовій правильній машині [4].

Встановлено, що відпал травлених штаб не тільки ліквідує несприятливі наслідки обробки штаб під час травлення, але і суттєво покращує пластичність металу в зрівнянні з гарячекатаним станом (табл. 2).

Відпал також сприяє формуванню рівномірної структури по перерізу гарячекатаних особливотонких штаб із сталі 08пс (розмір феритного зерна

складає 40-60 мкм). Величина зерна фериту для прокату з низьковуглецевої сталі згідно з ДСТУ 2834-94 допускається не крупніше 6 номеру.

Механічні властивості гарячекатаного, травленого в рулонах, відпаленого і дресированого особливотонкого листового прокату (схема 3) повністю відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 не тільки до гарячекатаного, але і до холоднокатаного металу групи міцності K270B (табл. 2).

За схемою 4 аналізували вплив дресування на показники якості гарячекатаного особливотонкого прокату при полистовому способі виробництва. Вихідні гарячекатані штаби товщиною 1,5 мм із сталі 08пс розрізали на агрегаті поперечного різання на листи, які протравили на агрегаті періодичного травлення і дресували на прокатно-дресувальному стані із ступенем деформації 0,8-1,6 %.

Механічні властивості дресированих листів відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 не тільки до гарячекатаного, але і до холоднокатаного прокату групи міцності K270B (табл. 2).

Висновки

Проведено аналіз впливу заключної операції обробки - дресування на структуру і властивості гарячекатаного особливотонкого листового прокату із низьковуглецевої сталі 08пс:

– встановлено, що механічні властивості металу, обробленого за різними технологічними схемами, повністю відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 як до гарячекатаного, так і до холоднокатаного прокату;

– відпал травленого особливотонкого листового прокату із сталі 08пс суттєво покращує його пластичність в зрівнянні з гарячекатаним станом та сприяє формуванню рівномірної структури металу відповідно до ДСТУ 2834-94;

– вибір параметрів та оптимізація процесу дресування дозволять попередити зниження пластичності матеріалу, покращити механічні властивості гарячекатаної особливотонкої листової низьковуглецевої сталі та підвищити якість дресированих штаб та листів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иванченко В. Г., Франценюк Л. И., Смирнов П. Н. Влияние степени деформации на качество полос при дрессировке // Сталь. – 1997. – № 8. – С. 41–44.

2. Присяжный А.В. Совершенствование процесса дрессировки автомобильного листа с целью снижения ребристости: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 03.05.03 «Технологии и машины обработки давлением». – Екатеринбург, 2006. – 24 с.
3. Путники А. Ю., Тилик В. Т., Штехно О. Н., Мовшович В. С., Иванченко В. Г. Исследование технологии горячекатаной особотонкой листовой стали для холодной штамповки // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Київ: Наукова думка, 2001. – С. 193–197.
4. Панченко В.С., Мирошниченко С.А., Иванченко В.Г., Мержинская Е.В. Дрессировка горячекатаных особотонких полос и листов // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Київ: Наукова думка, 2014. – С. 196–205.
5. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник / Куцова В. З., Ковзель М. А., Носко О. А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.
6. Тонколистова сталь: Монографія / Ю. С. Пройдак, В. З. Куцова, М. А. Ковзель, Т. В. Котова, Г. П. Стеценко / Дніпро: НМетАУ, 2018. – 311 с. – ISBN 978-617-7696-51-2.
7. Yu.M. Koval, V.Z. Kutsova, T.V. Kotova, M.A. Kovzel Forecasting and controlling the structure and properties of ultra-low-carbon steels / Metallophysics and Advanced Technologies, 2021 – vol. 43, p.p. 753-768. – ISSN1024-1809 (Print) E-ISSN: 2617-1511 (Online).

REFERENCES

1. Ivanchenko V. G., Frantsenyuk L. I., Smirnov P. N. Influence of the degree of deformation on the quality of strips during skin pass training // Steel. - 1997. - No. 8. - P. 41–44.
2. Prisyazhnoj A.V. Improving the process of tempering an automobile sheet in order to reduce ribbing: abstract of the dissertation: specialty 03.05.03 "Technologies and machines for pressure treatment." - Yekaterinburg, 2006. - 24 p.
3. Putnoki A. Yu., Tilik V. T., Shtehno O. N., Movshovich V. S., Ivanchenko V. G. Investigation of the technology of hot-rolled extra-thin sheet steel for cold stamping // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. - Kiev: Naukova Dumka, 2001. - P. 193–197.
4. Panchenko V.S., Miroshnichenko S.A., Ivanchenko V.G., Merzhinskaya E.V. Training of hot-rolled extra-thin strips and sheets // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. - Kiev: Naukova Dumka, 2014. - P. 196–205.
5. Alloy steels and alloys with special properties. Textbook / Kutsova V.Z., Kovzel M.A., Nosko O.A. - Dnepropetrovsk: NMetAU, 2008. - 348 p.
6. Sheet steel: Monograph / Yu. S. Proydak, V. Z. Kutsova, M. A. Kovzel, T. V. Kotova, G. P. Stetsenko / Dnipro: NMetAU, 2018. - 311 p. – ISBN 978-617-7696-51-2.
7. Yu.M. Koval, V.Z. Kutsova, T.V. Kotova, M.A. Kovzel Forecasting and controlling the structure and properties of ultra-low-carbon steels / Metallophysics and Advanced Technologies, 2021 – vol. 43, p.p. 753-768. – ISSN1024-1809 (Print) E-ISSN: 2617-1511 (Online).

Received 05.01.2022.

Accepted 18.01.2022.

УДК 621.771.23.09

V. Kutzova, V. Ivanchenko, T. Kotova, M. Kovzel

SKIN-ROLLING OF HOT-ROLLED EXTRA-THIN LOW-CARBON STEEL SHEETS

Skin-rolling is the final operation of the technological process for the production of auto sheet steel. Tempering affects the quality of the metal surface, properties and stamping ability. Treading allows you to harden the surface of the rolled products and keep the inner layers undeformed. As a result, it is possible to prevent the formation of shear lines during

stamping and provide an optimal combination of the mechanical characteristics of rolled products. On skin-rolling mills, the sheet is rolled to a predetermined thickness. Treading etched sheets provides them with a smoother surface. Benefits skin training are to increase the ability of the material to deep drawing and reduce energy costs during stamping. The use of skin-rolling will allow to produce high-quality rolled products in accordance with the requirements of standards. An analysis of the effect of skin-rolling on the quality indicators of low-carbon steel thin-rolled products for the automotive industry was carried out. The effect of skin-rolling on the structure and mechanical properties of hot-rolled extra-thin sheet metal from 08пс low-carbon steel was studied. The mechanical properties of the metal meet the requirements of ДСТУ 2834-94 for hot-rolled and cold-rolled steel. Annealing of extra-thin sheet steel from 08пс steel increases its plasticity compared to the hot-rolled state and contributes to the formation of a uniform metal structure in accordance with ДСТУ 2834-94. The choice of parameters and optimization of the skin-rolling process will prevent a decrease in the plasticity of the material, improve mechanical properties and improve the quality of extra-thin sheet steel.

Keywords: low-carbon steel; sheet steel; skin-rolling; mechanical properties; etching.

Куцова Валентина Зіновіївна – доктор технічних наук, професор, кафедра матеріалознавства ім. Ю.М. Тарана-Жовнира, Національна металургійна академія України.

Іванченко Віталій Георгійович – кандидат технічних наук.

Котова Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства ім. Ю.М. Тарана-Жовнира, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Український державний університет науки і технологій.

Ковзель Максим Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України.

Kutsova Valentina – Doctor of Engineering's Sciences, Professor, The department of material science the name U.N.Taran-Zhovnir, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Ivanchenko Vitalii – Ph.D.

Kotova Tetiana – Ph.D., Associate Professor, The department of material science the name U.N.Taran-Zhovnir, Scientific and educational institute «Institute of industrial and business technologies», Ukrainian state university of science and technologies.

Kovzel Maxim – Ph.D., associate professor, senior researcher Z.I. Nekrasov Institute for Iron and steel of the N.A.S. of Ukraine.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГОВАНОГО ПРОКАТУ

Анотація. При розробці нових марок сталей актуальним для сучасного машинобудування є вивчення впливу хімічного складу та обробки на структуру й механічні властивості. Метою дослідження було моделювання ролі хімічного складу на формування механічних властивостей та структури при визначенні впливу швидкості охолодження з температур аустенітизації сталі 31CrMoV9. Відомо, що від кількості легуючих елементів та режиму термічної обробки залежить комплекс механічних властивостей металовиробів. З використанням математичного та фізико-хімічного моделювання для сталі 31CrMoV9 побудовані залежності зміни механічних властивостей легованого сортового прокату (σ_b , δ_5) від показника структурного стану (d). Визначено, що для гарантованого виконання вимог границі міцності (900-1000 МПа) і відносного подовження ($> 11\%$) кількість легуючих елементів повинна відповідати наступному вмісту: 2,46...2,62 % Cr, 0,2...0,24 % Mo і 0,17...0,19 % V. Отримані дані дозволяють прогнозувати раціональні механічні властивості термічно обробленого сортового прокату в залежності від зміни вмісту хрому, молібдену й ванадію. Металографічні дослідження дозволили встановити вплив параметрів термічної обробки на структуру дослідженої легованої сталі. Встановлено, що нагрівання до температури $A_3+200^\circ\text{C}$ та подальше безперервне охолодження зі швидкостями $> 0,8^\circ\text{C}/\text{с}$ перешкоджає утворенню перлітної структури, що при подальшій термічній обробці (відпалі) сприяє проходженню структурних перетворень (коагуляція, сфероїдизація) в сталі. Для попередження викривлення металу бажано охолодження прокату зі сталі 31CrMoV9 проводити зі швидкістю $0,8...2^\circ\text{C}/\text{с}$. Рекомендовані швидкості охолодження дозволяють отримати більш прийнятну для подальшої обробки структуру з необхідними механічними властивостями. Разом із прогнозуванням рівня механічних властивостей для певного хімічного складу наведені рекомендації дозволяють раціонально використовувати хімічні елементи та гарантовано виконувати вимоги європейської нормативної документації EN 10085:2001.

Ключові слова: легований прокат, хімічний склад, термічна обробка, охолодження, структура, механічні властивості.

Вступ

У металургійній галузі України відбувається зниження завантаження виробничих потужностей із одночасною втратою традиційних ринків збуту

металопродукції. Відсутність на внутрішньому ринку України деяких сортових профілів масового призначення змушує основних споживачів сортового прокату (машинобудування та будівельну галузь) використовувати аналогічні профілі іноземного виробництва (дорожчі) або замінювати їх іншими наявними профілями. Внаслідок цього продукція вітчизняного машинобудування має низьку конкурентоспроможність. З метою підвищення ефективності функціонування підприємств машинобудівного комплексу доцільно здійснювати переорієнтацію на виробництво конкурентоспроможної продукції, впроваджувати сучасні технології зі збереженням рентабельності виробництва та економії ресурсів [1].

Виробництво прокату з легованих сталей особливо важливе для машинобудування. Сучасне машинобудування ставить все більш високі вимоги до експлуатаційних властивостей матеріалів, тому в останні роки збільшується число нових марок легової сталі. Основна увага при розробці нових марок сталі зосереджена на підвищенні механічних властивостей. Цікавим є вивчення впливу хімічного складу та обробки на структуру й механічні властивості прокату з легованих сталей із метою раціонального використання ресурсів [2-4]. В даний час сталі, леговані хромом, молібденом, ванадієм та іншими елементами, широко використовуються в машинобудуванні [5].

Необхідні властивості легового прокату досягаються за допомогою термічної обробки. Застосовуючи різні технологічні схеми термічної обробки легового прокату, можна змінювати властивості шляхом впливу на процеси структуроутворення. Механічні властивості металу визначаються структурою металу, яка залежить від хімічного складу, температури та режиму охолодження. Термічна обробка сталевих прокатів в машинобудуванні переслідує основну мету: створити структуру прокату, яка забезпечуватиме легке штампування, холодну висадку та інше. Вимоги нормативів за механічними властивостями сортового прокату з легованих конструкційних сталей забезпечуються застосуванням декількох видів термічної обробки, таких процесів, як відпал або поліпшення.

Метою дослідження є моделювання ролі хімічного складу на формування механічних властивостей та структури при визначенні впливу швидкості охолодження з температур аустенітизації хромомолібденованадієвої сталі.

Матеріал і методика досліджень

Термічна обробка зразків хромомолібденованадієвої сталі проводилася в лабораторних умовах з використанням муфельної печі СНОЛ-2,5.4,2.5/13U на

зразках розміром 30x10x50 мм від гарячекатаного прокату зі сталі 31CrMoV9. Хімічний склад досліджуваної сталі наведений у таблиці 1. Вміст хімічних елементів у даній сталі нормується стандартом EN 10085:2001 [6].

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 31CrMoV9

Вміст хімічних елементів, % мас.							
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
0,337	0,253	0,648	2,587	0,229	0,184	0,011	0,025

Термічна обробка здійснювалась за таким режимом: нагрів до температури аустенітизації ($A_3+200^{\circ}\text{C}$) із витримкою при даній температурі 30 хвилин. Охолодження експериментальних зразків проводили при різних умовах зі швидкостями: $0,03\ldots 0,07^{\circ}\text{C}/\text{с}$, $0,4\ldots 0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ та $2\ldots 8^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Мікроструктуру зразків після різних режимів охолодження вивчали на мікроскопі Axiovert 200M MAT після травлення 4% розчином азотної кислоти.

Результати дослідження

Для виявлення ролі хімічного складу сталі на формування властивостей і оцінки впливу ступеня легування аналізувався масив інформації про склад плавки сталі 31CrMoV9. Використовували багатокритеріальне рішення задач із оптимізації, пов'язане з досягненням відповідних механічних властивостей (програмна реалізація розроблена в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України [7, 8]). В якості базової моделі використовувалася залежність механічних властивостей від структурного модельного параметра d (середньостатистична між'ядерна відстань між взаємодіючими атомами досліджуваної сталі). Значення структурного параметру d залежить від кількості легуючих елементів (рис. 1).

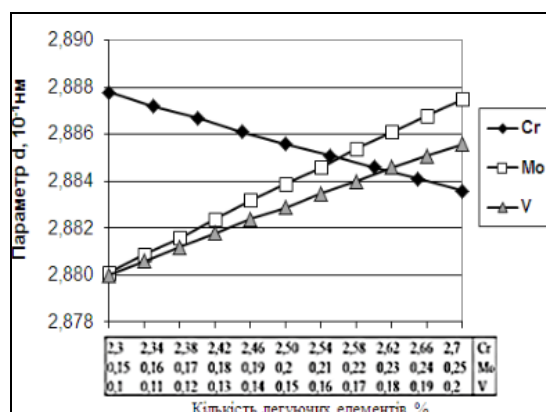


Рисунок 1 – Взаємозв'язок параметру d і кількості легуючих елементів

З використанням математичного та фізико-хімічного моделювання були побудовані математичні залежності взаємозв'язку структурного параметра (d) від механічних властивостей (σ_B , δ_5):

$$\sigma_B = -115015 \cdot d + 332831 \quad (R = 0,8), \quad \delta_5 = 199,6 \cdot d^2 - 570 \cdot d \quad (R = 0,7),$$

де σ_B – границя міцності, δ_5 – відносне подовження.

Зростання фізико-хімічного критерію легуючої підсистеми знижує границю міцності й підвищує відносне подовження сталі 31CrMoV9 (рис. 2).

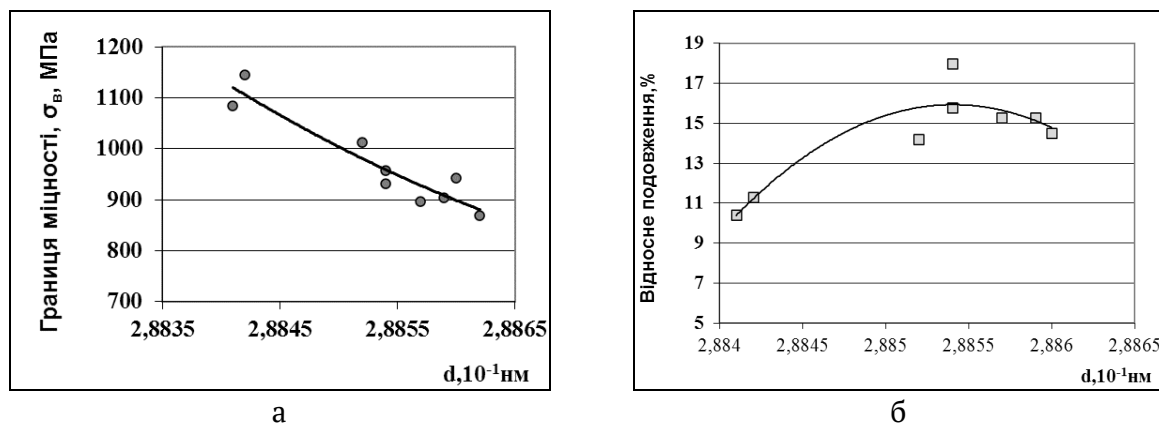


Рисунок 2 – Розподіл границі міцності (а) та відносного подовження (б) через структурний параметр досліджуваної сталі

Визначено, що для гарантованого виконання вимог границі міцності (900-1000 МПа) і відносного подовження (> 11 %) сталі 31CrMoV9 кількість легуючих елементів повинна відповідати наступному вмісту: 2,46...2,62 % Cr, 0,2...0,24 % Mo і 0,17...0,19 % V.

У гарячедеформованому прокаті з хромомолібденованадієвої сталі необхідно на прокатному переділі сформувати такий структурний стан, який дозволить забезпечити необхідні властивості при подальшій пом'якшувальній термообробці (відпуску).

Після нагрівання сталі 31CrMoV9 до температури аустенізації ($A_3 + 200^\circ\text{C}$) й повільного безперервного охолодження зі швидкістю в діапазоні $0,03...0,07^\circ\text{C}/\text{с}$ структура хромомолібденованадієвої сталі складається з фериту й пластинчастого перліту різної дисперсності (рис. 3, а).

Підвищення швидкості безперервного охолодження до $0,4...0,8^\circ\text{C}/\text{с}$ привело до формування структури, яка складалася з ~ 75 % бейніту з нерівномірно розподіленими частинками цементиту в феритній матриці, ~ 20 % фериту та до 5 % перліту (рис. 3, б).

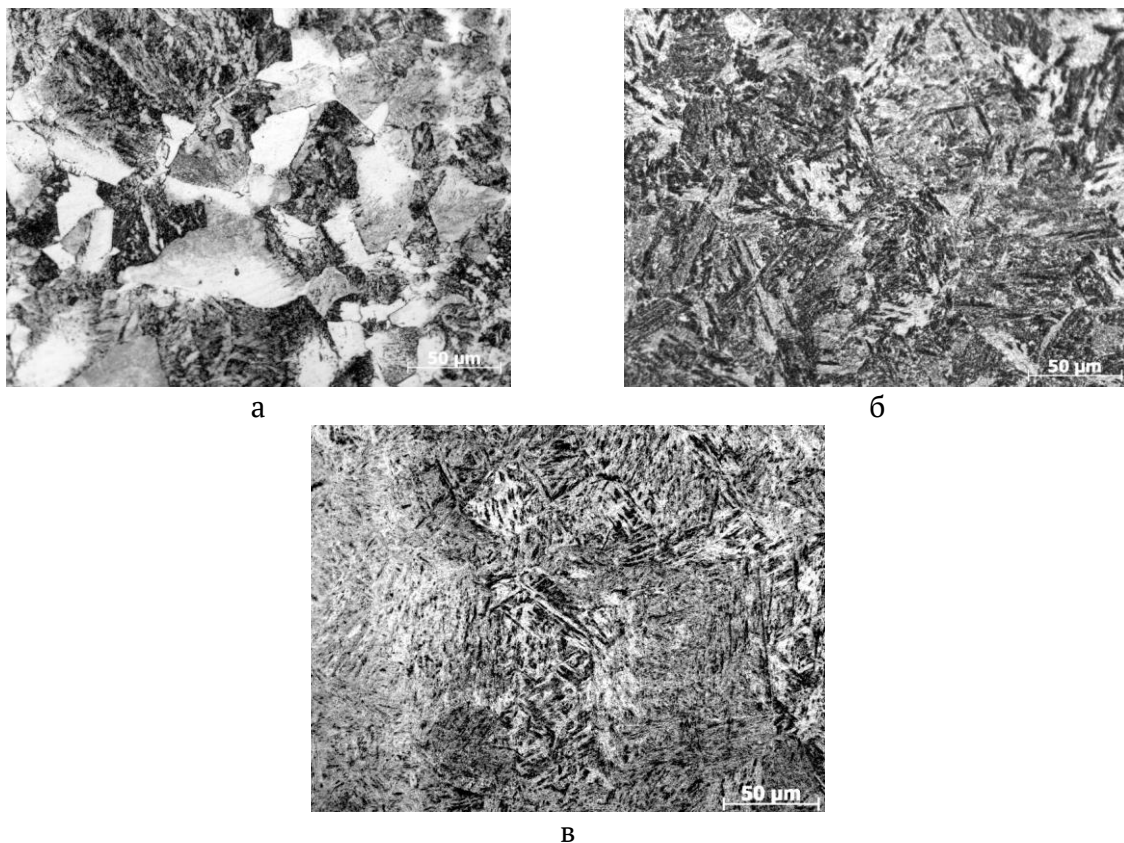


Рисунок 3 – Структура сталі 31CrMoV9 після нагрівання до температури $A_3+200^{\circ}\text{C}$ і безперервного охолодження зі швидкостями: 0,03...0,07 $^{\circ}\text{C/s}$ (а), 0,4...0,8 $^{\circ}\text{C/s}$ (б) та 2...8 $^{\circ}\text{C/s}$ (в)

Після процесу аустенізації й подальшого безперервного охолодження в інтервалі швидкостей 2...8 $^{\circ}\text{C/s}$ структура хромомолібденованадієвої сталі складалася з бейніту, мартенситу й фериту в кількостях близько 85 %, 10 % і 5 % відповідно (рис. 3, в).

Як показано у роботі [9], зернистий бейніт може швидко формуватися переважно у сталей, що мають термкінетичну діаграму з відокремленою бейнітною областю відносно перлітної. При подальшій термічній обробці в метастабільному бейніті починаються структурні перетворення (коагуляція, сфероїдизація) при меншому термодинамічному стимулі, ніж у перліті [10, 11]. Відсутність термодинамічно сталого перліту дозволить прискорити структурні перетворення при подальшому відпалі легованого прокату та скоротити режим обробки. Для попередження викривлення металу крупного сорту бажано охолодження проводити зі швидкістю 0,8...2 $^{\circ}\text{C/s}$ до температур, що перевищують критичну точку початку мартенситного перетворення.

На підставі отриманих результатів рекомендовано для легованого прокату із хромомолібденованадієвих сталей проводити охолодження від температур

аустенітизації зі швидкістю $\sim 0,8...2^{\circ}\text{C}/\text{с}$, це перешкоджатиме утворенню перлітної структури та інтенсифікуватиме структурні перетворення при відпалі. Наведені рекомендації дозволили знизити температуру відпалу та скоротити тривалість витримки на 2...4 години при однаковому рівні механічних властивостей.

Разом з прогнозуванням рівня механічних властивостей для певного хімічного складу хромомолібденованадієвих сталей наведені рекомендації дозволяють раціонально використовувати хімічні елементи та гарантовано виконувати вимоги європейської нормативної документації EN 10085:2001.

Результати досліджень можна використовувати при виробництві сортового прокату з конструкційної сталі, легованої хромом, молібденом і ванадієм, на металургійних підприємствах України.

Висновки

Встановлені особливості впливу хімічного складу на механічні властивості сталі 31CrMoV9. Для досліджуваної сталі з використанням математичного та фізико-хімічного моделювання побудовані залежності зміни механічних властивостей легового сортового прокату (σ_b , δ_5) від показника структурного стану (d). Отримані дані дозволяють прогнозувати механічні властивості термічно обробленого сортового прокату в залежності від зміни вмісту хрому, молібдену й ванадію. Встановлено, що безперервне охолодження сталі 31CrMoV9 зі швидкостями $0,8...2^{\circ}\text{C}/\text{с}$ від температур $A_3+200^{\circ}\text{C}$ перешкоджає утворенню перлітної структури та дозволить скоротити режим подальшої термічної обробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пігуль Н. Г. Сучасний стан та перспективи розвитку машинобудівного комплексу України / Н. Г. Пігуль, Є. І. Пігуль // Економіка та суспільство. – 2018. – № 15. – Режим доступу до журналу : <http://economyandsociety.in.ua>
2. Lutsenko V. A. Investigation of structure formation features in Cr-Mo steel bar section in the process of energy-saving heat treatment / V. A. Lutsenko, T. N. Golubenko, M. F. Evsyukov, N. I. Anelkin, V. I. Shcherbakov // Metallurgical and Mining Industry. 2010. – Volume 2. – Issue 1. – p.p. 47-50.
3. Parusov E. V. Influence of chemical composition and cooling parameters on kinetics of austenite decomposition in high-carbon steels / E. V. Parusov, V. A. Lutsenko, I. N. Chuiko, E. V. Parusov // Chernye Metally. – 2020. – № 9. – p.p. 39-44.
4. Lutsenko V. A. Structure formation in the heat treatment of alloy steel bar / V. A. Lutsenko, P. A. Bobkov, T. N. Golubenko, L. A. Drobyshevskii, V. I. Gritsaenko // Steel in Translation. – 2013. – Vol. 43. – Issue 6. – p.p. 394-398. <https://doi.org/10.3103/S0967091213060119>.
5. Description 31CrMoV9, Material specification, Typical applications. LonghaiSteel Inc. China. URL: http://www.ccsteels.com/Structural_steel/1447.html

6. DIN EN 10085:2001. Nitriding steel. Technical delivery conditions. Published date: 07-01-2001.
7. Приходько Э. В. Физико-химическое моделирование процессов межатомного взаимодействия в металлургических расплавах / Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая // ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – 1999. – № 7. – С. 72-83.
8. Козачёк А. С. Влияние степени легирования на прочностные свойства конструкционных сталей / А. С. Козачёк, Э. В. Приходько, В. А. Луценко, Л. А. Головкин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2014. – Вып. 29. – С. 196-201.
9. Кремнев Л. С. Строение и механизм формирования зернистого бейнита в стали 20Х2НАЧ / Л. С. Кремнев, В. В. Свищенко, Д. П. Чепрасов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1997. – № 9. – С. 6-9.
10. Гудремон Э. Специальные стали. Москва: Металлургия, 1966, 1274 с.
11. Lutsenko V. A. Features of annealing alloy steels with mixed structure / V. A. Lutsenko, T. N. Golubenko, O. V. Lutsenko // Chernye Metally. – 2021. – No. 4. – p.p. 39-43. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.04.07>.

REFERENCES

1. Pigul N. G. Modern mill and prospects for the development of a machine-building complex in Ukraine / N. G. Pigul, E. I. Pigul // Economics and Sustainability. – 2018. – No. 15. Retrieved from: <http://economyandsociety.in.ua>
2. Lutsenko V. A. Investigation of structure formation features in Cr-Mo steel bar section in the process of energy-saving heat treatment / V. A. Lutsenko, T. N. Golubenko, M. F. Evsyukov, N. I. Anelkin, V. I. Shcherbakov // Metallurgical and Mining Industry. 2010. – Volume 2. – Issue 1. – p.p. 47-50.
3. Parusov E. V. Influence of chemical composition and cooling parameters on kinetics of austenite decomposition in high-carbon steels / E. V. Parusov, V. A. Lutsenko, I. N. Chuiko, E. V. Parusov // Chernye Metally. – 2020. – No. 9. – p.p. 39-44.
4. Lutsenko V. A. Structure formation in the heat treatment of alloy steel bar / V. A. Lutsenko, P. A. Bobkov, T. N. Golubenko, L. A. Drobyshevskii, V. I. Gritsaenko // Steel in Translation. – 2013. – Vol. 43. – Issue 6. – p.p. 394-398. <https://doi.org/10.3103/S0967091213060119>.
5. Description 31CrMoV9, Material specification, Typical applications. LonghaiSteel Inc. China. URL: http://www.ccsteels.com/Structural_steel/1447.html
6. DIN EN 10085:2001. Nitriding steel. Technical delivery conditions. Published date: 07-01-2001.
7. Prikhodko E. V. Physical and chemical modeling of interatomic interaction processes in metallurgical melts / E. V. Prikhodko, D. N. Togobitskaya // Priazovsky State Technical University. – 1999. – No. 7. – p.p. 72-83.
8. Kozachek A. S. Influence of the degree of alloying on the strength properties of structural steels / A. S. Kozachek, E. V. Prikhodko, V. A. Lutsenko, L. A. Golovko // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. – 2014. – Issue 29. – p.p. 196-201.
9. Kremnev L. S. Structure and mechanism of formation of granular bainite in steel 20Kh2NACH / L. S. Kremnev, V. V. Svishchenko, D. P. Cheprasov // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 1997. – No. 9. – p.p. 6-9.
10. Gudremon Je. Special'nye stali [Special steels], Moscow, Metallurgija, 1966, 1274 p
11. Lutsenko V. A. Features of annealing alloy steels with mixed structure. / V. A. Lutsenko, T. N. Golubenko, O. V. Lutsenko // Chernye Metally. – 2021. – No. 4. – p.p. 39-43. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.04.07>.

Received 15.01.2022.

Accepted 27.01.2022.

**MODELING OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION
AND STRUCTURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF
ALLOY ROLLED PRODUCTS**

Actual for modern engineering is the study of the influence of chemical composition and processing on the structure and mechanical properties during development of the new brands of the steel. The purpose of the study was the modeling of the role of the chemical composition for the formation of the mechanical properties and structure in determining the effect of the cooling rate on the austenitization temperatures of the 31CrMoV9 steel. It is known that the complex of mechanical properties of metal products depends on the number of alloying elements and the mode of heat treatment. Using the mathematical and physicochemical modeling for 31CrMoV9 steel were made dependent on the change in the mechanical properties of the alloy rolled products (σ_B , δ_5) from the structural condition index (d). It is determined that for guaranteed compliance with the requirements of tensile strength (900-1000 MPa) and specific elongation ($> 11\%$) the number of the alloying elements shall be corresponds to the following content: 2,46...2,62 % Cr, 0,2...0,24 % Mo and 0,17...0,19 % V. Received data are allow to forecast the rational mechanical properties of the heat treated rolled products depending on the change in the content of chromium, molybdenum and vanadium. Metallographic studies allowed to establish the influence of heat treatment parameters on the structure of the studied alloy steel. It is established that heating to the temperature $A3+200^\circ\text{C}$ and further continuous cooling with speeds $> 0,8^\circ\text{C/s}$ prevents the formation of the pearlite structure, which during further heat treatment (annealing) promotes the passage of structural transformations (coagulation) in the steel. To prevent curvature of the metal, it is desirable to have cooling the rolled steel 31CrMoV9 at a speed of $0,8...2^\circ\text{C/s}$. Recommended cooling rates allow to obtain a more acceptable structure for further processing with the required mechanical properties. Together with prognostication of the level of the mechanical properties for the certain chemical composition, these recommendations allow the rational use of the chemical elements and guaranteed compliance with the requirements of the European regulatory documentation EN10085:2001.

Keywords: alloy rolled products, chemical composition, heat treatment, cooling, structure, mechanical properties.

Луценко Владислав Анатолійович – докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Голубенко Тетяна Миколаївна – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Чуйко Ігор Миколайович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Луценко Ольга Владиславівна – канд. техн. наук, науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Lutsenko Vladislav – Dr. Technical Sciences, lead researcher, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Golubenko Tatyana – Cand. technical science, senior researcher, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Chuiiko Ihor – Cand. technical science, senior researcher, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

Lutsenko Olga – Cand. technical science, researcher, Z. I. Nekrasov Iron & Steel Institute of NAS of Ukraine.

П.Т. Мельянцов, О.М. Лосіков, В.С. Назарець, В.К. Сидоренко

СТАБІЛІЗАЦІЯ РАДІАЛЬНОГО ЗАЗОРУ В КАЧАЮЧОМУ ВУЗЛІ НАСОСА ПІДЖИВЛЕННЯ УДОСКОНАЛЕННЯМ КОНСТРУКЦІЇ ВТУЛКИ ПІДШИПНИКА КОВЗАННЯ

Анотація. Проводиться експериментальне дослідження забезпечення стабілізації радіального зазору в качаючому вузлі насоса підживлення з зовнішнім зачепленням, за рахунок покращення умов роботи та зменшення зношення деталей, які формують радіальний зазор в підшипниках ковзання качаючого вузла насоса: «цапфа ведучого вала - отвір втулки», «цапфа веденої вісі – отвір втулки», впровадженням комбінованої втулки в підшипнику ковзання.

Ключові слова: насос підживлення, радіальний зазор, підшипник ковзання, момент сили тертя, площа контакту, рідинне тертя, граничне тертя, комбінована втулка, зношення.

Постановка проблеми

В гідравлічних трансмісіях мобільним машин гірничо-металургійного комплексу широке застосування знайшли аксіально-поршневі гідронасоси і гідромотори. В аксіально-поршневих гідронасосах, для регулювання їх робочого об'єму та компенсації об'ємних втрат в гідравлічній трансмісії, встановлюються насоси підживлення шестеренного типу з зовнішнім зачепленням.

В умовах експлуатації насоси такої конструкції, як правило втрачають роботоздатність в результаті гідроабразивного зношення деталей качаючого вузла в спряженнях: «торець шестерні-верхня кришка», «торець шестерні-нижня кришка», «колодязь корпусу-зуб шестерні», що підтверджується результатами досліджень в роботах [1, 2].

Вказані спряження качаючого вузла насоса формують відповідно торцевий і радіальний зазори, які суттєво впливають на об'ємні втрати робочої рідини та на об'ємний коефіцієнт корисної дії насоса. В роботах [3, 4] автори детально розглянули конструктивні заходи для компенсації об'ємних втрат через торцевий зазор, за рахунок його стабілізації.

Водночас питанням стабілізації радіального зазору «колодязь корпусу-зуб шестерні» для насосів підживлення з зовнішнім зачепленням приділено не достатньо уваги. В значній мірі такий стан справи обумовлюється тим, що формування радіального зазору та його подальша динаміка росту в значній мірі обумовлюється технічним станом деталей, які формують радіальний зазор в підшипниках ковзання качаючого вузла насоса: «цапфа ведучого вала - отвір втулки», «цапфа веденої вісі – отвір втулки». Є очевидним, що зростання радіального зазору в даних спряження буде обумовлювати відповідно і зростання радіального зазору між зубом ведучої та веденої шестерні та колодязем корпусу насоса.

Таким чином, для зменшення об’ємних втрат в качаючому вузлі насоса виникає необхідність розроблення конструктивних заходів, які забезпечать стабілізацію радіального зазору в підшипниках ковзання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Насос підживлення з зовнішнім зачепленням аксіально-поршневої гідромашини за конструктивними рішеннями являється подібним до шестеренних насосів модифікації НШ-У. У яких, для забезпечення жорсткості в підшипникових вузлах ковзання застосовують втулки із алюмінієвого матеріалу, які безпосередньо встановлюються в корпус гідронасоса і мають значні геометричні розміри, що забезпечує їх міцнісні показники [5].

У насосів підживлення втулки підшипників ковзання виготовлено з алюмінієвого сплаву (АК9М2 ГОСТ 158-93), які запресовано в отвори верхньої і нижньої кришок насоса (рис. 1).

Між валом 1 і втулкою 2, (рис. 1), при відсутності зовнішнього навантаження і за умови концентричного розміщення цапфи вала формується радіальний зазор ε :

$$\varepsilon = r_1 - R, \quad (1)$$

де r_1 – внутрішній радіус втулки, мм.; R – радіус ведучого вала, мм.

В результаті прикладення навантаження на привідний вал виникає крутний момент, який обумовлює перекошення вала і приводить до зближення поверхонь вала і втулки, що приводить до появи зростання об’ємної деформації втулки (виготовленої з алюмінієвого сплаву АК9М2 ГОСТ 158-93) і

виникненню контурної площі дотику A_K , яка відповідає центральному куту контакту $2\varphi_0$ (рис. 1) і визначається за виразом [6]:

$$A_K = 2\varphi_0 \times l \times R, \quad (2)$$

де A_K – контурна площа дотику поверхонь цапфи ведучого вала та внутрішньої поверхні втулки, мм^2 , l – довжина підшипника (цапфи вала), мм .

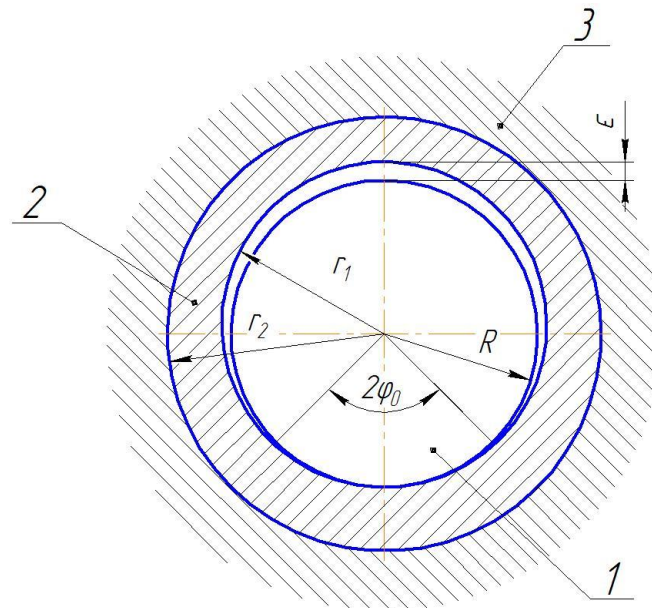


Рисунок 1 – Схема підшипника ковзання для визначення контурних тисків в підшипнику ковзання: 1 – ведучий вал; 2 – втулка кришки насоса; 3 – кришка насоса

Таким чином, внутрішні робочі поверхні втулок будуть сприймати зусилля від цапф ведучого валу, в результаті його перекошення, з силою, яка визначається за виразом:

$$F_{ц.в.} = P \times A_K, \quad (3)$$

де P – нормальне навантаження поверхні цапфи вала на поверхню втулки, МПа .

Величина нормального навантаження (P) цапф вала на поверхню втулки обумовлюється крутним моментом, який приводить в рух ведучий вал насоса. Є очевидним, що в процесі запуску насоса сила нормального навантаження на втулку має максимальне значення (пікове), що обумовлюється тривалим контактом деталей в стані спокою, який характеризується зростанням площі металевого контакту між їх поверхнями.

А в режимі нормальної експлуатації проходить стабілізація нормального навантаження, що обумовлюється зростанням площі рідинного тертя між поверхнями та зменшенням площі граничного. Величина приводного моменту, як правило знаходиться в визначеному діапазоні і відповідає технічним вимогам в відповідності до конструкції насоса. Звідси, можна зробити припущення, що величина сили нормального навантаження (P) також буде мати визначені значення, як для запуску насоса так і для умов нормальної експлуатації. Тоді значення сили ($F_{ц.в.}$), що діє на робочі поверхні втулок через ведучий вал, буде залежати від величини площини дотику поверхонь (A_K).

Із аналізу виразу (2) випливає, що площа дотику поверхонь (A_K) буде залежати від величини кута (φ_0), тому що такі параметри, як довжина цапфи (підшипника) (l) та радіус вала ведучої шестерні (R) практично являються не змінними. Разом з тим в роботі [6], автори відмічають, що кут (φ_0) знаходиться в функціональній залежності від прикладеного нормального навантаження в відповідності до виразу:

$$P = \frac{E \times r_1 \times l \times (r_1 - R)}{(r_2 - r_1) \times (1 - \mu^2) \times (1 - 2\mu)} \times \left(\frac{\varphi_0}{\cos \varphi_0} - \sin \varphi_0 \right), \quad (4)$$

де E – модуль пружності матеріалу втулки; μ – коефіцієнт Пуассона; r_2 – радіус втулки по зовнішньому діаметру.

Модуль пружності матеріалу втулки (E) також являється постійною величиною. Таким чином, можна висунути робочу гіпотезу, що зменшення кута (φ_0), який вказує на границі контакту поверхонь тертя в спряженні «цапфа ведучого вала - отвір втулки», обумовлює зменшення площі тіл тертя, які будуть працювати в умовах граничного тертя і збільшення площі тіл, що будуть працювати в умовах рідинного тертя. За таких умов суттєво покращується робота підшипника ковзання за рахунок зменшення сил тертя, а також зменшується деформація і зношення робочих поверхонь вала і втулки.

Виникає необхідність визначення мінімального значення кута (φ_0). В роботі [7] автори рекомендують в відповідності до виразу (4) ввести позначення $\psi = \varphi_0 / \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0$. Отримана ними функціональна залежність $\psi = f(\varphi_0)$ представлена в вигляді графіка на рис. 2.

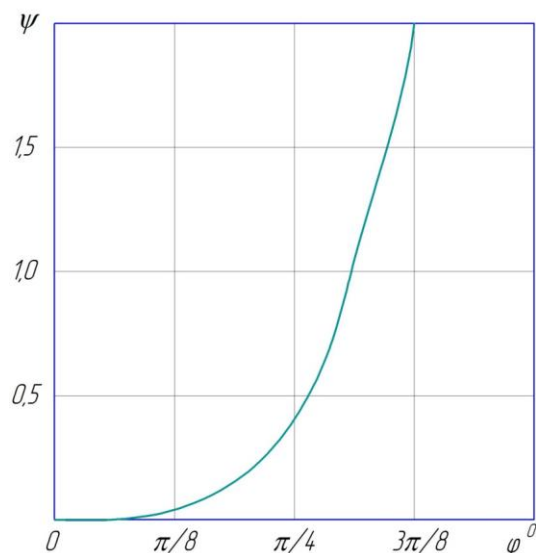


Рисунок 2 – Графічна залежність $\psi = f(\varphi_0)$ [7]

Із наведеної графічної залежності (рис. 2) видно, що при не значних кутах контакту, які відповідають інтервалу $0 < \varphi_0 \leq \pi/8$ або $0^\circ < \varphi_0 \leq 22,5^\circ$, параметр (ψ) змінюється на не значну величину. Зі зростанням значення (φ_0) до інтервалу $\pi/8 < \varphi_0 \leq \pi/4$ або $22,5^\circ < \varphi_0 \leq 45,0^\circ$, параметр (ψ) збільшується на 75 %. Подальше зростання кута (φ_0) приводить до інтенсивного зростання параметра (ψ). Проведений аналіз функціональної залежності $\psi = f(\varphi_0)$ показав, що ефективна робота підшипника ковзання «цапфа ведучого вала – отвір втулки» буде виконуватись, за умови коли кут контакту поверхонь тертя не буде перевищувати $\varphi_0 \leq 22,5^\circ$.

Зменшення кута контакту поверхонь тертя в спряженнях, які формують підшипники ковзання («цапфа ведучого вала – отвір втулки», «цапфа вісі веденої шестерні - отвір втулки») в насосі підживлення можливо за рахунок конструктивних змін втулки.

Мета дослідження

Мета дослідження – забезпечення стабілізації радіального зазору в качаючому вузлі насоса підживлення розробленням конструктивних заходів по зниженню зношення деталей в його підшипниках ковзання.

Викладення основного матеріалу дослідження

В роботі [8], автори рекомендують застосувати комбіновану втулку для підшипника ковзання насоса підживлення. Загальний вид насоса з комбінованими втулками представлено на рис. 3.

