

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МЕТАЛУРГІЇ

№4
(135)
2022

ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видається з березня 1997 року
Виходить 6 разів на рік

Засновники: Національна металургійна академія України
Відділення матеріалознавства та металургії
Академії інженерних наук України

Видавці: Національна металургійна академія України
Відділення матеріалознавства та металургії
Академії інженерних наук України

Дніпро
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ
АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ

Загальнодержавний
науково-технічний журнал

ISSN 1028-2335

Випуск 4 (135) 2022р

Свідоцтво про реєстрацію:
серія КВ № 21962-11862ПР
від 23 березня 2016 року

Наказом МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ №157 від
09.02.2021 р. журнал включено до
категорії «Б» переліку наукових
фахових видань України, по
спеціальностям:
133 – Галузеве машинобудування;
136 – Металургія;
161 – Хімічні технології

Формат 60x84¹/₈.
Ум.друк.арк. 5,12

Адреса редакції та видавця: Національна
металургійна академія України,
пр.Гагаріна, 4, м.Дніпро, 49006
т.(056) 745-41-96;
Тираж 100 прим.

Засновники:

Центр (відділення) матеріалознавства і металургії Академії
інженерних наук України

Національна металургійна академія України

Редакційна колегія

Головний редактор

д.т.н., проф. **Пройдак Ю.С.** (Україна)

Заступник головного редактора

д.т.н., проф. **Камкіна Л.В.** (Україна)

| | |
|--------------------------------|-------------|
| д.т.н., проф. Білодіденко С.В. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Волкова О. І. | (Німеччина) |
| д.т.н., проф. Гнатушенко В.В. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Кнапинський М.Я. | (Польща) |
| д.т.н., проф. Куцова В.З. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Лежнев С.М. | (Казахстан) |
| д.т.н., проф. Лялюк В.П. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Малий Є.І. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Медовар Л.Б. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Сігарьов Є.М. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Стовпченко Г.П. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Фролов Я.В. | (Україна) |
| д.т.н., проф. Шатоха В.І. | (Україна) |

Передрук лише за дозволом редакції

При використанні матеріалів посилання на журнал обов'язкове
**Видавництво не несе відповідальність за зміст матеріалу,
наданого автором до друку**

Матеріали публікуються на мові оригіналу

За якість перекладу статей на англійську мову редакція відповідальності не несе
**Редакційна рада залишає за собою право змінювати текст статей,
не впливаючи на загальний зміст наданого матеріалу**



+38056-745-41-96;

<http://tpm.nmetau.edu.ua>

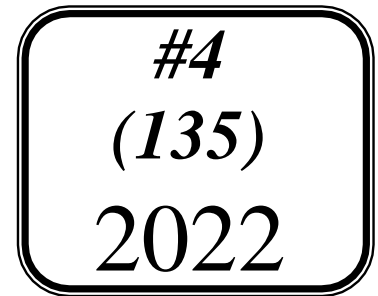
e-mail: projdak@metal.nmetau.edu.ua

Комп'ютерне верстання О.Г.Безшукурєнко

©НМетАУ 2022

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE

THEORY AND PRACTICE OF METALLURGY



GENERAL STATE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Issued since March 1997
Released 6 times a year

Founders: National Metallurgical Academy of Ukraine
Department of Materials Science and Metallurgy
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

Publishers: National Metallurgical Academy of Ukraine
Department of Materials Science and Metallurgy
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

Dnipro
2022

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE**

National scientific journal

ISSN 1028-2335

Edition 4 (135) 2022 year

Certificate of registration:

KB № 21962-11862П

23.03.2016

By the order of the MINISTRY OF
EDUCATION AND SCIENCE OF
UKRAINE №157 from 09.02.2021,
the journal is included in category "B"
of the list of scientific professional
publications of Ukraine, by
specialties:

133 - Industry engineering;

136 - Metallurgy;

161 - Chemical technologies

Format 60x84¹/₈.

CPP. 5,12

Editorial address and publisher: National
Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina,

4, Dnipro 49006

т.(056) 745-41-96;

Copies of 100.

Founders:

Center (Department) of Materials Science and Metallurgy of the
Academy of Engineering Sciences of Ukraine
National Metallurgical Academy of Ukraine

Editorial board

Editor in Chief

D.Tech.Sc., prof. **Proydak Yu** (Ukraine)

Honorable Editor

D.Tech.Sc., prof. **Kamkina L.** (Ukraine)

| | |
|------------------------------|--------------|
| Prof., d.t.s. Bilodidenko S. | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Volkova O. | (Germany) |
| Prof., d.t.s. Gnatushenko V. | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Knapinskij M. | (Poland) |
| Prof., d.t.s. Kutsova V. | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Lezhnyev S. | (Kazakhstan) |
| Prof., d.t.s. Lyalyuk V. | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Malij Ye. | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Medovar L. | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Sigarov Ye | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Frolov Ya. | (Ukraine) |
| Prof., d.t.s. Shatoha V. | (Ukraine) |

Reproduction only with permission of the publisher

With reference to the journal is obligatory

Publisher is not responsible for the content of the material,
by authors for publication

Publikuyutsya materials in the original language

For quality translations of articles on English version is not liable

Editorial Board reserves the right to change the text of the articles without affecting
the overall content of the material



+38056-745-41-96;

<http://tpm.nmetau.edu.ua>

e-mail:projdak@metal.nmetau.edu.ua

Computer layout by Olexej Bezshkurenko

©NMetAU 2022

Кривенко В.В., Грищенко С.Г., Ольшанский В.И., Філіппов І.Ю., Замкової О.В., Шепляков І.А., Овчарук А.Н.

МЕТАЛУРГІЙНА ОЦІНКА МАРГАНЦЕВОРУДНОЇ СИРОВИНИ ЕЛЕКТРОТЕРМІЇ ФЕРОСПЛАВІВ

Кривенко В.В., Грищенко С.Г., Ольшанский В.И., Філіппов І.Ю., Замкової О.В., Шепляков І.А., Овчарук А.Н.

МЕТАЛУРГІЙНА ОЦІНКА МАРГАНЦЕВОРУДНОЇ СИРОВИНИ ЕЛЕКТРОТЕРМІЇ ФЕРОСПЛАВІВ

Виконано комплексне дослідження фізико-хімічних властивостей і металургійної цінності марганцевої сировини різних родовищ, що використовуються для виробництва феросплавів у рудовідновлювальних печах підвищеної потужності.

Розглянуто питання повернення у виробництво продуктів збагачення сировини й відходів феросплавного виробництва, використання яких у металургійній переробці без підготовки й згрудкування неможливе.

Keywords: марганцевий концентрат, збагачення відвальних шлаків, параметри агломерації, виробництво феросплавів, охорона навколишнього середовища.

A comprehensive study of the physico-chemical properties and metallurgical value of manganese raw materials from various deposits, which are used for the production of ferroalloys in ore reduction furnaces of increased capacity, was performed.

The question of returning to production the products of enrichment of raw materials and wastes of ferroalloy production, the use of which in metallurgical processing without preparation and agglomeration is impossible, was considered.

Keywords: manganese concentrate, waste sludge enrichment, agglomeration parameters, production of ferroalloys, environmental protection.

Проаналізовано сучасні технологічні схеми **кускування/обкускування** марганцевмісних матеріалів методом агломерації. У лабораторних, напівпромислових і промислових умовах проведено комплекс досліджень, на підставі яких розроблено нові технології й технічні рішення, спрямовані на підвищення металургійних властивостей агломерату. Основні рішення полягають у спіканні марганцевого агломерату у високому (600 мм) шарі, попередньому **грудкуванню** тонкодисперсних марганцевих концентратів перед спіканням методом обкочування або брикетування, розробці і впровадженні технологічних схем комплексного використання вторинних ресурсів феросплавного виробництва.

INTRODUCTION

Відмінною рисою марганцевих руд вітчизняних родовищ є відносно невисокий вміст марганцю і підвищена концентрація фосфору і кремнезему [1], що не дозволяє, на відміну від більшості закордонних руд, використовувати сировину без попереднього збагачення і грудкування.

Для виваженої оцінки сировини необхідно зіставити показники якості марганцевих концентратів вироблених в Україні і закордоном (табл. 1)

Таблиця 1. Технічні вимоги до якості марганцевих руд і концентратів для виплавлення феросплавів

| Компонент | Масова частка, % | | | | | | | |
|------------------------------|------------------|----------------|------|----------|--------------------|----------------|------|----------|
| | Для феромарганцю | | | | Для силікомарганцю | | | |
| | Україна Іс | Західна Європа | | США «А»с | Україна Іс | Західна Європа | | США «Б»с |
| Іс | | ІІс | Іс | | | ІІс | | |
| Mn, не менше | 43,0 | 48,0 | 46,0 | 46,0 | 34,0 | 44,0 | 40,0 | 40,0 |
| Fe не більше | - | - | 7,5 | 8,0 | - | 9,0 | 12,0 | 16,0 |
| SiO ₂ , не більше | - | 7,0 | 9,0 | 12,0 | - | 10,0 | 12,0 | 15,0 |
| P, не більше | - | 0,12 | 0,15 | 0,18 | - | 0,15 | 0,15 | 0,30 |

Примітка: Вимоги зазначені до нікопольських окисних концентратів, та концентратів і руд закордонних

| | |
|------------------|--|
| Кривенко В.В., | |
| Грищенко С.Г., | |
| Ольшанский В.И., | |
| Філіппов І.Ю., | |
| Замкової О.В., | |
| Шепляков І.А., | |
| Овчарук А.Н. | |

виробників.