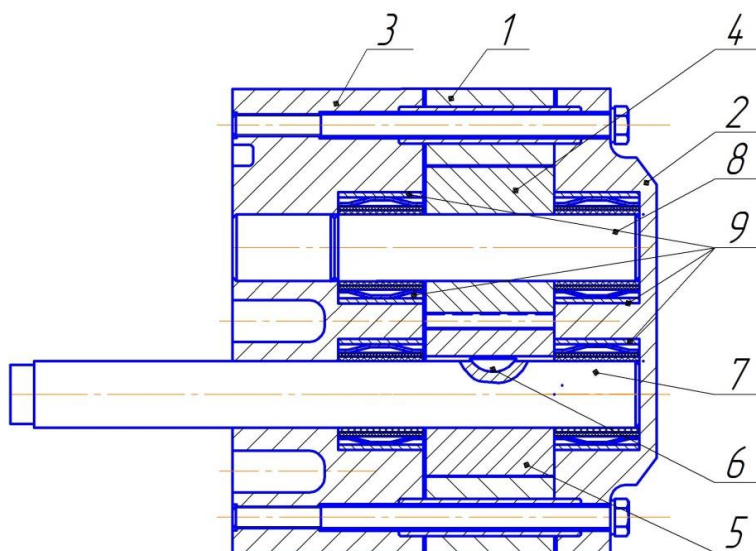


Рисунок 3 - Загальний вид експериментального насоса підживлення з комбінованими втулками: 1 – корпус; 2 – верхня кришка; 3 – нижня кришка; 4 – ведена шестерня; 5 – ведуча шестерня; 6 – шпонка; 7 – вал ведучий; 8 – вісь веденої шестерні; 9 – комбіновані підшипникові втулки

Конструктивні особливості комбінованої втулки наводяться на рис. 4.

Комбіновані втулки, що виконують роль підшипників ковзання для валу ведучої шестерні і вісі веденої, складаються (рис. 4) з робочої і напрямної втулок, між якими встановлено пружнодемпфуючий елемент у сферичних каналах якого додатково розташовані компенсаційні пружини, які розміщені по колу через 60° .

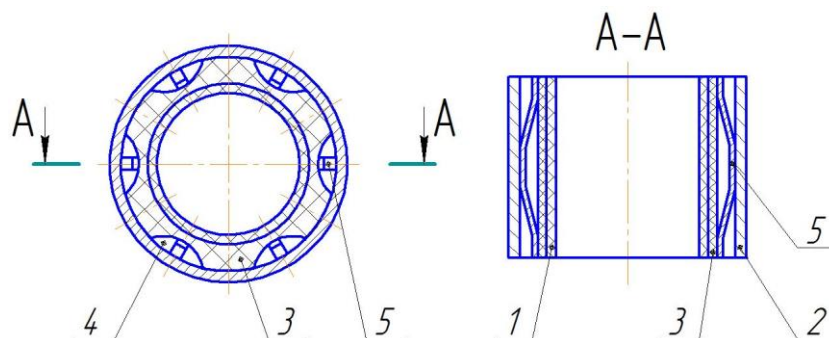


Рисунок 4. - Конструкція комбінованої втулки для підшипника ковзання: «цапфа ведучого вала - отвір втулки» насоса: 1 – робоча внутрішня втулка; 2 – напрямна втулка; 3 – пружнодемпфуючий елемент; 4 - сферичні канали; 5 - компенсаційні пружини

Із аналізу проведених досліджень випливає, що при значеннях кута $\varphi_0 \leq 22,5^\circ$ площа контакту вала з поверхнею втулки буде мінімальною, що забезпечить зменшення сили тертя між валом і втулкою. В зв'язку з цим, проведемо конструктивні зміни комбінованої втулки, розмістивши

компенсаційні пружини по колу через $22,5^0$. Загальний вид комбінованої втулки даної конструкції представлено на рис. 5.

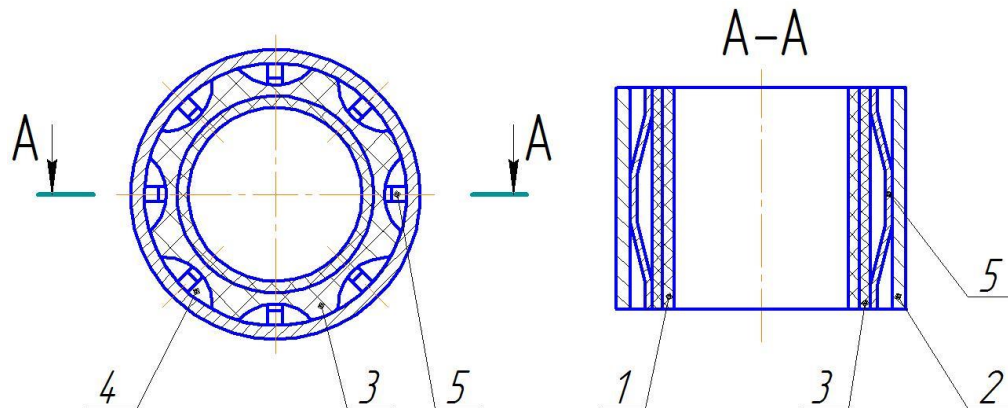


Рисунок 5. - Конструкція комбінованої втулки для підшипника ковзання: «цапфа ведучого вала - отвір втулки» насоса з розміщенням компенсаційні пружини по колу через $22,5^0$

При запуску насоса підживлення ведучий вал сприймає крутний момент та отримує швидкісне навантаження від валу основного насосу, що обумовлює появу перекошення валу в втулках і приводить до зростання контурної площі контакту A_K , зростання кута (φ_0) і відповідно зростання сили ($F_{ц.в.}$). За умови, коли $\varphi_0 > 22,5^0$ починає інтенсивно зростати площа контакту деталей, що приводить до інтенсивного зношення деталей підшипника за рахунок зростання моменту сил тертя, який визначається за виразом:

$$M_m = \sum_{i=1}^{n_r} T_i \times R_i, \quad (5)$$

де T_i - сила тертя, яка виникає в зоні фактичного контакту випадкової мікронерівності поверхні вала, Н; R_i - відстань від лінії дії сили T_i до вісі обертання вала, мм; n_r - число мікронерівностей, які вступають в контакт між валом і втулкою.

З аналізу умов роботи підшипника ковзання відомо, що зовнішнє тертя має молекулярно-механічну природу [9]. Тобто сила тертя буде дорівнювати сумі опорів, обумовлених міжмолекулярними взаємодіями (молекулярна складова сили тертя) та деформуванням поверхневих шарів мікронерівностей, які вступили в контакт (деформаційна складова сили тертя),

тобто сила тертя на кожній мікронерівності. Тоді силу тертя можна представити в наступному вигляді:

$$T_i = T_{mi} + T_{di}, \quad (6)$$

де T_{mi} – молекулярна складова сили тертя; T_{di} – деформаційна складова сили тертя.

Молекулярна складова сили тертя, яка виникає між поверхнями тертя, буде залежати від в'язкості робочої рідини, температурного режиму роботи спряження, та величиною тиску між деталями.

Деформаційна складова сили тертя в даному випадку обумовлюється гістерезисними втратами, які виникають при деформації поверхневого шару менш жорсткого тіла при відносному ковзанні.

Таким чином, зменшення сили тертя можливе за рахунок зменшення контурних тисків та збільшення площі рідинного тертя між поверхнями деталей.

Із виразу (4) також впливає, що при стабілізації показника (R_i) момент сили тертя буде залежати від величини (T_i).

Стабілізація відстані (R_i) (від лінії дії сили T_i до вісі обертання валу) забезпечується наступними конструктивними заходами. В момент запуску насоса, компенсаційні пружини 5 комбінованої втулки (рис. 5) сприймають через робочу поверхню внутрішньої втулки 1 нормальні навантаження (P), при цьому, зусилля їх пружності ($P_{к.н.}$) відповідає наступним умовам:

$$P_{к.н.} \leq (0,93...0,96) \times E_{\text{вм}}, \quad (7)$$

де $P_{к.н.}$ – сила пружності компенсаційної пружини, МПа; $E_{\text{вм}}$ – модуль пружності матеріалу втулки, МПа.

При таких умовах забезпечується зменшення площі контакту між цапфою вала і внутрішньою поверхнею втулки, так як остання, опираючись на компенсаційні пружини під дією нормальних навантажень (P), переміщується разом з валом за рахунок стискання пружин і одночасно стабілізує відстань (R_i). Такі умови роботи підшипника, для періоду запуску насоса, характеризуються мінімальним контактом металевих поверхонь, в результаті проскальзування валу по мікронерівностям поверхні втулки та створенням умов рідинного тертя для подальшої роботи підшипника ковзання.

При зникненні пікових навантажень на вал, що виникають в процесі запуску насоса, та після проскальзування валу в зоні компенсаційних пружин,

проходить зменшення нормальних навантажень на втулку, і вал, частково під дією сил пружності компенсаційних пружин ($P_{к.н.}$) та сил пружності пружнодемпфуючого елементу втулки ($P_{н.д.} \leq (0,96...0,98) \times E_{вм}$), які поглинають вібраційні рухи валу, старається розміститися концентрично по відношенню до вісі втулки, що характеризується мінімальною площею контакту тіл тертя, постійним показником (R_f) та створює умови стабілізації структурних параметрів деталей підшипника ковзання.

Аналітично визначити сили тертя, які виникають в підшипнику ковзання «цапфа ведучого вала – комбінована втулка», і залежать від нормальних навантажень (P), кута (φ_0), зони фактичного контакту мікронерівностей поверхонь, площі рідинного тертя між поверхнями дуже складно. В зв'язку з цим, виникає необхідність проведення експериментальних досліджень з ефективності роботи підшипника ковзання з застосуванням комбінованих втулок.

Триботехнічні порівняльні випробування зразків проводили для визначення наступних вихідних характеристик: величина моменту від сил тертя, зношування в одиницях маси.

Випробування для пари тертя «цапфа ведучого вала – комбінована втулка» проводили на машині тертя СМТ-1 за схемою «ролик-колодка» в відповідності до відомих методик [10].

В якості ролика використовувалася цапфа шестерні насоса (сталь 40Х ГОСТ 4543-71), оброблена відповідно до технічних умов, а колодка вирізувалася з втулок насоса (алюмінієвий сплав АК9М2 ГОСТ 1583-93).

Для оцінки різних варіантів втулок було приготовлено три види зразків втулок (колодок), які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Зразки втулок (колодок) для випробовування на машині тертя

№ з/п	Зразки виготовлені із нових еталонних втулок і комбінованих втулок з пружнодемпфуючими елементами.
1	Втулка нова, алюмінієвий сплав АК9М2.
2	Комбінована втулка: внутрішня робоча і напрямна втулки нові з алюмінієвого сплаву АК9М2, між якими встановлено пружнодемпфуючий елемент та компенсаційні пружини, розміщені по колу через 60^0 .
3	Комбінована втулка: внутрішня робоча і напрямна втулки нові з алюмінієвого сплаву АК9М2, між якими встановлено пружнодемпфуючий елемент та компенсаційні пружини, розміщені по колу через $22,5^0$.

Випробування на тертя та знос проводилися при постійній частоті обертання ролика, яка дорівнювала 500хв^{-1} .

Контактний тиск у парі становив $6,0\text{ МПа}$ при навантаженні $P=1000\text{Н}$ і протягом 3 годин знімалися показання моменту від сил тертя. Пуск машини здійснювався за відсутності навантаження на зразки. Вал машини тертя з встановленим роликом обертася близько 3...5 хвилин, що обумовлювало створення масляної плівки на ролику, після чого протягом 2 хвилин навантаження плавно доводили до встановленої величини. Зразки зважувалися до початку експерименту та після його завершення. По різниці значень судили про зношування зразків, вираженому в одиницях маси.

Результати зміни моменту сили тертя наводяться на рисунку 6.

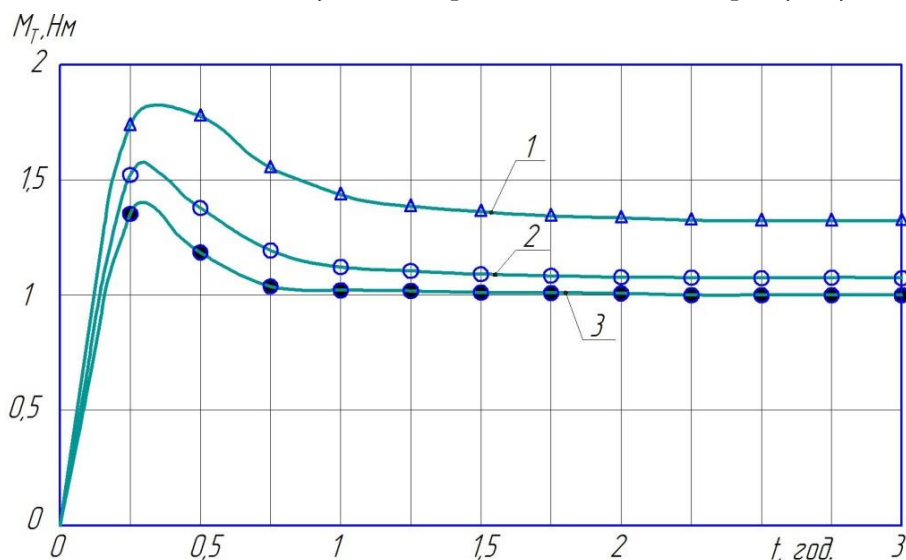


Рисунок 6 – Зміна моменту сили тертя в парі «цапфа ведучого вала – комбінована втулка»: 1 – «еталонна» пара тертя «втулка (алюміній АК9М2) – вал (сталь 40Х)»; 2 – пара тертя «втулка (алюміній АК9М2), з пружньодемпфуючим елементом та компенсаційними пружинами, розміщеними по колу через 60^0 - вал (сталь 40Х)»; 3 - пара тертя «втулка (алюміній АК9М2), з пружньодемпфуючим елементом та компенсаційними пружинами, розміщеними по колу через $22,5^0$ - вал (сталь 40Х)»

Із рисунку 6 видно, що момент сили тертя під час випробування досліджуваних зразків змінюється неоднаково і відрізняється за величиною і часом стабілізації.

На початку випробувань на протязі 0,5 години максимальний момент сили тертя (M_m) для «еталонної» пари, варіант 1, становив $M_m=1,8\text{Нм}$, а для комбінованих втулок відповідно, варіант 2 – $M_m=1,6\text{Нм}$ та варіант 3 – $M_m=1,34\text{Нм}$. З порівняльної оцінки випливає, що момент сили

тертя при застосуванні комбінованих втулок в 1,12 рази менший для комбінованої втулки варіант 2, та в 1,34 рази менший для варіанту 3 конструкції комбінованої втулки.

Інтенсивне зниження моменту сили тертя пов'язано зі зменшенням площі контакту поверхонь зразків, так як наявність у комбінованих втулках компенсаційних пружин зменшує адгезійне схоплювання вала з втулкою і деформаційна складова сили тертя формується на вершинах мікронерівностей поверхні втулки, так як пружність пружин на 4% менша від модуля пружності матеріалу втулки.

На протязі останніх 2-х годин випробовувань проходить стабілізація моменту сили тертя і в кінці випробовувань він становить 1,4 Нм для «еталонної» пари тертя і відповідно 1,1 Нм для комбінованої втулки – варіант 2, та 1,01 Нм для комбінованої втулки – варіант 3, що на 39% менше в порівнянні з «еталонною» парою тертя.

Стабілізація моменту сили тертя для еталонної пари характеризується зменшенням мікронерівностей на поверхнях зразків та формуванням мікрогеометрії поверхонь. У комбінованих втулках менше значення моменту сили тертя на кінець випробовувань пояснюється постійним поглинанням вібраційних навантажень пружнодемпфуючими елементом, пружність якого на 2% менша від модуля пружності матеріалу втулки. За таких умов роботи зменшується площа тіл, що контактують, та забезпечується стабільність відстані від вісі обертання валу до лінії дії сил тертя.

Результати зношення зразків пари тертя «цапфа ведучого вала - комбінована втулка» представлені на рис. 7.

Аналіз результатів зношення пар тертя (рис. 7) показує, що сумарне зношення експериментальної пари тертя з комбінованою втулкою, у якій компенсаційні пружини розміщені по колу через $22,5^0$ на 29,8 % має менше зношення в порівнянні з «еталонною» парою. Для комбінованої втулки з компенсаційними пружинами, які розміщені по колу через 60^0 , показник сумарного зношення зменшується на 19,6%, що обумовлюється зменшенням площі контакту валу зі втулкою в зоні максимальних значень сил тертя та стабілізацією розміру (R_f).

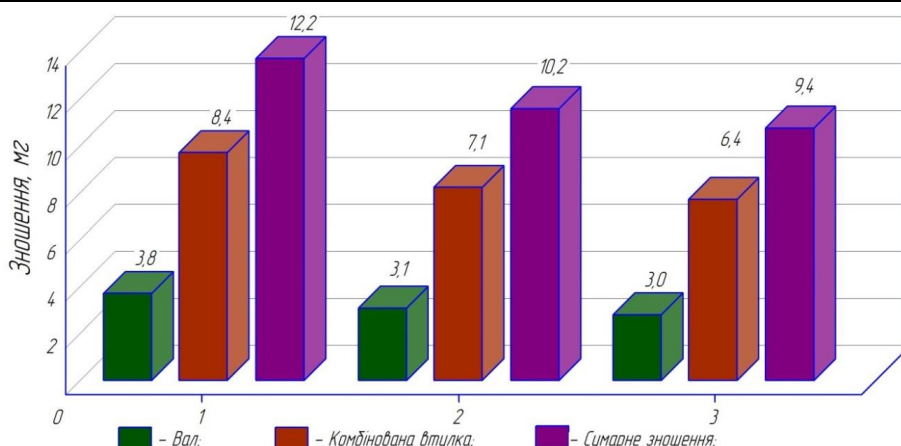


Рисунок 7 - Зношування зразків пари тертя «цапфа ведучого вала – комбінована втулка»: 1 – «еталонна» пара тертя «втулка (алюміній АК9М2) – вал (сталь 40Х)»; 2 – пара тертя «втулка (алюміній АК9М2), з пружнодемпфуючим елементом та компенсаційними пружинами, розміщеними по колу через 60^0 - вал (сталь 40Х)»; 3 – пара тертя «втулка (алюміній АК9М2), з пружнодемпфуючим елементом та компенсаційними пружинами, розміщеними по колу через $22,5^0$ - вал (сталь 40Х)»

Являється очевидним, що зменшення інтенсивності зношення деталей в підшипниках ковзання, забезпечить стабілізацію структурних параметрів технічного стану деталей, які формують радіальний зазор в качаючому вузлі насоса.

Висновки

1. Зростання радіального зазору «колодязь корпусу-зуб шестерні» для насосів підживлення з зовнішнім зачепленням обумовлюється технічним станом деталей, які формують радіальний зазор в підшипниках ковзання качаючого вузла насоса: «цапфа ведучого вала - отвір втулки», «цапфа веденої вісі – отвір втулки».

2. Із аналізу проведених дослідження випливає, що ефективна робота підшипника ковзання «цапфа ведучого вала - отвір втулки» буде виконуватись, за умови, коли кут контакту поверхонь тертя не буде перевищувати $\varphi_0 \leq 22,5^0$.

3. Зменшення кута контакту поверхонь тертя в спряженнях, які формують підшипники ковзання («цапфа ведучого вала - отвір втулки», («цапфа вісі веденої шестерні - отвір втулки») в насосі підживлення можливо за рахунок застосування комбінованої втулки, що складається з робочої і напрямної втулок, між якими встановлено пружнодемпфуючий елемент у сферичних

каналах якого додатково розташовані компенсаційні пружини, які розміщені по колу через $22,5^0$.

4. Момент сили тертя при застосуванні комбінованої втулки з компенсаційними пружинами, розміщеними по колу через $22,5^0$, в 1,34 рази менший в порівнянні з «еталонною» втулкою, що пояснюється формуванням деформаційної складової сили тертя на вершинах мікронерівностей поверхні втулки, так як пружність пружин на 4% менша від модуля пружності матеріалу втулки.

5. Менше значення моменту сил тертя на кінець випробовувань пояснюється постійним поглинанням вібраційних навантажень пружнодемпфуючим елементом, пружність якого на 2% менша від модуля пружності матеріалу втулки, що також зменшує площу тіл, що контактують.

6. Сумарне зношення експериментальної пари тертя з комбінованою втулкою, у якій компенсаційні пружини розміщені по колу через $22,5^0$ на 29,8% має менше зношення в порівнянні з «еталонною» парою, що обумовлюється зменшенням площі контакту валу зі втулкою в зоні максимальних значень сил тертя та стабілізацією розміру (R_f).

ЛІТЕРАТУРА

1. Лосіков О. М. «Вид та характер зношення деталей качаючого вузла насоса підживлення аксіально-поршневої гідромашини». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2015.-№7.-С.170-173.
2. Мельянцов П. Т., Лосіков О. М. «Вплив торцевого зазору качаючого вузла насоса підживлення гідроприводу трансмісії ГСТ-90 на сумарні об'ємні втрати». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. -2015.-№7.-С.174-177.
3. Мельянцов П. Т., Лосіков О. М., Мовчан В. Ф. Конструктивні рішення по зниженню об'ємних втрат робочої рідини в шестеренних насосах підживлення аксіально-поршневих гідромашин. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті*. 2019 № 22. С. 52-61.
4. Мельянцов П. Т. Підвищення післяремонтної довговічності насосів підживлення аксіально-поршневих гідромашин / О. М. Лосіков, В. С. Назарець, В. К. Сидоренко // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті* -2021. № 24- С. 69-80.
5. Юдин Е. М. Шестеренные насосы. - М.: Машиностроение, 1964.- 235 с.
6. Ремизов Д. Д. К расчету пластмассовых подшипников скольжения (анализ теорий расчета и рекомендации). / Д. Д. Ремизов, В. С. Бочков, В. А. Брагинский // В. кн.: машины и технологии обработки полимеров – Л.: Химия, 1974. С. 160-171.
7. Крагельский И. В. Узлы трения машин: Справочник. / И. В. Крагельский, Н. М. Михин – М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.
8. Насос підживлення аксіально-поршневої гідромашини. Мельянцов П.Т., Лосіков О.М.: пат. 98751 Україна: МПК F04B 1/20 (2006.01). № u201411141; заявл. 13.10.2014; опубл. 12.05.2015, Бюл. № 9.
9. Михин Н. М. Внешние трение твердых тел – М.: Наука, 1977. – 222с.

10. ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – Изд-во стандартов, 1987 – 139 с.

REFERENCES

1. Losikov O.M. "Type and nature of wear of parts of the oscillating unit of the booster pump of axial-piston hydraulic feed pumps". Metallurgical and mining industries. - 2015.-№7.-p.170-173.
2. Melyantsov P.T., Losikov O.M. "The influence of the end clearance of the oscillating unit of the booster pump of transmission hydraulic drive GST-90 on total volume losses." Metallurgical and mining industries. - 2015.-№7.-p.174-177.
3. Melyantsov P.T., Losikov O.M., Movchan V.F. Design solution for reduction of volume losses of hydraulic fluid in the gear booster pumps of axial-piston hydraulic feed pumps. Current problems in metallurgy. Science news. 2019 No. 22. p. 52-61.
4. Melyantsov P. T., Losikov O. M., Nazarets V. S., Sidorenko V. K. Improvement of repair life of pumps in the maintenance of axial-piston hydromachines // Modern problems of metallurgy. Science News -2021. No. 24- S. 69-80.
5. Yudin E.M. Gear pumps. - М.: Mashinostroenie, 1964.- 235 p.
6. Remizov D.D. On the calculation of plastic plain bearings (analysis of theories of calculation and recommendations). / D. D. Remizov, V. S. Bochkov, V. A. Braginsky // V. book: machines and technologies for processing polymers - L.: Chemistry, 1974. P. 160-171
7. Kragelsky I.V. Friction units of machines: a Handbook. / I. V. Kragelsky, N. M. Mikhin - М.: Mashinostroenie, 1984. - 280 p.
8. Axial-piston hydraulic machine pump. Melyantsov P.T., Losikov O.M.: Pat. 98751 Ukraine: IPC F04B 1/20 (2006.01). No. u201411141; dec. 10/13/2014; publ. 05/12/2015, Bull. No. 9.
9. Mikhin N.M. External friction of solids - М.: Nauka, 1977. - 222p.
10. GOST 23.224-86. Ensuring product durability. Methods for assessing the wear resistance of restored parts. - Publishing house of standards, 1987 - 139 p.

Received 06.02.2022.

Accepted 21.02.2022.

UDC 629.7:658.512.2

P. Melyantsov, O. Losikov, V. Nazarets, V. Sidorenko

STABILIZATION OF THE RADIAL CLEAR IN THE PUMPING ASSEMBLY OF THE SUPPLY PUMP IMPROVEMENT BY IMPROVING THE STRUCTURE OF THE SLIDE BEARING BUSHING

The performance of axial-piston hydraulic feed pumps depends on the technical condition of the coupling parts that form a radial gap in the pumping unit of the pump. The dynamics of its growth is largely due to the technical condition of parts that form a radial gap in the plain bearings of the pumping pump assembly: «drive shaft pin - bushing hole», «driven axle pin - bushing hole». Stabilization of a radial backlash in sliding bearings is possible by carrying out constructive improvement of the plug which will provide reduction of a contact angle of surfaces of friction of details in couplings.

The aim of the work is to ensure the stabilization of the radial clearance in the pumping unit of the feed pump by developing constructive measures to reduce wear

of parts in its plain bearings. From the analysis of the operating conditions of the plain bearing it is established that the reduction of the friction force is possible due to the reduction of the contour pressures and the increase of the area of liquid friction between the surfaces of the parts. Providing such conditions is possible by using combined bushings, which consist of working and guide bushings, between which is installed an elastic damping element in the spherical channels of which are additional compensation springs, which are placed in a circle through $22,5^{\circ}$.

The reduction of the friction force when using a combined sleeve with compensating springs is explained by the formation of the deformation component of the friction force at the vertices of the microroughness of the sleeve surface, as the spring elasticity is 4% less than the modulus of elasticity of the sleeve material. The lower value of the moment of friction forces at the end of the test is due to the constant absorption of vibration loads by the elastic damping element, the elasticity of which is 2% less than the modulus of elasticity of the sleeve material, which also reduces the contact area. The total less wear of the experimental friction pair is due to the reduction of the contact area of the shaft with the sleeve in the area of maximum values of friction forces.

Keywords: feed pump, radial clearance, sliding bearing, moment of friction force, contact area, liquid friction, limiting friction, combined sleeve, wear.

Мельянцов Петро Тимофійович – к.т.н., доцент, кафедра надійності і ремонту машин, Дніпровський державний аграрно-економічний університет.

Лосіков Олександр Михайлович – старший викладач, кафедра колісних та гусеничних транспортних засобів, Український державний університет науки і технологій.

Назарець Віктор Семенович – к.т.н., доцент, кафедра колісних та гусеничних транспортних засобів, Український державний університет науки і технологій.

Сидоренко Віктор Кононович – старший викладач, кафедра колісних та гусеничних транспортних засобів, Український державний університет науки і технологій.

Melyantsov Petr, Ph.D., associate professor, department of reliability and repair of machines, Dnipro State Agrarian-Economic University.

Losikov Olexander, senior lecturer, department of wheeled and full-track vehicles, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Nazarets Viktor, Ph.D., associate professor, department of wheeled and full-track vehicles, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Sidorenko Viktor, senior lecturer, department of wheeled and full-track vehicles, Ukrainian State University of Science and Technologies.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ ПРИ ЗМІНІ ПРОГРАМИ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ

Анотація. У публікації наведено результати прогнозової оцінки моделювання процесів та кінцевих показників доменної плавки при зміні програми завантаження шихти на доменній печі об'ємом 1719 м³ з наступним зіставленням з фактично отриманими результатами. Моделювання здійснено за допомогою математичної моделі доменної плавки, що на відміну від отримання балансових показників дозволяє отримати знання про механізм процесів, за рахунок яких відбуваються зміни, в тому числі при нерівномірності розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі.

Ключові слова: доменна плавка, моделювання, програма завантаження, рудне навантаження, витрата коксу.

Стан питання та постановка задач досліджень

Завданням дослідження була прогнозна оцінка процесів та кінцевих показників доменної плавки при зміні програми завантаження шихти на доменній печі об'ємом 1719 м³ з подальшим зіставленням отриманих результатів зі звітними (фактичними) результатами, отриманими на доменній печі після встановлення нової програми завантаження шихти.

Метою створення нової програми завантаження було забезпечення стабільного ходу печі та підвищення техніко-економічних показників доменної плавки. Однак, у зв'язку з низькою та нестабільною якістю шихтових матеріалів рішення поставленого завдання у повному обсязі було утруднено. Крім погіршення якості шихтових матеріалів, забезпечення стабільного ходу плавки ускладнювалося також відсутністю можливості використання промивних матеріалів і вимушеної роботою печі з малою величиною подачі і низьким рівнем засипу (менше 2,5 м) [1].

Виходячи з літературних даних, ефективна робота печі забезпечується при утворенні на колошнику товщині шарів коксу та залізовмісних матеріалів не менше 0,5 м. [1-3] Особливістю реалізованих на доменній печі 1719 м³

програм завантаження було використання шести та восьми кутових положень лотка безконусного завантажувального пристрою (БЗП) при розвантаженні порцій коксу, семи та восьми кутових положень лотка при вивантаженні залізовмісних порцій, що забезпечувало розподіл матеріалів практично по всьому радіусу колошника. Разом з цим, вимушена в умовах низької якості шихтових матеріалів робота доменної печі на малих подачах (коксова частина подачі у умовах становила 7,0–8,0 т) сприяла утворенню в печі шарів завтовшки – 0,40 м. З урахуванням встановленого німецькими дослідниками ефекту проникнення залізовмісних матеріалів при розвантаженні з БЗУ на 0,15 м в кокс, утворення шарів зазначеної товщини сприяло ще більшому зменшенню газопроникності [1-4].

Особливістю запропонованої для реалізації на доменній печі 1719 м³ програми завантаження є зменшення кількості робочих кутових положень лотка БЗП під час розвантаження порцій з шести – восьми до п'яти. Це дозволить збільшити товщину шарів шихтових матеріалів на ділянках радіусу печі, що завантажуються. Також у запропонованій програмі завантаження кожна наступна порція циклу завантаження зміщує умовний "гребінь" шихтових матеріалів щодо умовного "гребеня", сформованого вивантаженням попередньої порції, що спрямоване на зміну напрямку руху газового потоку. Крім того, використання при розвантаженні порції меншої кількості кутових положень лотка БЗП збільшує точність позиціонування лотка та дозування шихтових матеріалів у заданому кутовому положенні, що особливо актуально під час роботи на малих подачах.

Методика проведення досліджень

Аналітичне дослідження виконано з допомогою математичної моделі процесів доменної плавки, розробленої в Інституті чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України [5]. Попередньо дані технологічного обліку за базовим періодом піддали тестуванню розробленим в ІЧМ НАН України балансовим методом [5] з виявленням та подальшим усуненням похибок обліку. Далі за скоригованими даними базового періоду адаптували модель прогнозу в режимі визначення кінетичних констант для цієї доменної печі. З цими константами модель «запустили» в режимі прогнозу показників за будь-яких заданих параметрах плавки, зокрема базових.

Результати

У таблиці 1 наводяться результати прогнозного розрахунку базового періоду (Період 1-розрахунок) у порівнянні зі звітними показниками (Період 1-звіт), що незначно відрізняються за витратою коксу, прийнятому як головний критерій адаптації. Показники дослідного періоду (Період 2-розрахунок) отримані за всіх параметрів базового, крім розподілу відносних рудних навантажень по 10 радіально кільцевим зонам колошнику (щодо середнього за радіусом R_i/R_{cp}):

Період 1	0,366	0,799	1,088	1,166	1,221	1,191	1,168	1,146	1,126	1,108
Період 2	0,310	0,635	0,981	1,186	1,252	1,28	1,274	1,252	1,232	1,213

Таблиця 1

Показники роботи доменної печі 1719 м³ у періодах із
різною програмою завантаження шихти

Показники / Періоди	Період 1 звіт	Період 1 розрахунок	Період 2 звіт	Період 2 розрахунок
Продуктивність, т/доб	2803	2752	2849	2592
Витрата твердого палива, кг/т	539,6	536,5	531,2	571,3
кокс	505,1	504,3	496,7	537,0
коковий горіх	34,5	32,2	34,5	34,3
Дуття: витрата, м ³ /хв.	2781	2797	2905	2830
температура, град.	999	999	993	999
вологість, г/м ³	8	8	8	8
кисень, %	21,1	21,1	22	21,1
Витрата природного газу, м ³ /т	46,2	46,2	43,95	46,2
Колошниковий газ:				
температура, °C	316	321	306	386
вміст, % CO	24,98	24,09	24,71	25,17
CO ₂	15,98	15,58	15,13	14,37
H ₂	3,80	4,02	3,80	4,02
Всього залізовмісних, кг/т	1704	1689	1782	1688
Залізо в шихті, %	53,19	53,75	51,24	53,67
Винос пилу загальний, кг/т	37	56	43	57
Шлак, %:				
кремнезем	40,68	37,85	40,54	38,07
глинозем	5,98	9,79	6,18	10,02
вапно	47,81	44,49	47,27	44,74
магнезія	6,17	5,34	5,78	5,33
сірка	1,30	1,29	1,30	1,36
Основність шлаку	1,18	1,18	1,17	1,18
Кількість шлаку, кг/т	488	471	550	473
Теор. температура горіння, °C	2074	2047	2123	2060
Пряме відновлення оксиду Fe, %	43,08	43,76	47,69	45,56
Ступінь використання газу, %:	39,22	39,27	38,08	36,34

Наведені у таблиці 1 результати показали очікуване зростання витрати коксу за рахунок збільшення температури колошникового газу на 65 градусів та ступеня прямого відновлення на 1,8%. Зазначені зміни обумовлені змінами ходу процесів в об'ємі доменної печі, показаними на рис. 1, 2.

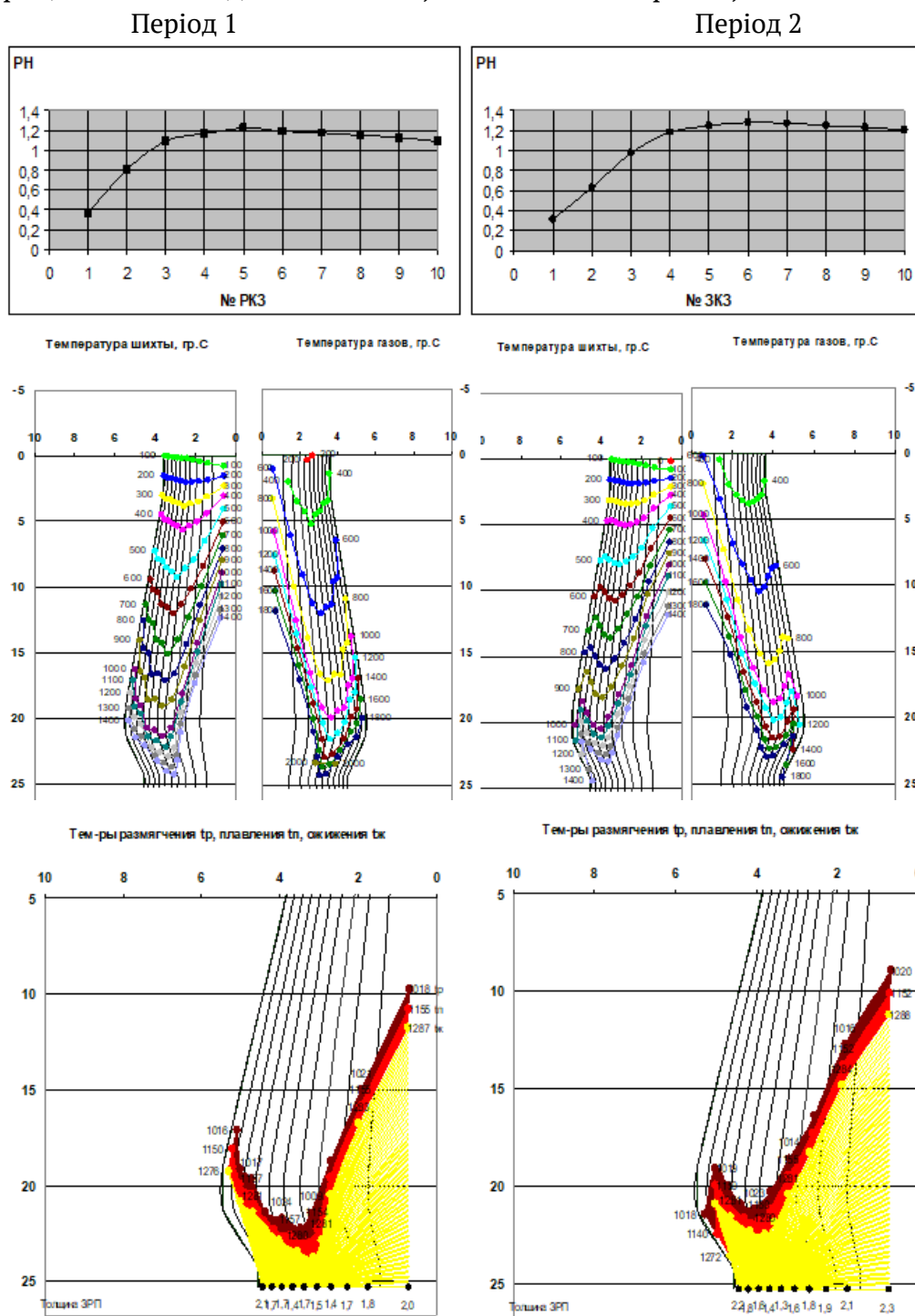


Рисунок 1 – Розподіл відносних рудних навантажень у радіальних кільцевих зонах р.1-р.10 на колошнику та відповідні температурно-фазові характеристики процесів по висоті, м. (ординати) та радіусу, м. (абсциси) доменної печі. Внизу – загальна товщина (м) зони розм'якшення та плавлення (ЗРП) у ПКЗ р.1 – р.10

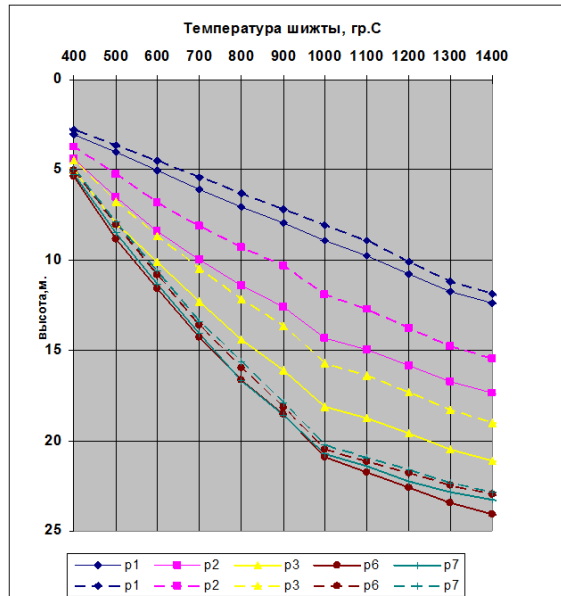
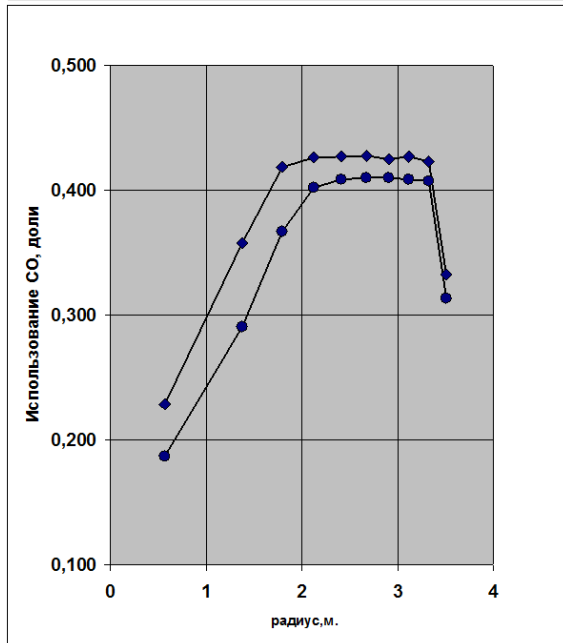
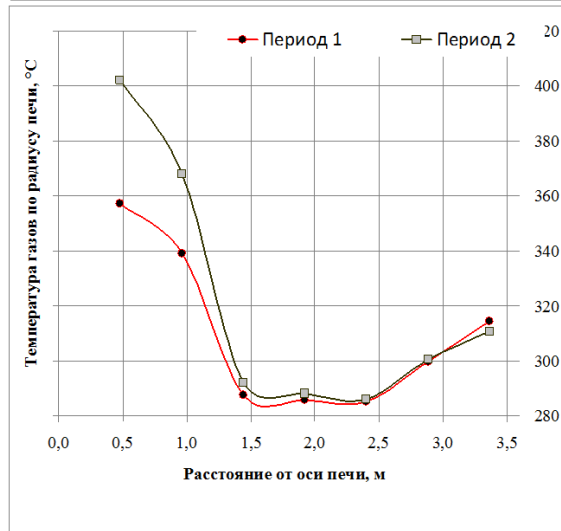
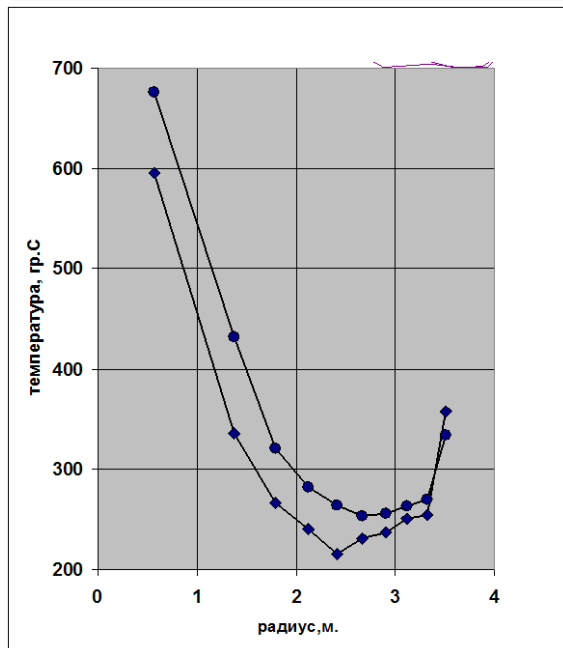
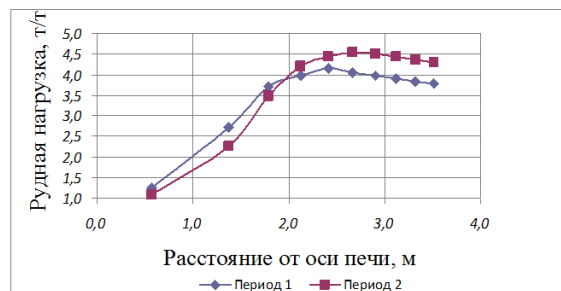
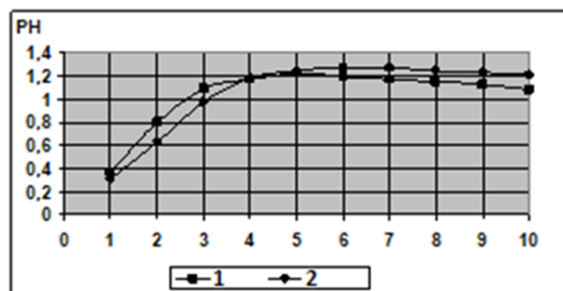


Рисунок 2 – Вплив розподілу рудного навантаження в РКЗ р.1-р.10 (графік ліворуч) по радіусу колошника, м. (праворуч) на температуру газів над поверхнею засипу (ліворуч – розрахунок на моделі, праворуч – вимірювання на доменній печі) та ступінь використання CO, %, а також нагрівання шихти в РКЗ р.1-р.10 за висотою доменної печі (графік – внизу праворуч)

Зміна розподілу рудного навантаження (РН) виразилося у зменшенні на 15-20% РН у РКЗ р.1-р.3, де їх величини у періоді 1 не перевищували 1,0 та збільшенні РН у найбільш навантажених РКЗ р.5-р.10 на 2-10%. Це призвело (рис. 1) до переміщення ізотерм газу прицентральної та проміжних радіальних кільцевих зон (РКЗ) вгору, і лише периферійної – вниз. При цьому різниця температур газу та шихти також збільшилася, особливо у верхній частині, а зона розм'якшення та плавлення змістилася вгору у більшості РКЗ, крім периферійної р.10. Результатом теплообміну в стовпі шихти є температура газу на виході зі стовпа шихти. Характер її зміни за радіусом печі однаковий для розрахункових за моделлю та вимірюваних на доменній печі значень (рис. 2) і свідчить про збільшення температури газів, що відходять при використанні програми завантаження періоду 2. Аналогічні криві ступеня використання СО (рис. 2), отримані розрахунком за моделлю, свідчать про такий же характер відновлювальної роботи газів.