Труднощі з виробництвом конкурентоспроможних марганцевих сплавів з вітчизняної сировини особливо загострилися останніми роками, коли підприємства почали нарощувати випуск низькофосфористих марок силікомарганцю і феромарганцю.

У зв'язку з цим досліджено проби марганцевих руд різного хімічного і фракційного складів (табл. 2,3), які зараз широко використовуються для виробництва марганцевих феросплавів на вітчизняних підприємствах. До них відносять проби марганцевих руд з родовищ Грузії, Бразилії і Гани [2].

Таблиця 2. Результати досліджень загальних фізичних властивостей марганцевих руд

| № п/п | Країна виробник | Масова частка вологи, % | Щільність, кг/м ³ | | | Поруватість загальна, % | Міцність (ДСТУ 3200-95) на удар по фракції більше 5 мм, % |
|-------|-----------------|-------------------------|------------------------------|--------------|--------|-------------------------|---|
| | | | насіпна | Позірн/уявна | Дійсна | | |
| 1 | Грузія | 4,0 | 1740 | 2400 | 3880 | 38,14 | 31,0 |
| 2 | Бразилія | 8,4 | 2940 | 4210 | 4270 | 10,92 | 58,0 |
| 3 | Австралія | 2,8 | 2110 | 3850 | 4020 | 4,23 | 75,6 |
| 4 | Гана-I* | 1,6 | 2300 | 3240 | 3270 | 1,4 | 71,0 |
| 5 | Гана-II | 7,2 | 2090 | - | 3670 | - | - |
| 6 | Гана-III | 1,6 | 2120 | 3190 | 3370 | 5,3 | 72,0 |

*Марганцева руда Гана I і III - карбонатна, II- окисна.

Таблиця 3. Хімічний склад марганцевих руд.

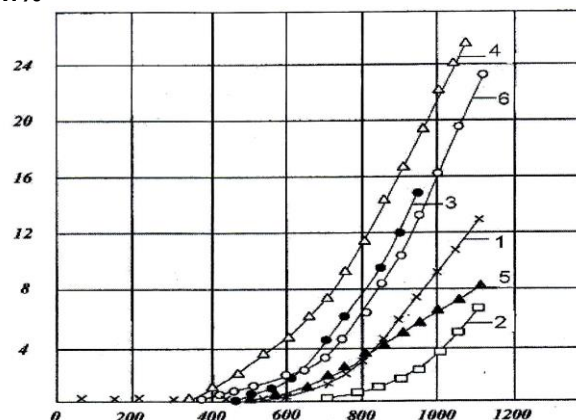
| № п/п | Країна виробник | Масова частка компонентів, % | | | | | | | | | |
|-------|-----------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|-------|
| | | Mn | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | Fe ₂ O ₃ | P ₂ O ₅ | Na ₂ O | K ₂ O | п.п.п |
| 1 | Грузія | 47,20 | 12,09 | 1,88 | 1,92 | 0,75 | 1,86 | 0,47 | 0,21 | 0,59 | 3,29 |
| 2 | Бразилія | 47,60 | 9,30 | 1,20 | 1,03 | 1,34 | 9,30 | 0,14 | 0,23 | 1,15 | 2,29 |
| 3 | Австралія | 47,00 | 13,05 | 1,63 | 2,67 | 0,98 | 8,94 | 0,07 | 0,12 | 0,03 | 3,88 |
| 4 | Гана-I* | 30,00 | 14,05 | 2,65 | 4,65 | 5,08 | 1,72 | 0,16 | 0,28 | 0,24 | 31,6 |
| 5 | Гана-II | 39,79 | 19,30 | 4,20 | 0,40 | 0,12 | 7,10 | 0,32 | 0,19 | 0,63 | 5,02 |
| 6 | Гана-III | 30,50 | 13,52 | 2,20 | 4,81 | 4,85 | 1,05 | 0,25 | 0,24 | 0,21 | 32,60 |

Дослідження з визначення відновлюваності і температури початку розм'якшення марганцевих руд проводили за стандартними методиками (ДСТУ-3202-95; ДСТУ-3203-95) в атмосфері генераторного газу. Відновлюваність визначали за втратою зразком маси ваговим способом і контролювали через хімічний аналіз.

Вивченню відновлення марганцевих мінералів, руд і концентратів присвячено велику кількість робіт [3,4], хоча дані, що є в наукових працях, неоднозначні. Відомо, що MnO₂ і MnCO₃ дисоціюють за порівняно низьких температур -510 і 176 °С відповідно.

Відновлення оксидів і карбонатів марганцю в рудах, що досліджуються, відбувається за нижчих температур, ніж їх дисоціація. На фіг. 1 зображено залежність зміни маси проби від температури, що підтверджує цей висновок. На швидкість і ступінь відновлення марганцевої сировини істотно впливає температура, вид і концентрація відновника, крупність, пористість, фазовий і мінеральний склад. Проби марганцевої сировини, що досліджуються за однієї і тієї ж температури та інших однакових умов, втрачають масу через дегідратацію, декарбонізацію та дисоціацію марганцевих мінералів з різною швидкістю.

Зменшення розміру проби%



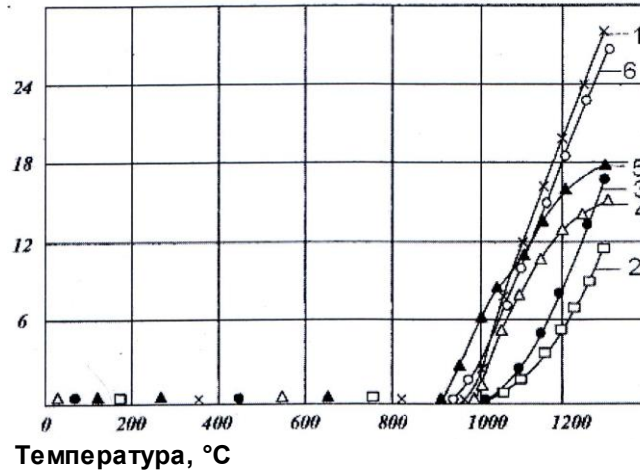
Температура, °С

Фіг.1 Кінетика зміни маси проби в реакційній зоні під час нагрівання у відновлювальному середовищі (цифри у кривих - номер проби з табл. 3)

На фіг. 2 зображено результати досліджень з визначення температури початку розм'якшення марганцевих руд, під час нагрівання у відновному середовищі. Температурою початку розм'якшення вважається та, за якою зменшення лінійних розмі-

рів досліджуваних проб складає більше 10% під час впливу на них постійного механічного навантаження. Характерною особливістю відновлення марганцевих руд є поява рідкої фази за порівняно низької температури 750 – 800 °С.

Зменшення розміру проби%



Фіг. 2 Зміна висоти проби в реакційній зоні під час нагрівання у відновному середовищі (цифри у кривих- номер проби з табл. 3)

Спочатку рідка фаза спостерігається в окремих мікрооб'ємних частках по периферії мінералів особливо на зернах польового шпату (K, Na) $[Al-SiO_3O_8]$ і кварцу (SiO_2), що межують з манганозитом (MnO). З підвищенням температури більш ніж 800 °С кількість рідкого розплаву збільшується, і силікатний розплав може просочувати значну частину маси руди. Низька температура появи рідкої фази пояснюється вмістом різної кількості у вихідному марганцевмісному матеріалі оксидів калію, натрію, кальцію, кремнію та інших елементів, які разом з високоактивним манганозитом утворюють складну за хімічним складом легкоплавку систему. Локальний рентгено-спектральний аналіз ділянки оплавлення фіксує підвищений вміст K, Na, Ca і Si.

Для технологічних процесів виробництва марганцевих феросплавів сприятливими є марганцеві руди і концентрати, що характеризуються підвищеною температурою розм'якшення, яка сприяє глибшому відновленню марганцю на початковому етапі процесу відновлення, коли шихта знаходиться у твердофазному стані. Проте, деякі з цих руд вимагають більше енергетичних затрат і відносяться до важковідновних через практично повне зв'язування оксиду марганцю в тефроріті ($MnSiO_4$), родоніті ($MnSiO_3$), яacobсиді ($MnFe_3O_4$) та інших термодинамічно стійких сполуках. Деякі з них, особливо яacobсид має знижений електроопір.

Складність залучення карбонатної марганцевої руди в металургійну переробку визначається високим теплоспоживанням карбонатної сировини для розкладання карбонатів з необхідною витратою електроенергії у кількості близько 240 кВт год/т матеріалу. У процесі розкладання вуглекислих солей кальцію та марганцю виділяється

значна кількість вуглекислого газу, що призводить до підвищення витрати вуглецевого відновника та електроенергії на реалізацію реакції $CO_2 + C = 2CO$ 42,45 кВт год; у процесі високошвидкісного нагрівання шматків карбонатної руди відбувається їх руйнування з утворенням дрібної фракції (менше ніж 5 мм) 20 – 30%, що призводить до зменшення газопроникності шихти і в результаті до порушення технологічного режиму плавлення [3].

Відомо: карбонатна сировина має природню основність 0,6 – 0,7, це частково виключає додавання до шихти вапняку, а температура плавлення карбонатних руд і концентратів приблизно на 100–200 °С вища, за оксидні, що покращує термодинамічні та кінетичні умови протікання процесів відновлення [6].

В результаті виплавка сплаву з фосфором 0,35%, за прийнятою у ПАТ «НЗФ» схемою з використанням шлаку малофосфористої переробки (ШМП) безфлюсного плавлення феромарганцю, добре поєднується з кількісною оцінкою впливу шлаку на основні показники виробництва. Таким чином, витрата електроенергії склала 4054 кВт год/т, а вилучення марганцю 82,2% (з урахуванням відходів виробництва). Використання в шихті імпортової руди для отримання аналогічного за якістю сплаву не дозволило досягти помітних переваг з вилучення марганцю, а витрата електроенергії навіть збільшилася. Імовірно, це пов'язано не стільки з якістю сировини, скільки зі зміною електричних параметрів плавки, спричинених підвищеною витратою відновника. Якщо врахувати витрати електроенергії під час агломерації (≈ 150 кВт год/т) і виплавці ШМП (850 – 900 кВт год/т), то сумарна витрата перевищує 5000 кВт год/т.

Унаочнити порівняння металургійної цінності різних видів сировини можна на прикладі виплавки силікомарганцю з фосфором 0,15 – 0,25%, для виплавки сплаву такої якості може бути використана сировина з фосфорним модулем не вище ніж 0,002. Використовується два варіанти виплавки сплавів: перший – з використанням в шихті більше, ніж 80% малофосфористого шлаку, другий – на високоякісній австралійській руді.

Під час використання зазначеної кількості ШМП виявляється його негативний вплив на виробничі показники: зі зниженням вмісту фосфору у сплаві з 0,25 до 0,15% (відповідне збільшення частки ШМП у шихті з 82 до 93%) видобування марганцю знижується з 73 до 60%, а питома витрата електроенергії зростає на 6 – 7%.

Застосування австралійської руди дозволяє значно підвищити видобування марганцю (до 82%) і знизити витрати електроенергії на 200 – 250 кВт год /т.

Наведені результати доводять: використання вітчизняної сировини для виробництва силікомарганцю з фосфором не більше, ніж 0,35% кількості малофосфористого шлаку в шихті для досягнення відносно прийнятних показників не повинно перевищувати 900 – 950 кг/т сплаву. Збільшення частки ШМП під час виплавки металу з фосфором 0,15 – 0,25% призводить до різкого зниження всіх показників процесу. Враховуючи зазначене вище, можна стверджувати: пріоритетними, безумовно, є високоякісні імпортні руди, що мають фосфорний модуль 0,002.

Одним з напрямків підвищення вилучення марганцю під час збагачення марганцевих руд в Україні в умовах постійного зниження якості вихідної руди є впровадження більш глибоких і досконалих схем збагачення з включенням флотації і високоінтенсивної магнітної сепарації (далі – ВМС) [7]. Це продукує збільшення кількості тонких часток і волиги в концентратах.

Спікання марганцевих концентратів підвищеної вологоємності (12,0 – 26,5%) і низької насипної щільності (1350 – 1750кг/м³) призводить до великих втрат під час прожарювання (до 10,5 – 25,5%). У порівнянні із процесом агломерації залізородних матеріалів спостерігається значна усадка шару, а питомих вихід продуктів спікання на 1,5 – 2,0 рази нижче.

Оскільки під час спікання такої сировини потрібна підвищена масова частка в шихті повернення, а також коксовий дріб'язок (в 1,5- 2,0 рази), збільшення в аглошихті частки тонких і вологоємних концентратів ще більше утруднює процес спікання внаслідок зниження газопроникності шихти.

На вітчизняних аглофабриках тонкі марганцеві концентрати в різних кількостях підшихтовують до гравітаційних концентратів. Ці матеріали надходять в агломераційну шихту у непідготовленому вигляді.

В лабораторних і промислових умовах дослідним шляхом встановлено, що введення в аглоши-

хту концентрату ВМС у непідготовленому вигляді у кількості більше 15 % знижує технологічні показники процесу агломерації.

Дослідження процесу агломерації проводили на устаткуванні дослідного виробництва інституту "Механобрчормет". Змішування, зволоження і грудування шихти здійснювали в **чашовому згрудковувачі** діаметром 1,0 м. Підготовлену шихту спікали на напівпромисловому агломераційному устаткуванні із чашею круглого перетину діаметром 280 мм і висотою 400 мм, обладнаною вакуум-камерою, запальним горном і тягодуттьовим пристроєм. Контроль процесу спікання здійснювався контрольно-вимірювальними приладами.

Досліди щодо спікання проводилися відповідно до розробленої матриці планування експерименту. Регульованими параметрами процесу спікання агломерату з використанням концентрату ВМС були: час запалювання, розрідження під час спікання, масова частка гранул, повернення, коксовий дріб'язок. Під час процесу спікання фіксувалися підконтрольні параметри: швидкість фільтрації повітря спікання й охолодження, температура відхідних газів, масова частка марганцю, втрати за умов прожарювання. Як вихідні технологічні параметри процесу агломерації взято: механічну міцність агломерату (ДСТУ-3200-95) і питому продуктивність агломераційного устаткування.

Щоб порівняти технологічні параметри процесу агломерації дослідження проводили, використовуючи у аглошихті концентрат ВМС у непідготовленому вигляді з його попереднім згрудкуванням. Складовими рудної частини аглошихти були окисний II сорту та карбонатний гравітаційний концентрат. Як тверде паливо використовували коксовий дріб'язок, що застосовувався на Богданівській аглофабриці, крупністю 0,5 – 3,0 мм із масовою часткою вуглецю 80,0% і золи 14,0%.

Збільшення масової частки концентрату ВМС понад 15 – 20% призводить до погіршення фізичних і газодинамічних властивостей аглошихти, що надалі знижує технологічні параметри спікання і якості агломерату. Якщо масова частка концентрату ВМС у непідготовленому вигляді в аглошихті дорівнює 40 – 60%, то процес агломерації важко здійснити. Внаслідок більш низької вологоємності карбонатного гравітаційного концентрату, більшої ніж середній розмір часток і більшої їх шорсткості у порівнянні з окисним гравітаційним концентратом II сорту, вплив домішок концентрату ВМС на шихту меншою мірою позначається на погіршенні технологічних показників. Під час спікання карбонатного концентрату з домішками концентрату ВМС і наявністю високої масової частки летких складових, зменшується вихід придатного агломерату і збільшується швидкість фільтрації відхідних газів. У поєднанні з терморуїнуванням шматкового карбонатного концентрату це призведе до значного збільшення винесення пилу під час спікання.

Використовуючи в аглошихті гранули концентрату ВМС, поліпшуються характеристики шару спі-

кання. Внаслідок підвищення газопроникності шихти можливе проведення процесу спікання у височому шарі за необмеженої кількості частки гранул у рудній частині аглошихти. З такою технологією усувається момент заковчування твердого палива в гранули, що знижує питому витрату коксового дріб'язку.

З'ясовано, що додавання концентрату ВМС в аглошихту у непідготовленому вигляді у кількості від 15 до 30% і від 30 до 50% знижує відповідно питому продуктивність агломераційної установки на 25 і 50% і міцність агломерату та збільшує втрати вихідного матеріалу.

Досліджували і другий спосіб попереднього обкускування тонкодисперсних концентратів методом брикетування без сполучної складової та підвищенні тиску пресування до 30 МПа. Було отримано партію брикетів для подальшого дослідження спікання агломерату з використанням в аглошихті сирих брикетів розміром 15x15x20 мм.

За результатами дослідів з агломерації встановлено, що за умов вмісту у шихті 30 – 40% брике-

тів, висота шару спікання може бути збільшена до 700 – 900 мм.