На правому нижньому графіку рисунка 2 наводяться результати розрахунку моделі температур матеріалів за висотою доменної печі для малонавантажених РКЗ р.1-р.3 і сильнонавантажених РКЗ р.6-р.7 (суцільні лінії – період 1, пунктирні – період 2). З отриманих результатів випливає, що в малонавантажених радіальних кільцевих зонах нагрівання до заданої температури відбувається на більш високих горизонтах, а в сильнонавантажених – на найнижчих-високотемпературних із попитом інтенсифікації теплопередачі та заходів щодо покращення утилізації енергії. Без додаткових заходів неминуче зменшення використання теплоти та відповідне збільшення температури газів, що відходять, при скороченні ступеня використання відновлювальної здатності газів, що й отримано в результаті розрахунків (табл. 1, рис. 2). Характерно, що отримане розрахунком загальне збільшення ступеня прямого відновлення від 43,76% у періоді 1 до 45,56% у періоді 2 обумовлено його збільшенням у осевих РКЗ р.1-р.2 та найбільш навантажених зонах р.5-р.6.

Таким чином, моделювання процесів доменної плавки показало, що перехід від розподілу рудного навантаження періоду 1 до розподілу періоду 2 обумовлює очікувану зміну ходу процесів плавки, що призводить до збільшення витрати коксу.

Висновки

Порівняння звітних результатів роботи доменної печі об'ємом 1719 м³ із розрахунковими показало наступне:

1. Замість очікуваного збільшення витрати коксу за звітними даними періоду 1 та 2 отримано його скорочення.

2. Використовувані звітні дані містять важливе протиріччя: температура газу, що виходить із доменної печі за даними термобалок у періоді 2 збільшилася проти періоду 1, а за даними виміру температури колошникового газу – зменшилася. Пізніше з'ясувалося, що термобалки встановлені на доменній печі характеризуються нестабільними показаннями. В подальшому, після заміни термобалок став можливим глибокий аналіз їх показань.

3. Характер нового розподілу рудного навантаження, встановленого у періоді 2 шляхом зменшення рудного навантаження у слабонавантажених РКЗ (р.1-р.3) та збільшення рудного навантаження у сильнонавантажених РКЗ (р.5-р.7), суперечить задуму про необхідність підвищення рівномірності розподілу рудного навантаження у проміжних кільцевих зонах (РКЗ р.2-р.9) для кращого використання енергії газів. Встановлене вимірюванням за допомогою термобалки збільшення температури газів, що відходять з доменної печі обумовлює отримання протилежного ефекту.

Викладене дозволяє припустити наявність у аналізовані періоди додаткових факторів, що істотно впливають на процеси плавки, але не знайшли відображення в технологічному обліку. Серед найімовірніших з них: характеристики коксу, режими коксування та вугільна шихта, нестабільність співвідношення у шихті агломерату та окатишів, а також флюсуючих добавок, нестабільність основності агломерату ($\pm 0,2$ од. протягом доби), тривала робота "тихим" ходом, нестабільність хімічного складу чавуну за рахунок регулювання теплового стану печі зміною температури гарячого дуття.

Отже, ефективне використання результатів моделювання для прогнозування раціональності застосування тих чи інших технологічних змін потребує максимально точної та повної інформації показників доменної плавки та надійної роботи засобів контролю параметрів, що застосовуються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. / Освоение энергосберегающей технологии загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии №28 (2014), ИЧМ НАН Украины: Днепропетровск.- С.57-80.
2. Тайхерт Э., Гупта В.Н. Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном диаметром 7,8 м // Черные металлы. – №14–15. –1976, С. 19–23.
3. Беер Г., Цишкале В. Влияние свойств кокса на показатели работы доменной печи // Черные металлы, №16, 1968, С. 3–10.

4. Ковшов В.Н., Петренко В.А. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи, Институт технологии – 1996, – 124 с.
5. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е. Аналитическое исследование процессов доменной плавки. 2011, Днепропетровск: Экономика. - 206 с.

REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Shumelchik E.I. et al. / Development of energy-saving technology for loading a blast furnace equipped with a BLT in market-driven fuel and raw materials and technological conditions // Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy No. 28 (2014), Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine: Dnepropetrovsk. - P. 57-80.
2. Teichert E., Gupta V.N. Influence of different coke size on the mode of operation of a blast furnace with a hearth with a diameter of 7.8 m // Chernye metally. - No. 14–15. – 1976, pp. 19–23.
3. Beer G., Tsishkale V. Influence of coke properties on the performance of a blast furnace // Chernye Metally, No. 16, 1968, pp. 3–10.
4. Kovshov V.N., Petrenko V.A. Experimental studies of charge and gas motion in a blast furnace, Institute of Technology - 1996, - 124 p.
5. Tovarovsky I.G., Bolshakov V.I., Merkulov A.E. Analytical study of blast-furnace melting processes. 2011, Dnepropetrovsk: Economics. - 206 p.

Received 06.02.2022.

Accepted 20.02.2022.

UDC 669.162.2

O. Merkulov, Yu. Semenov, M. Dzhigota

MODELING OF BLAST FURNACE MELT PROCESSES WHEN CHANGING THE PROGRAM OF CHARGING THE BURDEN

The publication presents the results of a predictive assessment of the modeling of processes and final indicators of blast-furnace smelting with a change in the charge loading program for a blast furnace with a volume of 1719 m³, followed by comparison with the actual results obtained. Modeling was carried out using a mathematical model of blast-furnace smelting, which, in contrast to obtaining balance indicators, makes it possible to obtain knowledge about the mechanism of the processes due to which changes occur, including the uneven distribution of charge materials on the top of the blast furnace.

The change in the distribution of the ore load was expressed in a decrease by 15-20% of the ore load in the radial ring zones 1-3, where their values in the first period did not exceed 1.0 and an increase in the ore load in the most loaded radial ring zones 5-10 by 2-10%. This led to the displacement of gas isotherms in the central and intermediate radial annular zones upwards, and only in the peripheral zone downwards. At the same time, the temperature difference between the gas and the charge also increased, especially in the upper part, and the softening and melting zone shifted upwards in most of the radial annular zones, except for the peripheral one - 10. The resulting value of heat transfer in the charge column is the gas temperature at the outlet of the charge column. The nature of its change along the radius of the blast furnace is the same for the values calculated by the

model and those measured in the blast furnace and indicates an increase in the temperature of the flue gases when using the program for loading the second period. Similar curves for the degree of use of CO gas, obtained by calculation according to the model.

From the obtained results, it follows that in lightly loaded radial annular zones, heating to a given temperature occurs at higher horizons, and in heavily loaded ones, at the lowest-high-temperature horizons, requiring heat transfer intensification and measures to improve energy utilization. Without additional measures, a decrease in the use of heat and a corresponding increase in the temperature of the exhaust gases with a reduction in the degree of use of the reducing ability of gases is inevitable, which is obtained as a result of calculations.

Keywords: blast furnace smelting, modeling, charging program, ore loading, coke consumption.

Меркулов Олексій Євгенович, старший науковий співробітник, доктор технічних наук, старший науковий співробітник лабораторії теплотехніки та енергозберігаючих технологій, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0002-7867-0659. E-mail: merkulov1@ukr.net

Семенов Юрій Станіславович, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, завідувач відділом технологічного устаткування та систем управління, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0003-2299-5742. E-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com

Джигота Марина Георгіївна, провідний інженер лабораторії теплотехніки та енергозберігаючих технологій, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0003-3062-5127. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Merkulov Oleksii, Senior Researcher, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Heat Engineering and Energy-Saving Technologies Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0002-7867-0659. E-mail: merkulov1@ukr.net

Semenov Yuriy, Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Technological Equipment and Control Systems, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0003-2299-5742. E-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com

Dzhigota Maryna, Leading Engineer of the Laboratory of Heat Engineering and Energy Saving Technologies Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0003-3062-5127. E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Л.С. Молчанов, М.В. Пушкаренко, В.Г. Кисляков

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОПЕРАЦІЇ ПАРАЛЕЛЬНОГО ВИДАЛЕННЯ СІРКИ ТА КРЕМНІЮ З ЧАВУНУ

Анотація. В сучасних умовах існування підприємств металургійної галузі дуже гостро постає проблема дефіциту якісних шихтових матеріалів, що спричиняє необхідність розвитку інноваційних процесів позапічної обробки металургійних розплавів, а саме комплексне видалення сірки та кремнію одночасно. Метою даного дослідження є визначення раціональної технічної схеми здійснення процесу паралельної десульфурації та десіліконізації чавуну в промислових умовах. Виходячи з різної фізико-хімічної природи процесів десульфурації та десіліконізації за умови їх одночасного протікання в межах однієї металургійної системи (один чавунозаливний ківш) їх необхідно максимально розмежувати у просторі. З метою встановлення пріоритетності протікання певних хімічних перетворень було використано методи термодинамічного аналізу. У якості показника, що визначає черговість протікання певних хімічних перетворень було обрано константу рівноваги. Шляхом термодинамічного аналізу встановлено, що окислення кремнію можливо при вдуванні газоподібного кисню. При цьому у якості відновників при десульфурації вапном раціонально використовувати марганець, оскільки він не впливає на процеси відновлення окисленого кремнію. Введення марганцю у розплав необхідно організовувати паралельно з проведенням операції десіліконізації, щоб уникнути перевитрати марганцю при окисненні домішок чавуну газоподібним киснем.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, комплексне рафінування, рідкий чавун, паралельні хімічні перетворення, десіліконізація, десульфурація, вапно, відновник.

Актуальність та завдання дослідження

В сучасних умовах існування підприємств металургійної галузі дуже гостро постає проблема дефіциту якісних шихтових матеріалів, що спричиняє необхідність розвитку інноваційних процесів позапічної обробки металургійних розплавів [1]. В контексті позапічної обробки чавуну найбільшої поширеності набули технології з його десульфурації за рахунок введення вапна, металевого магнію або їх сумішей [2]. Окрім цього, були розроблені

спеціальні процеси з позапічної дефосфорації та десиліконізації розплавів, що зумовлено потребами більшефективної подальшої переробки у сталь[3].

З метою зменшення часу загальної обробки чавуну були запропоновані методи комплексного рафінування чавуну, які передбачають видалення декількох домішок одночасно. При цьому найбільший інтерес представляють саме процеси одночасного видалення сірки та кремнію з чавуну. Перевагою зазначеного технічного рішення є зменшення теплових втрат при десульфурації та зниження вмісту кремнію в чавуні до раціонально обґрунтованої концентрації з позицій подальшої переробки чавуну у кисневих конвертерах.

Таким чином метою даного дослідження є визначення раціональної технічної схеми здійснення процесу паралельної десульфурації та десиліконізації чавуну в промислових умовах.

Методика виконання досліджень

Процеси десульфурації та десиліконізації залізовуглецевого розплаву є дуже різними за своєю фізико-хімічною природою, тому потребують різних умов для повного протікання: процеси видалення кремнію з розплаву потребують надходження великої кількості окисників, що приводить до локального переокислення розплаву; процеси десульфурації розплаву потребують якомога нижчого вмісту кисню у розплаві [4]. Виходячи з різної фізико-хімічної природи процесів десульфурації та десиліконізації за умови їх одночасного протікання в межах однієї металургійної системи (один чавунозаливний ківш) їх необхідно максимально розмежувати у просторі.

Враховуючи світовий досвід позапічної обробки чавуну найбільш раціональним методом введення реагентів є інжекція [2], тому запропонована технологічна схема процесу передбачає введення порошкоподібного вапна у струмені газоподібного кисню. А для створення умов для здійснення процесу десульфурації в розплав додатково вводиться відновник – матеріал, що містить металевий марганець або алюміній. Загальна схема хімічних перетворень, що протікають у металевій ванні при здійсненні процесу представлена на рис. 1.

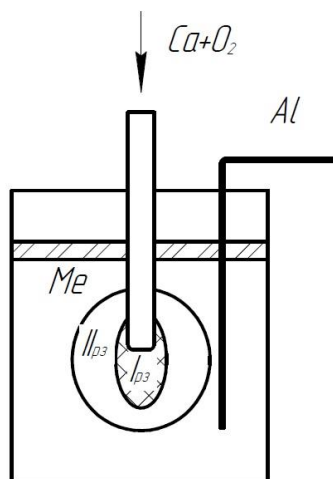


Рисунок 1 – Схема протікання фізико-хімічних реакцій при здійсненні паралельного видалення кремнію та сірки з розплаву:

- I – зона взаємодії розплаву з кисневим струменем, що містить порошок вапна;
 II – зона взаємодії продуктів, що утворилися в зоні I з складовими металевого розплаву;
 B – зона введення металевго відновника в розплав

З метою встановлення пріоритетності протікання певних хімічних перетворень використовувалися методи термодинамічного аналізу. У якості показника, що визначає черговість протікання певних хімічних перетворень було обрано K_p (константу рівноваги). Це викликано універсальністю зазначеного термодинамічного показника та можливістю більш точної його інтерпретації [5]. Константа рівноваги є похідною від Енергії Гібса і може бути розраховано за рівнянням:

$$\ln K_p = \frac{-\Delta G}{RT} = \frac{-\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R}. \quad (1)$$

де ΔG – енергія Гібса, Дж/моль;

ΔH – ентальпія, Дж/ моль;

ΔS – ентропія, Дж/моль·К;

T – температура, К;

$R = 8,31$ – універсальна газова стала, Дж/моль·К.

Значення K_p для певних реакцій хімічних перетворень розраховувалося відповідно до температурних залежностей, що приведені в довідковій літературі. У разі відсутності зазначеної залежності в довідковій літературі, вона аналітично розраховувалася із з використанням відомих термодинамічних величин [6].

Результати дослідження

З досвіду киснево-конвертерної плавки відомо, що в зоні взаємодії кисневого струменя з залізовуглецевим розплавом відбувається тотальне окислення всіх складових компонентів металевого розплаву [7]. Таким чином процес вдування в рідкий чавун газоподібного кисню буде призводити до подібного ефекту в межах первинної реакційної зони. Узагальнені рівняння процесів хімічних перетворень та відповідні аналітичні вирази для розрахунків значення констант рівноваги в залежності від температури приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Узагальнені рівняння хімічних реакцій та аналітичні вирази, що їм відповідають для умов зони взаємодії компонентів чавуну з газоподібним киснем [8, 9]

№	Рівняння хімічної реакції	Рівняння для визначення константи рівноваги в залежності від температури
1	$[\text{Fe}] + \frac{1}{2} \{\text{O}_2\} = (\text{FeO})$	$\lg K_p = 12439/T - 2,584$
2	$[\text{Si}] + \{\text{O}_2\} = (\text{SiO}_2)$	$\lg K_p = 43060/T - 11,46$
3	$[\text{Mn}] + \frac{1}{2} \{\text{O}_2\} = (\text{MnO})$	$\lg K_p = 18880/T - 5,83$
4	$2[\text{Al}] + 3/2 \{\text{O}_2\} = (\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\lg K_p = 82150/T - 20,14$
5	$[\text{S}] + \{\text{O}_2\} = \{\text{SO}_2\}$	$\lg K_p = -26134/T + 3,99$
6	$[\text{S}] + \frac{1}{2} \{\text{O}_2\} = \{\text{SO}\}$	$\lg K_p = -4373/T + 4,52$
7	$[\text{C}] + \{\text{O}_2\} = \{\text{CO}_2\}$	$\lg K_p = -25400/T + 9,30$
8	$[\text{C}] + \frac{1}{2} \{\text{O}_2\} = \{\text{CO}\}$	$\lg K_p = 7287/T + 2,22$
9	$2[\text{P}] + 5/2 \{\text{O}_2\} = (\text{P}_2\text{O}_5)$	$\lg K_p = -95948/T + 10,82$

Побудована графічна залежність логарифму константи рівноваги від температури для хімічних реакцій, що протікають за умови взаємодії компонентів рідкого чавуну з газоподібним киснем приведені на рис. 2. Відповідно до даних представлених на ньому можна зробити висновок про черговість окислення домішок, які складають рідкий чавун: в першу чергу протікає процес окислення алюмінію, розчиненого у розплаві (за його наявності); наступним відбувається процес окислення кремнію; потім окислення вуглецю до монооксиду; наступним окислюється марганець; потім відбувається утворення оксиду заліза (II). Окислення сірки, фосфору та вуглецю з утворенням його діоксиду за рахунок прямого контакту газоподібного кисню з компонентами рідкого чавуну є малоймовірним, оскільки для вказаних реакцій характерним є значення $K_p < 1$. Загалом черговість окислення домішок, що входять до складу рідкого чавуна відповідає відомим закономірностям,

характерним для виробництва сталі в кисневих конвертерах, що зумовлено найбільшою спорідненістю алюмінію та кремнію до кисню з поміж компонентів, що розглядаються. Таким чином, можна зробити висновок про те, що попереднє розкислення рідкого чавуну алюмінієм буде створювати додаткові ускладнення при окисленні кремнію, а саме доки не окислиться весь алюміній, процес окислення кремнію буде ускладнений. Таким чином попереднє розкислення рідкого чавуну алюмінієм є не раціональним, оскільки буде погіршувати умови окислення кремнію в межах первинної реакційної зони і призводити до перевитрати металевого алюмінію.

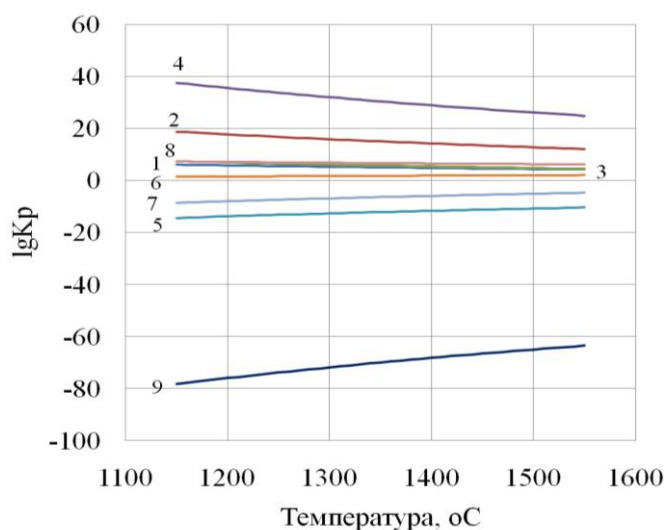


Рисунок 2 – Залежність $\lg K_p$ від температури для реакцій хімічних перетворень, що протікають в зоні контакту струменя газоподібного кисню з рідким чавуном: цифри біля ліній – порядкові номери відповідних рівнянь хімічних перетворень у таблиці 1

Узагальнені рівняння хімічних реакцій, що можуть протікати при взаємодії продуктів реакцій окислення домішок чавуну газоподібним киснем з компонентами розплаву і відповідні аналітичні вирази для розрахунку констант рівноваги в залежності від температури представлені у таблиці 2.

Використовуючи відомості наведені в таблиці 2 була побудована залежність $\lg K_p$ від температури для рівнянь хімічних реакцій взаємодії компонентів рідкого чавуну з продуктами окислення газоподібним киснем (рис. 3). Відповідно до даних представлених на ньому можна стверджувати, що відновлення діоксиду кремнію можливо алюмінієм. Що стосується процесів відновлення діоксиду кремнію вуглецем, то такий процес є малоімовірним у наслідок малих значент $\lg K_p$. Враховуючи можливість утворення комплексних

оксидних сполук між лі оксидом кремнію та оксидом кальцію, можна стверджувати що вказані процеси будуть мати значно меншу пріоритетність у порівнянні з відновленням діоксиду кремнію алюмінієм у наслідок значно менших величин $\lg K_p$.

Таблиця 2

Узагальнені рівняння хімічних реакцій та аналітичні вирази,
що їм відповідають для умов зони взаємодії компонентів чавуну з
продуктами окислення газоподібним киснем [8, 10]

№	Рівняння хімічної реакції	Рівняння для визначення константи рівноваги в залежності від температури
1	$2\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + 1/2[\text{Si}] = (\text{CaS}) + 1/2\langle 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rangle$	$\lg K_p = 11800/T - 3,90$
2	$\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + [\text{C}] = (\text{CaS}) + \{\text{CO}\}$	$\lg K_p = -3860/T + 3,29$
3	$\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + [\text{Mn}] = (\text{CaS}) + (\text{MnO})$	$\lg K_p = 23400/T - 11,58$
4	$\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + [\text{Fe}] = (\text{CaS}) + (\text{FeO})$	$\lg K_p = 16960/T - 8,63$
5	$\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + 2/3[\text{Al}] = (\text{CaS}) + 1/3\langle \text{Al}_2\text{O}_3 \rangle$	$\lg K_p = 31566,7/T - 12,62$
6	$\langle \text{CaO} \rangle + (\text{SiO}_2) = \langle \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rangle$	$\lg K_p = 4666,98/T - 0,026$
		$\lg K_p = 4358,29/T + 0,178$
7	$2\langle \text{CaO} \rangle + (\text{SiO}_2) = \langle 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rangle$	$\lg K_p = 6604,72/T - 0,263$
8	$3\langle \text{CaO} \rangle + (\text{SiO}_2) = \langle 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rangle$	$\lg K_p = 5323,76/T - 0,87$
9	$[\text{Si}] + 2(\text{FeO}) = (\text{SiO}_2) + 2[\text{Fe}]$	$\lg K_p = 20200/T - 10,6$
10	$[\text{Mn}] + (\text{FeO}) = (\text{MnO}) + [\text{Fe}]$	$\lg K_p = 6440/T - 2,95$
11	$[\text{Si}] + 2(\text{MnO}) = 2[\text{Mn}] + (\text{SiO}_2)$	$\lg K_p = 5200/T - 0,4$
12	$[\text{C}] + (\text{FeO}) = \{\text{CO}\} + [\text{Fe}]$	$\lg K_p = -5160/T + 4,74$
13	$[\text{C}] + (\text{MnO}) = \{\text{CO}\} + [\text{Mn}]$	$\lg K_p = -5272/T + 5,02$
14	$2[\text{C}] + (\text{SiO}_2) = 2\{\text{CO}\} + [\text{Si}]$	$\lg K_p = -28400/T + 15,77$
15	$2/3[\text{Al}] + (\text{FeO}) = 1/3\langle \text{Al}_2\text{O}_3 \rangle + [\text{Fe}]$	$\lg K_p = 14606,7/T - 3,99$
16	$2/3[\text{Al}] + (\text{MnO}) = 1/3\langle \text{Al}_2\text{O}_3 \rangle + [\text{Mn}]$	$\lg K_p = 8166,7/T - 1,04$
17	$4/3[\text{Al}] + (\text{SiO}_2) = 2/3\langle \text{Al}_2\text{O}_3 \rangle + [\text{Si}]$	$\lg K_p = 11133,4/T - 1,67$

* - в температурному діапазоні 298-1483 К існує α $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,
а при 1483 – 1813 – β $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

Що стосується процесів десульфурзації рідкого чавуну за рахунок взаємодії оксиду кальцію з компонентами розплаву, то вказані реакції можливі при використанні у якості відновлювачів алюмінію, кремнію, марганцю та вуглецю розчинених у розплаві. Проте ефективність вказаних процесів прямо пропорційна до спорідненості вказаних елементів до кисню.

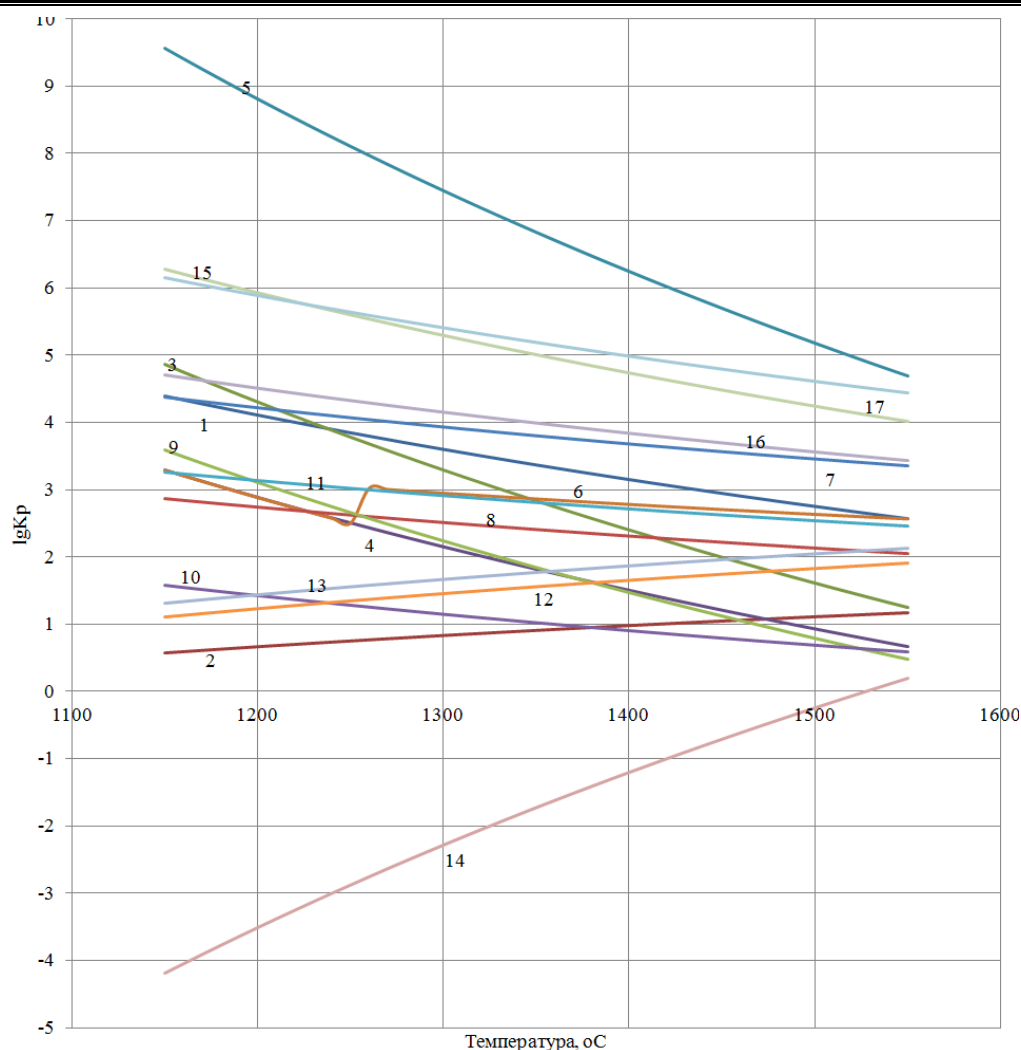


Рисунок 3 – Залежність $\lg K_p$ від температури для реакцій хімічних перетворень, що протікають в зоні взаємодії продуктів окислення газоподібним киснем з рідким чавуном: цифри біля ліній – порядкові номери відповідних рівнянь хімічних перетворень у таблиці 2

Виходячи з наведеного вище необхідно зазначити, що використання металевого алюмінію у якості відновника для здійснення процесів десульфурзації чавуну за рахунок обробки порошкоподібним вапном при здійсненні технології паралельного видалення сірки та кремнію з розплаву є недоцільним, оскільки буди викликати відновлення кремнію з діоксиду та зворотнє його надходження до розплаву. Серед розглянутих відновників найбільш перспективним для вказаного процесу є марганець. Враховуючи його спорідненість до кисню, він буде ефективно приймати участь у процесі десульфурзації з використанням вапна, а нижча спорідненість до кисня у порівнянні з кремнієм забезпечить уникнення повторного відновлення

кремнію з оксиду. Крім того кремній, що розчинений у розплаві буде додатково використовуватися на процес десульфурації чавуну вапном.

Висновки

Проведено термодинамічний аналіз процесу паралельного видалення сірки та кремнію з розплаву за рахунок вдування порошкоподібного вапна в струмені кисню та введення у розплав додаткового відновника. Встановлено, що окислення кремнію можливо при вдуванні газоподібного кисню. При цьому у якості відновників при десульфурації вапном раціонально використовувати марганець. Введення марганцю у розплав необхідно організовувати паралельно з проведенням операції десіліконізації, щоб уникнути перевитрати марганцю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойченко Б.М., Поляков В.Ф., Харахулах В.Ф. Состояние и проблемы сталеплавильного производства Украины. – Вестник ПГТУ. – 1999. – Вып. № 7. – С. 17 – 23.
2. А.Ф. Шевченко, И.А. Маначин, А.С. Вергун и др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах Технология. Исследования. Анализ. Совершенствование: Монография.—Днепропетровск: Дніпро–VAL, 2017. – 256с.
3. Молчанов Л.С., Вакульчук В.В., Кобеляцький О.С. Аналіз сучасних технологій позапічної обробки чавуну / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 17 квітня 2018 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – с. 273 – 286.
4. Меджибожський М.Я. Основы термодинамики і кінетики сталеплавильних процесів: Підручник / М.Я. Меджибожський, П.С. Харлашин. – Київ: Вища школа, 1994. – 327с.
5. Теорія металургійних процесів: Підручник/В.Б. Охотський, О.Л. Костюлов, В.К. Симонов та ін. – К.: ІЗМН, 1997. – 512 с.
6. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1988. – 288 с.
7. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов: Учебник. - Киев, Донецк: Вища школа, 1984 - 343 с.
8. Охотский В.Б. Модели металлургических систем. - Днепропетровск: Системные технологии, 2006. — 287 с.
9. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология: Учебник. - Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006. - 454 с.
10. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. - 240с.

REFERENCES

1. Boychenko B.M., Polyakov V.F., Harahulah V.F. Condition and problems of steel-making production in Ukraine. Vestnik PGU.-1999. – № 7 – p.17-23.
2. A.F.Shevchenko, I.A.Manachin, A.S.Vergun and others. Out-of-furnace sulphur removing from the cast iron in ladles. Technology. Research. Analysis. Developing. Monograph. – Dnepropetrovsk. Dnipro–VAL, 2017.-256 p.

3. Molchanov L.S., Vakulchuk V.V., Kobelatskii O.S. Analysis of the modern technologies of out-of-furnace cast-iron treatment/ Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow: materials of XVI Ukrainian science-practical conference, Kyiv, 17 april 2018 – K: I.Sikorsky KPI, 2018. – p.273 – 286.
4. Medzhibozhsky M. Y. Basis of thermodynamics and kinetics of steel-making processes: Coursebook / M.Y. Medgibogsky, P.S. Harlashin. – Kyiv: High school, 1994. – 327 p.
5. Theory of metallurgical processes: Coursebook/ Ohotsky V.B. Costolov O.L., Simonov V.K. and others – K.: IZMN, 1997. – 512 p.
6. Kazachkov E.A. Calculations of the theory of metallurgical processes. – M.: Metallurgy, 1988. – 288 p.
7. Baptizmansky V.I., Medzhibozhsky M.Y., Ohotsky V.B. Converter processes of steel-making. Theory, technology, construction of machines: Coursebook, – Kyiv, Donetsk: High school, 1984 – 343 p.
8. Ohotsky V.B. Models of metallurgical systems. – Dnepropetrovsk: System technologies, 2006. – 287 p.
9. Boychenko B.M., Ohotsky V.B., Harlashyn P.S. Converter producing of steel: theory, technology, quality of steel, construction of machines, recycling of materials and ecology: Coursebook. – Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 2006. – 454 p.
10. Voronova N.A. Removing sulphur from cast-iron with the magnesium. – M.: Metallurgy, 1980. – 240 p.

Received 21.02.2022.

Accepted 03.03.2022.

UDK 669.162

L. Molchanov, M. Pushkarenko, V. Kislyakov

THERMODYNAMICAL ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL OPERATION OF PARALEL SULPHUR AND SILICON REMOVING FROM THE CAST IRON

In the modern conditions of existence of metallurgical industry enterprises there is a problem. It is a problem of the lack of charging materials quality, that causes the necessity of innovative processes development. It means the processes of metallurgical alloys out-of-furnace treatment, that includes complex removing of sulphur and silicon simultaneously. The aim of this research is identification of rational technical scheme. It means the scheme of realizing of technological processes. These are the processes of the parallel removing sulphur and silicon from cast-iron in manufacture conditions. Taking into account different physical and chemical nature of processes of removing sulphur and silicon on condition of their simultaneous occurring within the limits of one metallurgical system (one iron-pouring ladle) they must be maximally delimited in space. With the aim of the priority examination of certain chemical transformations based on the methods of thermodynamics analysis were used. As an index that determines the order of occurring of certain chemical transformations it was selected the constant of equilibrium. It is set by a thermodynamics analysis, that oxidization of silicon maybe at insufflation of gaseous oxygen. In addition as reducing agent during removing sulphur with a lime it is rationally to use a manganese, because it does not influence on the processes of the oxidized silicon formation. Manganese

adding to fusion should be organized in parallel with operation realizing of sulphur removing. It is necessary in order to avoid the maganese overrun during the oxidation of cast-iron admixtures by gaseous oxygen.

Keywords: thermodynamic analysis, complex refining, liquid cast-iron, parallel chemical transformation, removing of sulphur and silicon, lime, deoxidizer.

Молчанов Лавр Сергійович, к.т.н, завідувач відділом Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Пушкарєнко Микита Володимирович, аспірант кафедри металургії чавуну та сталі Інституту промисловості та бізнес технологій УДУНіТ.

Кисляков Володимир Генадійович, к.т.н., завідувач відділу Фізико-технічних проблем позапічної обробки чавуна Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Molchanov Lavr, Ph.D., Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy of Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine.

Pushkarenko Mykyta, post graduate student of steel and cast-iron metallurgy department of the Institute of Manufacture and Business technologies UDUNiT.

Kislyakov Volodymyr, PhD., Head of the Department of Out of Furnace Cast_Iron Treatment of Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine.

PERFORMANCE EVALUATIONS RESEARCH OF MULTIPROCESSOR SYSTEM IN THE PROBLEM OF HEAT TREATMENT OF METAL PRODUCTS

Abstract. *The paper aims to research performance evaluations of a multiprocessor system in the problem of metal heat treatment. The research aims at the performance evaluations of a multiprocessor computer system. That reveals the problem of matching the computing capabilities of multiprocessor system processors with this system network interface. On the example of solving the problem of metal products heat treatment, analytical relations are derived to determine the optimal number of nodes of the cluster system according to the selected processors. The values of the consistency coefficient of the selected processors' capabilities, the network interface, and the size of the computing domain are derived. Estimates of cluster system performance at solving the metal heat treatment problem for various processors' classes are defined.*

Keywords: *heat treatment, metal, multiprocessor system, acceleration, performance, computing units.*

Research object analysis

Currently, heat treatment (HT) of metal is the most promising way to improve the consumer qualities of metal products radically. In this case, the steel for cold landing must have in the initial state the structure of granular perlite with a certain score, i.e., the one with a globular shape of the carbide phase of a certain size. To obtain a structure with a partially or fully spheroidized carbide phase, the metal products are subjected to spheroidal annealing. To solve the problems outlined above, an installation for heat treatment of a long steel product was developed [1].

Meanwhile, research aimed at studying the features of metal heat treatment by such an installation developed in the papers [2 – 5]. The developed installation is intended for heat treatment of metals and alloys. The installation application aims at improving the technological properties of metal by ensuring high dispersion and homogeneity of the billet structure over the entire plane of its cross-section. In this case, the technological process of metal heat treatment should acquire such advantages as high productivity, reduced energy consumption, improved performance. The multiprocessor computing system and the corresponding

distributed algorithms achieve those properties of the technological process of rolled metal [5 – 9]. The multiprocessor computing system is fixed as a separate module. It allows controlling the wire heating before the transition to the austenitic area to the phase recrystallization temperature on the entire cross-sectional plane of the long steel product, and then, solving the inverse problem of thermal conductivity (IPTC), to control the required mode of isothermal exposure in the range of annealing temperatures over the entire cross-sectional plane of the billet. The installation to implement the spheroidal annealing mode determines the uniform distribution of cementite globules in the ferrite matrix, which provides the necessary mechanical properties of the metal required for further cold deformation. At the same time, the research problem of evaluating multiprocessor systems' performance in metal heat treatment problems remains actual.

Analysis of recent research and publications

Nowadays, there is a rapid rise in the number of multiprocessor computing systems and their total performance [10 – 12]. Such systems became public and cheap hardware platforms for high-performance computing. At the same time, interest in computer networks (GRID) has grown sharply, and there is a widespread understanding that the introduction of such networks will have a huge impact on human development compared to the advent of unified electricity networks at the beginning of the century. In this regard, when considering the problems of multiprocessor systems, it should be borne in mind that they are the first step in creating such computing networks.

In addition, today, the practice poses to scientists of various kinds of problems, which complete solution in most cases is possible only via multiprocessor computing systems [13, 14]. For instance, there are many different and interconnected processes in metallurgical production. First of all, those are technologies of smelting and casting of iron-carbon alloys, heating, rolling, and heat treatment of metal products, and work of the auxiliary equipment to which filling machines, ladles, bowls, etc. concern. Industrial practice shows that neither the intensification of metallurgical production processes nor the constructive improvement of various metallurgical equipment is possible without studying and analyzing heat and mass transfer phenomena. At the same time, solving those problems by known standard approaches is a complex problem, which can be overcome only via up-to-date multiprocessor computing technologies [8, 10, 12]. At the same time, one of the application's main features of such technologies is to increase the speed and

computations' performance [6]. High computing performance allows solving multidimensional tasks and tasks that require a lot of CPU time. Speed allows to manage technological processes effectively or even create conditions for developing new promising technological processes.

At the same time, we note that, for instance, the structure and properties of steel depend mainly on the transformation processes that occur in the metal during heat treatment (HT). Known technological processes of preparation of rolled products for further deformation, which require some optimization for improvement, and new technological lines creation of metal heat treatment require high costs for many field experiments using laboratory and research equipment. As well as in real production. In this regard, the development and multiprocessor computing systems with their mathematical and software is an urgent problem that significantly reduces the number of experimental studies and the time required for their implementation, allowing obtaining the necessary information to create and implement various technological innovations [5]. In the current conditions of fierce competition between the world's producers of metal products, Ukrainian researchers are constantly working to create and implement competitive technologies for the production of metal products. New technological heat treatment processes of metal products (heating and cooling of metal at the required speed in specific temperature and time conditions), resource-saving technologies for preparing metal for further deformation - those are the most important promising areas of mining and metallurgy, and mechanical engineering. In order to implement in industrial practice the rational technology of heat treatment of hard-deformed steel grades, the metal must undergo the necessary special training to change its structural-phase state, study the mechanism and kinetics of hardening, determine the plasticity interval, which is very important in multicyclic rolled metal. Control of such processes can be effectively ensured by the multiprocessor computing systems [15]. This paper illustrates the latest metallurgical technologies development based on the multiprocessor computing systems based on the metal heat treatment. Thus, metal heat treatment is the most promising way to improve the consumer qualities of metal products radically.

The research purpose

The paper considers the latest metallurgical technologies based on multiprocessor computing systems. The research is illustrated against the background of metal heat treatment. The metal heat treatment is the most

promising way to improve the consumer qualities of metal products radically. Control of such processes is effectively ensured via multiprocessor computing. The research purpose is to study the multiprocessor computing system performance evaluations. It is necessary to reveal the problem of matching the computing capabilities of multiprocessor system processors with this system network interface. In addition, it is necessary to establish the optimal number of nodes of the cluster system that controls the process of metal heat treatment.

Presentation of the main research material

The research object analysis. To test the installation functions [1], several laboratory experiments were performed when a wire with a diameter of 20 mm of 20G2P steel was subjected to heat treatment. The ferritic-bainite (martensitic) structure of a billet was taken as the initial one. Note that the metal heat treatment is per the specified transients. At the first stage, the heat treatment process of the material was run by heating the billet within the intercritical zone. The following critical point values are set for the specified material: $Ac_1 = 725\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Ac_3 = 795\text{ }^{\circ}\text{C}$. Heating occurred to the value: $Ac_1 + (10 - 30^{\circ}\text{C})$. In the next stage of material processing, the isothermal holding process was run for 45 s. Then the cooling process continued with a speed of $20 - 30^{\circ}\text{C/s}$ to temperature 720°C , followed by isothermal exposure for 45 s. Finally, at the last stage of the material processing, the billet was heated at a speed of $15 - 25^{\circ}\text{C/s}$ to subcritical temperatures. In this process, the critical heating mode of a billet lasts 12 seconds. Therefore, there is a problem of matching the capabilities of processors and network interface, which is to ensure the control of temperature conditions for a given period, and in determining evaluations of the multiprocessor system performance as a whole. A series of computational experiments were performed on a computer platform with the Intel Core i5-8400E 4.2GHz processor.

For certainty, it is assumed that the length of the heat treatment line of metal products is 7.65 m, and it processes a wire with a diameter of 20 mm of steel 20G2R. In addition, the size of the difference grid is 100×76500 . We also enter the following values:

$$E_i = 76500, E_y = 100, \quad (1)$$

wherein E_i is the array length of the boundary domain, at the same time, this value determines the length of the difference grid along the abscissa, E_y is the length of the difference grid along the ordinate axis.

Mathematical research model, the modeling modes problem of metal heat treatment. Multiprocessor computing system with special software as a single base includes mathematical models such as the thermal conductivity equation, i.e.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + W, \quad (2)$$

while the Fourier test $\tau = \frac{at}{R^2}$, if $\tau > 0$, W is specific power as heat sources, W/m^2 .

The boundary conditions of this equation are as follows:

$$T(0, r, z) = f(r, \tau);$$

$$T(\tau, 1, z) = \text{var};$$

$$\frac{\partial T(\tau, 0, z)}{\partial r} = 0;$$

$$T(\tau, 0, z) \neq 0.$$

According to the z coordinate, the boundary conditions can be the first, second, or third, depending on the problem features to be solved. The last two relations in the boundary conditions indicate that the temperature value in the cylinder axis area during the entire heat transfer process must be finite. Solve the problem (2) by splitting methods, which essence is to reduce a complex operator (2) to simple ones. That approach allows integrating that equation as a sequence of integrating one-dimensional equations of simpler structure.

Note that the control problem (and the synthesis problem) in its exact formulation belongs to the inverse class because it involves determining the functional control parameters based on a predetermined, required result (inverse control problem). The algorithm for solving inverse problems is the "fork" method with a preliminary definition of some initial segment. The problem solution is realized in two stages. The first implements the minimum residual separation, the second determines the minimum of the desired control function from the separated interval. That procedure is implemented as a standard. In other words, if ϑ represents some real value of the desired root, i.e., when $a \leq \vartheta \leq b$, and $f(\vartheta) = 0$, then we can compute the number w that satisfies the conditions: $a \leq \vartheta \leq b$ and $|\vartheta - w| < \varepsilon$, that is, less than any predetermined small number ε . A similar scheme is included in the mathematical apparatus for controlling a multiprocessor computing system.

The modeling problem is that to ensure the required accuracy and stability of computations, one has to take the computational domain with many nodes and

perform many iterations. As a result, the number of arithmetic operations required to compute the temperature fields is within $10^7 \div 10^8$ nodes, and when the time step is 10^{-2} s, the total number of nodes for computations can reach 10^{20} or more. Single-processor computing systems cannot cope with such a load during real-time simulation, so the most justified is multiprocessor systems, which were done to improve the heat treatment technology of long steel products.

They were establishing the optimal number of cluster system nodes. Note that the computational methods for solving the problem of thermal conductivity were numerical-analytical schemes of the high order of accuracy, covered in [12 – 14]. At the preliminary research stage on one test computer equipped with the *Intel Pentium 4 3 GHz* processor, the speed of computing the thermal conductivity problem with the *Intel Fortran Compiler* was 0.15 s per iteration for the difference grid (1) of type elements *Real*8*. Thus, the speed of computation in solving problems of this class by the *Intel Pentium 4 3 GHz* processor will be equal to $3,1 \cdot 10^9$ bit/s. If the V_c symbol denotes this speed, then the analytical ratio to determine the counting time of one iteration can be written as follows:

$$T_{calc} = \frac{E_i \cdot E_y \cdot K_R}{V_c}, \quad (3)$$

wherein K_R is the volume of one difference cell of a type element *Real*8* (64 bit). Let us analyze the relationship (3). Here, the V_c parameter depends on the CPU power and the applied computational methods. When performing tasks of different types, its value, of course, changes. In addition, that parameter contains information about the "computing power," i.e., the number of mathematical operations that can be performed within one cell of the difference grid.