У процесі переробки шламів, що утворюються під час збагачення оксидних марганцевих руд, на високоінтенсивних магнітних сепараторах здобували концентрат з високою питомою поверхнею і підвищеною вологоємністю. Концентрат високоінтенсивної магнітної сепарації марганцевих шламів містить: %: 33,0 Mn; 24,8 SiO₂; 2,9 Al₂O₃; 6,2 FeO; 0,435 P₂O₅ та інші складові. Дійсна щільність концентрату становить 3420 кг/м³, питома поверхня 250 м²/кг; насипна щільність 1500 кг/м³, кут природного укусу 43,5 град. Концентрат характеризується високою вологоємністю, вміст води в ньому після фільтрації становить 30 – 40%. Концентрат грудкували в чашових згрудковувачах діаметром 1 і 2 м, здобуваючи сирі котуни рівномірного гранулометричного складу (діаметром 14 – 18 мм) без додавання **зміцнювачів**, з подальшою термообробкою. Оптимальні параметри котунів наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Оптимальні параметри термообробки котунів

| Технологічні режими | Тривалість термообробки, хв. | Температура теплоносія, °С | | Швидкість фільтрації, мЗ/(м ² ·с) | Розрідження, x103Па |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------|-----------|--|---------------------|
| | | На вході | На виході | | |
| Підігрів верху шару | 1,5-2,0 | 200 | 30-40 | 0,3-0,5 | 2,00 |
| Сушіння дугтям знизу | 12,0 | 350 | 80-90 | 1,2-1,4 | 5,00 |
| Сушіння дугтям зверху | 3-4 | 350 | 80-90 | 1,1-1,2 | 5,00 |
| Нагрівання | 6-7 | 700-900 | 200-350 | 1,1 | 5,00 |
| Випал | 12-15 | 1150-1180 | 400-500 | 0,9-1,0 | 5,00 |
| Рекуперація | 3,0 | 1000 | 500 | 0,9 | 5,00 |
| Охолодження | 15-16 | 20-25 | 800-300 | 1,3-1,4 | 5,00 |

Спеціальні дослідження показали, що уведення до складу шихти 1,0 – 1,2% тонко подрібненого твердого палива інтенсифікує процес випалу, знижує температурний інтервал між горизонтами шару випалу, збільшує питому продуктивність устаткування. Основні усереднені показники якості котунів без твердого палива (чисельник) і з додаванням 1% антрациту (знаменник) такі: міцність на стиснення, кН/котун 1,6/1,27; міцність на удар (фр. +5 мм), % — 90 / 87; питома продуктивність, т/(м² год) — 0, 57 / 0,72.

Для розробки технологічних схем і процесів повторного використання промислового пилу і шламів ПАТ "НЗФ" виконано комплексні дослідження їх хімічного й мінералогічного складу, визначено фізичні властивості, відпрацьовано режими згрудкування та агломерації. Склад суміші шламів і пилу за середньозваженими показниками такий, %: Mn — 25,6; Fe₂O₃ — 3,5; SiO₂ — 21,8; CaO + MgO — 10,8. Вміст марганцю в шламах аглоцеху сягає 30,0%. До особливостей шламів варто віднести їх високу молекулярну вологоємність, що становить 29,7 – 32,1% і свідчить про їх складну здатність до фільтрування. Досліджуючи мінералогічний склад шламів і пилу методами мікроскопічного, рентге-

нівського й термогравіметричного аналізу встановлено, що шлами плавильних цехів представлено приблизно на 40-60% глиноземистими частками й силікатним склом, з підвищеною масовою часткою лужних металів, на 30% дуже тонкою домішкою кальциту й частково родохрозиту, 2 – 5% гаусманіту, брауніту та гідрооксидами марганцю і заліза. Уламкові частки представлені кварцом, силікатами, оксидами марганцю. Повна питома поверхня суміші пилу і шламів 381,1 м²/кг; насипна щільність 1200 – 1350 кг/м³; температура розм'якшення 940 – 1000°С.

Досліджувалася можливість видобутку з пилу і шламів поточного виробництва котунів, придатних для виплавки стандартних сплавів, для цього було відпрацьовано режим фільтрування, грудкування і випробування отриманих окотнів. Одержано сирі котуни із середнім діаметром 12 – 20 мм, що витримують роздавлювання силою 22 – 30 Н/котун.

Міцність висушених котунів (t сушіння = 250 – 300°С) на стискання становила 120-160 Н/котун. Слід зазначити, що під час їх транспортування і вивантаження на склад готової продукції значна частина котунів руйнувалася. Насипна щільність сухих котунів становила 1020 – 1025 кг/м³. Під час

випробування сухих котунів за ДСТУ 3200495 міцність їх на удар становила в середньому 64,5% (від 58 до 70%) і стирання – 15,0% (від 9 до 26%).

Більше перспективним видається розроблений нами і викладений вище напрямок використання дрібнодисперсних продуктів для збагачення руд. Це вмотивовано ще і врахуванням фракційного складу пилу і шламів, представленого, в основному, частками – 0,044 мм. Шлами підсушені до масової частки вологи 18 – 20% розпушували у змішувачі (роторний або бігунковий), змішували з пилом і гранулювали. У гранулятор за допомогою форсунок розпилювалася вода в кількості, що забезпечувала масову частку вологи в гранулах на 24 – 33%, враховуючи, що розмір гранул був у межах 2 – 8 мм.

Процес здобування гранул був також випробуваний на промисловому устаткуванні, чашовому згрудковувачі діаметром 5,5 м. Установлено, якщо масова частка вологи у вихідних шламах 22 – 24%, кут нахилу згрудковувача 48 – 50° і швидкість його обертання 0,18 сек⁻¹ (11 об/хв.) утворюється гранули на 90% представлені фракціями в межах 3 – 5 мм. Під час транспортування і перевантаження таких гранул руйнування їх незначне, а випробування на удар показали руйнівність 3 – 5%.

Відпрацьовування процесу агломерації з використанням гранул діаметром 2 – 8 мм здійснювалися зі зміною їхньої масової частки в рудній частині від 10 до 50 %. Спікання шихти здійснювалося в шарі висотою 0,35 м. Масову частку повернення в шихті взяли за постійну – 25%. Аналіз результатів, отриманих під час спікання агломерату, показав, що зі збільшенням масової частки гранул зі шламів і пилу в аглошихті до 15% міцність агломерату на удар і стирання практично не знижується; зі збільшенням частки шламів до 30% міцність знижується на 2 – 3% (абсолютних); за більшого

збільшення на 4-5%. Крім цього, перевищення частки гранул понад 30% призводить до помітного погіршення якості агломерату за вмістом марганцю й питомому вмісту фосфору. У такий спосіб оптимальна частка гранул у шихті встановлена в межах 15 – 30%.

Основною відмінною рисою досліджуваної марганцевої сировини закордонних виробників є низький модуль фосфору P/Mn < 0,0035 і кремнезему SiO₂/ Mn від 0,5 і нижче, що дозволяє досягати високих техніко-економічних показників виробництва марганцевих феросплавів.

За допомогою порівняльного аналізу металургійної цінності вітчизняної й імпоротної сировини встановлено, що під час виробництва силікомарганцю у зв'язку з низькою температурою плавлення ШМП частка його в шихті не повинна перевищувати 40 – 45 % (сплав з P до 0,35 %). Для одержання сплаву з фосфором від 0,15 до 0,20 % доцільно використовувати імпорту руду з підшихткою ШМП.

На підставі виконаних досліджень встановлено, що із введенням в аглошихту 30 – 50% концентрату ВМС продуктивність агломераційної установки знижується на 25 – 50 %, погіршуються показники міцності агломерату, збільшується винесення пилу.

Розроблено технологію переробки дрібнодисперсних марганцевих матеріалів, концентрату збагачення шламів методом високоінтенсивної магнітної сепарації (ВМС) шламів і пилу виробництва феросплавів, що включає їх часткове додрібнення і підсушування, змішування, гранулювання та агломерацію у високому шарі. Визначено оптимальні параметри агломерації, що дозволяють проводити процес без зниження технологічних показників з використанням в аглошихті 30 – 45 % концентрату ВМС.

REFERENCES

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Физикохимия и технология электроферросплавов: Підручник для вузів. - Дніпропетровськ: ГНПП "Системні технології", 2005. - 448 с.
2. The comprehensive analysis of physical and chemical properties and metallurgical value of foreign manganese raw materials used during ferroalloy production /S.G. Grishenko., V.V.Krivenko, AN. Ovcharuk, V.I. Olshansky, I.Yu. Filippov // Proceeding of the fourteenth international ferroalloys congress. Infacon XI Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry, Ukraine, Kiev, May 31 -June 4, 2015. Volume II - P. 436-446.
3. Кучері А.Г. Дослідження фізико-хімічних перетворень у карбонатних марганцевих концентратах при їхній термічній обробці. - У кн.: Актуальні проблеми й перспективи електromеталургійного виробництва. - Дніпропетровськ: ГНПП "Системні технології", 1999. - С.48-54.
4. Кривенко В.В., Овчарук А.Н. Дослідження впливу механічного й теплового впливу на марганцеві концентрати й агломерати в окисних і відбудовних умовах // Металургійна й гірничорудна промисловість. 2002. - № 2 - С. 21-23.
5. Грищенко С.Г., Райченко Т.Ф., Москалева Н.М. Про взаємозв'язок хіміко-мінералогічного складу й востановимости марганцеворудних матеріалів різних родовищ. Повідомлення 1. Особливості генезису й стану вихідних марганцеворудних матеріалів // Изв. АН СРСР. Метали. 1991. - №3. - С.13
6. Гасик М.И. Марганець. - М: Металургія, 1992. - 608 с.
7. Грищенко С.Г., Проскурін Т.П., Люборець І.І. Сучасний стан і перспективи розвитку видобутку й переробки марганцевої сировини на Україні // Сталь. - 1992. №10-і С. 39 -41.
8. Трюханов Л.Г., Приходько І.Т., Куценко В. Ф. Напівпромислові випробування по селективній підготовці агломераційної шихти /," Теоретичні основи й технологія підготовки металургійної сировини до доменної плавки: Тези доповідей на Республіканській науково-технічній конференції- Дніпропетровськ. - 1980.

УДК 669.162

Крячко Г.Ю., Сігарьов Є.М.

ПРО ПІДХОДИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Kryachko G., Sigarev E.