Obviously, the relationship (3) needs to be clarified given the specifics of the modes of operation of the heat treatment plant of a long product. Yes, note that the drawing speed of a long product $V_{pr} = 60$ mm/c. That means that in one second, the wire moves by 60 mm, which does not allow controlling the temperature of the entire length of the production line. In this case, relation (3) can be represented as follows:

$$T_{calc} = \frac{E_i \cdot E_y \cdot K_R}{V_c} \cdot K_{pr}. \quad (4)$$

Here the value K_{pr} considers the device drawing speed for heat treatment of the long product the heat distribution material balance when heating (cooling) the wire and corresponds to this ratio:

$$K_{pr} = V_{pr} \cdot \frac{t}{h}, \quad (5)$$

wherein t is computations' time per unit of unit movement, c; h is the magnitude of the step of the computational domain, mm. The computations showed the time of one iteration $T_{calc} = 83,61$ s. However, the whole process of wire heat treatment takes 114 seconds. It is clear that one processor cannot implement the mode of determining the temperature fields during each cycle of wire heat treatment. In such circumstances, it is necessary to use cluster technologies to determine the temperature fields of a billet. Thus, further research will aim at determining the optimal number of blades of a multiprocessor system that controls the heat treatment of a long product, given the computing power of the selected processor.

As a basis for determining the time of the boundary data interchange in a multiprocessor system, we apply the ratio of this kind:

$$T_{ex1} = \frac{m \cdot (N-1) \cdot E_i \cdot K_R \cdot K_{pr}}{k \cdot d \cdot V_p}, \quad (6)$$

To compute the time of the boundary data interchange during the cluster system operation in the surplus mode of its network interface, we apply the relationship of this kind:

$$T_{ex2} = \frac{m \cdot (N-1) \cdot E_i \cdot K_R \cdot N \cdot K_{pr}}{k_m \cdot d \cdot V_b}. \quad (7)$$

Next, considering the multiprocessor system in the experiment conditions, we establish the number of nodes, ensuring the most efficient solution to the problem. Note that the computational time of one iteration of the computational process covers two terms: the time of direct computation on processors and the time of data interchange between computing nodes of the cluster, i.e.

$$T_{it} = T_{calc} + T_{ex}. \quad (8)$$

Thus in papers [15, 16] it is shown that the computational speed increases approximately to the moment when

$$T_{calc} \approx T_{ex}. \quad (9)$$

Thus, based on the relation (9), it is possible to compute the number of nodes in the cluster computing system required for the effective solution of the problem. Note that this research stage aims to reduce the total computational time by parallelizing the program. Obviously, the total size of the difference grid does not depend on the number of computing nodes of the cluster system. Given the relation (9), we obtain analytical expressions to determine the optimal number of nodes of the cluster system, i.e.

$$\frac{T_{calc}}{N} \approx \frac{m \cdot (N-1) \cdot E_i \cdot K_R \cdot K_{pr}}{k \cdot d \cdot V_p}. \quad (10)$$

Using expression (10), we can obtain two equations concerning N to determine the optimal number of nodes in the cluster system, in which the total computation time required to solve the problem will be minimal. Therefore, equation (10) is reduced to a quadratic form, i.e.

$$N^2 - N - \frac{E_y \cdot k \cdot d \cdot V_p}{m \cdot V_c} = 0. \quad (11)$$

For the equation (11) analysis convenience we write as follows:

$$N^2 - N - \lambda = 0. \quad (12)$$

Additionally, it should be emphasized that the capabilities compliance of the cluster system of the problems nature to be solved requires the coordination of all components included in the value. In equation (12) $\lambda = f(E_y, V_p, 1/V_c)$, this value can be interpreted as the consistency coefficient of the selected processors' capabilities, the network interface, and the value of the computational domain when the system is operating in the network interface deficit mode. Let us analyze that coefficient. At first glance, the result was somewhat paradoxical. It indicates that the coefficient of consistency λ , and the optimal number of blades in the cluster system, do not depend on the size of the data interchange area. That statement can be explained by the fact that the computational domain distribution between the nodes of the cluster system was performed at a constant size. That means that the ratio of time spent processing data in this domain and transmitting data also remained unchanged and independent of its size. The second essential conclusion is that the optimal number of blades in the cluster system, which provides the highest speed, decreases with the increasing computing power of the processors included in it. That statement is quite understandable when considering that the network data

interchange between nodes of the cluster system will be more noticeable to slow down the overall computational process (8), the less time will be spent directly on solving a problem.

Thus, the solution of equation (12) will be two roots, one of which is negative and the other is positive. Based on the physical conditions of the problem, a positive root is taken, which value is equal to eight, so $N = 8$. Definitely, there is a need for more powerful processors under such conditions. A series of computational experiments were performed on a computer platform equipped with the Intel Core i5-8400E 4.2GHz processor.

Features of the Intel Core i5-8400E 4.2GHz processor. All other things being equal, consider how the process of matching the capabilities of the *Intel Core i5-8400E 4.2GHz* processor with the network interface of the cluster system. Notably, the analysis of relation (11) allows us to conclude that a significant increase in parallelization performance can be expected when the power of the cluster processors increases. Obviously, this procedure should be performed against reducing the number of nodes in the cluster system. The *Intel Core i5-8400E 4.2GHz* processor was used to test such assumptions, which for the claimed numerical methods gives speed $1,47 \cdot 10^{10}$ bit/s. At the same time, the network equipment of the cluster system remains unchanged. Table 1 depicts initial data for studying this operation mode of a multiprocessor system.

Table 1

Computational process features with a processor Intel Core i5-8400E 4.2GHz

V_p	10 (8) Gbps
E_i	100
V_c	$14 \cdot 10^9$ bit/s
K_R	8 bit
m	2
d	2
k	2

Table 1 adopted the following notation: V_p is system network bandwidth, Gbps; k is the communication channels number of the computer network that work simultaneously (the number of computer networks); the value of m can be equal to one in the conditions of the one-way mode of boundary data interchange, or two - two-way; d – half-duplex ($d = 1$) or duplex ($d = 2$) computer network operation mode of the multiprocessor system.

Determining the optimal number of nodes in a cluster system with Intel Core i5-8400E 4.2GHz processor. The research task is, on the one hand, to determine the optimal number of nodes of the cluster system during metal heat treatment, and on the other hand, it is necessary to perform the procedure of matching the computing power of the *Intel Core i5-8400E 4.2GHz* processor with the network interface of the cluster system. Analytical ratios (9 - 12) were taken as the basis of the conducted research.

The analysis of the obtained simulation results showed the following. Under the conditions of the problem under study, the optimal number of blades of the cluster system will correspond to $N = 3$. That result confirmed the earlier assumptions. Further research aims at studying estimates of the parallelization effectiveness.

Research of cluster system performance with processor Intel Core i5-8400E 4.2GHz. Table 1 represents the initial data for studying this operation mode of a multiprocessor system. Further studies aim to evaluate the parallelization performance. The obtained simulation results are presented in graphical dependences (Figs. 1, 2). Fig. 1, line 1, presents the problem-solving time on N processors, line 2 depicts the time of the boundary data interchange, and line 3 shows the real problem-solving time.

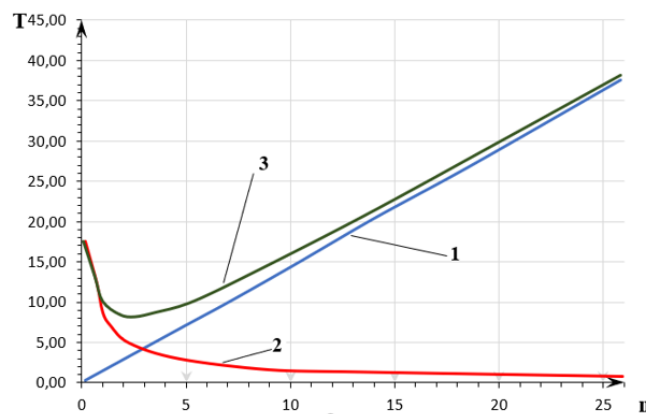


Fig. 1 – Curves of the time dependence of one iteration computation on the number of nodes of a multiprocessor system with the *Intel Core i5-8400E 4.2GHz* processor

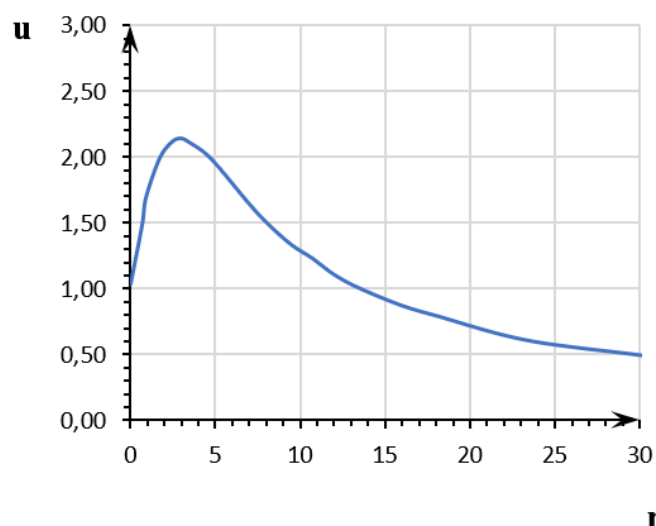


Fig. 2 – The computation acceleration curve on the number of nodes of the multiprocessor system with the *Intel Core i5-8400E 4.2GHz* processor

Therefore, there are prerequisites for quantifying the efficiency of a multiprocessor system. In this problem, the optimal number of nodes in the cluster system, which achieves maximum parallelization performance, will correspond to $N = 3$. The problem will be solved 2.73 times faster than on a single computer with the selected cluster size. The cluster operation mode significantly reduced the computation time according to the computed data. Thus, the computation time decreased from 17.75s to 7.43s. Note that computations acceleration value can control the temperature fields during the metal heat treatment for all its cycles.

Conclusions

Improvement and design of new technological processes associated with metal heat treatment require high costs for many field experiments on laboratory, research, and industrial equipment and in industrial conditions. Reduction of experimental research and time for implementation with the necessary information for the design and technological developments can be made via multiprocessor computing systems.

A multiprocessor computing system solves the class of problems considered in this paper. Due to the above, there is a matching problem of the processors' capabilities and the network interface of the cluster system. This paper illustrates the solution to this problem by the example of two processors *Intel Pentium 4 3 GHz* and *Intel Core i5-8400E 4.2GHz*, in a multiprocessor cluster system. On the example of solving the problem of metal products heat treatment, analytical relations are derived to determine the optimal number of nodes of the cluster system by the

selected processors. The consistency coefficient value ($\lambda = f(E_y, V_p, 1/V_c)$) is derived from the capabilities of selected processors, network interface, and the size of the computational domain. The analysis of such coefficient is run. Thus, it is shown that the optimal number of cluster system blades, which gives the highest speed, decreases with the increasing computing power of the processors that make up the cluster system. After all, the network data interchange between the nodes of the cluster system will be more noticeable to slow down the overall computational process; less time will be spent directly on the task computation.

Cluster system efficiency estimates at solving the problem of metal heat treatment for various classes of processors are defined.

REFERENCES

1. Patent 143971 Ukraine, IPC C21D 1/26 (2006.01). Installation for intensification of spheroidizing annealing of steel / Ivashchenko V., Shvachych G., Sobolenko M., Gul' Yu., Sobolenko O., Moroz D.; owner: National Metallurgical Academy of Ukraine. - № in 2020 00940; stated 02/14/2020; publ. 25.08.2020, Bull. № 6.
2. Dolzhenkov I. Ye. Influence of plastic deformation and other pre-treatment for spheroidizing carbides in steels. Theory and practice of metallurgy. 2007. №1. P. 66 – 68.
3. Gul Yu.P., Sobolenko M.A., Ivchenko A.V. Integrated intensification of spheroidizing annealing of low carbon steels for cold heading. Steel. 2012. №3. P. 44 – 47.
4. Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Sobolenko O.V. The system of automated control of temperature regimes of thermal treatment of steel products. Metallurgical and Mining Industry. 2015. № 1. P. 142 – 147.
5. Shlomchak G., Shvachych G., Moroz B., Fedorov E., Kozenkov D. Automated control of temperature regimes of alloyed steel products based on multiprocessors computing systems. Metalurgija. 2019. №58. P. 299 – 302.
6. Shvachych G., Mamuzic I., Ivaschenko O., Moroz B., Hulina I. Maximum parallel forms of difference scheme algorithms in applied problems of metallurgical thermal physics. Materials and Metallurgy: 14 International Symposium of Croatian Metallurgical Society SHMD. CROATIA. 2020. P. 442.
7. Shvachych G., Ivaschenko O., Busygin V., Fedorov E. Parallel computational algorithms in thermal processes in metallurgy and mining. Naukovy visnyk NHU. Dnipro. 2018. № 4. P. 129–137.
8. Ivaschenko V., Shvachych G., Ivaschenko O., Busygin, V. Processors selection problem in the module computing system when making new technological processes. Information Technology in Metallurgy and Machine Building: materials and Technical International Conference. 2018. P. 106.
9. Shvachych G., Pobochii I., Ivaschenko O., Busygin V. Research of compatibility in the multiprocessing compound systems. Science Review. Poland. 2018. № 2 (9). Vol. 1. P.15–19.
10. Shvachych G., Pobochii I., Kholod E., Ivaschenko O., V. Busygin Multiprocessors computing systems in the problem of global optimization. Structural transformations and problems of information economy formation: monograph. Ascona Publishing United States of America. 2018. P. 281 – 291.
11. Shvachych G. Prospects of construction highly-productive computer systems based on standard technologies. Strategy of Quality in Industry and Education: IV International Conference. May 30 – June 6. 2008, Varna, Bulgaria, 2008. Vol. 2. P. 815 – 819.
12. Voevodin V., Voevodin V. Parallel computations. Sankt Peterburg, 2002 600 p.

13. Ivaschenko V., Shvachych G., Semenov S. Efficient parallelization algorithms of the applied tasks in multiprocessor computing systems. System technologies. Dnipro. 2017. № 2 (109). pp. 57 – 66.
14. Ivaschenko V., Alishov N., Shvachych G., Tkach M. Latest technologies based on use of high-efficient multiprocessing computer systems. Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science, Baku, Azerbaijan. 2013. Vol. 1. Numb. 1. P. 44 – 51.
15. Ivaschenko V., Shvachych G., Shmukin A. Parallel computations and applied problems of metallurgical thermophysics. System Technology. 2008. № 56. P. 123 – 138.

Received 19.01.2022.

Accepted 26.01.2022.

УДК 681.3.012:621.1

Д.М. Мороз

ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНОК ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ В ЗАДАЧІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛОВИРОБУ

Статтю присвячено дослідженню проблеми узгодження можливостей процесорів і мережевого інтерфейсу в багатопроцесорних обчислювальних системах. Основна увага приділяється дослідженню ефективності й прискорення обчислень для розв'язування задачі термічної обробки металовиробу за рахунок застосування багатопроцесорних обчислювальних систем. Виведено аналітичні співвідношення для отримання оптимального числа вузлів багатопроцесорної системи через її параметри. Визначено оцінки ефективності багатопроцесорної системи при розв'язування задачі термічної обробки металовиробу для різного класу процесорів.

Ключові слова: термообробка, метал, багатопроцесорна система, прискорення, продуктивність, обчислювальні блоки.

UDK 681.3.012:621.1

D. Moroz

PERFORMANCE EVALUATIONS RESEARCH OF MULTIPROCESSOR SYSTEM IN THE PROBLEM OF HEAT TREATMENT OF METAL PRODUCTS

The paper is devoted to the study of evaluations of the multiprocessor system performance in the problem of metal heat treatment. Currently, metal heat treatment is the most promising way to improve the consumer qualities of metal products radically. In this case, the technological process of metal heat treatment should acquire such advantages as high productivity, reduced energy consumption, and improved performance. The paper shows that those properties of the technological process of rolled metal heat treatment are achieved by the multiprocessor computing system and the corresponding distributed algorithms. The multiprocessor computing system allows controlling the wire heating before the transition to the austenitic area to the temperature of phase recrystallization on the entire cross-sectional plane of the long steel product based on the mathematical model of the billet heating process. At the same time, the problem of studying the efficiency

estimates of multiprocessor systems in the problems of metal products heat treatment remains relevant.

The research aims to study the evaluations of multiprocessor computing system performance. That reveals the problem of matching the computing capabilities of multiprocessor system processors with this system network interface. In addition, the optimal number of cluster system nodes that control the process of metal heat treatment is determined.

Analytical relations are derived to determine the optimal number of cluster system nodes per the selected processors, solving the problem of metal products heat treatment. The coefficient values of consistency capabilities of the selected processors, the network interface, and the computational domain's size are derived. The analysis of such a coefficient is carried out. Thus, it is shown that the optimal number of blades of the cluster system, which gives the highest speed, decreases with the increasing computing power of the processors that make up the cluster system. It is shown that the network data interchange between the nodes of the cluster system will slow down the overall computational process, the less time will be spent directly on the computation of the corresponding task.

Evaluations of the cluster system performance in solving the problem of metal products heat treatment for different classes of processors are determined.

Keywords: heat treatment, metal, multiprocessor system, acceleration, performance, computing units.

Мороз Дмитро Максимович – аспірант, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Moroz Dmytro, *Ph.D. student*, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

В.Ю. Скосар, С.В. Бурилов, О.С. Ворошилов, Ю.О. Жулай, В.О. Дзензерський

МЕТОДИ ПЕРЕРОВКИ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ЛІТІЄВИХ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ

Анотація. На основі аналізу науково-технічних публікацій дано загальну характеристику сучасних технологій переробки літієвих джерел живлення. Переробку проводять за такою схемою. Спочатку організують розряд джерел струму та їх попередню обробку для відділення діючих речовин. Попередня обробка проводиться механічним подрібненням, або ультразвуком, або розчинниками. Отриманий матеріал піддають магнітному або гравітаційному розділенню, видаляючи речовини, що містять метали. Потім Li, Co, Ni, Mn видаляють пірометалургією, або гідрометалургією, або електрохімічним вилученням. Отримані метали придатні для вторинного використання в літієвих джерелах струму. Авторами розроблено принципову схему технології попередньої обробки літієвих акумуляторів, заснованої на акустичній або гідродинамічній кавітації, а також удосконалено спосіб магнітної сепарації цінних металів.

Ключові слова: літієві акумулятори і батареї, літій, кобальт, нікель, марганець, ультразвукова і гідродинамічна кавітація.

Постановка проблеми

Літієві джерела струму (літій-іонні акумулятори, літій-полімерні акумулятори, літієві батареї) широко використовуються в транспортних засобах, в електронних пристроях, в побутової техніці, а також в безлічі інших галузей господарства. Вартість літію та деяких інших матеріалів (по-перше, кобальту) для виробництва літієвих акумуляторів і батарейок дуже висока, а природні запаси обмежені. Одночасно спостерігаються негативні тенденції забруднення навколишнього середовища літієвими джерелами струму, які вже відпрацьовано, і які містять небезпечні хімічні речовини: сполуки літію, сполуки фтору, хлору і сірки, важкі метали (кобальт, нікель, марганець) хімічно агресивний електроліт. Тому, передові світові виробники літієвих джерел струму прагнуть до використання матеріалів переробки своєї продукції, яка відпрацьовано.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодення існують технології переробки літєвих джерел струму, але вони поки ще не є задовільними та економічно ефективними. Зазвичай, підприємство з переробки витягує виключно літій з акумуляторного брухту, або такі метали, як кобальт. Не існує універсальної, економічно ефективної технології переробки великої маси літєвих акумуляторів і батарейок. В Європі на сьогоднішній день переробляється лише 5% літєвих акумуляторів, що призводить до високих ризиків забруднення навколишнього середовища [1; 2]. В Україні був тільки один завод, який займався переробкою елементів живлення - «Аргентум» (м. Львів), котрий у 2018 р. закрився [3]. У всіх літєвих акумуляторах літій міститься у вигляді солей літію Li^+ в складі електроліту. Найбільш поширені варіанти мають анод у вигляді карбонового матеріалу, якій фіксовано на Cu фользі, або анод у вигляді металевого Li . Катод акумуляторів містить активну масу, яка фіксовано на Al фользі. Активна маса містить оксиди літію- Me : LiCoO_2 , LiNiO_2 , $\text{LiCo}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}_2$, LiMn_2O_4 , LiFePO_4 . Літєві батарейки, як правило, містять анод з металевого Li і катод з твердих MnO_2 , FeS_2 , CuO , CF_x , або рідких SO_2 , SOCl_2 . Електроліт, як правило, містить солі Li^+ . В результаті переробки літєвих акумуляторів і батарейок можливо отримати такі цінні вторинні речовини: Li_2CO_3 , LiOH , Li_3PO_4 ; оксиди-гідроксиди Co , Ni , Mn , Fe ; металеві Co , Ni , Mn , Fe , Cu , Al . Деякі з цих речовин можливо знову використовувати для виробництва літєвих джерел струму. Тому дослідження в галузі переробки та утилізації літєвих джерел струму є дуже актуальними.

Мета дослідження

Мета дослідження – на основі аналізу науково-технічних публікацій сформулювати загальну характеристику сучасних технологій переробки літєвих джерел струму. Друга мета – викласти результати досліджень співробітників Інституту транспортних систем і технологій НАНУ (далі - Інститут) щодо удосконалення технологій переробки літєвих акумуляторів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз науково-технічних публікацій вказує, що загальна схема технологій переробки літєвих акумуляторів і батарейок і отримання вторинних металів виглядає таким чином (див. рис. 1). Відпрацьовані джерела струму піддають розряду для зменшення хімічної енергії, яка в них

залишилася, і запобігання вибухів і пожеж. Після цього джерела струму піддають попередньої обробці (наприклад, механічному дробленню) для вилучення електродів, активних мас, струмовідводів, сепараторів, електроліту. Потім, методами сепарації матеріалів по магнітним властивостям, або по питомій масі (наприклад, на магнітному сепараторі, на денсиметричному столі) розділяють активні маси (які містять Li, Co, Ni, Mn) від пластику і Cu, Al фольги. Активні маси піддають одному з методів переробки: пірометалургійному; гідрометалургійному; електрохімічній екстракції. На виході отримують Li, Co, Ni, Mn, та інші цінні матеріали [4-7].

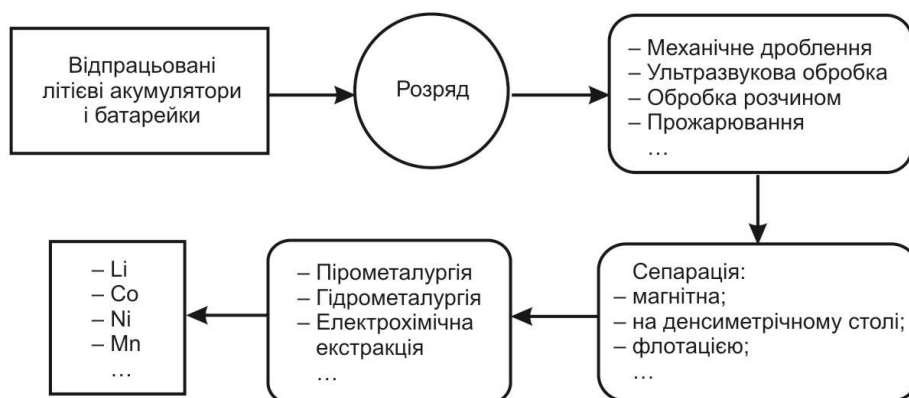


Рисунок 1 – Схема переробки літєвих джерел струму [4-7]

Найчастіше використовуваний метод розряду відпрацьованих акумуляторів – занурення в струмопровідний розчин NaCl. Ведуться дослідження швидкості розряду та швидкості корозії в інших струмопровідних рідинах. Основні методи виділення активних матеріалів у процесі попередньої обробки акумуляторів: механічне дроблення; обробка розчином; прожарювання. Застосовують також ультразвукову обробку.

Механічне дроблення виконують у лопатевих дробарках. Після подрібнення активний матеріал та інші речовини поділяють сепарацією. Наприклад, після дроблення акумуляторів у лопатевих дробарках подрібнені шматки були класифіковані на чотири розмірні групи шляхом сухого просіювання. Великі шматки пластику, Al, Cu та полімери були відокремлені від матеріалів катода та анода розміром 0,075 мм. Потім LiCoO_2 та графіт розділили флотацією [4].

Другий приклад: літєві батарейки спочатку розряджали на розрядної установці з програмним забезпеченням, а потім проводили

механічне дроблення і обробку розчином при $\text{pH} \sim 10-11$ з одночасним продувкою повітрям для зниження концентрації H_2 . Отриманий скраб очищали, і фільтрували рідку фракцію, із котрої за допомогою NaCO_3 вилучали товарний LiCO_3 [5].

Механічна обробка є найпоширенішим методом розділення літєвих акумуляторів. Проте вона має недоліки: сильний шум, викиди пилу та шкідливих газів. Крім того, важко забезпечити ідеальний розподіл всіх матеріалів за допомогою цього методу. А це призводить до збільшення енерговитрат на вилучення цінних металів [4].

Попередня обробка розчинником використовує розчини та розчинники для відокремлення активних матеріалів від Al , Cu фольги в акумуляторі. Цей метод видаляє добавку сполучного матеріалу, який посилював контакт фольги з активними матеріалами. Відомий метод полягає в тому, щоб вставити електроди в органічний розчинник (N -метил-2-піролідін (NMP)) при 100°C для видалення сполучного матеріалу та відокремлення Al , Cu фольги. Недоліки: у більшості акумуляторів використовується сполучний матеріал PVDF для кріплення активного матеріалу, але в деяких використовують інші сполучні, які вимагають підбору відповідного органічного розчинника. Крім того, цей метод вимагає використання гарячих органічних розчинників близько 100°C , що збільшує вартість та створює шкідливі відходи в навколишнє середовище [4].

Обробка прожарюванням відбувається в інтервалі температур $150-500^\circ\text{C}$ (наприклад, в атмосфері азоту) для видалення карбону та органічного матеріалу. Крім того, при температурі від 250 до 350°C сполучний матеріал PVDF видаляється, тим самим зменшуючи прилипання активних матеріалів на Al , Cu фользі. Потім матеріал електрода та фольга легко відокремлюються за допомогою гравітаційного поділу. Недоліки: обробка прожарюванням вимагає дорогого обладнання, є енергоємним і може виділяти токсичні гази [4].

В розробці [8] пропонується механічно подрібнені літєві джерела струму обробляти вищими аліфатичними спиртами в умовах ультразвукової ($у/з$) кавітації з подальшою екстракцією сполук літію водою. Причому сонолітичну дію проводять при температурах до 80°C в ультразвуковій ванні типу УЗВ-3/100-ТН з використанням каталізатора міжфазного переносу.

В даний час на ринку обладнання пропонуються промислові ультразвукові реактори американської фірми Hielscher, придатні в тому числі для обробки літєвих джерел струму, що відпрацювали свій ресурс [9, 10]. Згідно технології Hielscher, у/з обробку літєвих акумуляторів реалізують за схемою, яка приведено на рис. 2.

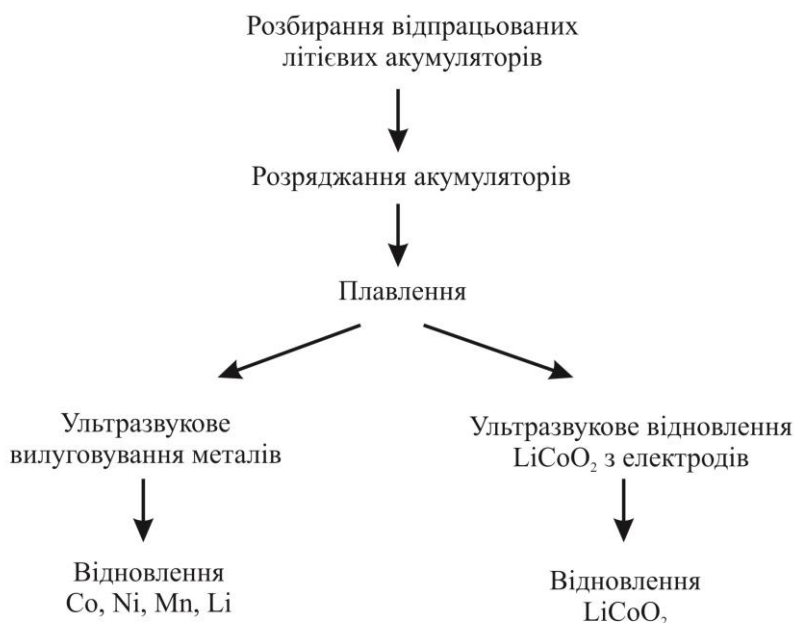


Рисунок 2 – Схема методу ультразвукової обробки літєвих акумуляторів з метою їх подальшої утилізації [10]

В розробці [11] пропонується спосіб відновлення оксиду літію-кобальту з літєвих акумуляторів шляхом пінної флотації з використанням відновлюваних і біорозкладних розчинників, наприклад, терпенів.

Розглянемо детальніше метод ультразвукової обробки, якій запропоновано в [6]. Розробка ефективних методів поділу відпрацьованих літєвих акумуляторів на потоки, що переробляються, необхідна для зниження втрат матеріалу при переробці. За допомогою потужного ультразвуку реалізовано швидкий, простий та безперервний метод видалення активного матеріалу з електродів. У/з кавітація на межі розділу електродів забезпечує швидке та селективне руйнування адгезійного зв'язку та розшарування електрода за лічені секунди. Це підвищує продуктивність попередньої обробки акумуляторів приблизно в 100 разів. Це також дозволяє виробляти матеріал вищої чистоти та якості, придатний для повторного застосування в електродах. Метод полягає в тому, що поміщають у розчин ультразвуковий

рупор у безпосередній близькості від електрода акумулятора. Розшарування електрода відбувається менше, ніж за 10 с, коли електрод розташований безпосередньо під сонотродом високої потужності (1000-2000 Вт), що призводить до руйнування адгезійних зв'язків між активними матеріалами та струмовідводами. Це дозволить відновити неушкоджений струмовідвід та порошкоподібний активний матеріал. Наприклад, в експериментах використовували аноди - мідну фольгу товщиною 15 мкм, покриту з обох боків активним матеріалом товщиною 70 мкм, який містить графіт, 3 мас.% сполучного PVDF або 4,5 мас.% сполучного CMC/SBR. Середній діаметр частинок графіту становив 15 мкм. Катоди - алюмінієва фольга товщиною 25 мкм, покрита з обох боків активним матеріалом товщиною 100 мкм, що містить суміш порошку оксиду літію-марганцю та оксиду літію-нікель-марганцю-кобальту (LiNiMnCoO_2) з добавкою технічного мастилу DF. Діаметр частинок оксиду літію-нікель-марганцю-кобальту становив 6 мкм, а діаметр провідної добавки - від 0,05 до 0,1 мкм. Ультразвукова установка працювала на частоті 20 кГц та максимальної потужності 2200 Вт, з площею лицьової сторони сонотроду $1,5 \times 21 \text{ см}^2$, забезпечуючи густину потужності до $200 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Зазор між сонотродом та лотком для проб становив 2,5-3,0 мм, швидкість пересування електрода під областю впливу у/з становила 2-3 см/с. Як рідину для забезпечення кавітації використовували деіонізовану воду, або водний розчин 0,05 М лимонної кислоти, або водний розчин 0,1 М NaOH. Це забезпечувало ефективне розшарування електродів. Покриття активного матеріалу диспергувалося в резервуарі з розчинником, після чого воно може бути легко витягнуте шляхом фільтрації розчинника. Розрахункова вартість проведення процесу становить 0,10 дол. США на 0,15 кг електродного матеріалу [6].

Треба підкреслити, що метод ультразвукового розшарування призначений для роботи з цілими, а не з подрібненими електродами, що робить його придатним для обробки виробничого браку та контролю якості, на які припадає приблизно 5–20% обсягу виробництва. Хоча сучасні конструкції акумуляторів не піддаються розбиранню, нові дослідження показують, що розбирання акумуляторів краще з фінансової точки зору, ніж їх подрібнення, і дозволяє отримувати продукти більш високої чистоти з меншими хімічними та

енергетичними витратами. Багато виробників почали розробляти батарейки та акумулятори, які легше розбирати та переробляти [6].

Гідродинамічну кавітацію, як відомо, можливо з успіхом використовувати для багатьох технологічних операцій в металургії, в тому числі для деструкції речовин і вилучення матеріалів. Наприклад, за допомогою гідродинамічної кавітації, яка формує імпульсний струмінь, з успіхом виконують очищення поверхонь металів від окалини, або від матеріалу покриття, який потрібно зняти. Зокрема, використання кавітаційного генератора (трубки Вентурі) в діапазоні параметра кавітації 0,07-0,15 дозволяє реалізувати імпульси тиску в струмені в 1,8 разів більшого, ніж тиск стаціонарного струменя на вході генератора, при частоті імпульсів 1000-3000 Гц, що призводить до якісного гідроочищення футерованої поверхні від еластичного покриття [12]. Тому приведені вище дані стосовно методів акустичної та гідродинамічної кавітації свідчать про перспективність їх використання для попередньої обробки літєвих джерел струму з метою вилучення цінних матеріалів. Зокрема, для відокремлення активних матеріалів від металевих струмовідводів.

Для різних літєвих джерел струму матеріали для катода, анода та електролітів, а також розмір виробів дуже різняться. Одночасна їхня обробка містить ризик вибухів. Для ефективної автоматичної обробки виробів та отримання вторинних металів високої якості необхідно вжити особливих заходів. Тому, ще одним шляхом підвищення ефективності переробки та утилізації літєвих джерел струму є така зміна їх конструкції, яка дозволяє легко їх розбирати, ремонтувати і утилізувати [6, 13-15].

Далі розглянемо технології, які виробляють придатні для використання метали. Це методи вилучення металів: пірометалургія, гідрометалургія, та електрохімічна екстракція. Вкажемо відразу, що метод електрохімічної екстракції відокремлює літій з використанням літій-селективної трансмісивної мембрани. Такий метод найбільш перспективний, оскільки літєві акумулятори можуть бути перероблені нешкідливим для навколишнього середовища способом, використовуючи лише воду. Цим методом літій високої чистоти може бути відокремлений та використаний у системах накопичення енергії. Проте ефективність цього методу доведено тільки в лабораторних умовах; необхідні додаткові дослідження для промислового застосування [4].

Пірометалургія використовує високі температури для видалення органічних матеріалів через випаровування та викликає реакції на катоді та аноді, щоб зробити літій розчинним у воді. Попередньо оброблені активні матеріали подрібнюють на порошок і піддають прожарюванню. При температурах вище 700°C оксид металевого літію електродів реагує з графітом з утворенням Li_2CO_3 та оксидів металів. Прожарений порошок потім піддається вилуговуванню водою: Li_2CO_3 розчиняється у воді; оксид металу не розчиняється у воді. Після фільтрації води нерозчинений оксид металу та водний розчин поділяють, щоб отримати розчин Li_2CO_3 , а потім воду випарюють для остаточного одержання Li_2CO_3 . Цей метод може обробляти велику кількість літієвих акумуляторів, що утилізуються, а процес простий [4]. Наприклад, вилучали літій і кобальт за допомогою пірометалургії з використанням LiCoO_2 і графіту із попередньо обробленої літієвої батареї. Виділені активні матеріали прожарювали в азоті при 1000°C протягом 30 хв для отримання Co , Li_2CO_3 . Прожарений порошок занурювали у воду для вилучення літію з використанням мокрої магнітної сепарації [5]. Другий приклад: скраб після обробки літієвих батарейок (дивись вище) промивають, сушать в апараті термічної дегідратації і піддають магнітної сепарації для вилучення металів. Рідку фракцію обробляють аміаком до $\text{pH} \sim 12$, тоді з розчину осідають $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$, $\text{Ga}(\text{OH})_3$ [5]. У деяких пірометалургіях для випалу використовуються додаткові кислоти, щоб підвищити ефективність вилучення літію. Недолік пірометалургійного методу для переробки металів полягає в тому, що після прожарювання додатковий процес зазвичай включає розчинення продукту у воді або розчиннику та його поділ. Однак низька розчинність Li_2CO_3 вимагає великої кількості розчинника. Крім того, пірометалургія вимагає складного обладнання та викликає виділення шкідливих газів [4].

Гідрометалургія є найбільш використовуваним методом вилучення металів. Суть у тому, що іонізують Li у активних матеріалах, оброблених кислотами та основами з подальшим вилуговуванням з отриманням Li^+ розчинів. Використовують кислоти H_2SO_4 , HCl та HNO_3 . H_2O_2 є найпоширенішим відновником. Однак використання кислоти з низьким pH може призвести до виділення шкідливих газів Cl_2 і NO_x . Тому розглядається можливість використання слабких кислот – щавлевої чи лимонної. Далі з'єднання Li можуть бути отримані за допомогою осадження, екстракцією розчинником або селективною адсорбцією. Осадження використовує різницю у розчинності

сполук металів. Матеріали з низькою розчинністю, такі як гідроксиди перехідних металів або оксалати випадають у осад. Зазвичай використовуються такі осадники - NaOH , Na_3PO_4 та Na_2CO_3 з подальшою екстракцією літію у вигляді Li_2CO_3 чи Li_3PO_4 . Цим шляхом можна отримати також з'єднання кобальту, нікелю і марганцю. Наприклад, з виділеного електродного матеріалу $\text{LiNi}_{0,3}\text{Mn}_{0,3}\text{Co}_{0,3}\text{O}_2$ вилуговували літій 2М мурашиною кислотою при 70°C і H_2O_2 , з подальшим збільшенням рН при використанні NaOH та розчинів NH_4OH . Підвищення рН призвело до осадження Co , Mn і Ni у вигляді гідроксидів, які потім поділили. Насичений Na_2CO_3 розчин додавали для отримання Li_2CO_3 . Для екстракції розчинником використовується двофазна система виділення літію з катодного матеріалу. Метод використовує відносну розчинність для відокремлення іонів від полярних та неполярних рідин. Неполярні екстрагенти переважно використовуються для поділу цінних металів (Co , Ni , Mn), а літій відокремлюють. Селективна адсорбція вилучає літій за допомогою іонно-літієвого сита. Літій-іонні сита являють собою неорганічні адсорбенти, які надзвичайно селективні по відношенню до літію в розчині. Оскільки літій є найменшим іоном металу, літій-іон сита використовують вакансію, щоб пропустити лише іони літію. Адсорбоване літієм іонно-літієве сито відокремлюють та розчиняють у HCl . Потім додають NaOH та Na_2CO_3 для отримання Li_2CO_3 . У цілому гідрометалургійний метод гарантує високу швидкість відновлення і не вимагає додаткового устаткування, що робить його дуже популярним у лабораторії, а також придатним до промисловості. Однак, недолік в тому, що цей метод вимагає великого обсягу кислоти та основи для вилуговування, що може призвести до додаткових витрат на хімікати [4].

Таким чином, аналіз сучасних технологій переробки літієвих джерел струму вказує, що технології дозволяють отримати вторинний Li 98-99,97% чистоти, а також Co , Mn і Ni , які знову можливо використовувати для виробництва літієвих джерел струму. Але це досягається ціною великих енергетичних і матеріальних затрат і екологічних ризиків [4-7]. Тому, важливим шляхом підвищення ефективності переробки і утилізації є підвищення якості попередньої обробки продукції, яка відпрацювала ресурс, що дозволяє ефективно вилучити активні матеріали з найменшими енергетичними затратами і екологічними ризиками.

Співробітники Інституту здійснюють активні розробки по вдосконаленню методів переробки літієвих джерел струму. Нами запропоновано метод

попередньої обробки акумуляторів і магнітної сепарації матеріалів, загальна схема якого приведено на рис. 3. Основна ідея полягає в тому, що попередня обробка літєвих акумуляторів здійснюється шляхом впливу на електроди акумуляторів у/з або гідродинамічної кавітації. В результаті активні матеріали відокремлюються від струмовідводів та у вигляді рідкої суміші з активними матеріалами, прямують на магнітну сепарацію з використанням потужних супермагнітів, організованих в масив Хальбаха. На рис. 3 вказані основні операції обробки: у/з кавітація рідини (електроліту) реалізується в у/з реакторі, в якому розміщено літєві акумулятори (Ак); як альтернатива, гідродинамічна кавітація рідини реалізується за допомогою трубок Вентурі, які направлені в комірки акумуляторної батареї (Ак-батарея); магнітний сепаратор відокремлює матеріал, що містить кобальт, нікель, марганець, залізо, літій (Me) від неметалів.

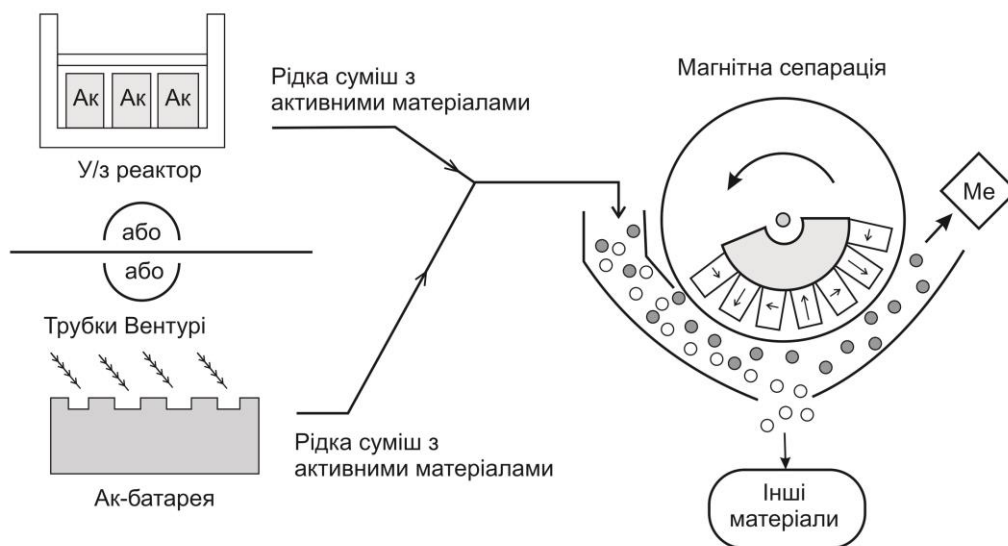


Рисунок 3 – Схема методу попередньої обробки літєвих акумуляторів і магнітної сепарації матеріалів

Оскільки літій міститься в сполуках з феромагнітними металами, він також разом з ними потрапляє до однієї суміші – Me. Потужні NdFeB супермагніти (полярність магнітів вказана стрілками), які організовані в масив Хальбаха, дозволяють суттєво підвищити ефективність магнітної сепарації. Ширина потоку матеріалу, що піддається магнітній сепарації, повинна бути не більше 2-3 від середнього розміру супермагнітів. Це визначається областю максимальної інтенсивності магнітного поля.

Висновки

1. На основі аналізу науково-технічних публікацій сформульовано загальну характеристику сучасних технологій переробки літєвих джерел струму. Технології дозволяють отримати вторинний Li 98-99,97% чистоти, а також Co, Mn і Ni, які знову можливо використовувати для виробництва літєвих джерел струму.

2. Перспективним напрямком удосконалення технологій переробки літєвих джерел струму є підвищення ефективності попередньої обробки акумуляторів, наприклад, за рахунок використання акустичної або гідродинамічної кавітації для розшарування електродів.

3. Фахівцями Інституту розроблено принципову схему технології попередньої обробки літєвих акумуляторів, заснованої на акустичній або гідродинамічній кавітації. А також удосконалено спосіб магнітної сепарації цінних металів із застосуванням супермагнітів у масиві Хальбаха.

ЛІТЕРАТУРА

1. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Gavin Harper et. al. Nature. Vol 575, 7 November 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
2. Костюченко А. Електромобіли наступають: Що буде з використаними батареями? (06.05.2021) [Електронний ресурс] / А. Костюченко // Режим доступу: https://cfts.org.ua/articles/elektromobili_nastupayut_cho_budet_s_ispolzovannymi_batareyami_1802.
3. Бурдюгова К. В Україні закритися останній завод по переробці батарейок: у чому небезпека (10.12.2018) [Електронний ресурс] / К. Бурдюгова // Режим доступу: <https://znaj.ua/society/193673-v-ukrajini-zakrivsya-ostanniy-zavod-po-pererobci-batareyok-u-chomu-nebezpeka>.
4. Hyuntae Bae and Youngsik Kim. Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review. Materials Advances, 2021. <https://doi.org/10.1039/d1ma00216c>.
5. Пат. № 2676806 РФ. МПК C22B 26/12, 3/04, 7/00 (2006.01), H01M 6/52, 10/54 (2006.01). Способ утилизации отработанных литиевых источников тока. А.Н. Евдокимов, Л.В. Нестеров. - № 2017139099, 10.10.2017. Опубл. 11.01.2019. Бюл.№2.
6. Lithium ion battery recycling using high-intensity ultrasonication. Chunhong Lei et. al. Green Chem., 2021, 23, 4710. June 2021. <https://doi.org/10.1039/d1gc01623g>.
7. Pat. № 2559928 CA. МПК H01M 10/54 (2006.01), H01M 6/52 (2006.01). Method for the mixed recycling of lithium based anode batteries and cells. Tedjar Farquk, Foudraz Jean-Claude. - № PCT/FR2005/000814, 04.04.2005. Data publ. 27.10.2005.
8. Пат. № 2531911 РФ. МПК H01M 6/52 (2006.01). Способ утилизации литиевых источников тока с истекшими сроками эксплуатации. А.Ю. Бойко, В.В. Красильников, В.И. Тагаев, Е.Б. Поторопин, Б.В. Серебренников. - № 2013154387/07, 06.12.2013. Опубл. 27.10.2014. Бюл.№30.
9. Optimized Chemical Reactor Efficiency by High-Power Ultrasonication (17.03.2022) [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.hielscher.com/optimized-chemical-reactor-efficiency-by-high-power-ultrasonication.htm>.

10. Ultrasonics for the Recycling of Lithium Ion Batteries (17.03.2022) [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.hielscher.com/ultrasonics-for-the-recycling-of-lithium-ion-batteries.htm>.
11. Pat. № 9,972,830 US. МПК H01M 4/1391 (2013.01), B03D 1/006 (2013.01), B03D 1/008 (2013.01), B03D 1/02 (2013.01). Method for the recovery of lithium cobalt oxide from lithium ion batteries. Sarah L. Poe, et. al. - № PCT/US2012/043119, 27.03.2014. Date of Patent 15.05.2018.
12. Жулай Ю.А. Кавитация, как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (обзор) / Ю.А. Жулай, В.Ю. Скосарь // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. 8 (105). С.7-15.
13. Яворський В.Т. Утилізація цінних компонентів із відпрацьованих малих джерел електричного струму / В.Т. Яворський, Г.І. Зозуля, Р.Л. Буклів // Національний університет «Львівська політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2014. № 787. С. 117-121.
14. Гурков А. Батареи для электромобилей: в ЕС дают миллиарды на инновации и утилизацию (28.01.2021) [Електронний ресурс] / А. Гурков // Режим доступу: <https://www.dw.com/ru/batarei-dlja-jelektromobilej-v-es-dajut-milliardy-na-innovacii/a-56362784>.
15. The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review. Dana L. Thompson et. al. Green Chem., 2020, 22, 7585. August 2020. <https://doi.org/10.1039/d0gc02745f>.

REFERENCES

1. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Gavin Harper et. al. Nature. Vol 575, 7 November 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
2. Kostuchenko A. Elektromobili nastupajut: Chto budet s ispolzovannimi batarejami? (06.05.2021) [Elektronniy resurs] / A. Kostuchenko // Regim dostupu: https://cfts.org.ua/articles/elektromobili_nastupajut_chno_budet_s_ispolzovannymi_batarejami_1802.
3. Burdjugova K. V Ukraini zakrivsja ostanniy zavod po pererobci batareyok: u chomu nebezpeka (10.12.2018) [Elektronniy resurs] / K. Burdjugova // Regim dostupu: <https://znaj.ua/society/193673-v-ukrajini-zakrivsya-ostanniy-zavod-po-pererobci-batareyok-u-chomu-nebezpeka>.
4. Hyuntae Bae and Youngsik Kim. Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review. Materials Advances, 2021. <https://doi.org/10.1039/d1ma00216c>.
5. Pat. № 2676806 RF. МПК C22B 26/12, 3/04, 7/00 (2006.01), H01M 6/52, 10/54 (2006.01). Sposob utilizacii otrabotannih litievih istochnikov toka. A.N. Evdokimov, L.V. Nesterov. - № 2017139099, 10.10.2017. Opubl. 11.01.2019. Bul.№2.
6. Lithium ion battery recycling using high-intensity ultrasonication. Chunhong Lei et. al. Green Chem., 2021, 23, 4710. June 2021. <https://doi.org/10.1039/d1gc01623g>.
7. Pat. № 2559928 CA. МПК H01M 10/54 (2006.01), H01M 6/52 (2006.01). Method for the mixed recycling of lithium based anode batteries and cells. Tedjar Faruk, Foudraz Jean-Claude. - № PCT/FR2005/000814, 04.04.2005. Data publ. 27.10.2005.
8. Pat. № 2531911 RF. МПК H01M 6/52 (2006.01). Sposob utilizacii litievih istochnikov toka s istekshimi srokami expluatacii. A.Yu. Boiko, V.V. Krasilnikov, V.I. Tagaev, E.B. Potoropin, B.V. Serebrennikov. - № 2013154387/07, 06.12.2013. Opubl. 27.10.2014. Bul.№30.
9. Optimized Chemical Reactor Efficiency by High-Power Ultrasonication (17.03.2022) [Elektronniy resurs] // Regim dostupu: <https://www.hielscher.com/optimized-chemical-reactor-efficiency-by-high-power-ultrasonication.htm>.
10. Ultrasonics for the Recycling of Lithium Ion Batteries (17.03.2022) [Elektronniy resurs] // Regim dostupu: <https://www.hielscher.com/ultrasonics-for-the-recycling-of-lithium-ion-batteries.htm>.
11. Pat. № 9,972,830 US. МПК H01M 4/1391 (2013.01), B03D 1/006 (2013.01), B03D 1/008 (2013.01), B03D 1/02 (2013.01). Method for the recovery of lithium cobalt oxide from lithium ion batteries. Sarah L. Poe, et. al. - № PCT/US2012/043119, 27.03.2014. Date of Patent 15.05.2018.

12. Zhulay Yu.A. Kavitiya, kaik sredstvo intensifikacii technologicheskikh processov. Obit primeneniya i perspektivi (obzor) / Yu.A. Zhulay, V.Yu. Skosar // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. 2013. 8 (105). S.7-15.
13. Javorskiy V.T. Utilizacija cinnih komponentiv iz vidpracjovanih malih djerel elektrichnogo strumu / V.T. Javorskiy, G.I. Zozulia, R.L. Bukliv // Nacionalniy universitet «Lvivska Politehnika». Himija, tehnologija rechovin ta ih zactosuvannja. 2014. № 787. S. 117-121.
14. Gurkov A. Batareji dlja elektromobiley: v ES dajut milliardi na innovacii i utilizaciju (28.01.2021) [Elektronniy resurs] / A. Gurkov // Regim dostupu: <https://www.dw.com/ru/batarei-dlja-jelektromobilej-v-es-dajut-milliardy-na-innovacii/a-56362784>.
15. The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review. Dana L. Thompson et. al. Green Chem., 2020, 22, 7585. August 2020. <https://doi.org/10.1039/d0gc02745f>.

Received 14.02.2022.

Accepted 28.02.2022.

UDC 669.2; 669.1

V. Skosar, S. Burylov, O. Voroshilov, Yu. Zhulay, V. Dzenzersky

METHODS OF RECYCLING OF LITHIUM POWER SOURCES

Today, there are technologies for recycling lithium power sources, but they are not yet satisfactory and cost-effective. The purpose of the study - based on the analysis of scientific and technical publications to formulate a general description of modern technologies for recycling lithium power sources. The second purpose is to present the results of the authors' research on the improvement of lithium battery recycling technologies.

Based on the analysis of scientific and technical publications, a general description of modern technologies for processing lithium power sources is given. Processing is carried out according to the following scheme. First, they organize the discharge of power sources and their pre-treatment to separate the active substances. Pre-treatment is carried out by mechanical grinding, or ultrasound, or calcination or solvents.

Mechanical crushing is performed in blade crushers. Machining is the most common method of separating lithium batteries. However, it has disadvantages: loud noise, emissions of dust and harmful gases. Calcination takes place at temperatures up to 500 ° C to remove carbon and organic material. Disadvantages of the method: calcination requires expensive equipment, is energy-intensive and can emit toxic gases. Solvent pre-treatment uses solutions and solvents to separate the active materials from Al, Cu foil in the battery. This method removes the addition of binder material, which increased the contact of the foil with the active materials. Disadvantages: this method requires the use of hot organic solvents of about 100°C, which increases the cost and creates hazardous waste into the environment. More promising is the method of processing batteries in ultrasonic cavitation.

The pre-treated material is subjected to magnetic or gravitational separation, removing substances containing metals. Then Li, Co, Ni, Mn are removed by pyrometallurgy, or hydrometallurgy, or electrochemical extraction. The obtained metals are suitable for secondary use in lithium power sources.

The analysis of the considered technologies of processing of lithium power sources indicates that an important way to increase the efficiency of recycling is to improve the

quality of pre-treatment of products that have exhausted the resource, which allows to effectively remove active materials with the lowest energy costs and environmental risks.

The authors have developed a schematic diagram of the technology of pre-treatment of lithium batteries based on acoustic or hydrodynamic cavitation, as well as improved the method of magnetic separation of metals.

Keywords: lithium batteries and elements, lithium, cobalt, nickel, manganese, ultrasonic and hydrodynamic cavitation.

Скосар Вячеслав Юрійович – к.ф.-м.н., с.н.с., відділ Електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення, Інститут транспортних систем і технологій НАН України.

Бурилов Сергій Володимирович – к.ф.-м.н., с.н.с., зав. відділом Електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення, заступник директора з наукової роботи, Інститут транспортних систем і технологій НАН України.

Ворошилов Олексій Станіславович – м.н.с., відділ Електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення, Інститут транспортних систем і технологій НАН України.

Жулай Юрій Олексійович – к.т.н., пров.н.с., відділ Електротехнічних комплексів і хімічних джерел струму транспортного призначення, Інститут транспортних систем і технологій НАН України.

Дзензерський Віктор Олександрович – д.т.н., голов.н.с., проф., зав. відділом Надпровідних магнітних систем, директор Інституту, Інститут транспортних систем і технологій НАН України.

Skosar Vyacheslav – Candidate of Physical and Mathematical Science, Senior Scientist, department of Electrical Complexes and Chemical Power Sources for Transport, Institute of transport systems and technologies.

Burylov Sergiy – Candidate of Physical and Mathematical Science, Senior Scientist, head of department of Electrical Complexes and Chemical Power Sources for Transport, Deputy Director for Research, Institute of transport systems and technologies.

Voroshilov Olexiy – Scientist, department of Electrical Complexes and Chemical Power Sources for Transport, Institute of transport systems and technologies.

Zhulay Yuriy – Candidate of Technical Science, Senior Scientist, department of Electrical Complexes and Chemical Power Sources for Transport, Institute of transport systems and technologies.

Dzenzerskiy Viktor – Doctor of Physical and Mathematical Science, professor, head of department of Superconducting Magnetic Systems, Director of Institute of transport systems and technologies.

SOME ASPECTS OF MODELING OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF MECHANISMS

Abstract. *The research is aimed at revealing the problems of modeling technical diagnostics of mechanisms and machines. To assess the technical condition of machines and the formation of diagnostic features, a method based on the application of the mathematical theory of pattern recognition is proposed. It is shown that technical diagnostics of machines and mechanisms can be interpreted as the recognition of classes of technical condition of the object by the set of its technical characteristics. At the same time, it is established to what class the current recognized state belongs. The conducted studies are covered against the background of the assessment of gear defects. Such studies have shown that in the early stages of defect development there is a process when synchronous components do not grow, and all the extra power from the defect is concentrated in asynchronous harmonics.*

Keywords: *diagnostics, mechanisms, machines, pattern recognition, technical status, defects, gear transmissions.*

Formulation of the problem

The main goal in creating machines and mechanisms is to increase their productivity, reliability, accuracy, and economy. Such contradictory requirements can be satisfied as best as possible only with precise control of the technical condition of machines and mechanisms, as well as timely minimization of miscalculations at the design stage. Therefore, research aimed at improving the efficiency of mechanisms and machines is relevant and meets the requirements of scientific and technological progress in the field of modern engineering.

To obtain information about technical mechanisms, parametric characteristics of the technical condition are often measured: coefficient of friction, temperature in the contact zone, the intensity of response, vibration values of acoustic oscillations, variable deformations, and forces [1]. However, despite the great prospects of these measurements, they cannot be performed in all machines and mechanisms without exception.

One of the biggest ways to reduce the duration of the test of mechanisms is the method of comparative evaluation of the performance of the studied, for example, gears with gear pairs, in which the gear ratio is equal to one. In this case, each strained pair of teeth is considered as a separate object of study, which differs from other dynamic components of the load on the teeth, due to different steps for a combination of errors in the manufacture and assembly. This approach allows to store information about the processes of elaboration, the accumulation of potential damage, residual life and significantly reduce the number of gears under study and the duration of the experiment.

To refine the forecast of the residual life of the responsible elements of the mechanisms, it is necessary to control the change in the values of the coefficients of internal dynamics and uneven load distribution along the gear engagement line. This can be done by utilizing periodic instrumental monitoring of changes in the state of the limited elements, for example, according to the control of vibroacoustic characteristics of the drive mechanisms. The methodology for determining the internal dynamic component of the load in the engagement of the amplitudes of vibration pulses generated by the engagement is disclosed in [2].

At the same time, mathematical modeling enters a fundamentally important period of its development, "embedded" in the structure of the modern information society. Technical, economic, ecological, and other systems studied by modern science are no longer subject to study (in the required completeness and accuracy) by traditional theoretical methods. A direct natural experiment on them is long, expensive, often dangerous, or impossible, because the system exists in a single instance, and the cost of errors and miscalculations, in this case, is unacceptably high, so mathematical modeling is an inevitable component of scientific and technological progress.

Many leading scientists have presented a general description of mathematical modeling. In particular, in [3] the main types of mathematical models and methods of their identification are considered. Attention is paid to the modeling of control and management systems in conditions of uncertainty, identification of technical objects, modeling tools.

The availability of objective information about the technical condition of complex systems is the most important condition for ensuring their reliability at the stage of operation. Therefore, the diagnosis of such systems should be based on a

theoretical basis, which allows us to fully take into account the complexity of building systems and algorithms for their operation [4 – 5].

In [6], an approach to the formation of many controlled features of complex technical systems is proposed. It consists in processing the trajectories of the initial processes of the system based on the theory of spaces of measurable functions quadratically integrated according to Lebesgue, which allows to approximate partial sums of Fourier series trajectories with arbitrary set of finite discontinuities, taking into account the complexity of system structures and algorithms for their operation. The application of coefficients of trajectory decomposition into partial sums of Fourier series on the orthonormal Legendre basis as a controlled feature is substantiated.

Taking into account the above, these studies are aimed at revealing the problems of modeling technical diagnostics of mechanisms and machines.

Analysis of recent studies and publications

Technical diagnostics of machines is carried out in order to determine the technical condition of machines and individual mechanisms, identify the feasibility, conditions and terms of safe operation, taking into account the actual mode of operation, as well as the need for repairs, reconstruction or decommissioning. The methodology determines the procedure, methods and scope of technical inspection and is based on regulatory documents [7]. The organization of work on technical diagnostics of machines includes the construction of information models of machines. The information model is a database consisting of operational, design, repair and other documentation [8]. A dynamic model of a particular machine is being built and the operating conditions are studied to determine the places of control and modes of operation. Technical means are chosen for technical inspection; the presence of stable in terms of performance parameters of the machine is being investigated; the rapidly changing parameters and the composition of the measuring complex for their fixation is being determined.

The mathematical model of diagnosis is chosen depending on the definition and provision of goals. An algorithmic model of diagnosis, which can be complicated or simplified depending on the goals and operating conditions, is built [9]. With the help of Petri nets, a graph of the state of the machine is formed and limited in terms of information set of diagnostic parameters for different operating conditions is determined. For diagnostic parameters, the program is used to build reference surfaces (based on information model data) that correspond to normal or optimal

functioning and surfaces of the current state, which are constantly changing over time in the process of monitoring diagnostics [10].

Based on the mathematical theory of pattern recognition, the reference surface and the state surface are compared and a diagnosis, which determines the further operation of the machine, is made. The actual technical condition of the machine is assessed by the results of comparison of surfaces and predicting changes in diagnostic parameters allows to determine the period of safe operation before the appearance of signs of a sharp decrease in reliability.

To date, some progress has been made in their design and manufacturing technology, but there is a significant gap in the field of theory and technical means of diagnosis. This lag is caused by the complexity of methods of obtaining primary information signals due to the fact that their construction requires the involvement of various physical phenomena, the need for direct measurements, as well as the inconvenience of installing primary measuring instruments in small, closed volumes without violating the design of mechanisms. The success of the implementation of computer technology in the diagnostics of gears and bearings largely depends on the availability and quality of primary information selection tools, which must have informative reliability, high metrological and operational characteristics, ease of installation and ability to diagnose without machine's interruption.

These studies are aimed at revealing the main features of technical diagnostics on the examples of gears.

The purpose of the study

Based on the review of literature sources and the results of the analysis of the current state of development of problems of technical diagnostics of mechanisms and machines propose a method of estimating the diagnostics of devices based on the theory of pattern recognition. To show that technical diagnostics of machines and mechanisms can be interpreted as the recognition of classes of technical condition of the object based on the set of its technical characteristics. The efficiency of the proposed mathematical models should be illustrated by conducting a numerical experiment and comparative analysis of the obtained estimates against the background of the study of gear defects.

Statement of the main research material

Investigation of stable functioning of mechanisms on the basis of the theory of pattern recognition. Technical diagnostics of machines and mechanisms can be

interpreted as the recognition of classes of technical condition of the object based on the set of its technical characteristics. To solve this problem, it is expedient to apply the mathematical theory of pattern recognition. In relation to machine diagnostics, the recognition problem can be formulated as follows.

Let the initial set W of phenomena, situations, processes in the object is divided into classes:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}.$$

Different technical characteristics of the object are combined into range of features:

$$U = \{u_1; u_2; \dots u_n\}.$$

Let's make the description of each class $W_i (i=1, \bar{m})$ in the language of features $u_j (j=1, \bar{n})$, i.e., make the functional dependence $W_i = p_i(u_1, u_2, \dots u_n)$. The information contained in this relationship is a priori information of the recognition system.

Suppose that as a result of experiments it is established that for the located state of the sign following values are accepted:

$$u_1 = u_1^0; \quad u_2 = u_2^0, \dots u_n = u_n^0.$$

It needs to be determined to which class the currently recognized state belongs. The solution of the recognition problem is based on the comparison of a posteriori information on the a priori description of classes using the recognition algorithm.

Signs of states of machines and mechanisms that are being recognized can be deterministic, probabilistic, and logical.

Deterministic features take specific numerical values on the range U and geometrically represent the coordinates of a point in the n -dimensional space of features.

Probabilistic features are carrying random character and determine the probability of correctness of measurement of numerical values of deterministic features.

Logical features can be considered as elementary statements that take on two meanings that do not have a quantitative expression with complete certainty ("yes" or "no").

Recognition algorithms are based on comparing the recognized state with each class carrying one or another degree of proximity. If selected degree of proximity L of features U of a given state W with the features of any class W_* exceeds the degree of proximity to the characteristics of other classes, the decision is made on the affiliation of the state W to the class W_* , i.e., $W \in W_*$.

When using deterministic features as a measure of proximity, the *RMS* Euclidean distance between the points of states W and W_* of the n -dimensional space of features:

$$L(W, W_*) = \left[\frac{1}{K_q} \sum_{S=1}^{K_q} (U_j - U_{sj}^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

where K_q – number of states W_* ; U_{sj}^* – features of state W_* .

The implementation of the recognition process will be carried out by comparing the parameters of the current state of the object with the standard of each class. By standard, we mean some averaged image of the class. With a large number of class members, the procedure for determining affiliation to one of the classes can be greatly simplified by pre-forming the standards of each class and comparing the next presented for recognition object with each of the standards. In the presence of a sample of l members of class state W the reference vector and the reference curve of the characteristics of the object can be taken as a reference.

The reference vector is taken as:

$$\vec{V} = \left\{ \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l v_{k1}; \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l v_{k2}; \dots; \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l v_{kn} \right\}. \quad (2)$$

Recognition of the state given by the vector $\vec{U} = \{u_1^0; u_2^0; \dots; u_n^0\}$, is carried out by estimating the distance between the vectors $\vec{U}$ and $\vec{V}$, and assigning it to the appropriate class of states, i.e. the task is to find the minimum of the functional:

$$F(u, v) = \sqrt{\left(\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l v_{k1} - u_1^0 \right)^2 + \left(\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l v_{k2} - u_2^0 \right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l v_{kn} - u_n^0 \right)^2} \quad (3)$$

with the following restrictions:

$$|U_j - V_j| < \rho_j,$$

where ρ_j – the radius of the sphere into which the point U_j must fall in the sign space to assign it to the j -th class.

The area (sphere) of the diagnosis W_j with radius ρ_j should be chosen so that it includes, with some margin, both: all points of the sign space, and the coordinates of the reference vector.

To classify the states of machines and mechanisms, it is more convenient to use the reference surface instead of the reference vector. With that, the recognition of the tested state is carried out by estimating the angle between the normal vectors drawn to the corresponding points of the feature space and the actual state space. The value of the angle is calculated by the formula:

$$\cos \varphi_j = \frac{\sum_{j=1}^n u_j^0 \cdot v_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^0)^2 \cdot \sum_{j=1}^n v_j^2}}, \quad (4)$$

where $v_j = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l v_{kj}$.

The maximum of similarity is achieved when the following condition is met:

$$\left(\sum_{j=1}^n u_j^0 \cdot v_j \right)^2 = \sum_{j=1}^n (u_j^0)^2 \cdot \sum_{j=1}^n (v_j)^2 + \alpha(u_j^0, v_j), \quad (5)$$

where $\alpha(u_j^0, v_j)$ – infinitesimal function, which is determined by the error of measurement of the actual parameters of the technical condition of the machine by the complex of control and measuring equipment (CCME).

Recognition algorithms based on the use of probabilistic features use the risk of measurement correctness or error, as a measure of similarity.

The risk matrix is:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mm} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

where $c_{ij}(i, j = \overline{1, m})$ – losses due to wrong decisions.

The main diagonal of the matrix is the loss of correct decisions, and other elements of the matrix - the loss of incorrect decisions.

Suppose that as a result of the experiment it is established that the values of the signs of the recognized state W , are $u_1 = u_1^0; u_2 = u_2^0; \dots u_n = u_n^0$.

Let us denote this event by A . Then the value of the risk associated with deciding whether the recognized object belongs to a certain class, if there is an event A , will be calculated by the formula:

$$P\left(\frac{W_*}{A}\right) = \sum_{j=1}^m C_j P\left(\frac{W_j}{A}\right), \quad (7)$$

where $P\left(\frac{W_i}{A}\right)$ – conditional and posterior probability that $W \in W_*$, which is calculated by the Bayesian formula:

$$P\left(\frac{W_i}{A}\right) = \frac{P(W_i) P_i(u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0)}{\sum_{i=1}^n P(W_i) \rho_i(u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0)}. \quad (8)$$

Here $P_i(U)$ – the density of the distribution of characteristics within the i -th class.

In recognition algorithms based on the use of logical features, the description is built in the form of Boolean relations that characterize the recognized state: 1 – for those classes to which the object is assigned; 0 – for those classes to which the object does not belong.

When building real diagnostic systems, the question about the power of the set of features arises. Increasing the power of the set, although it increases the probability of recognition, typically requires additional costs for the implementation of the system.

At power of set U reliability of the diagnosis decreases. That is why it is so important when developing a system of technical diagnostics to carefully assess which classes of technical conditions of machines and mechanisms should be included in a set of features.

When choosing diagnostic features, it is necessary to take into account a number of requirements arising from the task of optimizing the diagnostic system. Features must be clearly associated with the condition of the machine and to detect defects in the early stages of their development.

The set of diagnostic features is formed taking into account their informativeness and limitations on resources (mass, dimensional, temporary, cost, etc.).

Let a set of classes be given as $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$, a priori set of features $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, a priori probabilities of states $P(W_i)$, and the density of the distribution of features of the i -th class $\rho_i = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$. The initial entropy of such a system equal:

$$H_0 = - \sum_{i=1}^m P(W_i) \ln P(W_i). \quad (9)$$

After measuring the feature u_j entropy in the system equals:

$$H(u_j) = - \sum_{i=1}^m P\left(\frac{W_i}{u_j}\right) \ln P\left(\frac{W_i}{u_j}\right), \quad (10)$$

where $P\left(\frac{W_i}{u_j}\right)$ – conditional probability of conformity of the state of the recognized mechanism or machine to the class W_i :

$$P\left(\frac{W_i}{u_j}\right) = \frac{P(W_i)P_i(u_j)}{\sum_{i=1}^m P(W_i)P_i(u_j)}. \quad (11)$$

Informativeness of the feature u_j , i.e., the amount of information received by the recognition system when measuring the feature, is defined as the difference between the entropy values of the initial and current states:

$$I(u_j) = H_0 - H(u_j). \quad (12)$$

When designing a real system of technical condition recognition, it is advisable to assess the informativeness of each feature under the assumption that it is determined first. This procedure allows you to pre-determine which of the features of the set U should be excluded from further consideration.

In the diagnosis of machines and mechanisms as the main requirement for the diagnostic feature is its high sensitivity to changes in the structural parameter, i.e., the high rate of its change from the normal state of the mechanism WN to the defective WD.

The informativeness of this feature is calculated by the formula:

$$I_j = \frac{(U_j^N - \Gamma_j^D)}{U_j^N}, \quad (13)$$

where U_j^N, U_j^D – the value of diagnostic signs in normal and defective states of the mechanism.

For each class of machines and mechanisms, reference curves are formed - in some way approximated and averaged within the class values of diagnostic features, as well as their threshold values, which correspond to the limit values of the diagnosed parameters of the technical condition, are formed.

Based on the comparison of current and reference diagnostic features stored in the PC database, a decision-making operation is performed, i.e., the diagnosis is made, on the basis of which the operation of managing the diagnostic object is performed.

Modeling of processes for assessing the technical condition of gears. Gears are widely used in various fields of mechanical engineering and pose a number of new challenges related to increasing durability. Existing methods of calculating the teeth of gears for operation do not provide the required level of reliability, as the assessment of performance is carried out only if the prevention of breakage of the teeth and the destruction of the contact surface as a result of chipping.

Information about the technical condition while the programming diagnostic studies of gears is generalized, i.e., it describes the change in structural parameters over time. This raises the problem of rapid response as a function of time to deviations of structural parameters from their standard. This can be achieved by moving from general functional descriptions of gear characteristics to operational commands as a function of time for executive bodies.

Prediction of gear performance is directly related to the detailed analysis of the operation of the teeth at the corresponding points of contact. In contrast to the engagement of non-actuated teeth, which have a constant value of the gear ratio, for the profile of the actuated teeth, the gear ratio is variable and is a function of the angle of rotation of the traction link. To describe such a profile, piecewise-spline approximations, which are modulated by introducing a state function are used [11].

The technical condition of gears can be interpreted as the recognition of classes of technical condition of the object on the set of its technical characteristics. To solve this problem, it is advisable to apply the mathematical theory of pattern recognition.

The technical condition of any, even almost perfectly made, gear-pair can be assessed in the course of work by means of signals of sensors of speed of rotation (SSR). This statement is true for a single pair of gears, as well as for complex gearboxes and multipliers. The advantage of this method when it's used for the analysis of the state of the gearbox is that the diagnosis is carried out "indiscriminately" in operating modes. All other methods, except vibration and analysis of the composition of impurities in the oil, require disassembly of equipment.

By changing the gear, experiments were performed for different types of defects. The magnetic measuring equipment was the same as in previous experiments. Gear module $m = 5,0$ mm, number of teeth $z = 49$. Measurements were performed in a mode close to static ($= 1$ mm, $= 2,5$ mm, $= 1$ mm, $= 2,5$ mm).

Obviously, when the tooth is broken, the information signal can be obtained by simply subtracting the reference and real signals using an amplitude discriminator. Wear of the teeth reduces the amplitude of the sensor signal in proportion to the change in the parameter δ . Change of the parameter δ from 0 to 0,2 mm corresponds to the change in signal amplitude by 1,5 – 2%. A defect in the tooth in the form of a crack or chip distorts the shape of the output signal of the sensor of the corresponding tooth with the defect. The discrepancy between the experimental data and the data obtained by theoretical calculation does not exceed 7-8%.

For traction drives of transport machines wear of active surfaces of teeth under the influence of friction forces is the main reason of failure. Wear S_E determined by the difference between the measurements of the thickness of the teeth at the height of the constant chord in the initial state and after the run of the transport machine L (km). The built chord on a traction and traction gear wheel of traction transmission with the module of 8 mm is located at a distance of 8,9 mm from the top of the teeth. At the same time values of wear of teeth in operation are allowed $S_{E1} = 1,8$ mm.

During normal operation of the gear transmission, a negligibly small part of the load is accounted for by the direct contact of individual micro-irregularities of the teeth and contact through abrasive particles. Therefore, most of the load is transmitted through the oil layer thickness h_c .

Under the actual plane of convergence of the active surfaces of the teeth we understand the plane of intersection A_c in relative units at the relative level $x = r_a - h_c$, where r_a – the average size of abrasive particles; h_c – the thickness of the

lubricating layer; $R_{\max} = \sqrt{R_{1\max}^2 + R_{2\max}^2}$ – the root mean square value of the maximum micro-irregularities of the interacting surfaces. When $r_a = \text{const}$ the actual convergence plane will be uniquely determined by the thickness of the lubricating layer:

$$A_x = b^2 \left[\frac{r_a - h_c}{R_{\max}} \right]^{2v}, \quad (14)$$

where b , v – coefficients. For teeth that have grown, $b=1$, $v=2.2$, $R_{\max} = 0.008 \text{ mm}$.

The linear wear of teeth S_e is considered to be directly proportional due to the fact that in this plane the abrasive particles, present in the oil, accelerate all types of wear of all moving surfaces of the teeth.

The formula characterizing the process of wear of the teeth of traction gears of transport vehicles, is written in the form:

$$S_{E1} = n_{n1} U K_K L f(h_c) f_1(A) f(S_{E1}) / f(H_{HRC}); \quad (15)$$

$$S_{E2} = n_{n2} U K_K L f(h_c) f_2(A) f(S_{E2}) / f(H_{HRC}); \quad (16)$$

$$f(h_c) = \left[0.25 - 1.6 \cdot 10^6 \alpha_{\beta}^{0.6} \mu_H^{0.5} V_{rk}^{0.6} \rho_r^{0.4} / (K_{qv} K_{M\rho} F_{H0} / b \omega^{0.2} V_{rc}^{0.8}) \right]^{4.4}; \quad (17)$$

$$f(A) = a \varepsilon_p^{0.7} r_A^{0.5} \left\{ 1 - \Phi^* \frac{\sigma_{F\lim b}^0 - \sigma_{A\lim b}^0}{0.45 \sigma_{A\lim b}^0} \right\}; \quad (18)$$

$$f(S_{E1}) = 0.36 + \exp(-2/S_{E1}), f(S_{E2}) = 0.5 + \exp(-2/S_{E2}); \quad (19)$$

$$f(H_{HRC}) = 0.53 + 0.016(H_{HRC} - 19), \quad (20)$$

where n_{n2} – the number of interactions of the teeth of the wheel per revolution of the wheel pair; K_K – coefficient that takes into account the climatic conditions of the machine; L – mileage of the car (km); $f(h_c), f(A), f(S_T), f(H_{HRC})$ – functions that take into account the dependence of the wear intensity of the teeth on the thickness of the lubricating layer, the characteristics of abrasive impurities, reducing the hardness of active surfaces, increasing internal dynamic loads with increasing wear of teeth, hardness of working surfaces of gears in the initial state; $\alpha_{\beta} \mu_H$ – piezoelectric viscosity coefficient (m/H²) and dynamic viscosity ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) at a constant mode of operation of traction transmission; $\varepsilon_A \approx 0.06\%$, $r_a \approx 0.002 \text{ mm}$,

$\sigma_{Alimb}^0 = 700 \text{ MPa}$ – the concentration of abrasive impurities in the oil as a percentage by volume, average size and average endurance of abrasive particles, a – coefficient that leads the function $f(A)$ to a value equal to the ratio of the number of abrasive particles in the lubricating layer to the number of points of the micro projections at the level r_a ($a = 2.5$); Φ^* – normal standard function; V_{rc}, V_{rk}, ρ_r – sliding speed, rolling (mm / s) and the given radius of curvature (mm), determined at the calculated point of contact r .

The dependence of the wear of the teeth on the mileage of the transport vehicle (armored personnel carrier) is shown in Fig. 1.

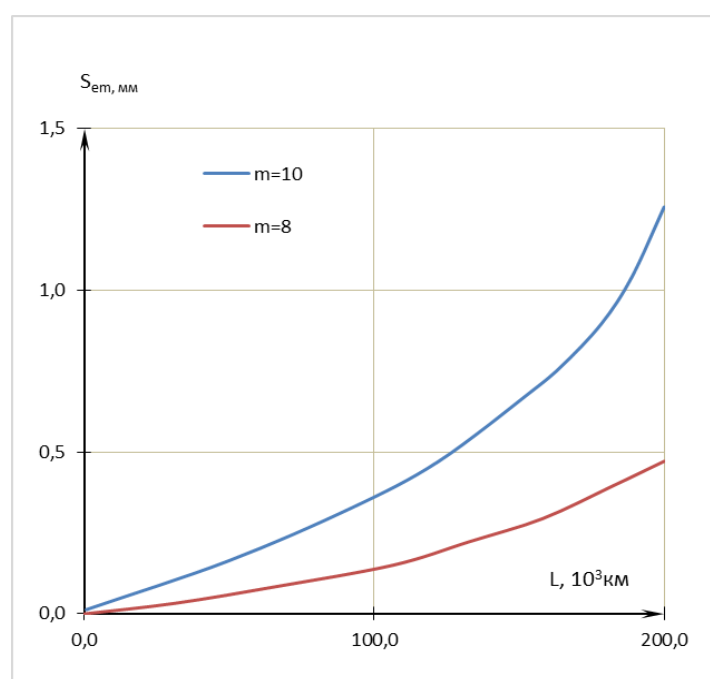


Fig. 1 – Dependence of gear wear based on the mileage of the transport vehicle

Tooth wear is conveniently assessed by the frequency spectrum of the transducer signals. When using the geometric dimensions of the tooth, its frequency spectrum is shifted to a higher frequency range. The wear of the teeth is caused by the appearance in the spectrum of unacceptable frequencies.

To carry out such control, it is necessary that the primary IP give a signal not only on the presence or absence of a tooth at a certain point on the gear but also show that the signal reflects the shape and geometric dimensions of the tooth.

When sampling the information signal, i.e., during the transition $x(t) = x_\partial(nT_0)$, where T_0 – sampling period, information signal spectrum $x_\partial(nT_0)$

becomes periodic with the frequency of signal repetition $\omega = n \frac{2\pi}{T_0}$ or $f = nf_0 = n \frac{1}{T_0}$,

where $n = \overline{1, N}$.

While the periodic dependence of the time function has a discrete spectrum, the spectrum of the discrete function obtained by measuring samples of duration NT_0 , is periodic. From this periodicity of the discrete Fourier transform (DFT) the requirement for sampling frequency is established f_0 . Duplicate DFT spectra should not overlap. This occurs when the highest frequency of the information signal $f_{\max}$ does not exceed half the sampling frequency:

$$f_{\max} < 0.5f_0, \omega_{\max} < \frac{1}{2} \frac{2\pi}{T_0}. \quad (21)$$

In practice, the maximum signal frequency is determined by the frequency of the low-pass filter. The amplitude characteristic of this filter at the cutoff frequency drops to zero not vertically, but with some slope. Due to this, the sampling rate f_0 and cutoff frequency $f_{\max}$ should differ more than twice. Therefore, the sampling frequency is chosen to be 5-8 times higher than the upper cutoff frequency of the signal.

Due to the fact that the number of discrete data is limited, and the sampling time should be chosen equal to the period of rotation of the gear, the amplitudes of the spectrum can be calculated only for a limited number of discrete frequencies. The time of full rotation of the gear wheel will be the window through which the information signal is considered. The algorithm for calculating the spectrum of the information signal is following:

$$X_{\partial}(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_0) e^{-j\omega nT_0} = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_0) \cos \omega nT_0 - j \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_0) \sin \omega nT_0. \quad (22)$$

Values $X_{\partial}(j\omega)$ can be calculated for any frequency value.

Each spectral line consists of one real and one imaginary part. Hence, from the existing N selections, it is possible to determine the amplitudes and phases for $N/2$ discrete frequencies.

In the area between $f = 0$ and $f = f_0$ frequency lines can be built:

$$\omega_k = k \frac{2\pi}{NT_0}, k = \overline{0, N-1}. \quad (23)$$

If ω on ω_k , the usual form of DFT writing is observed:

$$X_{\partial}(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_0) e^{-j2k\pi n/N} \quad (24)$$

or simplified

$$W_N^{nk} = e^{-j2\pi nk/N}$$

can be written

$$X_{\partial}(j\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_0) W_N^{nk}. \quad (25)$$

The upper frequency of the information signal of the primary IP diagnostic system is determined by the speed of rotation of the gear, shape, geometric dimensions of the tooth, the parameters of the magnetic system IP.

To determine the information signal as a function, it is necessary to solve the problem of calculating the magnetic field in the magnetic system of the converter and calculate its conversion functions.

The conversion function establishes a relationship between the parameters of one gear of the gear and the parameters of the output signal of the sensor. The function of sensor conversion due to the complex relationship between the parameters of the tooth characteristics of the output signal cannot be expressed as an analytical dependence and appears as a numerical calculation algorithm, which is embedded in the computational monitoring system.

Summary

The research is aimed at revealing the problems of modeling technical diagnostics of mechanisms and machines. To assess the technical condition of machines and the formation of diagnostic features, a method based on the use of mathematical theory of pattern recognition is proposed. It is shown that technical diagnostics of machines and mechanisms can be interpreted as recognition of classes of technical condition of object on set of its technical characteristics. At the same time, it is established to what class the current recognized state belongs. The solution of the recognition problem is based on the comparison of a posteriori information on the a priori description of classes using the recognition algorithm. It is revealed that the states of recognizable machines and mechanisms can be deterministic, probabilistic, and logical. Deterministic features take specific

numerical values on the set U and geometrically represent the coordinates of a point in the n -dimensional space of features. Probabilistic features are random, they determine the probability of correct measurement of numerical values of deterministic features. It is shown that for classification of states of machines and mechanisms it is more convenient to use not a reference vector, and a reference surface. The recognition of the tested state is carried out by estimating the angle between the normal vectors drawn to the corresponding points of the feature space and the space of the actual state. For each class of machines and mechanisms, reference curves are formed - in some way approximated and averaged within the class values of diagnostic features, as well as their threshold values are formed, which correspond to the limit values of the diagnosed parameters of the technical condition.

The conducted research is covered against the background of the assessment of gear defects. Such studies have shown that in the early stages of defect development there is a process when synchronous components do not grow, and all the extra power from the defect is concentrated in asynchronous harmonics. In particular:

- When centering a gearbox or multiplier with a drive motor or actuator, the spectral pattern changes not only of the first three rotational harmonics of the speed of the centered shaft, but also there are characteristic harmonics of the gear frequency. The second, and sometimes the third harmonics of the rotational frequency of the shaft rotation increases, also the second, and sometimes the third, harmonics of the gear frequency appear on the spectrum of the vibration signal of the gear pair.;

- Assessment of the condition of the gear pair with a cracked (broken) tooth is facilitated by the fact that such a defect leads to a significant increase in the overall level of vibration on the gearbox. In the gearbox with suspicion of such a defect it is necessary to register and review the form of the time signal of vibration of the gear pair. If such a defect does occur, then the time signal shows periodic shocks that appear with a time interval of 0.1 s, which corresponds to the speed of the input shaft of the gearbox, which is equal to 10 Hz.

- Harmonics from the "beating" of the lateral frequencies of different shafts were detected on the spectra of vibration signals from gear pairs. This is expressed in the presence of new side harmonics removed from the peak of the harmonic of the gear frequency by an amount equal to the sum or difference of the rotational frequencies of the input and output shaft.

– With the incorrect landing of the gear ring on the shaft, bending of the gear shaft, non-parallelism of the gear shaft pairs, which leads to the eccentricity of the gear ring gear relative to the actual center of rotation of the gear shaft, there is increased vibration of gear pairs.

– A similar spectral picture of the distribution of harmonics in the spectrum also gives a significant increase in the gaps in the bearings of the shaft, when due to forces in the engagement or other reasons there is a significant shift and vibration of the shaft relative to the ideal, calculated axis. In the vibrational spectrum, such defects, regardless of their root causes, appear as a set of a large number of sidebands (more than four) near the frequency of engagement, which are divided into a frequency step equal to the speed of the shaft with eccentric gear.

REFERENCES

1. Kholodilov O.V. Diagnostics of wear of movable mates. *Tribology. Research and applications*. 1993. P.413 – 423.
2. Berestnev Y.O., Ishin N.N. New methods for experimental determination of criterial parameters of dynamic systems of drive mechanisms. Minsk: UE "Technoprint", 2004. 117 p.
3. Dubovoi V.M. Identification and modeling of technological objects and systems. Tutorial. Vinnytsia: VNTU, 2012. 310 p.
4. Acar Y., Kadipasaoglu S., Schipperijn P. A decision support framework for global supply chain modelling: An assessment of the impact of demand, supply and lead – time uncertainties on performance. *Intern. J. of Production Research*. 2010. Vol. 48, N 11. P. 3245-3268.
5. Statnikov I.N., Firsov G.I. Interactive structuring of the parameter space in the design of dynamic systems. *Dispatch of TGTU*, 2015. V. 21, № 1. P. 36 – 41.
6. Senchenkov V.I. Mathematical apparatus for diagnosing complex technical systems. *Izv. Universities. Instrumentation*. 2016. T. 59, № 7. P. 547 – 557.
7. Provolotsky A.E., Kadilnikova T.M. Monitoring systems for assessing the technical condition of machines. Dnepropetrovsk, 2005. 172p.
8. G.G. Shvachych, V.U. Hrygorenko, T.M. Kadylnykova, L.F. Sushko Computer system of comprehensive assessment of technical condition of functions of mechanics. *World Science*. 2019. № 9(49), Vol. 1. P. 4 – 11.
9. G.G. Shvachych, I.A. Pobochii, O.V. Ivaschenko, L.F. Sushko Mathematical modeling of thermophysical properties of materials using inverse methods. *Dispatch of Kherson National Technical University*. 2019. №2(69), V. 3. P. 210 – 215.
10. Sushko L.F. Mathematical modeling of the process of recognizing the technical condition of gears. *Dispatch of Kherson National Technical University*. 2018. № 3(66), P. 2. P. 306 – 310.
11. V. P. Onishchenko, Mathematical description of tooth profiles when modeling their wear. *Progressive technologies and engineering systems: International collection of scientific papers. Volume 10. Donetsk*, 2000. P. 188 – 197.

Received 03.02.2022.