ABOUT APPROACHES TO DESIGN RATIONAL PROFILE OF BLAST FURNACES

Метою роботи є вирішення питань, пов'язаних з відмінністю підходів до проектування раціонального профілю доменних печей. Питання стосуються врахування попереднього досвіду профілювання і змін, що відбуваються в доменному процесі при збільшенні об'єму агрегатів.

Результати досліджень. Аналіз розбіжностей при створенні перших профілів радянських і японських потужних печей з обліком майже однакових наукової і проектної бази показав суттєві необгрунтовані завищення висоти шахт і заниження глибини горна радянських печей, що в подальшому поряд зі зниженням чисельності повітряних фурм призвело до відомих ускладнень при виведенні цих печей на проектний режим. Показано, що віддалення проекції рудної лінзи від фурмених вогнищ в горні і стін розпару є неминучим явищем при збільшенні об'єму печей, негативний вплив якого слід усувати застосуванням безконусних завантажувальних пристроїв зверху і покращенням якості дуття знизу.

Розгляд недоліків профілів ДП №3 заводу Елікіппа і типової радянської печі об'ємом 2300 м³, пов'язаних між собою низькими значеннями d_k/D в межах 0,62-0,63 показав, що низька продуктивність печей і важкі етапи освоєння пов'язані не тільки зі звуженими колошниками, але і іншими недоліками їх профілю, що були, зазвичай неврахованими. На сучасному етапі розвитку доменного виробництва кардинальні зміни сировинних умов, засобів завантаження і технології плавки призвели до повернення пляшкоподібного профілю з величинами d_k/D 0,61-0,59.

Показано, що в останній досліджуваній період, відбулася зміна підходів до визначення раціонального об'єму потужних печей. Так в проміжок часу між 2011 і 2022 рр. більшість побудованих печей (68,8 %) мали об'єм в межах 4200-4400 м³, що в середньому на 300 м³ менше, ніж у попередній період. Це підтверджує раніше зроблений висновок про закінчення екстенсивного розвитку доменного процесу.

Наукова новизна роботи полягає у виявленні тенденції 2011-2022 рр. обмеження корисного об'єму нових потужних доменних печей в межах 4200-4400 м³, а також тенденції до повернення пляшкоподібного профілю у визначених сировинних та експлуатаційних умовах плавки.

Ключові слова: доменна піч, підходи, проектування, раціональний профіль, рудна лінза, об'єм.

The purpose work is to resolve issues related to difference in approaches design of a rational profile of blast furnaces. The questions relate to taking into account previous profiling experience and changes occurring in the domain process when the volume of aggregates increases.

Research results. The analysis discrepancies in creation first profiles of Soviet and Japanese powerful furnaces based on almost same scientific and design basis showed significant unjustified overestimation height shafts and underestimation depth shaft of the Soviet furnaces, which subsequently, along with underestimation number of air nozzles, led to known complications in removal of these furnaces to project mode. It is shown that the distance projection ore lens from tuyere hearths in furnace and walls gap is an inevitable phenomenon when volume of the furnaces increases, negative effect of which should be eliminated by using coneless loading devices from above and improving quality of blowing from below.

Examination shortcomings profiles of DP No. 3 of the Eliquippa plant and a typical Soviet furnace with a volume of 2,300 m³, connected with each other by low d_k/D values in the range of 0,62-0,63, showed that low productivity furnaces and difficult stages development are related not only with narrowed speakers, but also other shortcomings of their profile that were usually not taken into account. At the current stage development of blast furnace production, drastic changes in raw material conditions, means loading, and smelting technology have led to return of bottle-shaped profile with d_k/D values of 0,61-0,59.

It is shown that in the last researched period, there was a change in approaches to determining rational volume of powerful furnaces. Thus, in period between 2011 and 2022, majority of built furnaces (68,8%) had a volume of 4200-4400 m³, which is on average 300 m³ less than in the previous period. This confirms earlier conclusion about end extensive development of domain process.

The scientific novelty work lies in identification of 2011-2022 tendency to limit useful volume of new powerful blast furnaces within 4200-4400 m³, as well as tendency to return to the bottle-shaped profile under defined raw material and operating conditions of smelting.

Keywords: blast furnace, approaches, design, rational profile, ore lens, volume.

Вступ

Тривалий час головним критерієм оцінки результативності нового профілю доменної печі була її продуктивність. Так в період створення профілю, який на початку ХХ ст. став прообразом сучасного, пошук кращих його параметрів йшов в напрямі досягнення пічкою середньодобової продуктивності 1000 т чавуну [1]. Взірцем раціонального профілю

на той час була ДП №5 заводу Елікіппа (США) об'ємом 900 м³, яка першою в світі досягла такої позначки. Характерним є те, що на якість коксу і залізородних матеріалів та на ступінь форсування процесу, який залежав від потужності повітродувних засобів, майже не зверталось уваги.

Після другої світової війни в проектуванні доменних печей виник напрям в сторону збільшення

| | |
|---------------|--|
| Крячко Г.Ю., | |
| Сігарьов Є.М. | |

потужності агрегатів, де об'єм печі мав вирішальне значення, оскільки небезпідставно передбачалося підвищення результативності плавки внаслідок збільшення обсягів проплавлення залізородних матеріалів. Максимальний об'єм печі став свого роду показником рівня розвитку металургії конкретної країни. В 70-80-ті роки минулого століття виникла своєрідна гонка за створення і освоєння найбільшої за об'ємом печі в світі, відзвуки якої спостерігались навіть на початку ХХІ ст. (Японія, Китай, Південна Корея).

Перегони в боротьбі за більший об'єм печі призводили іноді до суттєвих втрат, оскільки не вистачало часу на доведення профілю до прийнятних кондицій, на доведення огороження робочого простору до надійної експлуатації, на створення обладнання для забезпечення нормальної роботи потужних печей.

Аналіз публікацій з досліджуваної теми

Зважаючи на те, що деякі вади в проектуванні профілю вітчизняних доменних печей не усунути до сих пір, слід звернутися до аналізу прикладів, які визначили різні підходи радянських і японських проектувальників до створення раціонального профілю. Вибір для порівняння підходів двох шкіл проектувальників обґрунтовано тим, що профілі потужних печей в 70-х роках ХХ ст. створювалися на практично однаковій експериментальній (СРСР, Японія) і проектній базі (СРСР), оскільки японські промислові компанії придбали в СРСР ліцензії на проектні профілі печей об'ємом 1719, 2000 і 2700 м³ [2].

Дослідницька база була створена науковцями СРСР в 60-х роках ХХ ст., коли колективами дослідників Інституту чорної металургії (м. Дніпропетровськ), ДонНДІчормету (м. Донецьк) і Дніпродзержинського індустріального та Ленінградського політехнічного інститутів були проведені горизонтальні і вертикальні зондування доменних печей різного об'єму.

Суттєвий внесок в розширення знань про структуру стовпа шихти зробили японські науковці, дослідивши заморожені на ходу доменні печі [3, 4].

Ще в радянські часи, коли будівництво потужних печей вважалося магістральним напрямом розвитку, з'явилася робота [5], автори якої посилюючись на труднощі експлуатації таких вітчизняних печей на залізородних матеріалах і коксі власного виробництва, вважали необхідним всебічне дослідження доцільності подальшого нарощування об'єму доменних печей. На погляд дослідників [5] заслуговує уваги і така показова цифра, як виробництво чавуну з кожного кубічного метру корисного об'єму печі за кампанію до капітального ремонту: на печі №8 Криворіжсталі об'ємом 2700 м³ воно складало 5096 т, в той час як на печі №9 об'ємом

5000 м³ лише 1836 т. Слід додати, що це порівняння не досить коректне в тому плані, що внаслідок прорахунків з визначенням кількості повітряних фурм, період освоєння ДП №8 Криворіжсталі у свій час був також важким і тривалим, про що буде повідомлено далі.

Також в [5] вважали зниження куту нахилу шахти з 85 до 82°, обумовлене зростанням діаметру розпару негативним фактором, оскільки на потужних печах проекція рудної лінзи віддаляється від фурменого вогнища (рис. 1) внаслідок чого можна прогнозувати труднощі обробки лінзи фурменними газами.

До недоліків цієї умовної схеми слід віднести те, що, по перше рудна лінза при опусканні в ширші горизонти печі розосереджується, тоншає і наближається до стін внаслідок бокового тиску, по друге, враховуючи різні висоти вісьової зони малорухомого коксу, проплавлення рудної лінзи відбувається тим вище, чим більше діаметр горна при нормальному ході печі.

Що стосується розладнань ходу, то прихід не підготовлених матеріалів рудної лінзи на горизонт повітряних фурм цілком можливий і може бути одним із визначальних факторів в обмеженні попередних розмірів доменних печей. Тому запропонований підхід до визначення розмірів елементів профілю за допомогою кількісних показників, пов'язаних з опусканням рудної лінзи заслуговує на увагу.

Перший показник являє собою відстань від торця повітряної фурми до зовнішнього краю проекції рудної лінзи в горні доменної печі і визначається як половина різниці між діаметрами горна d_r і колошника d_k за відрахуванням величини висову повітряної фурми ВПФ в робочий простір горна:

$$\text{ПРЛГ} = \frac{1}{2} (d_r - d_k) - \text{ВПФ}, \quad \text{м}$$

де ПРЛГ – умовна назва показника – проекція рудної лінзи в горні.