Accepted 17.02.2022.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕХАНІЗМІВ

Дані дослідження спрямовані на розкриття основних особливостей технічної діагностики механізмів та машин. Для оцінки технічного стану машин та формування діагностичних ознак запропоновано метод, заснований на використанні математичної теорії розпізнавання образів. Показано, що технічну діагностику машин і механізмів можна трактувати як розпізнавання класів технічного стану об'єкта за сукупністю його технічних характеристик. При цьому встановлюється, до якого класу належить поточний стан, що розпізнається. Розв'язання задачі розпізнавання здійснюється на основі порівняння апостеріорної інформації за апріорним описом класів за допомогою алгоритму розпізнавання.

Проведені дослідження, виділені на фоні оцінки дефектів передач, показали, що інформація про технічний стан при програмуванні діагностичних досліджень зубчастих передач є узагальненою, тобто описує зміну конструктивних параметрів у часі. При цьому виникає проблема оперативного реагування у функції часу на відхилення структурних параметрів від їх еталону. Це може бути досягнуте шляхом переходу від загальних функціональних описів характеристик зубчастих передач до оперативних команд у функції часу для виконавчих органів.

Прогнозування працездатності зубчастої передачі прямо пов'язане з детальним аналізом спрацювання зубців у відповідних точках контакту. На відміну від зачеплення неспрацьованих зубців, які мають постійне значення передатного числа, для профілю спрацьованих зубців передатне число змінне і є функцією кута повороту тягової ланки передачі. Для опису такого профілю використовуються кусково-сплайнові апроксимації, які модулюються завдяки введенню функції стану.

Ключові слова: діагностика, механізми, машини, розпізнавання образів, технічний стан, дефекти, зубчасті передачі.

SOME ASPECTS OF MODELING OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF MECHANISMS

This research aimed at revealing the main features of technical diagnostics of mechanisms and machines. To assess the technical condition of machines and the formation of diagnostic features, a method based on the usage of a mathematical theory of pattern

recognition is proposed. It is shown that technical diagnostics of machines and mechanisms can be interpreted as the recognition of classes of technical condition of the object by the set of its technical characteristics. At the same time, it is established to which class the currently recognized state belongs. The solution of the recognition problem is carried out based on comparison of a posteriori information according to the a priori description of classes with the help of the recognition algorithm.

Conducted studies highlighted against the background of the assessment of gear defects had shown that information on the technical condition in the programming of diagnostic studies of gears is generalized, i.e., it describes the change in structural parameters over time. This raises the problem of rapid response as a function of time to deviations of structural parameters from their standard. This can be achieved by moving from general functional descriptions of gear characteristics to operational commands as a function of time for executive bodies.

The prediction of gear performance is directly related to the detailed analysis of the operation of the teeth at the appropriate points of contact. In contrast to the engagement of non-actuated teeth, which have a constant value of the gear ratio, for the profile of the actuated teeth, the gear ratio is variable and is a function of the angle of rotation of the traction transmission. To describe such a profile, piecewise spline approximations, which are modulated by introducing a state function, are used.

Keywords: diagnostics, mechanisms, machines, pattern recognition, technical status, defects, gear transmissions.

Сушко Лариса Федорівна – старший викладач кафедри вищої математики та фізики Дніпровського державного аграрно-економічного університету, Дніпро, Україна.

Sushko Larysa – Senior Lecturer, Department of Mathematics and Physics, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ФАКЕЛУ ДОГОРЯННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ У КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ

Анотація. Киснево-конвертерний процес супроводжується виділенням значного обсягу газів, що за умов допалювання формують факел над горловиною конвертера. Він є додатковим джерелом тепла у конвертері та за зміною його характеру можливо оцінити особливості протікання продувки плавки. Проте зареєструвати та проаналізувати показники факела досить складно через значну температуру над горловиною агрегату та великий обсяг виділення пилу під час продувки плавки. І, якщо дрібні часточки пилу можуть значно нагріватися в реальних умовах агрегату й підсилювати показники факела, то значно більші часточки можуть перешкоджати цьому. У роботі було проведено фізичне моделювання на одиничному газовому факелі впливу часток розміром 250-300 мкм різного хімічного складу (що відповідає киснево-конвертерному процесу) на можливість реєстрації фізичних показників факела допалювання: теплопередачі, світимості (яскравості) та електричних характеристик. Встановлено, що через природний коливальний характер полум'я отримані за допомогою спеціальних датчиків величини потрібно інтегрувати, й вплив високих температур та наявності часток пилу на обладнання також створюють похибку у вимірюванні. За результатами досліджень зроблено висновок, що вимір електричних характеристик факела догорання газів може бути використаний у якості параметру для контролю процесу конвертування завдяки оперативності визначення та відсутності значного впливу на точність виміру надлишкової температури і запиленості.

Ключові слова: фізичне моделювання, кисневе конвертування, факел допалювання відхідних газів, теплопровідність, яскравість електропровідність полум'я.

Актуальність та завдання дослідження

На сьогоднішній день, не дивлячись на високий рівень розвитку сучасної вимірювальної техніки, агресивне високотемпературне середовище, з високим ступенем запиленості, не дозволяє проводити прямий контроль процесів, які

зумовлюють теплові та фізико-хімічні показники кисневого конвертування безпосередньо у порожнині кисневого конвертера [1-3]. Найближчою ділянкою, що може дозволити оперативно отримувати інформацію щодо процесів у агрегаті є горловина конвертера над якою формується факел допалювання відхідних газів. Саме зміна показників факелу допалювання, що відбувається внаслідок зміни основних процесів у агрегаті, у досвідчених операторів є індикатором певних фізико-хімічних перетворень, що відбуваються за ходом продувки. Проте такий підхід є дуже суб'єктивним. Сам факел має ряд фізичних характеристик: тепловий потік, яскравість, що проявляється у досить широкому діапазоні спектру, електричні характеристики [4-7]. Особливості перебігу хімічних перетворень повинні чинити зміну оптичних та геометричних характеристик факелу і, як наслідок, відбиватися на його фізичних характеристиках. А значить, реєстрація фізичних характеристик факелу може дозволити отримати інформацію щодо фізико-хімічних процесів, які протікають у агрегаті. Таким чином актуальним є дослідження можливості адекватної реєстрації актуальних у часі фізичних характеристик факелу допалювання конвертерних газів з урахуванням умов реального агрегату (температура, ступінь запиленості середовища).

Апаратура та методи дослідження

Були проаналізовані наступні методи визначення фізичних показників стану газового факелу: по інтегральній теплопередачі (щільність теплового потоку); по світимості (яскравості) газового факелу; по електричним характеристикам газового факелу (електропровідності). Дослідження було проведено на лабораторній установці, яка імітувала одиничний запилений газовий факел (при змінах типу твердих часток). З цією метою була створена експериментальна установка спеціальної конструкції, принципова схема якої представлена на рис. 1, яка була оснащена сталевим кожухом, що ізолював модель одиничного факелу від впливів зовнішнього середовища. У якості палива для пальника використовували зріджену пропан-бутанову суміш, що подавали з заданою витратою та тиском (ротаметр РМ016Г та манометр ДМ 05160 М (0-60 кПа). Порошок для імітації запиленості подавався безпосередньо у полум'я за допомогою живильника шнекового типу з електричним приводом. Для реєстрації фізичних показників факелу в одну з бокових відносно полум'я

стінок моделі було вмонтовано пластину з фотодіодами та термоелектричним перетворювачем (фотодіод ІК 940-для реєстрації інфрачервоного спектру (ІЧ), ТЕМТ6000 - аналоговий датчик освітленості, ML8511 - датчик ультрафіолетового випромінювання (УФ), термістор опором 20 кОм для перерахунку тепловіддачі [8]) показники яких реєструвалися аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) та безперервно записувалися на персональний комп'ютер. Паралельно проводилась фіксація та передача на АЦП електричних показників факелу (електропровідності).

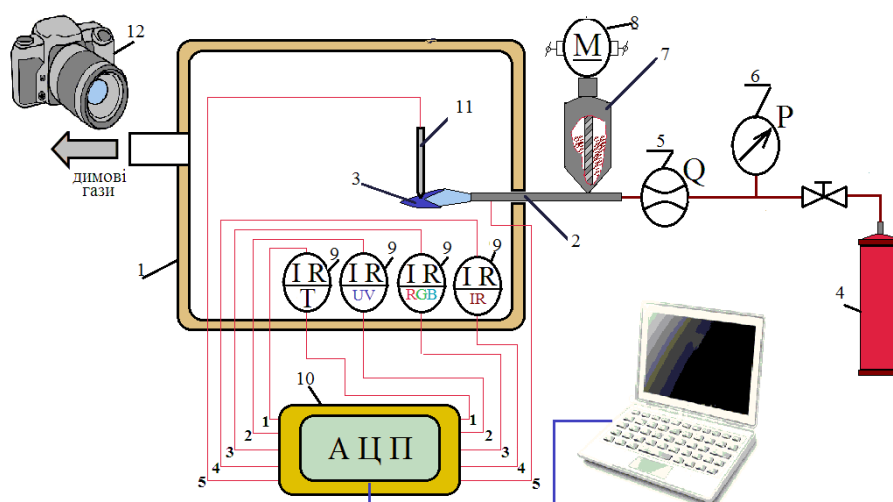


Рисунок 1 – Схема та фото експериментальної установки: 1 – кожух моделі; 2 – газовий пальник із соплом; 3 – полум'я факелу; 4 – газовий балон; 5 – ротаметр; 6 – манометр; 7 – шнековий живильник з порошком; 8 – електропривод; 9 – датчики реєстрації показників факелу; 10 – АЦП; 11 – датчик заміру електропровідності; 12 – відеокамера

Ланцюг виміру складав 3 - 8 калібрів від сопла пальника до точки встановлення молибденового електроду діаметром - 1000 мкм, орієнтованого перпендикулярно до повздовжньої вісі факелу. Синхронно до запису оптичних, температурних та електричних характеристик палаючого факелу проводилась відео фіксація характерних візуальних змін. Реєстрацію фізичних показників палаючого факелу проводили як в умовах чистого факелу (без подачі пилоподібного порошку різного складу) так і в умовах запиленості при стабільній подачі порошку у полум'я для досягнення умов запиленості на рівні, що реєструється під час конвертерної продувки ванни. У якості порошоків для імітації запиленості факела використовували різні речовини: графіт, сажу,

порошок заліза, а також оксиди заліза (II) та (III), кальцію, кремнію, магнію (фракція порошоків варіювалася в діапазоні 250 - 300 мкм).

Оскільки в ході кожного дослідження електросхема з датчиками неминує нагрівалася і, таким чином, показники датчиків набували похибки, перед кожним дослідом модель охолоджували до кімнатної температури природним шляхом.

Результати дослідження та їх обговорення

На рисунку 2 зображені найбільш характерні фото дослідів з подачі в факел різних порошоків. Візуально встановлено, що пряма подача у палаючий факел твердих частинок, які не окислюються проявляється у появі жовтого або жовто-помаранчевого кольору у забарвленні полум'я та збільшенні його видимих габаритів через неповне допалювання паливної суміші у порівнянні з варіантом чистого горіння (без пилу). Такий прояв характерний для частинок оксидів кремнію, кальцію та магнію й оксиду заліза (III). Частинок, які можуть окислюватися при контакті з палаючим факелом, крім збільшення видимої частини, спричиняють значне підвищення візуальної яскравості полум'я та характеризуються наявністю палаючих іскор.

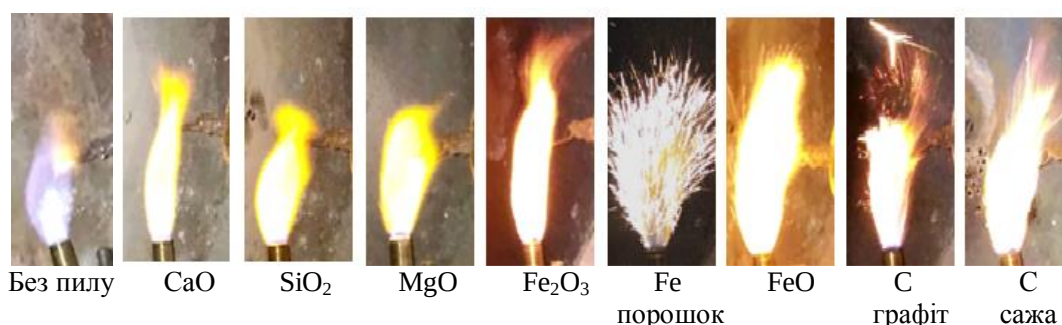


Рисунок 2 – Характерні фото полум'я у тому числі при безпосередній подачі твердих порошкових компонентів

Зазначена особливість є характерною для часток оксидів заліза (II), графіту, сажі і особливо відмічено для дрібних частинок заліза. Для умов подачі частинок заліза було відмічено найбільш яскравий факел з найбільшими розмірами лінійних показників, який складався з великої кількості палаючих іскор.

Щодо зареєстрованих фізичних показників факелу перш за все було відмічено, що отримані протягом експерименту данні мають коливальний характер, що спостерігається, перш за все через коливальний характер полум'я.

Відповідно отримані результати необхідно інтегрувати за часом (30 сек). Середні значення результатів вимірювання фізичних характеристик факелу надані на рисунку 3. Встановлено, що подача будь-якого твердого матеріалу з температурою нижчою за температуру факела та не схильного до горіння негативно відбивається на теплопередачі від нього навіть при візуальному збільшенні яскравості та довжини полум'я (див.рис. 3 А). Виключення складають компоненти, що здатні окислюватися (оксид заліза II та залізний порошок). Отриманий результат відповідає встановленим візуально фактам зміни кольору факелу при потраплянні у нього частинок, які не горять, що вказує на фактичне зниження температури факела та кореспондуються з результатами роботи [9].

Стосовно особливостей зміни випромінювання факелу у різних частинах спектру встановлено, перш за все, що рівень зареєстрованих показників для трьох діапазонів спектру був досить різним: для ультрафіолетового спектру відмічено досить низький рівень показників; інфрачервоній частині спектру відповідали посередні показники; денний спектр випромінювання характеризувався найбільш значимими показниками (див. рис. 3 Б). Поява часток пилу різного характеру у палаючому факелі значно змінювала показники випромінювання у порівнянні з чистим полум'ям. При цьому найменший зворотній зв'язок мав показник УФ спектру, а найбільший – денного спектру. Так частки оксидів кремнію, кальцію, магнію, заліза, графіту чи сажі підвищували яскравість у всіх діапазонах спектру, що вивчалися. Це відбувалося через неповне згоряння газової суміші з формуванням сажистих часток, що випромінюють у цих діапазонах, та збільшенню видимої частини факелу (здебільшого жовтогарячого кольору). Проте рівень різниці показників випромінювання при потраплянні у факел оксидів заліза чи кремнію, часток сажі чи графіту був майже однаковий.

Щодо виміру електропровідності полум'я (див. рис. 3В), встановлено, що потрапляння часток різної природи у факел сприяло підвищенню цього показника.

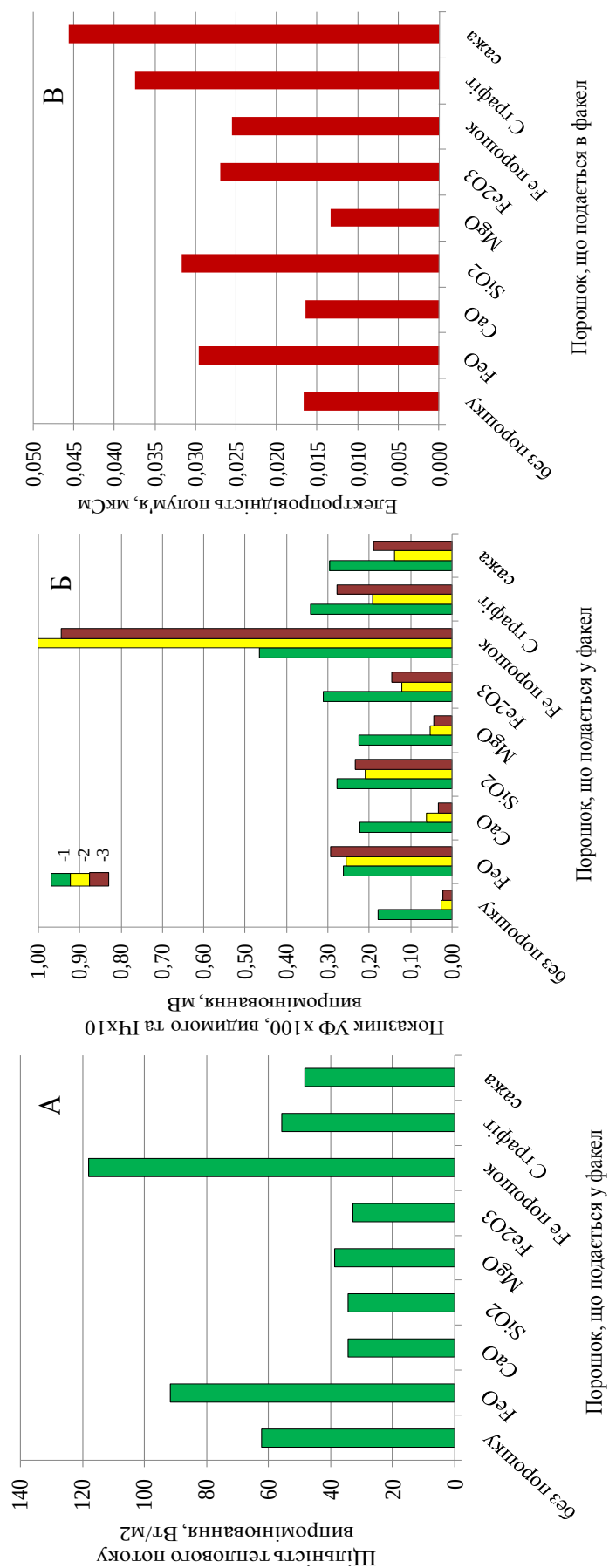


Рисунок 3 – Середній рівень результатів виміру щільності теплового потоку (А) світлості у широкому діапазоні спектру (Б: 1 – інфрачервоний, 2 – ультрафіолетовий та 3 – видимий спектри) тт. електропровідності (В) у тому числі при подачі твердих частинок різних компонентів у полум'я

При цьому було відмічено, що частки оксидів заліза та кремнію сприяли підвищенню показника електропровідності приблизно у два рази, а, наприклад, потрапляння часток сажі чи графіту, що можуть бути показниками ступеня згоряння факелу (повноти допалювання CO до CO_2), відбивалися у збільшенні показників у 2,5-3 рази. Тобто за величиною зміни електропровідності полум'я можливо робити висновок про природу часток, що до нього потрапляють, а значить опосередковано й про процеси, що супроводжують їх утворення. Відповідно, реєстрація цього показника в умовах, наближених до агресивних промислових умов, дозволить отримати більш достовірну інформацію щодо зміни характеру полум'я в залежності від, наприклад, ступеня допалювання відхідних газів, через можливість виокремити серед отриманих результатів потрібний результат.

Висновок

В ході проведення досліджень було проаналізовано можливість використання для аналізу процесів в факелі сумарного теплового потоку, випромінювання у видимій, інфрачервоній та ультрафіолетовій ділянках спектру та електричної провідності факелу. Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що саме вимір електричних характеристик факелу догоряння газів, що відходять з порожнини конвертера, може бути використаний у якості параметру для контролю процесу, наприклад, допалювання. Зазначений спосіб контролю ходу окислення має ряд переваг перед іншими технічними рішеннями: оперативність визначення – заміри здійснюються безпосередньо на горловині конвертера; відсутність впливу на точність виміру надлишкової температури і ступеня запиленості.

ЛІТЕРАТУРА

1. A temperature prediction model of converters based on gas analysis/ Wu Ling, Yang Ningchuan, You Xiangmi, Xing Kaixin , Hu Yan// *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011. 2(1), P. 14 – 19
2. M. K. Shin, S. D. Lee, S. H. Joo, J. K. Yoon. A Numerical Study on the Combustion Phenomena Occurring at the Post Combustion Stage in Bath type Smelting Reduction Furnace. *ISIJ International*. 1993. Vol. 33, No. 3. P.369 - 375.
3. Богушевский В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А., Жук С.В. Реализация модели управления конвертной плавкой в системе принятия решений. Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы. 2010. №1 (25). С. 101-105
4. Specific features of the diffusion flame in the transition from the laminar to turbulent regime of combustion/ V. S. Kozulin, V. L. Krainev, V. L. Krainev, P. K. Tretyakov, A. V. Tupikin. *Combustion Explosion and Shock Waves*. 2014. 50(6). P.742-744
5. Golub V. V., Volodin V. V. and Krivokorytov M. S. Acoustic control of the structure of the gas torch. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol.774. P.1-8
6. Masataka Arai, Hiroyuki Sato, Kenji Amagai. Gravity effects on stability and flickering motion of diffusion flames. *Combustion and Flame*. 2009. Vol.118(1-2). P. 293-300
7. Крыжановский Ю.В., Крыжановский В.Н. Структура и расчет газового факела. К., 2012. 96 с.

8. Румянцев В.Д. Теория тепло - и массообмена. Днепропетровск, 2006. 532 с.
9. Дослідження на фізичній моделі особливостей впливу запиленості середовища на якісні показники газового, палаючого факелу/ Л.С. Молчанов, Т.С. Голуб, Є.В.Синегін, С.І.Семикін. Сучасні проблеми металургії. 2021.№24. С. 90-97

REFERENCES

1. A temperature prediction model of converters based on gas analysis/ Wu Ling, Yang Ningchuan, You Xiangmi, Xing Kaixin , Hu Yan// Procedia Earth and Planetary Science. 2011. 2(1), P. 14 – 19
2. M. K. Shin, S. D. Lee, S. H. Joo, J. K. Yoon. A Numerical Study on the Combustion Phenomena Occurring at the Post Combustion Stage in Bath type Smelting Reduction Furnace. ISIJ International. 1993. Vol. 33, No. 3. P.369 - 375.
3. Bogushevskiy V.S., Suhenko V.Yu., Sergeeva Ye.A., Zhuk S.V. Realizacia modeli upravleniia konverternoy plavkoy v sisteme prinianiia resheniy. Avtomatika. Avtomatizaciia. Elektricheskie kompleksi i sistemy.2010.№1 (25). С. 101-105 [in Russian]
4. Specific features of the diffusion flame in the transition from the laminar to turbulent regime of combustion/ V. S. Kozulin, V. L. Krainev, V. L. Krainev, P. K. Tretyakov, A. V. Tupikin. Combustion Explosion and Shock Waves. 2014. 50(6). P.742-744
5. Golub V. V., Volodin V. V. and Krivokorytov M. S. Acoustic control of the structure of the gas torch. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol.774. P.1-8
6. Masataka Arai, Hiroyuki Sato, Kenji Amagai. Gravity effects on stability and flickering motion of diffusion flames. Combustion and Flame. 2009. Vol.118(1-2). P. 293-300
7. Kryzhanovskiy Yu.V., Kryzhanovskiy V.N. Struktura i reschet gazovogo fakela. K., 2012. 96 p. [in Russian]
8. Rumiantsev V.D. Teoriia teplo - i massoobmena. Dnepropetrovsk, 2006. 532 p. [in Russian]
9. Doslidzennia na fizichniy modeli osoblyvostey vplyvu zapylenosti seredovysha na yakisni pokaznyky gazovogo palauchogo fakelu / L.S. Molchanov, T.S. Golub, Ye.V.Sinegin, S.I.Semykin. Suchasni problemy metalurgii. 2021.№24. С. 90-97 [in Ukrainian]

Received 10.01.2022.

Accepted 25.01.2022.

UDK 669.184.14

T. Golub, L. Molchanov, S. Semykin

RESEARCH OF METHODS FOR MEASURING THE PHYSICAL PARAMETERS OF THE FLUE GAS POSTCOMBUSTION TORCH IN OXYGEN CONVERTER

The oxygen-converter process is accompanied by the release of a significant amount of off-gases, that under the conditions of postcombustion form a torch over the neck of the converter. It is an additional source of heat in the converter. Change the torch nature corresponds the peculiarities of the heat blowing. However, it is difficult to register and analyze the torch due to the significant temperature above the neck of the unit and the large amount of dust released during the blowing. And, if small particles of dust can considerably heat up in real conditions of the converter and strengthen indicators of a torch, much bigger particles can interfere with it. It was conducted a physical modeling on a single gas torch of 250-300 mm particles of different chemical composition (corresponding to the oxygen-converter process) influence on the possibility to register the physical characteristics of the postcombustion torch: heat transfer, luminosity (brightness) and electrical characteristics. Visually, it was established that the direct supply of non-oxidizing solid particles to the

burning torch turns the burning flame in yellow or yellow-orange color and the flame increases in size due to incomplete combustion of the fuel mixture compared to pure combustion (without dust). This manifestation is characteristic of particles of oxides of silicon, calcium and magnesium and iron (III) oxide. Particles that can be oxidized by contact with a burning torch, in addition to increasing the visible part, cause a significant increase in the visual brightness of the flame.

It was found that due to the natural oscillating nature of the flame, the values of physical characteristics of the flame obtained with the special sensors need to be integrated, and the effect of high temperatures and the presence of dust particles on the equipment also creates measurement error. According to the research results, it was concluded that the measurement of electrical characteristics of the postcombustion torch can be used as a parameter to control the converter process due to the efficiency of determination and lack of significant impact on the accuracy of measurement of excess temperature and dust. For example, the particles of iron and silicon oxides contributed to an increase in electrical conductivity of about two times in comparison with ordinary gas combustion, and the ingress of soot or graphite particles, which may be indicators of the degree of flare combustion (completeness of combustion CO to CO₂), was reflected in an increase of registered value in 2.5-3 times. That is, by the magnitude of the change in the electrical conductivity of the flame, it is possible to clear the nature of the particles that fall into it, and thus indirectly about the processes that accompany their formation.

Keywords: physical modeling, oxygen converter process, postcombustion torch, thermal conductivity and brightness of the torch, electrical conductivity of the torch.

Голуб Тетяна Сергіївна, к.т.н., старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Молчанов Лавр Сергійович, к.т.н, завідуючий відділом Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Семикін Сергій Іванович, к.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Golub Tetiana, Ph.D., senior researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy of Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine.

Molchanov Lavr, Ph.D., Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy of Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine.

Semykin Sergiy, Ph.D., senior researcher, senior researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy of Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine.

Д.О. Кононов, В.О. Єрмократьєв, В.А. Чеченев

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ
ЕЛЕМЕНТІВ ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОТУ З
ЕЛАСТИЧНОЮ ДИНАМІЧНО-АКТИВНОЮ ПОВЕРХНЕЮ**

Анотація. Мета роботи: експериментальне дослідження руху елементів вібраційного грохоту з еластичним ситом.

Методи дослідження: визначення прискорень елементів вібраційного грохота за допомогою датчиків-акселерометрів.

Проведено експериментальне дослідження руху елементів вібраційного грохоту та визначено основні кінематичні характеристики.

Розроблено схему вимірювального комплексу, в умовах роботи лабораторного вібраційного грохоту (частота коливань 25 Гц, максимальна амплітуда 4 мм). Запропоновано використовувати датчики MPU 6050, ADXL345 та мікроконтролерів Arduino Nano або STM32F103. Розроблено необхідне програмне забезпечення.

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок що еластичні елементи сита у вертикальній площині коливається з амплітудою 2-2,5 рази більше, ніж амплітуда коливання короба вібраційного грохота.

Ключові слова: вібраційний грохот, еластичне сито, MPU 6050, ADXL345, Arduino, STM32F103.

Постановка проблеми. Просіваюча поверхня (сито) вібраційного грохота є його основним вагонесучим робочим органом і її удосконалення нерозривно пов'язане з удосконаленням роботи всієї механічної системи даного типу вібраційної техніки. Для рішення специфічних задач, пов'язаних з удосконаленням ситових поверхонь вібраційних грохотів, конструкторам, технологам, механікам-експлуатаційникам необхідно розуміння характеру процесу коливань елементів вібраційного грохота, загалом, та просіваючої поверхні, зокрема.

Об'єктом лабораторних досліджень є процес коливань динамічно активній просіваючій поверхні з еластичними елементами вібраційного грохота.

Мета лабораторних досліджень: отримання кінематичних параметрів коливань просіваючій поверхні вібраційного грохота.

Задачі, які потрібно вирішити: розробити принципову схему установки для вимірювання прискорень елементів вібраційного грохоту з еластичною просіваючою поверхнею. в умовах роботи лабораторного вібраційного грохоту (частота коливань 25 гц, максимальна амплітуда 4 мм); розробити необхідне програмне забезпечення; провести порівняння кінематичних характеристик коливань точок короба вібраційного грохоту і еластичним ситом.

Опис лабораторного вібраційного грохота. Грохот (рис. 1) складається з наступних основних структурних вузлів і елементів: короба 1, який представляє собою зварну конструкцію, що складається з двох бортовин, з'єднаних між собою зв'язок-балками, віброзбудника 2, закріпленого на двох верхніх зв'язок-балках короба, самоочисної колосниково-карткової просіваючої поверхні 3, жорстко закріпленої хомутоподібними скобами на 4-х нижніх зв'язок-балках короба 1, системи пружних зв'язків - гумових віброізоляторів циліндричної форми 4, на які спирається короб моделі грохота, опорної рами 5 короба, жорстко закріпленого до бетонного фундаменту за допомогою анкерних болтів.

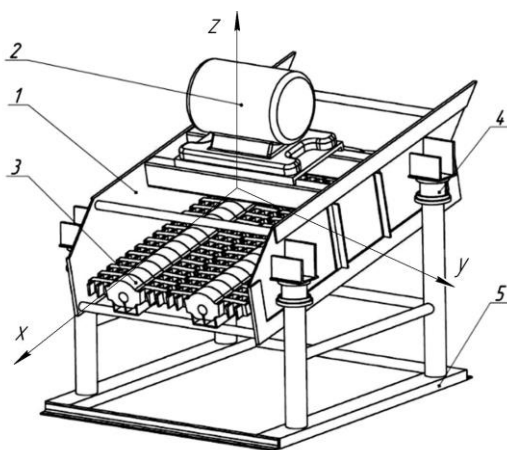


Рисунок 1 – Структурні елементи лабораторної моделі вібраційного грохота

Самоочисна колосниково-карткова просіваюча поверхня складається з окремих пружних колосниково-карткових елементів ККЕ, жорстко затиснених

в пазах поздовжніх колосникоподібних опор рейкоподібного поперечного перерізу і являє собою володіючий підвищеною рухливістю складовий секційний набірний комплект - карту. Трьохкомпонентна поздовжня колосникоподібна опора сформована з жорстко об'єднаних між собою за допомогою зварювання металевих частин - порожнистого трубчастого елемента 1, поздовжньої опорної пластини 2 і швелерного профілю 3.



Рисунок 2 – Загальний вид лабораторної установки із встановленим в коробі плоско-листовим металевим ситом



Рисунок 3 – Установка датчиков на эластичном картковом элементе просеивающей поверхности на вибрационном грохоте

Вібраційний грохот приводиться в рух регульованим віброприводом - одновальним інерційним віброзбуджувачем, на якому встановлено дебаланси зі змінною масою.

У вимірювальній установці використовується підключення 2-х датчиків MPU 6050 або ADXL345 до мікроконтролера Arduino Nano або STM32F103. Межа вимірювання даних датчиків лежить у межах $\pm 16g$, що відповідає параметрам роботи вібраційного грохоту. Частота дискретизації 1000 Гц. Підключення датчиків до мікроконтролера відбувається по інтерфейсу I2C. Частота запису даних на комп'ютер лежить у межах 250-500 Гц.

Початкові дані: частота коливання короба грохота 25 Гц; амплітуда коливань 3-5 мм. мм.

Установка датчиків показана на фотографіях (рис. 3)

Перша серія експериментів (при установці датчика MPU 6050 на поздовжньої балці).

Результати експерименту. На графіках (рис. 4-5) показані типові графіки зміни прискорень точок короба вібраційного грохота (поздовжня балка) при повному циклі роботи: від запуску до повної зупинки. Графіки побудовані в після математичній обробці значень, лічених з датчика MPU 6050.

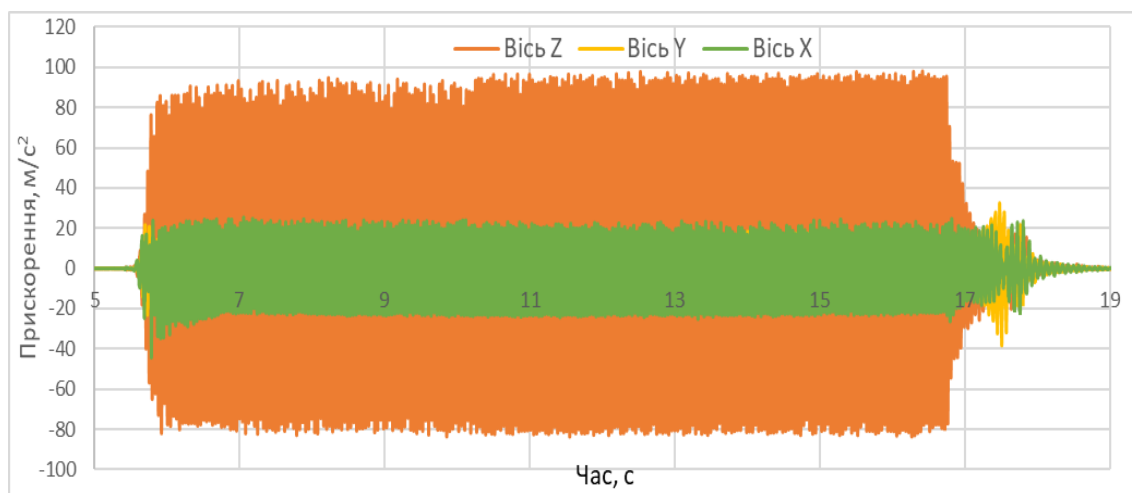


Рисунок 4 – Прискорення поперечної балки грохота

Результати обробки експерименту для сталих коливань зведені в таблицю 1.

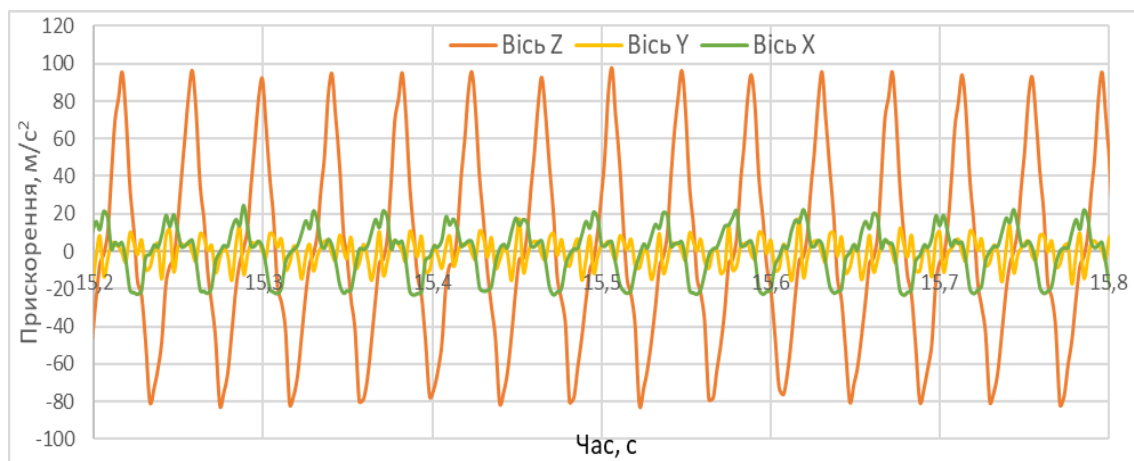


Рисунок 5 – Зміна прискорень поперечної балки грохота (збільшено)

Таблиця 1

Амплітуда прискорень при сталих коливаннях

Напрямок	вісь Z	ось Y	ось X
Середнє прискорення, м / с ²	90,38	35,36	34,78
Амплітуда коливань, мм	3,67	1,43	1,41

На цих графіку чітко видно зона вибігу (зупинки) грохота. Має місце збільшення амплітуди коливання прискорення короба грохота при проходженні резонансної частоти. Це явище характерне для роботи вібраційної машини з зарезонансним налаштуванням.

Варто відзначити, що збільшення амплітуди (при збігу власної частоти коливань з частотою коливання грохота) для різних напрямків не співпадає за часом. Звідси можна зробити висновок, що власні частоти коливань для різних напрямків мають таке співвідношення $f_y > f_z > f_x$.

В аналогічному співвідношенні знаходяться і наведені жорсткості в напрямку цих осей.

На вібраційних машинах з лінійним пружним зв'язком (з пружинами) збільшення амплітуди може досягати значень в 3-5 рази більше номінальних амплітуд.

На лабораторній установці кафедри МАМВ використовуються гумометалеві амортизатори, тому амплітуда при вибігу збільшується на 20-50% від номінальних значень.

Друга серія експериментів проводилася з двома датчиками MPU6050 і ADXL345. Датчик ADXL345 встановлюється на поздовжньої балці, а датчик MPU6050 на консолі еластичного елемента. Установка датчиків показана на рис. 3.

Таблиця 2

Узагальнені результати експерименту

Напрямок	вісь Z		ось Y		ось X	
Місце встановлення	Балка	сито	Балка	сито	Балка	сито
Середнє прискорення, м / с ²	50,84	96,40	25,56	70,45	26,25	29,27
Амплітуда коливань, мм	2,06	3,91	1,04	2,86	1,06	1,19

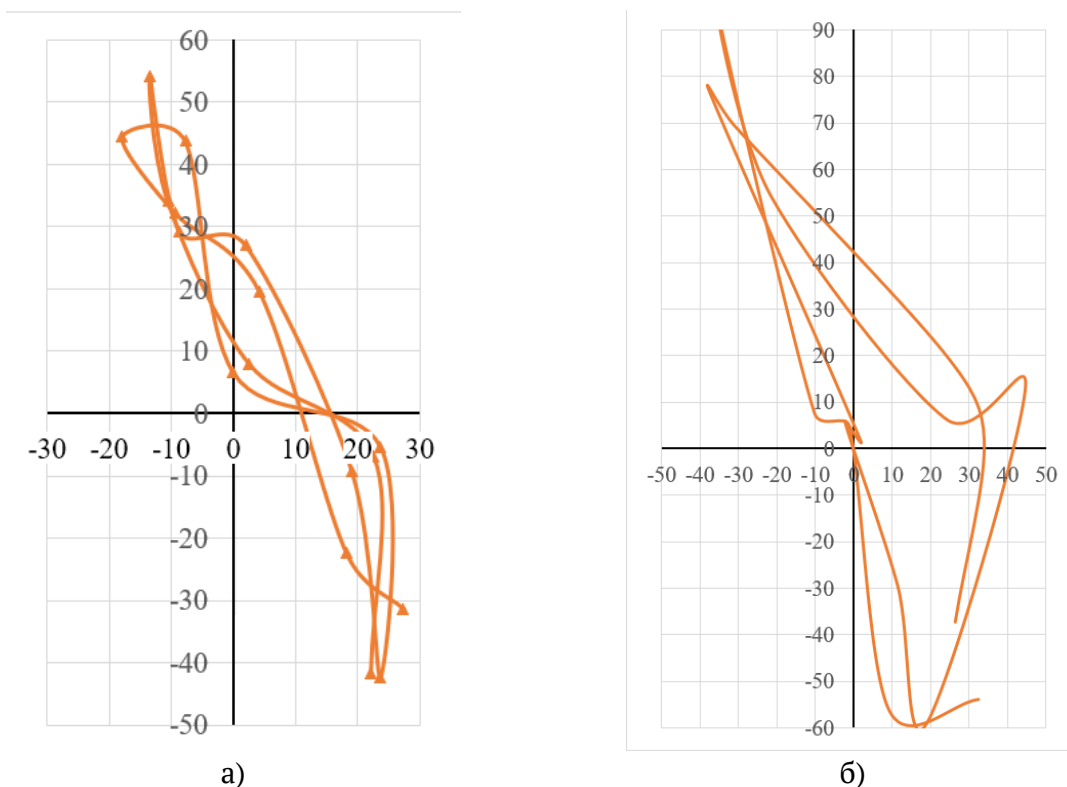


Рисунок 6 – Годограф прискорень:
а) поздовжня балка (датчик ADXL 345);
б) еластичний елемент «крило» (датчик MPU 6050)
(по осях відкладені прискорення в м/с²)

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок що еластичні елементи сита коливаються з амплітудою 2 2,5 рази більше, ніж амплітуда коливання власне вібраційного грохота.

У вертикальній площині збільшенні амплітуди досягає значень 1,9-2,1. Це повинно сприяти кращій сегрегації матеріалу на ситі і, відповідно, позитивно позначається на ефективності просівання.

У напрямку руху матеріалу збільшення амплітуд коливань досягає 2,5 рази, в момент вибігу. Значне збільшення амплітуди коливання в даному напрямку при проході резонансу, пояснюється тим, що власна частота коливання гумового елемента в даному напрямку є найменшою.

У поперечному напрямку збільшення амплітуди відбувається незначно, так як жорсткістю в даному напрямку дуже велика.

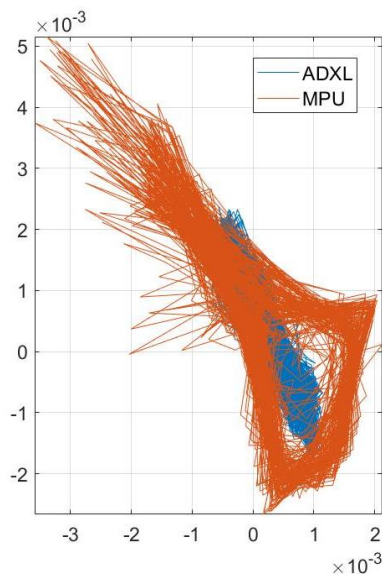


Рисунок 7 – Поля траєкторій руху досліджуваних точок (датчиків)

Висновки. Проведено експериментальне дослідження руху елементів еластичної динамічно-активної поверхні вібраційного грохоту для розсіву коксу для підвищення ефективності грохочення. Визначено основні кінематичні характеристики руху.

Розроблено схему вимірювального комплексу, в умовах роботи лабораторного вібраційного грохоту (частота коливань 25 Гц, максимальна амплітуда 4 мм).

У запропонованій вимірювальній установці використовується підключення 2-х датчиків MPU 6050 або ADXL345 до мікроконтролеру Arduino Nano або Mega2560). Розроблено необхідне програмне забезпечення.

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок що еластичні елементи сита коливається з амплітудою 2-2,5 рази більше, ніж амплітуда коливання власне вібраційного грохота. У вертикальній площині збільшенні амплітуди досягає значень 1,9-2,1. Це повинно сприяти кращій сегрегації матеріалу на ситі і, відповідно, позитивно позначається на ефективності просівання.

У напрямку руху матеріалу збільшення амплітуд коливань досягає 2,5 рази, в момент вибігу.

У поперечному напрямку збільшення амплітуди відбувається незначно, так як жорсткістю в даному напрямку дуже велика.

ЛІТЕРАТУРА

1. И.В. Пельх, С.В. Белодеденко, Д.А. Кононов, В.А. Петренко. Рациональная конструкция просеивающей поверхности вибрационного грохота металлургического производства /Металлургическая и горнорудная промышленность. -2009 –№4 –с. 79-82.
2. Л.А.Вайсберг «Исследования процессов, машин и аппаратов разделения материалов по крупности» Механобр 1988г.
3. 32-разрядные платы Arduino [Электронный ресурс]. URL: <http://mcucpu.ru/index.php/platformy-8-bit/arduino/95-arduino32bit> – (дата обращения: 12.05.2021).
4. Считывание, первичная обработка ускорений и углов наклона с MPU-6050 и запись их на SD карту ArduinoDUE / Михайлов В.Г., ведущий инженер, к.т.н, ООО «Мидивисана», г. Минск, УДК 004.9: 681.3
5. Модуль GY-521 DataSheet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000Datasheet1.pdf> – (дата обращения: 15.05.2021).

REFERENCES

1. I.V. Pelykh, S.V. Belodedenko, D.A. Kononov, V.A. Petrenko. Rational design of the screening surface of the vibrating screen of metallurgical production / Metallurgical and mining industry. - 2009 -№4 -p. 79-82.
2. L.A. Vaisberg “Research of processes, machines and apparatuses for separating materials by size” Mekhanobr 1988.
3. 32-bit Arduino boards [Electronic resource]. URL: <http://mcucpu.ru/index.php/platformy-8-bit/arduino/95-arduino32bit> - (date of access: 05/12/2021).
4. Reading, primary processing of accelerations and tilt angles from the MPU-6050 and writing them to the ArduinoDUE SD card / Mikhailov V.G., Leading Engineer, Ph.D., Midivisana LLC, Minsk, UDC 004.9: 681.3
5. Module GY-521 DataSheet [Electronic resource]. URL: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000Datasheet1.pdf> - (accessed 05/15/2021).

Received 14.02.2022.

Accepted 28.02.2022.

UDC 621.928.024.1

D. Kononov, V. Ermokratiev, V. Chechenev

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MOTION OF VIBRATING SCREEN ELEMENTS WITH ELASTIC DYNAMICALLY ACTIVE SURFACE

Purpose: experimental study of the movement of vibrating screen elements with an elastic sieve.

Research methods: determination of accelerations of vibrating screen elements using accelerometer sensors.

An experimental study of the movement of vibrating screen elements was performed and the main kinematic characteristics were determined.

The scheme of the measuring complex is developed, in the conditions of laboratory vibrating screen operation (oscillation frequency 25 Hz, maximum amplitude 4 mm). The measuring device uses the connection of 2 MPU 6050 or ADXL345 sensors to an Arduino

Nano or STM32F103 microcontroller. The measurement limit of these sensors is within $\pm 16g$, which corresponds to the parameters of the vibrating screen.

It should be noted that the increase in amplitude (when the natural frequency of oscillation coincides with the frequency of oscillation of the screen) for different directions does not coincide in time. From this we can conclude that the natural frequencies of oscillations for different directions have the following ratio of free frequencies of oscillations $f_y > f_z > f_x$.

Analyzing the obtained data, we can conclude that the elastic elements of the sieve oscillates with an amplitude of 2-2.5 times greater than the amplitude of oscillations of the actual vibrating screen. In the vertical plane, the increase in amplitude reaches values of 1.9-2.1. This should contribute to better segregation of the material on the sieve and, accordingly, have a positive effect on the efficiency of sieving.

In the direction of movement of the material, the increase in the amplitude of oscillations reaches 2.5 times at the time of run-out.

In the transverse direction, the increase in amplitude is negligible, as the stiffness in this direction is very high.

Keywords: vibrating screen, elastic sieve, MPU 6050, ADXL345, Arduino, STM32F103.

Кононов Дмитро Олександрович, Український державний університет науки та технології, доцент кафедри машин і агрегатів металургійного виробництва, к.т.н.

Єрмократьєв Віктор Олексійович, Український державний університет науки та технології, доцент кафедри машин і агрегатів металургійного виробництва, к.т.н.

Чеченев Володимир Андрійович, Український державний університет науки та технології, доцент кафедри машин і агрегатів металургійного виробництва, д.т.н.

Kononov Dmytro, Ukrainian State University of Science and Technology, Associate Professor of the Department of Machines and Units of Metallurgical Production, Ph.D.

Yermokratiev Viktor, Ukrainian State University of Science and Technology, Associate Professor of the Department of Machines and Units of Metallurgical Production, Ph.D.

Chechenev Volodymyr, Ukrainian State University of Science and Technology, Professor, Doctor of Technical Sciences.

А.П. Шевченко, В.Г. Кисляков, Б.В. Двоскін, І.О. Маначин, К.І. Чубін

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВМІСТУ СІРКИ В ЧАВУНІ І СКЛАДУ ШЛАКУ НА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕРЕРОБАХ ПРИ ПОДГОТОВЦІ ЧАВУНУ ДО КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

Анотація. У статті проаналізовано зміну вмісту сірки в чавуні та складу шлаку в технологічному ланцюзі підготовки чавуну до конвертерної плавки. На підставі результатів проведених досліджень розроблено та рекомендовано технічні рішення та технологічні прийоми, спрямовані на виключення ресульфурзації чавуну. Точкове зондове сканування зразків ковшового шлаку показало, що в шлаковій фазі поряд із системами типу $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ з різним співвідношенням компонентів, що містять 0,2–3,5 % сірки, виявлені системи типу $\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{Al}_z$, що містять до 1 % сірки; у «корольках» вміст сірки коливається не більш 0,1 – 0,85 % і у вигляді сульфідів типу $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$, переважно MnS , причому у неметалевих включеннях «корольків» виявлено вміст сірки не більш 15–30 %. Проведені дослідження складів сухих, розсипчастих і рідких склоподібних ковшових шлаків після десульфурзації показали, що вони не змінюють фазовий склад, але на відміну від вихідних ковшових шлаків у шлаковій фазі таких шлаків переважно присутні системи типу $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$, збагачені оксидами магнію з перемінним співвідношенням компонентів. При цьому сірка у шлаковій фазі сухих шлаків знаходиться в основному у вигляді комплексів $(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Si})\text{S}$, а у шлаковій фазі рідких шлаків в основному у вигляді MnS і рідше у вигляді комплексів $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$. За результатами проведених промислових експериментів на низці підприємств України та Китаю було встановлено, що для обмеження приходу сірки до конвертерної сталі зі шлаком на рівні $\leq 0,002$ %, залишок ковшового шлаку після десульфурзації не повинен перевищувати 0,5 – 0,7 кг/т чавуну.

Ключові слова: позапічна десульфурация чавуну, шлак, сірка, ресульфурация.

Вступ

У сучасних умовах виробництва металопродукції у чорній металургії, що характеризується необхідністю виробництва високоякісної конкурентної металопродукції, питання видалення сірки з найменшими витратами набуває все більшої актуальності.

Боротьба із сіркою ведеться на всіх переробах металургійного виробництва.

Основна кількість сірки при виробництві металопродукції надходить із шихтовими матеріалами в аглодоменному виробництві. Відомо [1, 2], що в доменному процесі в системі метал-шлак рівноважний коефіцієнт розподілу сірки перевищує фактичний $L_s = (0,3 - 0,6) \times L_s^0$. Тому протягом усього часу перебування чавуну в доменній печі здійснюється спрямований перехід сірки з металу в шлак. Кількість сірки, що видаляється, в реалізованих доменних процесах на меткомбінатах України становить 91–95 % і забезпечує виплавку чавуну із вмістом сірки 0,02 – 0,03 %.

При застосуванні позапічної обробки чавуну в комплексах десульфурації чавуну та скачування шлаку (КДЧ) ступінь десульфурації чавуну може становити 75-99 % і забезпечує отримання чавуну з вмістом сірки в межах 0,015-0,002 %.

Ступінь десульфурації металу в конвертері становить близько 30 % при виплавці сталі з вмістом сірки $\geq 0,030$ %, при виплавці особливо чистої сталі з вмістом сірки $\leq 0,005$ % десульфурація металу в конвертерах становить 3-7 %.

Наші розрахунки [3-5], обґрунтовані на фактичних даних роботи меткомбінатів України та Китаю, показали, що питомі витрати на зниження вмісту сірки в чавуні з 0,055 % до 0,025 % у КДЧ у 4,2 рази нижчі, ніж у ДП, та 5,9 рази нижче, ніж у ККЦ. Тому при визначенні раціонального рівня зниження вмісту сірки в чавуні на кожному з технологічних переробів слід враховувати і величину витрат на видалення сірки.

При реалізації кожного з перероба здійснюється ряд технологічних операцій, при виконанні яких можливий зворотний перехід сірки зі шлаку в метал. Це стосується випуску чавуну з доменних печей у відкриті доменні та міксерні ковші, витримки чавуну в ковшах під кислим шлаком з низькою сульфідною ємністю, його переливу в міксери або заливні ковші, переливу чавуну з міксерів у заливні ковші, скачування шлаку, переливу в конвертер із

залишками ковшових шлаків. У цих умовах особливо важливо не допустити повернення сірки до розплаву на його шляху від виплавки чавуну в доменних печах і до виробництва конвертерної сталі.

Мета дослідження

Мета дослідження - аналіз зміни вмісту сірки в чавуні та складу шлаку в технологічному ланцюгу виробництва сталі з подальшою розробкою технічних рішень та технологічних прийомів, спрямованих на виключення ресульфурзації чавуну.

Результати та їх обговорення

У цій роботі проаналізовано зміну вмісту сірки в чавуні та складу шлаку в технологічному ланцюзі ДП – КДЧ – ККЦ. На підставі результатів проведених досліджень розроблено та рекомендовано технічні рішення та технологічні прийоми, спрямовані на виключення ресульфурзації чавуну.

Випуск чавуну з доменних печей у ковші.

Проведені протягом останніх чотирьох десятиліть на різних меткомбінатах України, Китаю та Тайваню дослідження [6 – 9, 12] хімічного та фазового складів доменних та ковшових шлаків показують, що вони суттєво різняться. Це пов'язано з тим, що ковшовий шлак є продуктом багатофакторного утворення. Склад ковшового шлаку залежить від кількості продуктів руйнування футерування ковша, що надходять у ківш (в основному, SiO_2), залишків ковшового шлаку від попередніх наливів чавуну, а також від кількості оксидів заліза і марганцю, що утворюються від окислення відкритої поверхні розплаву на жолобі і струмені металу при наповненні ковша. Основність ковшових шлаків проти основності на жолобах доменних печей знижується з 1,08 – 1,27 до 0,17 – 0,63.

У ковшових шлаках рівноважний коефіцієнт розподілу сірки менший за фактичний [6], отже, термодинамічна ймовірність для зворотного переходу сірки зі шлаку в метал у цих шлаках досить висока. З урахуванням наявності більш сприятливих кінетичних умов у процесі наповнення чавуновозних ковшів чавуном, а також внаслідок зниження сульфідної ємності ($C_s=7,9 \cdot 10^{-6}$ – $6,3 \cdot 10^{-5}$) та основності (0,17–0,63) ковшового шлаку, можуть створюватися в процесі випуску чавуну з доменних печей необхідні умови для зворотного переходу сірки зі шлаку до чавуну.

У виробничій практиці переважно зустрічаються сухі, розсипчасті з «острівцями» у вигляді твердих кірок ковшові шлаки. Рідкі, склоподібні шлаки зустрічаються значно рідше. Сухі, розсипчасті ковшові шлаки з погляду міжфазного дифузійного перерозподілу сірки неактивні. Їх активність збільшується під час переливів (з ковша в ківш, в міксер, в ківш заливки), коли відбувається інтенсивне перемішування металу зі шлаком, у результаті чого збільшується питома реакційна поверхня шлаку і зменшується внаслідок нагрівання його в'язкість. Такі кінетичні фактори можуть сприяти протіканню ресульфурзації чавуну, особливо за низької основності шлаку ($<0,8$).

Сухі розсипчасті шлаки є сумішшю металу (20–50 %) у вигляді «корольків», заплесків, залишків коржів, шлаку (46–78 %) і графіту (2,2–4,6 %) у вигляді спіллі [6, 7]. Кількість «корольків» у цих шлаках становить у середньому 30 %. У рідких шлаках кількість «корольків» становить 1,4 – 9,8 %, у середньому 4,8 % [8, 9]. Основність ковшових шлаків обох типів коливається у межах (0,07 – 0,64) й у середньому становить 0,5.

Аналіз структури «корольків» шлаків методами оптичної мікроскопії та растрової електронної мікроскопії показав, що вони мають ферито-графітну структуру доевтектичного або евтектичного типу з неметалевими включеннями у вигляді сульфідів марганцю та заліза [8, 9]. Точкове зондове сканування зразків шлаку ковшового показало:

- у шлаковій фазі поряд із системами типу $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ з різним співвідношенням компонентів, що містять 0,2 – 3,5 % сірки, виявлені системи типу $\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{Al}_z$, що містять до 1 % сірки;

- у «корольках» вміст сірки коливається не більш 0,1 – 0,85 % і у вигляді сульфідів типу (Fe, Mn)S, переважно MnS, причому у неметалевих включеннях «корольків» виявлено вміст сірки не більш 15 – 30 % [9, 10].

Таким чином, «корольки», як і шлак, є джерелами надходження сірки до металу [6 – 10].

Дослідження, виконані на меткомбінаті «Азовсталь» у процесі 49 випусків чавуну (182 ковша) [6, 7], підтвердили, що ресульфурация чавуну має місце у процесі наливу чавуну в ковші. Вміст сірки в чавуновозних ковшах після їх наповнення в доменному цеху в основному був на 0,010 – 0,024 % більше, ніж на жолобі доменної печі. Було встановлено, що кількість шлаку, що перейшла з

чавуну сірки, зростає зі збільшенням кількості шлаку в ковші, зниження його основності і вмісту сірки в чавуні.

Аналогічні дослідження, проведені на комбінаті «Азовсталь» протягом 2020 – 2021 рр., показали, що величина ресульфурзації чавуну знизилась і становить 0,003 – 0,010 %. Це пов'язано із застосуванням бетонних жолобів, зміною технології доменної плавки, що забезпечила зниження вмісту сірки в чавуні, а також зниження кількості ковшових шлаків.

Тому через ресульфурзацію чавуну в чавуновозних ківшах при випуску металу з доменних печей не слід для оцінки вмісту сірки в чавуні у чавуновозних ківшах, орієнтуватися на результати аналізу проб, відібраних на жолобах доменних печей.

Для запобігання перебігу процесів переходу сірки зі шлаку в чавун рекомендується використовувати коригувальні добавки в шлак матеріалів на основі CaO (у т.ч. зернисті нефракціоновані відходи виробництва металургійного вапна в кількості 1,0 – 2,0 кг/т чавуну), що підвищують сульфідну ємність шлаку.

Проведена у промислових умовах на меткомбінатах України [6] перевірка впливу коригувальних добавок у вигляді зернистих нефракціонованих відходів виробництва металургійного вапна, поданих на дно чавуновозних ковшів у кількості 1,0 – 2,0 кг/т чавуну, перед випуском чавуну з доменних печей показала, що приріст вмісту сірки в чавуні знизився у 1,5 – 2 рази.

На меткомбінатах Китаю (Цяньянський МК) введення коригуючої добавки у вигляді металургійного меленого порошкового вапна в кількості 2 – 2,5 кг/т, поданого на дно заливних ковшів, перед переливом у них чавуну з міксерних ковшів, забезпечило зниження приросту вмісту сірки в чавун ~2 рази.

Позапічна десульфурзація чавуну.

У світовій практиці в даний час в основному застосовуються три технологічні процеси позапічної десульфурзації чавуну: моноінжекція диспергованого магнію, коінжекція суміші CaO - Mg і KR-процес (механічне перемішування чавуну з вапном з добавкою CaF_2).

Виконаний [3] порівняльний техніко-економічний аналіз цих процесів десульфурзації чавуну показав, що найбільш ефективним є моноінжекція магнію. Десульфурзація чавуну моноінжекцією магнію характеризується найменшими питомими витратами реагенту, найменшими експлуатаційними

та капітальними витратами, найменшим циклом обробки, найменшими втратами чавуну та його температури та найбільшою стабільністю результатів, що досягаються.

У цій роботі досліджувався міжфазний перерозподіл сірки в ковшових шлаках при десульфурації чавуну моноінжекцією гранульованого магнію. У процесі проведення досліджень вивчалася зміна хімічного складу шлаків двох типів: сухих та рідких. З даних, наведених у таблиці 1 видно, що склади шлаків ковшових різних меткомбінатів істотно відрізняються.

На підприємствах, де вихідні ковшові шлаки були сухими, розсипчастими після десульфурації в них збільшувався вміст сірки у 1,3 – 15 разів, вміст MgO – у 1,5–8,5 разів, FeO – у 1,1–3 рази. На Юаньлінському меткомбінаті, де вихідні шлаки були рідкими, склоподібними вміст сірки після десульфурації підвищувався в 1,3–30 разів (у середньому в 7,7 разів), вміст MgO – в 1,1–2,1 разів (в середньому в 1,7 рази). Вміст FeO і Fe₂O₃ у ковшовому шлаку після десульфурації змінювався як у бік збільшення, так і у бік зменшення і в середньому знизився в 1,35 та 1,42 рази відповідно. Це пов'язано з меншим окисненням металу в процесі барботажу ванни у вигляді покриття поверхні металу шаром рідкого шлаку, а також зі знебідненням складу шлаку через прихід в шлак сірки та MgO.

Вміст металевої фази в сухих шлаках збільшувався незначно на 5–7 % абс. У рідких шлаках – збільшився в середньому в 3,7 рази (до 17,6 % абс.).

Аналіз вмісту сірки у шлаках до та після десульфурації чавуну (табл. 1) магнієм показав, що основний вплив на зміну вмісту сірки у шлаках здійснюють кількість вихідного (перед десульфурацією) ковшового шлаку та його основність. Було встановлено, що кількість сірки, що перейшла з чавуну в шлак тим більша, чим більша кількість шлаку у ковші, вища основність вихідного шлаку і чим нижчий вміст сірки в чавуні після десульфурації.

При цьому основність шлаку CaO/SiO₂ принципово не змінюється і шлак у ковші після десульфурації залишається кислим. У випадках, коли прихід MgO в шлак значний і основність шлаку (CaO+MgO+MnO)/SiO₂+Al₂O₃ стає більше одиниці, сіркопоглинальна здатність шлаку підвищується. Зі збільшенням MgO у шлаку пов'язують збільшення його в'язкості та підвищення температури плавлення на 40–60° за рахунок утворення в шлаку тугоплавких сполук типу форстериту (2MgO · SiO₂) та монтичеліту (CaO, MgO · SiO₂) [6].

Проведені дослідження складів сухих, розсипчастих і рідких склоподібних ковшових шлаків після десульфурації показали, що вони не змінюють фазовий склад, але на відміну від вихідних ковшових шлаків у шлаковій фазі таких шлаків переважно присутні системи типу $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$, збагачених оксидами магнію з перемінним співвідношенням компонентів. При цьому сірка у шлаковій фазі сухих шлаків знаходиться в основному у вигляді комплексів $(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Si})\text{S}$, а у шлаковій фазі рідких шлаків в основному у вигляді MnS і рідше у вигляді комплексів $(\text{Ca}, \text{Mn},)\text{S}$. У шлаках обох типів вміст сірки становить 2 %, а в частині складових шлаку вміст сірки досягає 16 %. Крім того, у шлаках обох типів були виявлені включення, що є сплавами Ca-Si-Al-Mg , з різним співвідношенням компонентів, що містять 2 – 4 % сірки.

Таблиця 1

Характеристики (середні) ковшових шлаків до (чисельник) та після (знаменник) десульфурації чавуну магнієм на різних підприємствах

Підприємство	Вміст сірки, %		Відношення $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$	Відношення $\frac{\text{CaO}+\text{MgO}+\text{MnO}}{\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3}$	Відношення (S)/[S]	Тип шлаку
	у чавуні	в шлаці				
«Запоріжсталь»	$\frac{0,052}{0,024}$	$\frac{1,06}{3,53}$	$\frac{0,58}{0,62}$	$\frac{0,63}{0,94}$	$\frac{20,3}{147}$	сухий, розсипчастий
ім. Ілліча	$\frac{0,038}{0,006}$	$\frac{1,43}{3,81}$	$\frac{0,84}{0,73}$	$\frac{0,99}{1,15}$	$\frac{7,6}{338}$	сухий, розсипчастий
«Азовсталь»	$\frac{0,026}{0,003}$	$\frac{0,80}{2,45}$	$\frac{0,54}{<1,0}$	$\frac{0,63}{<1,1}$	$\frac{30,8}{817}$	сухий, розсипчастий
«Криворіжсталь»	$\frac{0,069}{0,019}$	$\frac{1,07}{5,89}$	$\frac{0,76}{0,71}$	$\frac{0,76}{1,05}$	$\frac{16,7}{414}$	сухий, розсипчастий
Сянтаньський МК (КНР)	$\frac{0,028}{0,005}$	$\frac{0,30}{0,65}$	$\frac{0,20}{0,22}$	$\frac{0,16}{0,21}$	$\frac{3,3}{98}$	сухий, розсипчастий
Ханданський МК (КНР)	$\frac{0,018}{0,005}$	$\frac{0,31}{1,12}$	$\frac{0,36}{0,33}$	$\frac{0,29}{0,31}$	$\frac{17,3}{16}$	сухий, розсипчастий
Юаньлінський МК (КНР)	$\frac{0,031}{0,019}$	$\frac{0,13}{1,00}$	$\frac{0,50}{0,40}$	$\frac{0,66}{0,69}$	$\frac{4,1}{52,6}$	рідкий

Аналіз [8, 9] структури «корольків» шлаків після десульфурації показав, що вона практично не змінюється і відповідає структурі «корольків» шлаку,

відібраних до десульфурації, залишаючись ферито-графітною, яку умовно можна віднести до доєвтектичного (у разі наявності розвинених дендритів твердого розчину матричної фази – фериту) або евтектичного типу, рис 1.

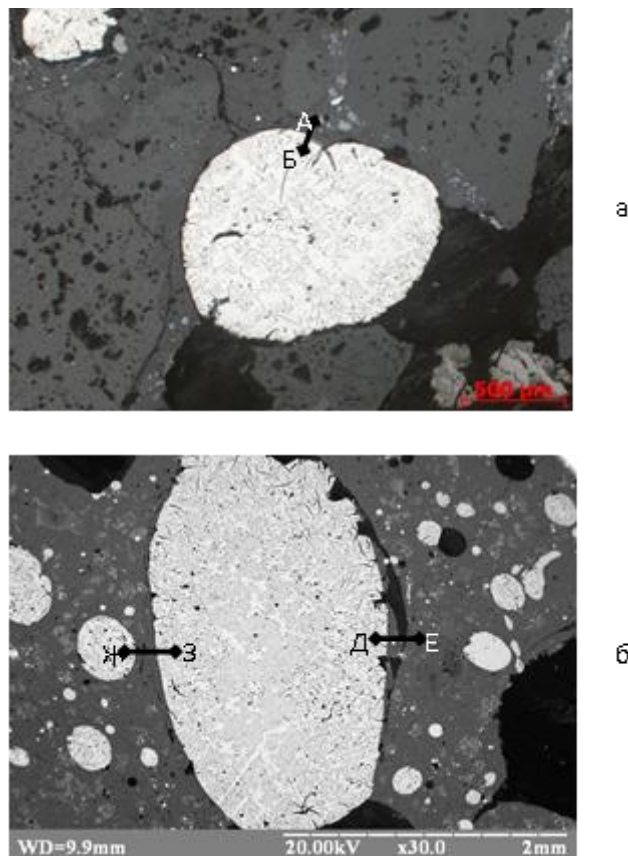


Рисунок – 1 Мікроструктура металевої та шлакової фаз проб ковшового шлаку, відібраних до (а) та після (б) десульфурації чавуну гранульованим магнієм

Виконаний у роботах [10, 11] аналіз закономірностей міжфазного розподілу сірки при рафінуванні моноінжекцією чавуну магнієм з використанням даних експериментальних обробок, проведених у промислових умовах, показав, що практично вся видалена з металу сірка переходить у шлакову та металеву («корольки») фази шлаку, де знаходиться у вигляді сполуки із Ca та Mn. При цьому наголошується, що спостерігається швидкий перехід сірки зі шлаку в «корольки» металу. Середній вміст сірки в «корольках» після десульфурації залежить від їхнього фракційного складу та зі збільшенням розміру «корольків» зростає. Також встановлено, що протягом двогодинної витримки системи метал – шлак перехід сірки із шлаку в чавун практично не відбувається і лімітується дифузією сірки у шлаку.

Проведені дослідження показали, що ковшові шлаки істотно впливають на міжфазний розподіл сірки в процесі інжекційної десульфурації чавуну магнієм і мають широкі межі фізико-хімічних характеристик.

При розробці технологічних процесів для конкретних вихідних умов слід враховувати вплив ковшових шлаків та за необхідності передбачати технологічні прийоми, що виключають негативний вплив ковшових шлаків на ефективність процесу десульфурації чавуну. З метою раціоналізації ковшових шлакових режимів рекомендується:

- підвищувати ступінь очищення чавуновозних ковшів від залишків ковшового шлаку попередніх наливів;

- за необхідності проводити коригування складів ковшових шлаків (до і після позапічної обробки різними реагентами), у тому числі з використанням нефракціонованих відходів металургійного вапна, відходів вогнетривких матеріалів, сухих подрібнених (гранульованих) доменних шлаків;

- у разі відсутності шлакового покриву доцільно його наводити, наприклад, використовуючи нефракціоновані відходи металургійного вапна у кількості 1,0 – 1,5 кг/т чавуну.

Виконана оцінка необхідних витрат на десульфурацію та скачування шлаку в комплексах позапічної обробки чавуну моноінжекцією магнію показала, що вони значно нижчі, ніж у доменному виробництві. При зниженні вмісту сірки в чавуні з 0,055 % до 0,025 % питомі витрати в комплексах десульфурації чавуну моноінжекцією магнію становлять ~0,9 \$/т·0,01 %ΔS.

Транспортування ковшів із знесірченням чавуном.

Проведені дослідження [7] на МК «Азовсталь» при транспортуванні знесіреного чавуну магнієм у відкритих доменних ковшах від відділення десульфурації чавуну до відділення скачування шлаку показали, що суттєвих змін вмісту сірки в чавуні не відбувається. З 49 проконтрольованих ковшів із знесірченням чавуном у 14 ковшах через 0,7–2,7 години вміст сірки був нижчим на 0,001–0,002 абс.%, у 14 ковшах - вище на 0,001–0,002 абс. % і у 21 ковші вміст сірки не змінився. Відхилення, що мали місце, знаходилися в межах точності експрес-аналізу ($\pm 0,002$ абс.%).

Незважаючи на наявну термодинамічну можливість, ресульфурація в ковшах зі знесірченням чавуном, що характеризується вищим на порядок перевищенням фактичного коефіцієнта розподілу сірки над рівноважним

($\Delta L_s \geq 120$), порівняно зі знесірченим чавуном, повернення сірки зі шлаку в чавун не спостерігалось. Це пов'язано з двома чинниками. По-перше, з відсутністю належних кінетичних умов у чавуновозних ковшах. По-друге, з наявністю в знесірченому магнієм чавуні залишкового вмісту магнію, який чинить захисну дію на процес ресульфурзації. Було встановлено, що магній у кількості $\geq 0,005$ %, що залишився в чавуні, створює захисний бар'єр, перешкоджаючи поверненню сірки з ковшового шлаку в рідкий чавун.

Перелив знесірченого чавуну з ковшів у міксери.

При переливах знесірченого чавуну є більш сприятливі термодинамічні умови для ресульфурзації чавуну, ніж при переливі чавуну неОшибк! Ошибка **связи**. [7]. Проведені на меткомбінаті «Азовсталь» дослідження показали, що перевищення фактичного коефіцієнту розподілу сірки над рівноважним при переливі в міксер глибокознесірченого чавуну із середнім вмістом сірки 0,0025 % становить $\Delta L_s = 80-375$. Незважаючи на це, повернення сірки зі шлаку до чавуну не відбувалося. Більш того, мало місце зниження вмісту сірки в чавуні, що зливається в ківш заливки, в середньому на 0,0005 %. Відсутність ресульфурзації чавуну пояснюється захисною дією залишкового магнію. Виявлене зниження вмісту сірки в чавуні пов'язане з завершенням процесів десульфурзації, що протікають між розчиненими в чавуні магнієм і сіркою і спливанням сульфідів магнію в шлакову фазу.

За результатами проведених промислових експериментів було встановлено взаємозв'язок вмісту магнію в знесірченому чавуні та зміною вмісту сірки при витримці чавуну в міксері. (рис. 2) Вміст магнію в чавуні в кількості більше 0,006–0,008 % не тільки запобігає поверненню сірки в чавун, але й мав деякий вплив на розплав, що десульфуредується.

У процесі проведених досліджень також було встановлено, що при всіх операціях з глибоко знесірченим чавуном (у т.ч. при транспортуванні та переливах його з чавуновозних ковшів в міксер і з міксера в ківші заливки) вміст сірки в чавуні залишається незмінним. При цьому спостерігалось зниження вмісту залишкового магнію з 0,038 - 0,040 % (в чавуні чавуновозних ковшів), до 0,017 - 0,020 % (в чавуні заливних ковшів).

Тривалий промисловий досвід роботи меткомбінатів ім. Ілліча (9 місяців) та «Азовсталь» (більше двох років) із забезпеченням у міксерах вмісту сірки в чавуні $\leq 0,005$ %, підтверджує, що наявність в знесірченому магнієм чавуні

залишкового магнію є вагомим фактором, що надійно виключає повернення сірки в чавун.

Очищення чавуну від ковшового шлаку.

Наявність високосірчистого ковшового шлаку в знесірченому чавуні і особливо в знесіченому чавуні, в якому вміст сірки ще вище, обумовлює важливість і необхідність ефективного очищення чавуну від ковшового шлаку (рис. 3), так як у конвертерній плавці сірка, що надходить з ковшовим шлаком, може переходити у метал. При цьому можливості видалення сірки в конвертерній ванні дуже обмежені.

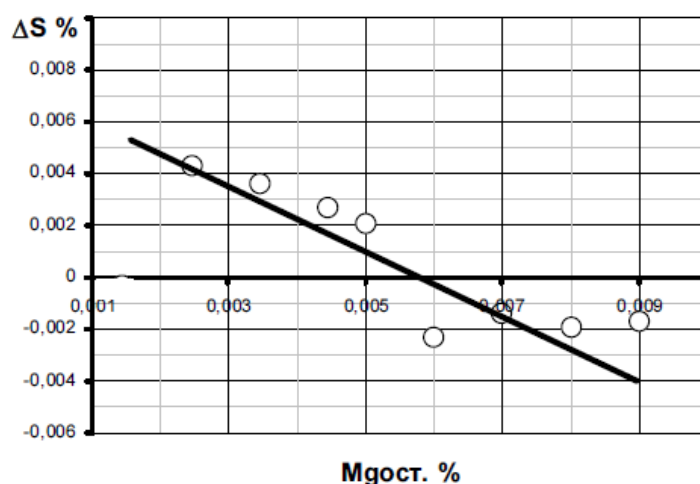


Рисунок – 2 Залежність зміни вмісту сірки (ΔS) від вмісту залишкового магнію ($Mg_{\text{зал}}$) у чавуні при його зливі з міксера або доменного ковша в заливальний

Для підвищення ефективності очищення чавуну від ковшового шлаку, зниження втрат чавуну при завантаженні шлаку та скорочення тривалості операції очищення чавуну використовується ряд технологічних прийомів, у т.ч.:

- продувка чавуну азотом у процесі завантаження шлаку, що забезпечує переміщення масиву шлаку в зону видалення його з ковша машиною завантаження шлаку;

- коригування складу шлаку загущаючими і знебідненими добавками (наприклад, нефракціонованими відходами металургійного вапна, сухим подрібненим (гранульованим) доменним шлаком).

Для продувки чавуну азотом використовуються щілинні вогнетривкі вставки в днище ковша, а також бабблери з занурювальними вогнетривкими фурмами.

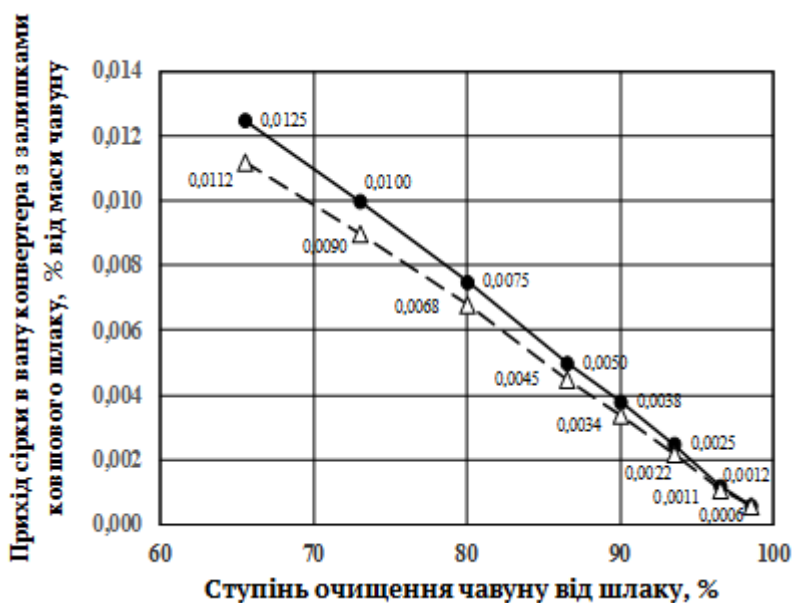
Для скачування шлаку з ковшів рекомендуються найсучасніші машини скребкового типу фірм «Gerwin Holtmann» (Німеччина), «Dango Dienenthal» (Німеччина) та Тангшанського машзаводу (КНР).

За результатами проведених промислових експериментів на низці підприємств України та Китаю було встановлено, що для обмеження приходу сірки до конвертерної сталі зі шлаком на рівні $\leq 0,002\%$, залишок ковшового шлаку після десульфурації не повинен перевищувати 0,5 – 0,7 кг/т год.

Виплавка сталі в конвертерах.

Визначальними факторами приходу сірки в конвертерну сталь є: вміст сірки в шихтових матеріалах, в першу чергу в брукті і чавуні, що використовується, а також ступінь очищення чавуну від високосірчистого шлаку. Так як можливості десульфурації металу в конвертері обмежені і витрати на десульфурацію металу зростають у зв'язку з погіршенням показників конвертерного перероба, то для виплавки особливо чистих марок сталей використовують знесірчений чавун, очищений до вмісту сірки, що відповідає рівню виплавлюваної сталі, і брукт з аналогічним (зазвичай обріз прокатного виробництва сталей того ж сортаменту). За відсутності брукту необхідного сортаменту виплавку особливо чистих сталей можна проводити з використанням знесірченого чавуну та окатиші.

Експериментальне вивчення надходження сірки до сталі при виплавці в конвертерах особливо чистих сталей з використанням глибоко знесірченого чавуну було проведено на 300-тонних конвертерах меткомбінату «Азовсталь» та сталезаводу № 3 Уханьського МК, КНР. Дані, що характеризують вихідні умови проведених експериментів та отримані результати, наведені в таблиці 2. До особливостей плавки на комбінаті «Азовсталь» слід віднести використання металізованих окатишів (89,46-90,28 % Fe_{мет.}, 1,36-1,71% С, 0,006% Р, 1,36-1,55% СаО та 0,003-0,004% S), а також подвійне скачування шлаку (з доменних та заливальних ковшів) та злив у конвертер чавуну практично повністю очищеного від шлаку.



Цифри біля точок – величини приходу сірки у конвертер зі шлаком.

Кінцевий вміст сірки в чавуні 0,002 %.

—●— - вдування зернистого магнію;

--Δ----- вдування магнію в суміші з вапном

Рисунок 3 – Залежність приходу сірки у ванну конвертера (з відходами ковшового шлаку) від рівня скачування шлаку з ковша після десульфурації.

Таблица 2

Дані, що характеризують дослідні плавки сталі у 300-тонних конвертерах з контролем балансу сірки

Найменування показників	МК «Азовсталь», Україна			Стальзавод № 3, Уханьський МК, КНР	
	Номери плавок				
	2004329	2004401	531275	531279	531350
1	2	3	4	5	6
1. Характеристика чавуну:					
1.1. Маса чавуну, т	308	294	278	278	278
1.2. Вміст сірки в чавуні, %	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004
1.3. Температура чавуну, °C	1365	1250	н /д	н /д	н /д
2. Характеристика ковшового шлаку					
2.1. Маса шлаку, т	0	0	0,56	1,12	0,56
2.2. Вміст сірки в шлаку, %	0,79	0,5	1,01	1,21	0,46
3. Витрати матеріалів на конвертерну плавку					
3.1. Вапно:					
- маса, т	36,0	23,0	14,335	17,0	12,93
- вміст сірки, %	0,017	0,017	0,025	0,025	0,025

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6
3.2. Доломіт:					
- маса, т	-	-	3,08	3,09	4,621
- вміст сірки, %	-	-	0,018	0,018	0,018
3.3. Окатиші:					
- маса, т	55,0	65,0	6,70	11,48	13,847
- вміст сірки, %	0,003	0,003	0,045	0,045	0,045
3.4. Плави́ковий шпат:					
- маса, т	0	2,4	-	-	-
- вміст сірки, %	н /д	н /д	-	-	-
3.5. Кисень, м ³	19900	20480	22080	15200	14880
4. Характеристика сталі:					
4.1. Маса сталі, т	286	273	256	256	256
4.2. Марка сталі	09Г2С	09Г2С	н /д	н /д	н /д
4.3. Вміст сірки в сталі, %	0,004	0,003	0,008	0,012	0,008
4.4. Температура сталі, °С	1760	1670	н /д	н /д	н /д
5. Характеристика конвертерного шлаку					
5.1. Маса шлаку (розрахункова), т	22,880	21,840	20,480	20,480	20,480
5.2. Вміст сірки в шлаку, %	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003
6. Розрахункова маса сірки, що надходить в конвертер, у т.ч.:					
- з чавуном, кг	6,16	5,88	8,34	8,34	11,12
- з ковшовим шлаком, кг	0	0	5,66	13,6	2,58
з вапном, кг	6,12	5,75	3,58	4,25	3,23
- з доломітом, кг	-	-	0,55	0,56	0,83
- з окатишами, кг	1,65	1,95	3,01	5,16	6,23
- всього	13,93	13,58	21,14	31,91	23,99
7. Кількість сірки, що надходить на 1 т сталі, %	0,00487	0,00497	0,00826	0,01247	0,0094
8. Кількість сірки, видаленої зі шлаком при конвертерній плавці на 1 т сталі, %	0,00032	0,00032	0,00024	0,0003	0,00024
9. Дебаланс сірки на 1 т сталі, %	-0,00055	-0,00165	-0,00002	-0,00017	-0,0012
10. Неврахований прихід сірки в сталь, $[S]_{ст.-} [S]_{ч}$, %	+0,002	+0,001	+0,005	+0,009	+0,005

Аналіз отриманих результатів у проведених серіях дослідних плавок у 300-тонних конвертерах з використанням окатишів показав, що прихід сірки в

сталь у всіх п'яти обробках був нижчим за розрахунковий (згідно з балансом) на 0,00002 – 0,00165 %. Установлену похибку можна вважати цілком прийнятною для промислових експериментів. Отримані результати з балансу сірки показали, що в конвертерних плавках на МК «Азовсталь» ступінь десульфурації металу становив ~7 %, а на Уханьському МК – ~3 %. Виявлений умовний прихід сірки в сталь відповідав рівню надходження сірки в сталь із шихтових матеріалів та з ковшовим шлаком. При цьому на меткомбінаті «Азовсталь», де виключно ретельно шлак був видалений із заливальних ковшів, умовний прихід сірки в сталь становив 0,001 – 0,002 % і був пов'язаний із надходженням сірки до сталі з інших шихтових матеріалів. На Уханьському МК, де недостатньо ретельно проводилося очищення чавуну від шлаку, умовний прихід сірки в сталь становив 0,005 – 0,009 % і був пов'язаний в основному з надходженням сірки в сталь із ковшового шлаку.

Проведені дослідні плавки підтвердили прогнозований вплив ковшового шлаку на прихід сірки в конвертер і показали необхідність ретельного видалення ковшового шлаку. Після забезпечення на Уханьському МК ступеня очищення чавуну від шлаку до ~95 % прихід сірки до конвертерної сталі зі шлаком знизився до $\leq 0,002$ %.

Оцінку впливу зміни глибини десульфурації металу в конвертерах на показники конвертерного переробу виконано з використанням даних роботи одного з комбінатів України.

Показано, що при використанні чавуну з вмістом сірки 0,055 % та виплавці сталі з вмістом сірки 0,025 %, витрата вапна збільшується на ~21 кг/т, продуктивність конвертерів знижується на ~12 %, витрата металошихти збільшується на ~40 кг/т, витрата феромарганцю збільшується на ~1,4 кг/т, витрата вогнетривів збільшується на ~0,14 кг/т, витрата кисню збільшується на 15 м³/т і вихід придатного знижується на ~3 %. При цьому питомі витрати, пов'язані зі зниженням вмісту сірки в металі у розглянутому діапазоні, становлять ~5,3 \$/т·0,01%ΔS.

Висновки

Для підвищення ефективності боротьби з сіркою важливо поряд із забезпеченням технологічно та економічно обґрунтованого видалення сірки на кожному з металургійних переробів не допустити повернення сірки у процесі здійснення технологічних операцій, пов'язаних з переливами чавуну та його транспортуванням. Найбільш переважним місцем для проведення позапічної

десульфуратії чавуну з точки зору недопущення повернення сірки є заливні ківші.

Для запобігання ресульфуратії чавуну під час випуску його з доменної печі доцільно раціоналізувати ковшові шлакові режими, у т.ч. за рахунок коригування складів ковшових шлаків, підвищення ступеня очищення ковшів від залишків шлаку попереднього наливу, наведення шлакового покриву у разі відсутності ковшового шлаку.

Для зниження умовного приходу сірки при конвертерному переробі необхідно забезпечити ретельне видалення шлаку з поверхні чавуну перед його заливкою в конвертер, обмеживши залишкову кількість ковшового шлаку на рівні – 0,5 - 0,7 кг/т.

Виконане зіставлення витрат на зниження вмісту сірки у технологічному ланцюзі ДП – КДЧ – ККЦ показало, що найменші питомі виробничі витрати на десульфуратію мають місце при позапічній десульфуратії чавуну.

Таким чином, проведені дослідження показали, а тривалий промисловий досвід підтвердив, що при всіх операціях з глибокознесірченим чавуном, отриманим моноінжекцією магнію, сірка з шлаку в чавун не повертається і ресульфуратія не відбувається, що пояснюється захисною дією залишкового магнію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Куликов И.С. Десульфурация чугуна. М.: Металлургиздат.– 1961. – 356 с.
2. Воловик Г.А. Внедоменная обработка чугуна. – К. Гостехиздат УССР.- 125 с. -1961.
3. Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. Киев. Наукова думка. – 2017. – 205 с.
4. «Разработка технологических решений и предложений на поставку технологии десульфурации жидкого чугуна гранулированным (зернистым) магнием в заливочных ковшах миксерного отделения № 1 конвертерного цеха металлургического комбината ПАО "Арселормиттал Кривой рог"» // Отчет по НИР. Институт черной металлургии НАН Украины. - № госрегистрации 0116U003769 - Днепропетровск, 2014. –73 с.
5. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков.-М.: Издательский дом «Кодекс», 2017.- С. 111-123.
6. Особенности шлакообразования в ковшах с жидким чугуном / Ткач Н.Т., Шевченко А.Ф., Костенко Д.В., Лындя П.С. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. Тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАНУ. – 2004. - №8. – С. 168 – 175.
7. О ресульфурации чугуна от выпуска из доменной печи до слива в конвертер. Л.П.Курилова, А.С.Булахтин, В.Г.Кисляков, А.Л.Руденко, Н.Т.Ткач // Сб. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2010. – No 22. – С.96–105.