Другий показник – це відстань від стін розпару до зовнішнього краю проекції рудної лінзи в розпар

$$\text{ПРЛР} = \frac{1}{2} (D - d_k), \quad \text{м}$$

де ПРЛР – умовна назва показника – проекція рудної лінзи в розпар.

Використовуючи запропоновані показники автори [5] згадали широко відомий пляшкоподібний профіль ДП №3 заводу Елікуіппа. Стіни розпару відходили на цій печі від кромки проекції рудної лінзи на 1677 мм, а стіни горна на 1443 мм. Оскільки ця піч працювала з хронічним периферійним потоком газу з неможливістю підвантажити залізородною шихтою пристінний простір від профілю пляшки відмовились.

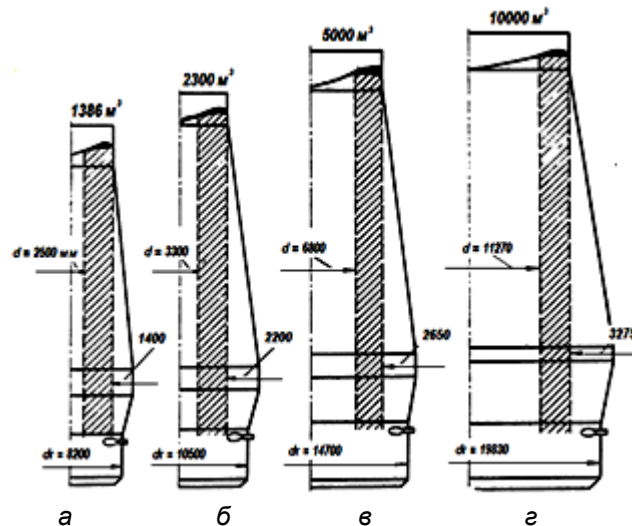


Рис. 1. Величина відступу проекції рудної лінзи на колошнику від стін печей в залежності від діаметру розпару за даними [5]: а - типова поширена в СРСР піч малого об'єму; б - ДП №5 колишнього Ждановського металургійного заводу (ЖМЗ); в - ДП №9 Криворіжсталі; г - нездійснений радянський варіант надпотужної доменної печі

Причину незадовільної роботи типової печі об'ємом 2300 м^3 на ЖМЗ автори [5] вбачали також у віддаленні проекції рудної лінзи від активної зони фурмених вогнищ. Тому зменшення кута нахилу стін шахти зі збільшенням об'єму печей дослідники вважали негативним явищем, що погіршує газодинаміку доменного процесу.

У зв'язку з викладеним слід повернутися до розгляду загальновідомих прикладів реалізації помилкових рішень в створенні нових профілів доменних печей.

З 1986 по 2010 рр. за 24 роки максимальний об'єм печей зріс на 500 м^3 . Це печі №5 «Северстали» (РФ) об'ємом 5500 м^3 [6] і №1 фірми POSCO (Південна Корея) об'ємом 6000 м^3 у Гваньяні [7]. Хоча ще у 80-х роках ХХ ст. в колишньому СРСР розглядалися як перспективні проекти печей об'ємом до 10000 м^3 [5]. Вочевидь під впливом досвіду експлуатації раніше побудованих печей спостерігається деяке гальмування нарощування об'єму нових агрегатів. Тому важливим є визначення тенденції в зміні об'єму потужних печей починаючи з періоду стійкого нарощування їх кількості.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є вирішення кількох задач, пов'язаних з відмінністю підходів до проектування раціонального профілю доменних печей, для чого передбачені:

розгляд розбіжностей при створенні перших профілів потужних радянських і японських печей;

аналіз змін розміщення проекції рудної лінзи відносно стін горна і розпару, зі збільшенням об'єму печей, змінами профілю і завантажувальних пристроїв;

аналіз класичних прикладів недосконалості профілів в ДП №3 Елікуіппа і ДП №5 ЖМЗ;

визначення раціонального діапазону зміни об'єму потужних доменних печей з урахуванням сучасного рівня підготовки шихтових матеріалів і організації доменного процесу.

Виклад основного матеріалу

Для аналізу використали доступні друковані джерела інформації та електронний ресурс.

Порівняння профілів приблизно однакових за об'ємом доменних печей радянських і японських проектів (табл. 1) показує суттєву різницю у виборі визначальних для профілю параметрів, а саме діаметрів горна і колошника, а також висот горна і шахти. Зокрема діаметр горна японських печей був на $300\text{--}400 \text{ мм}$ більше радянських, а висота шахти на $3800\text{--}4250 \text{ мм}$ менша. Це дозволяло, зважаючи, зазвичай, на більшу кількість повітряних фурм і помірно знижені шахти вести японські печі більш форсовано ніж радянські.

Найбільш суттєві розбіжності виявилися для печей об'ємом 3159 і 3200 м^3 , зокрема по кількості повітряних фурм. Про значення вибору достатнього числа фурм для забезпечення нормальної роботи печі свідчить негативний досвід освоєння ДП №8 об'ємом 2700 м^3 комбінату «Криворіжсталь». Недостатня кількість фурм (20) і кількість чавунних льоток (2) при тогочасному режимі випусків продуктів плавки, недостатня товщина футерівки зумпфу і горна призвели до трьох проривів горна (березень 1970 р., квітень і вересень 1971 р.). Тільки після збалансування роботи горна за збільшеною кількістю повітряних фурм (24) і чавунних льоток (3) вдалося збільшити тривалість кампанії цієї печі з 2-х до 8-ми років [8]. Краща в галузі серед печей об'ємом 2700 м^3 ДП №4 Череповецького комбінату мала 28 фурм і три чавунних льотки [9].

На рис. 2 показана зміна показників знаходження проекції рудної лінзи відносно торця повітряної фурми і стін горна типових печей колишньо-

го СРСР. При збільшенні об'єму печей з 1033 до 2000 м³ ці показники монотонно зростали, а далі в межах 2300-3000 м³ помітно зріс ПРЛГ для печі 2300 м³ (до 1,4 м) і ПРЛР для групи печей 2300-3000 м³ (до 2,2 м). Найменша різниця між вказаними показниками спостерігалася для печей 1033 і 1513 м³ (0,7 м). Найбільша різниця (0,95 м) стосу-

валася профілю 2700 м³. Низькі значення різниці ПРЛР-ПРЛГ=0,75 м відносяться до печей 1386, 1719 і 3200 м³. Вірогідно, що в умовах роботи на агломераті з вдуванням природного газу ця відмінність профілю 3200 м³ була однією з особливостей, за якими ДП №6 НЛМК вважали кращим російським проектом [10].

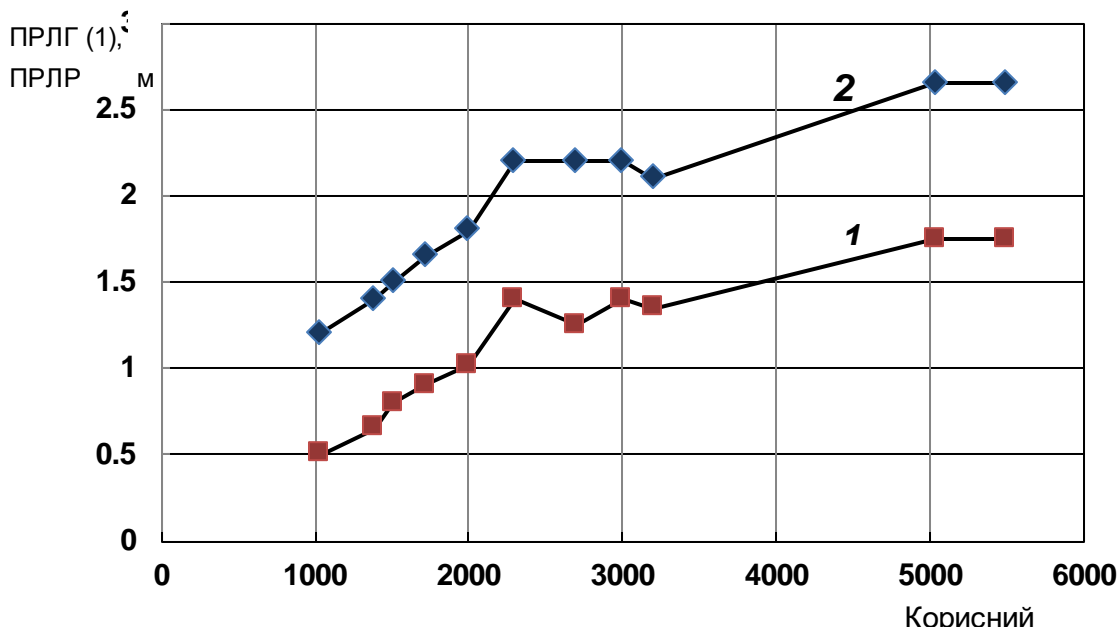


Рис. 2. Зміна відстаней від кромки проекції рудної лінзи до торця повітряної фурми в горні (ПРЛГ) і від тієї ж кромки до стінки розпару (ПРЛР) на типових радянських печах