8. Особенности структуры металлической и неметаллической фаз шлака, формирующегося в ковше в процессе десульфурации чугуна магнием / А.С. Вергун, А.М. Нестеренко, В.Г. Кисляков [и др.] // Теория и практика металлургии, 2009. - № 5 – 6. – С.86 – 90.
9. Кисляков В.Г. Совершенствование технологических основ подготовки чугуна к выплавке низкосернистой кислородно-конвертерной стали. Дисс. канд. тех. Наук Днепропетровск. ИЧМ. -2013. – 231.с.
10. Руденко А.Л. Анализ закономерностей межфазного распределения серы при инъекционной обработке чугуна магнием // «Изв. Вуз. Металлургические технологии». 2014. -№8.-С.13-18.
11. Руденко А.Л. Кинетика межфазного перехода серы в процессе ковшевого рафинирования чугуна магнием // «Изв. Вуз. Физико-химические основы металлургических процессов». 2016. -№12. Том 59. -С.896-902.
12. Frank Nicolaas Hermanus Schrama, Elisabeth Maria Beunder, Bart Van den Berg, Yongxiang Yang & Rob Boom Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. Ironmaking & Steelmaking, 2017-№ 44(5),-р. 333-343, DOI: 10.1080/03019233.2017.1303914

REFERENCES

1. Kulikov I.S. (1962) Desulphurization of cast iron. Moskow: Metallurgizdat (in Russian).
2. Volovik G.A. (1961) Out-of-blast processing of cast iron. – Kiev: GostehizdatUSSR (in Russian).
3. Shevchenko A.F. (2017) Technology and equipment for iron desulfurization with magnesium in heavy-duty ladles. (in Russian).
4. «Development of technological solutions and proposals for the supply of technology for the desulfurization of liquid iron with granular (granular) magnesium in pouring ladles of the mixing department No. 1 of the converter shop of the metallurgical plant of PJSC "Arselormittal Kryvyi Rih» // Research report. Z.I Nekrasov Iron and Steel Institute. National Academy of Sciences of Ukraine. - № state registration 0116U003769 - Dnepropetrovsk, 2014. – pp. 73 (in Russian).
5. Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Regulatory assessment of the influence of blast furnace parameters on coke consumption and productivity // Metallurgiya chuguna – vizovi XXI veka. Trudi VIII Mezhdunarodnogo kongressa domensh'ikov.-M.: Izdatelskii dom «Kodeks», 2017.-pp. 111-123 (in Russian).
6. Features of slag formation in ladles with cast iron / Tkach N.T., Shevchenko A.F., Kostenko D.V., Lindya P.S. // Fundamentalnie i prikladnie problemi chernoi metallurgii: Sb. nauchn. Tr. – Dnepropetrovsk: ICHM NANU. – 2004. – No 8. – pp. 168 – 175 (in Russian).
7. About the resulfurization of cast iron from a blast furnace' tapping to draining into a converter. L.P.Kurilova, A.S.Bulahtin, V.G.Kislyakov, A.L.Rudenko, N.T.Tkach // Sb. ICHM «Fundamentalnie i prikladnie problemi chernoi metallurgii». – 2010. – No 22. – pp.96–105 (in Russian).
8. Features of the structure of the metallic and non-metallic phases of the slag formed in the ladle in the process of iron desulfurization with magnesium / A.S. Vergun, A.M. Nesterenko, V.G. Kislyakov [i dr.] // Teoriya i praktika metallurgii, 2009. - No 5 – 6. – pp. 86 – 90 (in Russian).
9. Kislyakov V.G. (2013) Improving the technological bases for the preparation of pig iron for the smelting of low-sulfur oxygen-converter steel. Diss. kand. teh. Nauk Dnepropetrovsk. ISI. (in Russian).
10. Rudenko A.L. Analysis of regularities of interfacial distribution of sulfur during injection treatment of cast iron with magnesium // «Izv. Vuz. Metallurgicheskie tehnologii». 2014. -No 8.-pp.13-18. (in Russian).
11. Rudenko A.L. Kinetics of Sulfur Interfacial Transition in the Ladle Refining of Cast Iron with Magnesium // «Izv. Vuz. Fiziko-himicheskie osnovy metallurgicheskikh processov». 2016. -No 12/59. -pp. 896-902. (in Russian).
12. Frank Nicolaas Hermanus Schrama, Elisabeth Maria Beunder, Bart Van den Berg, Yongxiang Yang & Rob Boom Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. Ironmaking&Steelmaking, 2017-№ 44(5),-r. 333-343, DOI: 10.1080/03019233.2017.1303914

Received 1.02.2022.

Accepted 14.02.2022.

A. Shevchenko, V. Kislyakov, B. Dvoskin, I. Manachyn, K. Chubin

STUDY OF CHANGES OF THE SULFUR CONTENT IN CAST IRON AND THE COMPOSITION OF SLAG IN TECHNOLOGICAL PROCESSING DURING THE PREPARATION OF CAST IRON FOR THE CONVERTER MELTER

The article analyzes the change in the sulfur content of cast iron and the composition of slag in the technological chain of preparing cast iron for converter smelting. On the basis of the results of the conducted research, technical solutions and technological techniques aimed at eliminating cast iron resulfurization were developed and recommended. Spot probe scanning of bucket slag samples showed that in the slag phase, along with $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ type systems with different ratios of components containing 0.2–3.5% sulfur, $\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{Al}_z$ type systems containing up to 1% sulfur were found; in "beads" the sulfur content varies no more than 0.1 - 0.85% and in the form of sulfides of the (Fe, Mn)S type, mainly MnS, and in the non-metallic inclusions of "beads" the sulfur content is no more than 15 - 30%. Studies of the compositions of dry, friable and liquid glassy ladle slags after desulfurization showed that they do not change the phase composition, but unlike the original ladle slags, in the slag phase of such slags there are mainly $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ type systems, enriched with magnesium oxides with variable ratio of components. At the same time, sulfur in the slag phase of dry slags is mainly in the form of (Ca, Mn, Mg, Al, Si)S complexes, and in the slag phase of liquid slags it is mainly in the form of MnS and less often in the form of (Ca, Mn)S complexes. According to the results of industrial experiments carried out at a number of enterprises in Ukraine and China, it was established that in order to limit the introduction of sulfur into converter steel with slag at the level of $\leq 0.002\%$, the remaining ladle slag after desulfurization should not exceed 0.5-0.7 kg/t of cast iron.

Keywords: out-of-furnace desulfurization of cast iron, slag, sulfur, resulfurization.

Шевченко Анатолій Пилипович, професор, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0003-0867-6825. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Кисляков Володимир Геннадійович, кандидат технічних наук, завідувач відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0002-1775-5050. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Двоскін Борис Вульфівич, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0003-2891-7833. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Маначин Іван Олександрович, старший дослідник, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Українського державного університету науки та технологій (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0001-9795-6751. E-mail: imanachyn@gmail.com

Чубін Костянтин Іванович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу позапічної обробки чавуну, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України (Дніпро, Україна). ORCID ID: 0000-0001-6068-9901 E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Shevchenko Anatoliy, professor, doctor of technical sciences, leading researcher of the department of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov of NAS of Ukraine, National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0003-0867-6825. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Kislyakov Volodymyr, candidate of technical sciences, Head of out- of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov of NAS of Ukraine, National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0002-1775-5050. Email: ovoch-isi@outlook.com

Dvoskin Borys, candidate of technical sciences, senior researcher of the department of out- of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov of NAS of Ukraine, National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0003-2891-7833. E-mail: ovoch-isi@outlook.com

Manachyn Ivan, senior researcher, candidate of technical sciences, associate professor of the department of automation of production processes of the Ukrainian state university of science and technology (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0001-9795-6751. E-mail: imanachyn@gmail.com

Chubin Kostyantyn, candidate of technical sciences, senior researcher of the department of out- of secondary treatment of iron, Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov of NAS of Ukraine, National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine). ORCID ID: 0000-0001-5939-4479 E-mail: ovoch-isi@outlook.com

ЗМІСТ / CONTENTS

<i>Гришин О.М., Надточій А.А., Петренко В.О., Киричок В.С.</i> Фізико-хімічні передумови зневуглицьовування продуктів вуглецевотермічного відновлення Cr_2O_3 <i>Grishin A., Nadtochij A., Petrenko V., Kyrychok V.</i> Physico-chemical prerequisites for decarburization of carbon-thermal reduction products Cr_2O_3	3
<i>Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Калініна Н.Ю., Балакін В.Ф., Ларіонов Г.І.</i> Проектування і аналіз схемотехніки інверторного перетворювача для індукційного нагріву <i>Zimoglyad A., Guda A., Kalinina N., Balakin V., Larionov H.</i> Design and analysis of circuit technique of inverter converter for induction heating.....	17
<i>Селівьорстова Т.В., Селівьорстов В.Ю., Іванова Л.Х.</i> Математичні основи фрактального тепло і масопереносу в двохфазній зоні розплаву металу <i>Selivyorstova T., Selivyorstov V., Yvanova L.</i> Mathematical foundations of fractal heat and mass transfer in the two-phase zone of the metal melt	35
<i>Зубко Ю.Ю., Фролов Я.В., Кузьміна О.М., Самсоненко А.А., Бобух О.С.</i> Дослідження параметрів зони деформації при багатоканальній кутовій екструзії <i>Zubko Yu., Frolov Ya., Kuzmina O., Samsonenko A., Bobukh O.</i> Investigation of deformation zone parameters at multichannel angular extrusion	45
<i>Камкіна Л.В., Мянговська Я.В., Пройдак Ю.С., Мішалкін А.П.</i> Оцінка технологічної можливості використання шунгітової породи при одержанні марганцевого агломерату <i>Kamkina L., Mianovska Ya., Projdak Yu., Mishalkin A.</i> Assessment of using shungite rock technological feasibility in the production of manganese agglomerate	60

Качан Ю.Г., Міщенко В.Ю.

Можливості зменшення обсягів електроспоживання руднотермічною піччю

Kachan Yu., Mishchenko V.

Possibilities of reducing electricity consumption by ore-thermal furnace75

Куцова В.З., Іванченко В.Г., Котова Т.В., Ковзель М.А.

Дресирування гарячекатаного особливотонкого листового прокату із
низьковуглецевої сталі

Kutzova V., Ivanchenko V., Kotova T., Kovzel M.

Skin-rolling of hot-rolled extra-thin low-carbon steel sheets85

Луценко В.А., Голубенко Т.М., Чуйко І.М., Луценко О.В.

Моделювання впливу хімічного складу та структури
на механічні властивості легованого прокату

Lutsenko V., Golubenko T., Chuiko I., Lutsenko O.

Modeling of the influence of the chemical composition and
structure on the mechanical properties of alloy rolled products93

Мельянцов П.Т., Лосіков О.М., Назарець В.С., Сидоренко В.К.

Стабілізація радіального зазору в качаючому вузлі насоса підживлення
удосконаленням конструкції втулки підшипника ковзання

Melyantsov P., Losikov O., Nazarets V., Sidorenko V.

Stabilization of the radial clear in the pumping assembly of the supply pump
improvement by improving the structure of the slide bearing bushing102

Меркулов О.Є., Семенов Ю.С., Джигота М.Г.

Моделювання процесів доменної плавки при
зміні програми завантаження шихти

Merkulov O., Semenov Yu., Dzhigota M.

Modeling of blast furnace melt processes when changing the program
of charging the burden117

Молчанов Л.С., Пушкаренко М.В., Кисляков В.Г.

Термодинамічний аналіз технологічної операції
паралельного видалення сірки та кремнію з чавуну

Molchanov L., Pushkarenko M., Kislyakov V.

Thermodynamical analysis of technological operation of paralel sulphur
and silicon removing from the cast iron126

Moroz D.

Performance evaluations research of multiprocessor system in
the problem of heat treatment of metal products

Мороз Д.М.

Дослідження оцінок ефективності багатопроцесорної системи в задачі
термічної обробки металовиробу136

Скосар В.Ю., Бурилов С.В., Ворошилов О.С., Жулай Ю.О., Дзензерський В.О.

Методи переробки та утилізації літієвих джерел струму

Skosar V., Burylov S., Voroshilov O., Zhulay Yu., Dzenzersky V.

Methods of recycling of lithium power sources150

Sushko L.

Some aspects of modeling of technical diagnostics of mechanisms

Сушко Л.Ф.

Деякі аспекти моделювання технічної діагностики механізмів.....164

Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Семикін С.І.

Дослідження методів вимірювання фізичних показників

факелу догоряння димових газів у кисневому конвертері

Golub T., Molchanov L., Semykin S.

Research of methods for measuring the physical parameters

of the flue gas postcombustion torch in oxygen converter183

Кононов Д.О., Єрмократєв В.О., Чеченев В.А.

Експериментальне дослідження руху елементів вібраційного грохоту з

еластичною динамічно-активною поверхнею

Kononov D., Ermokratiev V., Chechenev V.

Experimental study of the motion of vibrating screen elements

with elastic dynamically active surface192

Шевченко А.П., Кисляков В.Г., Двоскін Б.В., Маначин І.О., Чубін К.І.

Дослідження зміни вмісту сірки в чавуні і складу шлаку на технологічних

переробах при підготовці чавуну до конвертерної плавки

Shevchenko A., Kislyakov V., Dvoskin B., Manachyn I., Chubin K.

Study of changes of the sulfur content in cast iron and the composition of

slag in technological processing during the preparation of cast iron for

the converter melter201

УДК 66.094.2:661.875.2

Гришин О.М., Надточій А.А., Петренко В.О., Киричок В.С. **Фізико-хімічні передумови знеуглецьовування продуктів вуглецевотермічного відновлення Cr_2O_3** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 3 – 16.

У роботі виконано термодинамічний аналіз процесу вуглецевотермічного відновлення сировини, що містить хром, для визначення умов отримання лігатури з низьким вмістом вуглецю. Виконаний шестифакторний експеримент математичного планування з використанням напіврепліки повного факторного експерименту. Отримано рівняння регресії, що дозволяє кількісно визначити оптимальне значення кожного фактора. За допомогою фазового аналізу систем Cr-O-C та Cr-Fe-O-C визначені умови, що забезпечують зниження вуглецю в кінцевому продукті. Розглянуто умови появи метастабільних карбідів. Визначено термодинамічні параметри, що забезпечують стабільність твердих фаз. Розглянуто особливості механізму карбідотермічного відновлення. Введення в шихту заліза створює передумови зниження вуглецю, а також інтенсифікує процес твердофазного відновлення.

Бібл. 14, іл. 4.

UDK 66.094.2:661.875.2

Grishin O., Nadtochij A., Petrenko V., Kyrychok V. **Physico-chemical prerequisites for decarburization of carbon-thermal reduction products Cr_2O_3** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 3 – 16.

The thermodynamic analysis of the process of carbon-thermal reduction of raw materials containing chromium was performed to determine the conditions for obtaining a low-carbon ligature. A six-factor mathematical planning experiment was performed using a half-replica of a complete factorial experiment. The regression equation is obtained, which allows to quantify the optimal value of each factor. By phase analysis of the Cr-O-C and Cr-Fe-O-C systems, the conditions that ensure the reduction of carbon in the final product are determined. The conditions for the appearance of metastable carbides are considered. Thermodynamic parameters that ensure the stability of solid phases are determined. Features of the carbido-thermal reduction mechanism are considered. The introduction of iron into the charge creates the preconditions for carbon reduction, as well as intensifies the process of solid-phase reduction.

Bibl. 14, Ill.4.

УДК 621.365.5.

Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Калініна Н.Ю., Балакін В.Ф., Ларіонов Г.І. **Проектування і аналіз схемотехніки інверторного перетворювача для індукційного нагріву** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 17 – 34.

Розроблено схему та конструкцію лабораторного інвертору, призначеного для індукційного нагріву та плавки. В якості топології конструкції інвертору обрано напівмост. Потужність інвертора регулюється від 0 до 2 кВт, діапазон робочих частот від 50 кГц до 200 кГц, живлення від 220В. Завдяки захисту від перевищення току, перегріву, низької напруги живлення в ланцюзі управління, він добре підходить для лабораторних досліджень з плавлення та нагрівання металу.

Бібл. 4, іл. 15.

УДК 621.365.5.

Zimoglyad A., Guda A., Kalinina N., Balakin V., Larionov H. **Design and analysis of circuit technique of inverter converter for induction heating** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 17 – 34.

Was developed the scheme and design of a laboratory inverter designed for induction heating and melting. A half-bridge was chosen as the topology of the inverter construction. The power of the inverter is adjustable from 0 to 2 kWt, the operating frequency range from 50 kHz to 200 kHz, power supply from 220V. Due to the protection against overcurrent, overheating, low supply voltage in the control circuit, it is well suited for laboratory research on melting and heating of metal.

Bibl. 4, Ill.15.

УДК 004.942:536.24:66.021.3:517.982:515.127

Селівьорстова Т.В., Селівьорстов В.Ю., Іванова Л.Х. **Математичні основи фрактального тепло і масопереносу в двохфазній зоні розплаву металу** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 35 – 44.

В статті наведені результати аналізу процесів переносу в розплаві. Представлені результати експериментальних досліджень, що свідчать про фрактальний характер затвердіння притаманний більшості ливарних сплавів. Наведений математичний апарат опису процесу затвердіння з позиції тепло та масопереносу в двохфазній зоні та дифузії у фрактальних середовищах. Показано, що математичний апарат дробового обчислення дозволяє ефективно описувати фрактальний характер дифузійних процесів.

Бібл. 16, іл. 2.

UDC 004.942:536.24:66.021.3:517.982:515.127

Selivyorstova T., Selivyorstov V., Yvanova L. **Mathematical foundations of fractal heat and mass transfer in the two-phase zone of the metal melt** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. С. 35 – 44.

The article presents the results of the transfer processes analysis in the melt. The results of experimental studies are presented, which testify to the fractal nature of hardening inherent in most casting alloys. The mathematical apparatus for describing the curing process from the standpoint of heat and mass transfer in a two-phase zone and diffusion in fractal media is presented. It is shown that the mathematical apparatus of fractional calculation makes it possible to effectively describe the fractal nature of diffuse processes.

Bibl. 16, Ill.2.

УДК 621.777

Зубко Ю.Ю., Фролов Я.В., Кузьміна О.М., Самсоненко А.А., Бобух О.С. **Дослідження параметрів зони деформації при багатоканальній кутовій екструзії** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 45 – 59.

Метою дослідження є визначення особливостей зони деформації та пластичного плину металу в процесі багатоканальної кутової екструзії. Експериментальну частину дослідження здійснено шляхом аналізу викривлення координатної сітки в зоні деформації після закінчення процесу. Аналіз сітки дозволив виокремити певні елементи зони деформації. Розроблений спеціальний інструмент, що забезпечує проведення багатоканальної кутової екструзії. Особливістю розробленого інструменту є те, що матриця інтегрована у контейнер і виконується розбірною. Встановлено, що центральні шари металу деформуються легше, а шари, потік яких сповільнюється внаслідок контактного тертя між інструментом та заготовкою, деформуються із затримкою. За допомогою експериментальних даних підтверджено адекватність розробленої в програмі QForm © математичної моделі процесу.

Бібл. 15, іл. 10.

UDC 621.777

Zubko Yu., Frolov Ya., Kuzmina O., Samsonenko A. Bobukh O. **Investigation of deformation zone parameter at multichannel angular extrusion** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 45 – 59.

The aim of the research is to determine the features of the deformation zone and plastic flow of metal in the process of multichannel angular extrusion. The experimental part of the study was carried out by analyzing the curvature of the grid in the deformation zone after the process. The analysis of the grid allowed to identify certain elements of the deformation zone. A special tool has been developed to provide multi-channel angular extrusion. The peculiarity of the developed tool is that the matrix is integrated into the container and is made collapsible. It has been found that the central layers of metal deform more easily, and the layers, the flow of which slows down due to contact friction between the tool and the workpiece, deform with a delay. The adequacy of the mathematical model of the process developed in the QForm © program was confirmed with experimental data.

Bibl. 15, Ill.10.

УДК 669.046.446.48

Камкіна Л.В., Мянговська Я.В., Проїдак Ю.С., Мішалкін А.П. **Оцінка технологічної можливості використання шунгітової породи при одержанні марганцевого агломерату** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 60 – 74.

Виконано розрахунки термодинамічної рівноваги оксидних систем, адекватних агломераційним, проведено дослідження хімічного складу фазових складових мікроструктур марганцевого агломерату. Встановлено раціональний вміст шунгіту в аглошихті, який забезпечує одержання агломерату із заданими характеристиками (міцністю, виходом придатного, вмістом марганцю) становить 12...13% від маси вихідної шихти. Подальше підвищення його частки в аглошихті призводить до зниження міцності та виходу придатного спеку. Збільшення ступеня дисперсності шунгіту до 0-2мм дозволяє збільшити рівень використання вуглецю шунгіту як паливо без збільшення на процес кількості традиційного палива - коксу.

Бібл. 19, табл. 5.

UDC 669.046.446.48

Kamkina L., Myanovskaya Ya., Proidak Yu., Mishalkin A. **Assessment of using shungite rock technological feasibility in the production of manganese agglomerate** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 60 – 74.

Calculations of the thermodynamic equilibrium of oxide systems, adequate to agglomeration, were performed, the study of the chemical composition of the phase components of the microstructures of manganese agglomerate was carried out. The rational content of shungite in the sinter charge, providing the agglomerate with the specified characteristics (strength, yield, suitable manganese content) is 12 ... 13% by weight of the initial charge. Further increase of its particle in the sinter charge leads to a decrease in strength and the release of suitable heat. Increasing the degree of dispersion of shungite to 0-2 mm allows to increase the level of carbon use of shungite as a fuel without increasing the amount of traditional fuel - coke.

Bibl. 19, table. 5.

УДК 669:621

Качан Ю.Г., Міщенко В.Ю. **Можливості зменшення обсягів електроспоживання руднотермічною піччю** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 75 – 84.

Представлений аналіз існуючих моделей розподілу електричного струму в руднотермічній печі. Запропонована комплексна алгоритмічна модель роботи такої печі. За допомогою цього математичного опису стає можливим прогнозування витрат електричної енергії при одержанні різних видів феросплавів. Також модель дозволяє за зпрогнозованою кількістю необхідно утвореного розплаву зупинити процес та почати злив феросплавів, що в свою чергу зменшить час плавки та кількість споживаної електричної енергії.

Бібл. 16, іл. 1.

UDC 669:621

Kachan Yu., Mishchenko V. **Possibilities of reducing electricity consumption by ore-thermal furnace** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 75 – 84.

An analysis of existing models of electric current distribution in an ore thermal furnace is presented. A complex algorithmic model of operation of such a furnace is proposed. With the help of this mathematical description it becomes possible to predict the consumption of electrical energy in obtaining different types of ferroalloys. The model also allows the predicted amount of melt formed to stop the process and start draining ferroalloys, which in turn will reduce the melting time and the amount of electricity consumed.

Bibl. 16, ill.1.

УДК 621.771.23.09

Куцова В.З., Іванченко В.Г., Котова Т.В., Ковзель М.А. **Дресування гарячекатаного особливотонкого листового прокату із низьковуглецевої сталі** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 85 – 92.

Проведено аналіз впливу заключної операції обробки - дресування на структуру і властивості гарячекатаного особливотонкого листового прокату із низьковуглецевої сталі 08пс. Встановлено, що механічні властивості металу, обробленого за різними технологічними схемами, повністю відповідають вимогам ДСТУ 2834-94 як до гарячекатаного, так і до холоднокатаного прокату.

Показано, що відпал травленого особливотонкого листового прокату із сталі 08пс суттєво покращує його пластичність в зрівнянні з гарячекатаним станом та сприяє формуванню рівномірної структури металу відповідно до ДСТУ 2834-94.

Бібл. 7, табл. 2.

UDC 621.771.23.09

Kutzova V., Ivanchenko V., Kotova T., Kovzel M. **Skin-rolling of hot-rolled extra-thin low-carbon steel sheets** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 85 – 92.

Skin-rolling is the final operation of the technological process for the production of auto sheet steel. Tempering affects the quality of the metal surface, properties and stamping ability. Treading allows you to harden the surface of the rolled products and keep the inner layers undeformed. As a result, it is possible to prevent the formation of shear lines during stamping and provide an optimal combination of the mechanical characteristics of rolled products. On skin-rolling mills, the sheet is rolled to a predetermined thickness. Treading etched sheets provides them with a smoother surface. Benefits skin training are to increase the ability of the material to deep drawing and reduce energy costs during stamping. The use of skin-rolling will allow to produce high-quality rolled products in accordance with the requirements of standards. An analysis of the effect of skin-rolling on the quality indicators of low-carbon steel thin-rolled products for the automotive industry was carried out. The effect of skin-rolling on the structure and mechanical properties of hot-rolled extra-thin sheet metal from 08nc low-carbon steel was studied. The mechanical properties of the metal meet the requirements of ДСТУ 2834-94 for hot-rolled and cold-rolled steel. Annealing of extra-thin sheet steel from 08пс steel increases its plasticity compared to the hot-rolled state and contributes to the formation of a uniform metal structure in accordance with ДСТУ 2834-94. The choice of parameters and optimization of the skin-rolling process will prevent a decrease in the plasticity of the material, improve mechanical properties and improve the quality of extra-thin sheet steel.

Bibl. 7, table. 2.

УДК 669.1.017:669.15-194.001.57

Луценко В.А., Голубенко Т.М., Чуйко І.М., Луценко О.В. **Моделювання впливу хімічного складу та структури на механічні властивості легованого прокату** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 93 – 101.

При розробці нових марок сталей актуальним для сучасного машинобудування є вивчення впливу хімічного складу та обробки на структуру й механічні властивості. З використанням математичного та фізико-хімічного моделювання для сталі 31CrMoV9 побудовані залежності зміни механічних властивостей легованого сортового прокату (σ_b , δ_5) від показника структурного стану (d). Визначено, що для гарантованого виконання вимог границі міцності (900-1000 МПа) і відносного подовження ($> 11\%$) кількість легуючих елементів повинна відповідати наступному вмісту: 2,46...2,62 % Cr, 0,2...0,24 % Mo і 0,17...0,19 % V. Отримані дані дозволяють прогнозувати раціональні механічні властивості термічно обробленого сортового прокату в залежності від зміни вмісту хрому, молібдену й ванадію. Встановлено, що нагрівання до температури $A_3+200^\circ\text{C}$ та подальше безперервне охолодження зі швидкостями $> 0,8^\circ\text{C/s}$ перешкоджає утворенню перлітної структури, що при подальшій термічній обробці (відпалу) сприяє проходженню структурних перетворень (коагуляція, сфероїдизація) в сталі. Для попередження викривлення металу бажано охолодження прокату зі сталі 31CrMoV9 проводити зі швидкістю $0,8...2^\circ\text{C/s}$.

Бібл. 11, іл. 3, табл. 1.

UDC 669.1.017:669.15-194.001.57

Lutsenko V., Golubenko T., Chuiko I., Lutsenko O. **Modeling of the influence of THE chemical composition and structure on the mechanical properties of alloy rolled products** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 93 – 101.

Actual for modern engineering is the study of the influence of chemical composition and processing on the structure and mechanical properties during development of the new brands of the steel. The purpose of the study was the modeling of the role of the chemical composition for the formation of the mechanical properties and structure in determining the effect of the cooling rate on the austenitization temperatures of the 31CrMoV9 steel. It is known that the complex of mechanical properties of metal products depends on the number of alloying elements and the mode of heat treatment. Using the mathematical and physicochemical modeling for 31CrMoV9 steel were made dependent on the change in the mechanical properties of the alloy rolled products (σ_B , δ_5) from the structural condition index (d). It is determined that for guaranteed compliance with the requirements of tensile strength (900-1000 MPa) and specific elongation ($> 11\%$) the number of the alloying elements shall be corresponds to the following content: 2,46...2,62 % Cr, 0,2...0,24 % Mo and 0,17...0,19 % V. Received data are allow to forecast the rational mechanical properties of the heat treated rolled products depending on the change in the content of chromium, molybdenum and vanadium. Metallographic studies allowed to establish the influence of heat treatment parameters on the structure of the studied alloy steel. It is established that heating to the temperature $A_3+200^\circ\text{C}$ and further continuous cooling with speeds $> 0,8^\circ\text{C/s}$ prevents the formation of the pearlite structure, which during further heat treatment (annealing) promotes the passage of structural transformations (coagulation) in the steel. To prevent curvature of the metal, it is desirable to have cooling the rolled steel 31CrMoV9 at a speed of $0,8...2^\circ\text{C/s}$. Recommended cooling rates allow to obtain a more acceptable structure for further processing with the required mechanical properties. Together with prognostication of the level of the mechanical properties for the certain chemical composition, these recommendations allow the rational use of the chemical elements and guaranteed compliance with the requirements of the European regulatory documentation EN10085:2001.

Bibl. 11, Ill. 3, table. 1.

УДК 629.7:658.512.2

Мельянцеv П.Т., Лосіков О.М., Назарець В.С., Сидоренко В.К. **Стабілізація радіального зазору в качаючому вузлі насоса підживлення удосконаленням конструкції втулки підшипника ковзання** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 102 – 116.

Розглядається метод стабілізації структурних параметрів технічного стану деталей, які формують радіальний зазор в підшипниках ковзання качаючого вузла насоса: «цапфа ведучого вала - отвір втулки», «цапфа веденої вісі – отвір втулки». Запропоновано конструкцію комбінованих втулок підшипника ковзання, яка забезпечує зменшення площі контакту валу зі втулкою в зоні максимальних значень сил тертя, за рахунок застосування компенсаційних пружин та пружнодемпфуючого елемента, які мають пружність меншу модуля пружності матеріалу втулки. Проведено триботехнічні порівняльні випробування пари тертя «цапфа ведучого вала – комбінована втулка» за схемою «ролик-колодка». Показано ефективність запропонованого методу стабілізації структурних параметрів порівнянням оцінок сумарного зношення експериментальної пари тертя та «еталонної».

Бібл. 10, іл. 7, табл. 1.

UDC 629.7:658.512.2

Melyantsov P., Losikov O., Nazarets V., Sidorenko V. **Stabilization of the radial clear in the pumping assembly of the supply pump improvement by improving the structure of the slide bearing bushing** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 102 – 116.

The method of stabilization of structural parameters of technical condition of details which form a radial backlash in sliding bearings of pump pumping unit is considered: «driving shaft pin - sleeve hole», «driven axle pin - sleeve hole». The design of combined plain bearing bushes is proposed, which reduces the contact area of the shaft with the bushing in the area of maximum values of friction forces, due to the use of compensating springs and elastic damping element with elasticity less than the modulus of elasticity of the bushing material. Tribotechnical comparative tests of the friction pair of the «drive shaft pin - combined sleeve» according to the «roller-pad» scheme were carried out. The efficiency of the proposed method of stabilization of structural parameters is shown by comparing the estimates of the total wear of the experimental friction pair and the "reference" pair.

Bibl. 10, Ill. 7, table. 1.

УДК 669.162.2

Меркулов О.Є., Семенов Ю.С., Джигота М.Г. **Моделювання процесів доменної плавки при зміні програми завантаження шихти** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 117 – 125.

Наведено результати прогнозової оцінки моделювання процесів та кінцевих показників доменної плавки при зміні програми завантаження шихти на доменній печі об'ємом 1719 м³ з наступним зіставленням з фактично отриманими результатами. Моделювання здійснено за допомогою математичної моделі доменної плавки, що на відміну від отримання балансових показників дозволяє отримати знання про механізм процесів, за рахунок яких відбуваються зміни, в тому числі при нерівномірності розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі.

Бібл. 5, іл. 2, табл. 1.

UDC 669.162.2

Merkulov O., Semenov Yu., Dzhigota M. **Modeling of blast furnace melt processes when changing the program of charging the burden** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 117 – 125.

The results of the forecast estimation of modeling of processes and final indicators of blast furnace smelting at change of the program of loading of charge on the blast furnace with a volume of 1719 m³ with the subsequent comparison with actually received results are resulted. The simulation was performed using a mathematical model of blast furnace smelting, which, in contrast to obtaining balance indicators, provides knowledge about the mechanism of processes due to which changes occur, including uneven distribution of charge materials on the blast furnace grate.

Bibl. 5, Ill.2, table. 1.

УДК 669.162

Молчанов Л.С., Пушкаренко М.В., Кисляков В.Г. **Термодинамічний аналіз технологічної операції паралельного видалення сірки та кремнію з чавуну** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 126 – 135.

У роботі наведені результати термодинамічний аналіз процесу паралельного видалення сірки та кремнію з розплаву за рахунок вдування порошкоподібного вапна в струмені кисню та введення у розплав додаткового відновника. Встановлено, що окислення кремнію можливо при вдуванні газоподібного кисню. При цьому у якості відновників при десульфуратії вапном раціонально використовувати марганець. Введення марганцю у розплав необхідно організовувати паралельно з проведенням операції десіліконізації, щоб уникнути перевитрати марганцю.

Бібл. 5, іл. 3, табл. 2.

UDC 669.162

Molchanov L., Pushkarenko M., Kislyakov V. **Thermodynamical analysis of technological operation of parallel and silicon removing from the cast iron** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 126 – 135.

There are results of thermodynamical analysis of parallel sulphur and silicon removing from the melt with the help of powder lime blowing and adding to the melt additional deoxidizer. It is found that it is rational to use manganese as a deoxidizer. Adding manganese is necessary to do simultaneously with silicon removing to avoid manganese overrun.

Bibl. 5, Ill. 3, table. 2.

УДК 681.3.012:621.1

Мороз Д.М. **Дослідження оцінок ефективності багатопроцесорної системи в задачі термічної обробки металовиробу** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 136 – 149.

Статтю присвячено дослідженню проблеми узгодження можливостей процесорів і мережевого інтерфейсу в багатопроцесорних обчислювальних системах. Основна увага приділяється дослідженню ефективності й прискорення обчислень для розв'язування задачі термічної обробки металовиробу за рахунок застосування багатопроцесорних обчислювальних систем. Виведено аналітичні співвідношення для отримання оптимального числа вузлів багатопроцесорної системи через її параметри. Визначено оцінки ефективності багатопроцесорної системи при розв'язування задачі термічної обробки металовиробу для різного класу процесорів.

Бібл. 15, іл. 2, табл. 1.

UDK 681.3.012:621.1

Moroz D. **Performance evaluations research of multiprocessor system in the problem of heat treatment of metal products** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 136 – 149.

The paper aims to study matching the processors' possibilities and the network interface in the multiprocessor computing systems. The main focus is on investigating the performance and acceleration of computations for solving the problem of metal products' heat treatment due to the multiprocessor computing systems. The research evaluates the multiprocessor system performance in the heat treatment of metal products. Analytical correlations were introduced for getting the optimum number of nodes in the multiprocessor system via parameters.

Bibl. 15, Ill. 2, table. 1.

УДК 669.2; 669.1

Скосар В.Ю., Бурилов С.В., Ворошилов О.С., Жулай Ю.О., Дзензерський В.О. **Методи переробки та утилізації літієвих джерел струму** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 150 – 163.

На основі аналізу науково-технічних публікацій дано загальну характеристику сучасних технологій переробки літієвих джерел живлення. Переробку проводять за такою схемою. Спочатку організують розряд джерел струму та їх попередню обробку для відділення діючих речовин. Попередня обробка проводиться механічним подрібненням, або ультразвуком, або розчинниками. Отриманий матеріал піддають магнітному або гравітаційному розділенню, видаляючи речовини, що містять метали. Потім літій, кобальт, нікель, марганець видаляють пірометалургією, або гідрометалургією, або електрохімічним вилученням. Отримані метали придатні для вторинного використання в літієвих джерелах струму. Авторами розроблено принципову схему технології попередньої обробки літієвих акумуляторів, заснованої на акустичній або гідродинамічній кавітації, а також удосконалено спосіб магнітної сепарації цінних металів.

Бібл. 15, іл. 3.

UDC 669.2; 669.1

Skosar V., Burylov S., Voroshilov O., Zhulay Yu., Dzenzersky V. **Methods of recycling of lithium power sources** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 150 – 163.

Based on the analysis of scientific and technical publications, a general description of modern technologies for recycling lithium power sources is given. Recycling is carried out according to the following scheme. First, they organize the discharge of power sources and their pre-treatment. Pre-treatment is carried out by mechanical grinding, ultrasound, calcination, or solvents, followed by magnetic or gravitational separation. Then Li, Co, Ni, Mn are removed by pyrometallurgy, hydrometallurgy, or electrochemical extraction. The obtained metals are suitable for secondary use in lithium power sources. The authors have developed a schematic diagram of the technology of pre-treatment of lithium batteries based on acoustic or hydrodynamic cavitation, and magnetic separation of metals.

Bibl. 15, Ill. 3.

УДК 004.942:519.6

Сущко Л.Ф. **Деякі аспекти моделювання технічної діагностики механізмів** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 164 – 182.

Проведені дослідження спрямовані на розкриття проблем моделювання технічної діагностики механізмів і машин. Для оцінки технічного стану машин і формування діагностичних ознак запропонована методика, заснована на застосуванні математичної теорії розпізнавання образів. Показано, що технічну діагностику машин і механізмів можна інтерпретувати як розпізнавання класів технічного стану об'єкта за сукупністю його технічних характеристик. При цьому встановлюється до якого класу відноситься поточний стан, що розпізнається. Проведені дослідження висвітлюються на фоні оцінки дефектів зубчастих передач показали. Такі дослідження показали, що на перших етапах розвитку дефектів відбувається процес, коли синхронні компоненти не зростають, а вся додаткова потужність від дефекту зосереджується в несинхронних гармоніках.

Бібл. 11, іл. 1.

UDC 004.942:519.6

Sushko L. **Some aspects of modeling of technical diagnostics of mechanisms** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 164 – 182.

Conducted research is aimed to reveal the problems of modeling technical diagnostics of mechanisms and machines. To assess the technical condition of machines and the formation of diagnostic features, a method based on the application of mathematical theory of pattern recognition is proposed. It is shown that technical diagnostics of machines and mechanisms can be interpreted as the recognition of classes of technical condition of the object by the set of its technical characteristics. At the same time it is established to what class the current recognized state belongs. The studies highlighted against the background of the assessment of gear defects showed. Such studies have shown that in the early stages of defect development there is a process when synchronous components do not grow, and all the extra power from the defect is concentrated in asynchronous harmonics.

Bibl. 11, Ill. 1.

УДК 669.184.14

Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Семикін С.І. **Дослідження методів вимірювання фізичних показників факелу догорання димових газів у кисневому конвертері** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 183 – 191.

У роботі наведені результати фізичного моделювання дослідження впливу часток розміром 250-300 мм різного хімічного складу (що відповідає киснево-конвертерному процесу) на можливість реєстрації фізичних показників факелу допалювання: теплопередачі, світимості (яскравості) та електричних характеристик. Встановлено, що саме вимір електричних характеристик факелу догорання газів може бути використаний у якості параметру для контролю процесу конвертування завдяки оперативності визначення та відсутності значного впливу на точність виміру надлишкової температури і запиленості.

Бібл. 9, іл. 3.

UDK 669.184.14

Golub T., Molchanov L., Semykin S.

Research of methods for measuring the physical parameters of the flue gas combustion torch in oxygen converter // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 183 – 191.

The paper presents the results of physical modeling of the study of the influence of particles with a size of 250-300 mm of different chemical composition (corresponding to the oxygen-converter process) on the possibility of registration of physical parameters of the postcombustion torch: heat transfer, luminosity and electrical characteristics. It was established that the measurement of electrical characteristics of the gas combustion torch can be used as a parameter to control the conversion process due to the efficiency of determination and the lack of significant impact on the accuracy of measurement of excess temperature and dust.

Bibl. 9, Ill. 3.

УДК 621.928.024.1

Кононов Д.О., Єрмократьєв В.О., В.А. Чеченев В.А. **Експериментальне дослідження руху елементів вібраційного грохоту з еластичною динамічно-активною поверхнею** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 192 – 200.

Проведено експериментальне дослідження руху елементів вібраційного грохоту та визначено основні кінематичні характеристики.

Розроблено схему вимірювального комплексу, в умовах роботи лабораторного вібраційного грохоту (частота коливань 25 Гц, максимальна амплітуда 4 мм). Запропоновано використовувати датчики MPU 6050, ADXL345 та мікроконтролерів Arduino Nano або STM32F103. Розроблено необхідне програмне забезпечення.

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок що еластичні елементи сита у вертикальній площині коливається з амплітудою 2-2,5 рази більше, ніж амплітуда коливання короба вібраційного грохота.

Бібл. 5, іл. 7, табл. 2.

UDC 621.928.024.1

Kononov D., Ermokratiev V., Chechenev V. **Experimental study of the motion of vibrating screen elements with elastic dynamically active surface** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 192 – 200.

An experimental study of the movement of vibrating screen elements was performed and the main kinematic characteristics were determined.

The scheme of the measuring complex is developed, in the conditions of laboratory vibrating screen operation (oscillation frequency 25 Hz, maximum amplitude 4 mm). It is recommended to use MPU 6050, ADXL345 sensors and Arduino Nano or STM32F103 microcontrollers. The necessary software has been developed.

Analyzing the obtained data, we can conclude that the elastic elements of the sieve in the vertical plane oscillates with an amplitude of 2-2.5 times greater than the amplitude of oscillations of the vibrating screen box.

Bibl. 5, ill. 7, table. 2.

УДК 669.162.63

Шевченко А.П., Кисляков В.Г., Двоскін Б.В., Маначин І.О., Чубін К.І. **Дослідження зміни вмісту сірки в чавуні і складу шлаку на технологічних переробах при підготовці чавуну до конвертерної плавки** // Сучасні проблеми металургії, № 25 – 2022. С. 201 – 219.

У статті проаналізовано зміну вмісту сірки в чавуні та складу шлаку в технологічному ланцюзі підготовки чавуну до конвертерної плавки. На підставі результатів проведених досліджень розроблено та рекомендовано технічні рішення та технологічні прийоми, спрямовані на виключення ресульфурзації чавуну. Точкове зондове сканування зразків ковшового шлаку показало, що в шлаковій фазі поряд із системами типу $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ з різним співвідношенням компонентів, що містять 0,2–3,5 % сірки, виявлені системи типу $\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{Al}_z$, що містять до 1 % сірки; у «корольках» вміст сірки коливається не більш 0,1 – 0,85 % і у вигляді сульфідів типу $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$, переважно MnS , причому у неметалевих включеннях «корольків» виявлено вміст сірки не більш 15–30 %. Проведені дослідження складів сухих, розсипчастих і рідких склоподібних ковшових шлаків після десульфурзації показали, що вони не змінюють фазовий склад, але на відміну від вихідних ковшових шлаків у шлаковій фазі таких шлаків переважно присутні системи типу $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, збагачені оксидами магнію з перемінним співвідношенням компонентів. При цьому сірка у шлаковій фазі сухих шлаків знаходиться в основному у вигляді комплексів $(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Si})\text{S}$, а у шлаковій фазі рідких шлаків в основному у вигляді MnS і рідше у вигляді комплексів $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$. За результатами проведених промислових експериментів на низці підприємств України та Китаю було встановлено, що для обмеження приходу сірки до конвертерної сталі зі шлаком на рівні $\leq 0,002$ %, залишок ковшового шлаку після десульфурзації не повинен перевищувати 0,5 – 0,7 кг/т чавуну.

Бібл. 12, іл. 3, табл. 2.

UDC 669.162.63

Shevchenko A., Kislyakov V., Dvoskin B., Manachyn I., Chubin K. **Study of changes of the sulfur content in cast iron and the composition of slag in technological processing during the preparation of cast iron for the converter melter** // Modern problems of metallurgy, № 25 – 2022. P. 201 – 219.

The article analyzes the change in the sulfur content of cast iron and the composition of slag in the technological chain of preparing cast iron for converter smelting. On the basis of the results of the conducted research, technical solutions and technological techniques aimed at eliminating cast iron resulfurization were developed and recommended. Spot probe scanning of bucket slag samples showed that in the slag phase, along with $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ type systems with different ratios of components containing 0.2–3.5% sulfur, $\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{Al}_z$ type systems containing up to 1% sulfur were found; in "beads" the sulfur content varies no more than 0.1 - 0.85% and in the form of sulfides of the $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{S}$ type, mainly MnS , and in the non-metallic inclusions of "beads" the sulfur content is no more than 15 - 30%. Studies of the compositions of dry, friable and liquid glassy ladle slags after desulfurization showed that they do not change the phase composition, but unlike the original ladle slags, in the slag phase of such slags there are mainly $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ type systems, enriched with magnesium oxides with variable ratio of components. At the same time, sulfur in the slag phase of dry slags is mainly in the form of $(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Si})\text{S}$ complexes, and in the slag phase of liquid slags it is mainly in the form of MnS and less often in the form of $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$ complexes. According to the results of industrial experiments carried out at a number of enterprises in Ukraine and China, it was established that in order to limit the introduction of sulfur into converter steel with slag at the level of $\leq 0.002\%$, the remaining ladle slag after desulfurization should not exceed 0.5-0.7 kg/t of cast iron.

Bibl. 12, ill. 3, table. 2.

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ

НАУКОВІ ВІСТІ

№ 25

Технічна редакція: Власова Т.Є.
Комп'ютера верстка: Селівьорстова Т.В.

Здано в набір 04.04.22. Підписано до друку 08.04.22.
Формат А4. Гарнітура Шкільна. Тираж 300. Зам. № 07/22.

Український державний університет науки і технологій
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»
49005, Дніпро
st@nmetau.edu.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:
Серія КВ № 8684