Таблиця 1 - Порівняння підходів радянських і японських фахівців до створення профілів доменних печей середнього (3159-3200 м³) і великого (5037-5050 м³) об'єму періоду 70-х років ХХ ст. за даними [2, 6]

| Країна, завод, піч | Корисний об'єм, м ³ | Діаметр, мм | | | | Бисота, мм | | | | | | Кут нахилу, град. | | ПРЛГ | ПРЛР | Кількість повітряних фурм |
|---------------------------|--------------------------------|-------------|---------|-----------|--------|------------|-----------|---------|--------|-----------|---------|-------------------|-------------|--------|--------|---------------------------|
| | | горна | розпару | колошника | зуп фу | горна | запечиків | розпару | шахти | колошника | корисна | запечиків | шахти | | | |
| СРСР, НЛМК, №5 | 3200 | 12000 | 13100 | 8900 | 1185 | 3900 | 3400 | 2300 | 19600 | 2990 | 32130 | 80° 49' | 83° 53' | 1,35 | 2,10 | 28 |
| Японія, Kashima, №1 | 3159 | 12400 | 13100 | 9600 | н. д. | 5200 | 3200 | 2800 | 15350 | 1890 | 28440 | н. д. | н. д. | 1,20 | 1,75 | 36 |
| Різниця ± | - 41 | + 400 | - | + 700 | - | + 1300 | - 200 | + 500 | - 4250 | - 1100 | - 3690 | | | - 0,15 | - 0,35 | + 8 |
| % | - 1,3 | + 3,3 | - | + 7,9 | - | + 33,3 | - 5,9 | + 21,7 | - 21,7 | - 36,8 | - 11,5 | | | - 11,1 | - 16,7 | + 28,6 |
| СРСР, Криворізь-сталь, №9 | 5037 | 14700 | 16100 | 10800 | 1113 | 4400 | 3700 | 1700 | 20700 | 3000 | 33500 | 79° 13' 17" | 82° 42' 17" | 1,75 | 2,65 | 36 |
| Японія, Kashima, №3 | 5050 | 15000 | 16300 | 11200 | 1500 | 5100 | 4000 | 2800 | 16900 | 2400 | 31200 | 80° 19' | 81° 41' | 1,70 | 2,55 | 40 |
| Різниця ± | + 13 | + 300 | + 200 | + 400 | + 387 | + 700 | + 300 | + 1100 | - 3800 | - 600 | - 2300 | | | - 0,05 | - 0,10 | + 4 |
| % | + 0,3 | + 2,0 | + 1,2 | + 3,7 | + 34,8 | + 15,9 | + 8,1 | + 64,7 | - 18,4 | - 20,0 | - 6,9 | | | - 2,9 | - 3,8 | + 11,1 |

Як і для радянських типових печей прослідковується тенденція відходження проекції рудної лінзи від фурмених вогнищ і відповідно стін горна зі зростанням потужності сучасних агрегатів (табл. 2). Однак заслуговує на увагу те, що незважаючи

на збільшення робочого об'єму печей Schwelgern на 39 і 72 % в порівнянні з меншими печами CSA показник ПРЛР залишився майже на одному рівні (3,0-3,1 м). Вочевидь така величина ПРЛР для печей середнього і потужного об'ємів забезпечує

кращі умови для збереження огороження шахти і послаблення периферійного газопотоку.

Відносно хрестоматійного прикладу профілю ДП №3 заводу Елікуіппа (США), в якому розширення горна відбулося одночасно з переломом утворючої у верхній частині шахти. Вважали [12], що вузький колошник лімітував проходження газів, погіршував газорозподіл, збільшував витрату коксу і знижував продуктивність. Насправді не тільки звужений колошник ДП №3 погіршував роботу печі. Причина незадовільної роботи печі пояснювалась також невдалою спробою вирішення конструкції

шахти зі змінним кутом нахилу. Аналізуючи профіль ДП №3 дослідники не звертали увагу на те, що її шахта зроблена з переломом — верхня частина шахти мала більший кут нахилу $86^{\circ}10'$, ніж нижня $81^{\circ}30'$. В результаті проектувальники зробили «горловину» у верхній частині печі, висота якої разом з колошником становила 5 м. Горловина утворилася з вигином не зовні, як було запропоновано і впроваджено пізніше, а в середину робочого простору на протиріч розвитку тепломасообмінних процесів в цій зоні.

Таблиця 2 – Параметри профілю доменних печей фірми ThyssenKrupp Steel [11], оснащених безконусними завантажувальними пристроями

| Піч | Робочий об'єм, м ³ | Діаметр, м | | | d_k / D | ПРЛГ | ПРЛР |
|--------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------|------|------|
| | | горна d_f | розпару D | колошника d_k | | | |
| CSA №1,2, Бразилія | 2775 | 12,0 | 14,5 | 8,5 | 0,59 | 1,55 | 3,0 |
| Schwelgern №1, ФРН | 3844 | 13,6 | 16,0 | 10,0 | 0,62 | 1,60 | 3,0 |
| Schwelgern №2, ФРН | 4769 | 14,9 | 17,2 | 11,0 | 0,64 | 1,75 | 3,1 |

Профіль згаданої вище печі з відношенням діаметру колошника d_k до діаметру розпару D рівним 0,63 в деякій мірі був повторений на типовій печі Діпромезу об'ємом 2300 м³ з $d_k/D = 0,62$. Поява профілю останньої печі зобов'язана перш за все рішенням оснащення її засипним апаратом, призначеним для меншої печі об'ємом 2000 м³. Така інновація призвела до значних утруднень реалізації процесу,

Як і у випадку ДП №3 Елікуіппа при аналізі профілю ДП №5 тоді Ждановського металургійного заводу вбачали [5] негативну дію одного помилкового рішення. Цим рішенням, на думку авторів, було зменшення кута нахилу стін шахти до $82^{\circ}23'47''$ і відходження проекції рудної лінзи від стін розпару на 2200 мм і фурмених вогнищ в горні. Із-за розвиненого периферійного ходу ДП №5 швидко втратила вогнетривке огороження шахти, із-за перегрівання деформувалась верхня частина кожуху шахти.

Під час капітального ремонту розширили колошник з 7300 до 7700 мм ($d_k/D = 0,67$), внаслідок чого відхід проекції рудної лінзи від стін розпару зменшився з 2200 до 2000 мм, а в горні відповідно з 1600 до 1400 мм. Дані про роботу печі після корекції профілю показали, що здатність печі працювати форсованіше і економічно значно не збільшилась, добавка дуття на цій печі приводила до розвитку периферійного ходу.

Слід зазначити, що при аналізі профілю ДП №5 ЖМЗ автори [5] не прийняли до уваги суттєвий недолік цього профілю, який був притаманний всім типовим печам радянської генерації, а саме завищена висота шахти. Висота шахти ДП №5 складала 19 м, що на 2 м більше, ніж у сучасних печей об'ємом > 4000 м³. Якщо додати до 19 м метровий стовп шихти на колошнику, то стає зрозумілим її

хронічний периферійний хід, зважаючи на недостатню кількість повітряних фурм (20 шт.) і недостатню потужність вітчизняних доменних компресорів [13, 14].

Із порівняльної таблиці 3, де представлені профілі печей різних поколінь з близькими корисним об'ємом і відношенням d_k/D в межах 0,61-0,62 добре видно ще один суттєвий недолік ДП №5 ЖМЗ, а саме недостатню кількість повітряних фурм. Занижена кількість фурм обмежувала рівномірність утворення і розподілу гарячих відновлювальних газів по окружності печі з однієї сторони і з другої сприяла переохолодженню коксової насадки в горні і втрати нею газопроникності і дренажної здатності. Зрозуміло, що нормальна робота італійської і голандської печей з вдуванням ПВП і використанням обкотитів була можливою за рахунок розосередження рудної лінзи в перетині печі за допомогою безконусних завантажувальних пристроїв.

Слід зазначити, що необґрунтований підхід Діпромеців колишнього СРСР до визначення висоти шахт на тривалий час зробив заручниками старих ідей і прорахунків існуючі вітчизняні доменні печі. Сучасні проектувальники розуміють хибність рішень попередників, але на заваді впровадження раціонального профілю печі часто стають бажання замовників зберегти колошникові конструкції і обладнання з метою зменшення капітальних витрат [15].

Досвід освоєння потужних печей об'ємом > 4000 м³ в Європі, США і, перш за все, в Японії, накопичений в 70—х роках дозволяв поширювати ареал розповсюдження високопродуктивних агрегатів. Потужні печі зі своїм новітнім оснащенням були і є своєрідними маркерами розвитку доменного процесу, як складної технічної системи. Для

кількісної оцінки зміни головного параметру профілю — корисного об'єму від 80—х років ХХ ст. до сьогоднішнього за допомогою доступної інформації [17—26] було зібрано відповідні дані. Результати обробки цих даних представлені в таблиці 4. Інформація, зібрана в цій таблиці, не претендує на повний обсяг даних, але переважна більшість потужних печей врахована.

Із таблиці видно, що найбільша кількість потужних печей припадає на період 2001-2010 рр. і зобов'язана вона бурхливому розвитку доменно-конвертерної переробки металу в Китаї і Південній Кореї. Завищений середній об'єм потужних печей в цей період пояснюється введенням в дію печей об'ємом 5775-6000 м³ в Японії, Китаї і Південній Кореї.

Таблиця 3 – Порівняння параметрів профілю доменних печей різних поколінь за даними [2, 6, 15]

| Піч, завант. пристрій, дуттьова паливна добавка | Період | Корисний об'єм, м ³ | Діаметр, мм | | | Висота шахти, мм | d_k/D | ПРЛГ, м | ПРЛР, м | Кількість повітряних фурм |
|---|------------------|--------------------------------|-------------|---------|-----------|------------------|---------|---------|---------|---------------------------|
| | | | горна | розпару | колошника | | | | | |
| №5, Ждановський метзавод КЗП ¹ , ПГ ² | 60-і роки ХХ ст. | 2300 | 10500 | 11700 | 7300 | 19000 | 0,62 | 1,4 | 2,2 | 20 |
| №4, Пйомбіно, Італія, БЗП ³ , ПВП ⁴ | 90-і роки ХХ ст. | 2400 | 10600 | 11846 | 7500 | 17800 | 0,63 | 1,35 | 2,17 | 27 |
| №4, Хооговенс-Голандія, БЗП, ПВП | 2000 роки | 2323 | 10640 | 12234 | 7500 | 16310 | 0,61 | 1,37 | 2,37 | 30 |

*1 - конусний завантажувальний пристрій; *2 – природний газ; *3 – безконсний завантажувальний пристрій; *4 – пиловугільне паливо

Судячи по величині середнього об'єму доменних печей в період 2011-2022 рр., а саме 4579 м³ можна зробити висновок про те, що технічна сис-

тема — доменний процес при сучасних умовах експлуатації і розвитку доменної техніки досягла певного максимуму.

Таблиця 4 - Динаміка введення в дію нових і реконструйованих доменних печей об'ємом > 4000 м³ з 80-х років ХХ ст. до 2022 року

| Роки | 1981 - 1990 | 1991 - 2000 | 2001 - 2010 | 2011 - 2022 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Кількість печей з об'ємом > 4000 м ³ | 6 | 10 | 24 | 16 |
| Середній об'єм | 4685 | 4481 | 4735 | 4579 |
| Кількість печей (чисельник) і їх середній об'єм (знаменник) по країнам і регіонам: | | | | |
| Європа | 1 / 5500 | 2 / 4450 | 1 / 4200 | 1 / 5513 |
| Японія | 5 / 4522 | 5 / 4687 | 8 / 5076 | 3 / 4892 |
| Китай | | 3 / 4159 | 11 / 4507 | 5 / 4351 |
| Південна Корея | | | 3 / 5067 | 1 / 5600 |
| Індія | | | 1 / 4060 | 6 / 4287 |

Цей максимум в 5500-6000 м³ обумовлений суто технологічними обмеженнями, починаючи зі забезпечення задовільного протитоку шихти і газів при периферійному підведенні дуття, зі забезпечення дуття високого тиску і витрати, зі забезпечення високої якості сировини у великих обсягах, тощо. На користь цього припущення свідчать дані про зменшення середнього об'єму потужних печей Японії і Китаю в останній період 2011-2022 рр. у порівнянні з попереднім періодом.

Про зміну підходів до визначення раціонального об'єму потужних печей свідчать наступні дані (див. табл. 4). Якщо в період з 1981 по 2010 рр. із побудованих 40 печей об'ємом > 4000 м³ 21 агре-

гат або 52,5 % мали об'єм в діапазоні 4500-4700 м³, то в останній період, а саме з 2011 по 2022 рр. більшість печей, 11 із 16 врахованих (68,8 %) мали об'єм в межах 4200-4400 м³. Це підтверджує висновок [27] про завершення екстенсивного розвитку доменного процесу, оскільки для успішної організації протитоку в потужних печах неминучі витрати на покращення якості плавильних матеріалів, коксу і на підвищення тиску газу в робочому просторі.

Висновки. Аналіз класичних прикладів недосконалості профілів доменних печей №3 заводу Елікуіппа об'ємом 1085 м³ (США) і №5 Ждановського металургійного заводу (колишній СРСР)

об'ємом 2300 м³ показав, що завужений колошник $d_k/D = 0,62-0,63$ цих печей був не єдиним недоліком. Так суттєвою вадою американської пляшкоподібної печі слід вважати, перш за все, конструкцію шахти зі змінним кутом нахилу – верхня частина її мала більший кут нахилу ніж нижня, в результаті чого утворилась висока горловина разом з колошником, яка стала перешкодою для опускання шихти і форсування процесу. Профіль типової печі об'ємом 2300 м³, крім відмічених в спеціальній літературі недоліків, мав завищену висоту шахти 19 м, що на 2 м більше ніж на сучасних печах об'ємом > 4000 м³, а також суттєво занижену кількість повітряних фурм.

На сучасному етапі розвитку доменного виробництва кардинальні зміни сировинних умов, засобів завантаження і технології плавки з вдуванням

пиловугільного палива призвели до повернення пляшкоподібного профілю з величинами d_k/D до 0,61-0,59.

Показано, що в останній досліджуваний період відбулася зміна підходів до визначення раціонального об'єму потужних печей. Так в проміжок часу між 2011 і 2022 рр. більшість побудованих потужних печей (68,8 %) мала обмежений об'єм 4200-4400 м³, що в середньому на 300 м³ менше, ніж за попередній суміжний період.

Необґрунтований підхід до проектування раціонального профілю доменних печей, що виник ще в 60-70-х роках ХХ ст. на тривалий час зробив вітчизняні печі заручниками старих ідей і прорахунків. В умовах, що склалися, сучасним проектувальникам з об'єктивних причин далеко не завжди вдається виправити помилки попередників.

Бібліографічний список

1. Красавцев Н. И. Перспективы развития доменного производства. М.: Metallurgizdat, 1958. 558 с.
2. Можаренко Н. М., Вышинская Е. Д., Горупаха В. В. Тенденции изменения проектных профилей доменных печей в современных условиях. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 29. С. 52-63.
3. Гуденау Г.-В., Сасабе М., Крайбих К. Исследования на охлажденных доменных печах в Японии. *Черные металлы*. 1977. № 6-7. С. 13-17.
4. Доклад о разборке содержимого доменной печи №1 завода Амагасаки / К. Нарита, Т. Сато, М. Маскава и др. *Тецу то Хагане*. 1980. №13. С. 1975-1984.
5. Гиммельфарб А. А., Воловик Г. А., Левченко В. Е. Рациональный профиль доменной печи и перспективы его развития. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1987. №7. С. 32-41.
6. Металлургия чугуна: учебник для вузов. 3—е изд., перераб. и доп. / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев и др. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.
7. Капитальный ремонт и задувка доменной печи №3 в Кванъяне. *Новости черной металлургии за рубежом*. 2009. №4. С. 23-26.
8. Опыт эксплуатации, выдувки, ремонта и пуска после реконструкции доменной печи объемом 2700 м³ / В. А. Шеремет, В. П. Лялюк, А. В. Кекух и др. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2010. №3. С. 50-59.
9. Капитальный ремонт с реконструкцией доменной печи № 4 ОАО / «Северсталь». В. Н. Логинов, А. В. Захаров, В. И. Нетронин и др. *Сталь*. 2007. № 6. С. 8-13.
10. Доменная печь №6 ОАО НЛМК – лучший российский проект / И. Ф. Курунов, С. С. Ляпин, В. Л. Емельянов и др. *Металлург*. 2008. №10. С. 40-45.
11. Строительство фирмой ThyssenKrupp CSA нового металлургического комбината в Бразилии / Х.-У. Линденберг, Ф.-В. Шефер, И. Игельбюшер. *Черные металлы*. 2008. №2. С. 45-52.
12. Похвиснев А. Н., Абрамов В. С., Красавцев Н. И., Леонидов Н. К. Доменное производство : підручник. М.: Metallurgizdat, 1951. 707 с.
13. Изменение дутьевого режима в процессе совершенствования технологии выплавки чугуна на заводе им. Дзержинского / В. И. Логинов, Г. Ю. Крячко, О. А. Бабенко и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1983. №1. С. 9-13.
14. Режимы работы доменных печей и воздуходувных машин в условиях нестабильности производства / Г. Ю. Крячко, Д. В. Пикалов, Л. А. Сафина-Валуева. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2010. №8. С. 26-30.
15. Панін В. Н. Модернізація діючих доменних цехів України. «Новини науки Придніпров'я» до науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю відомого вченого Г. А. Воловика : зб. наукових доповідей. Дніпропетровськ: «Дніпро-VAL», 2010. С. 39-43.
16. Работа доменной печи на 100 % окатышей на заводе в Пьюмбино / G. Perini, J. Merollari, U. Chiarotti et al. // *Новости черной металлургии за рубежом*.
17. Design Innovation and Practice of Laiwu Steel 3# 4000 m³ Blast Furnace. URL: http://www.meconlimited.co.in/writereaddata/MIST_2016/sesn/tech_3/2.pdf
18. Masaaki Naito. Recent progress of practical BF operation in Japan and innovation trials for the future. *5th European Coce and Ironmaking Congress*, 12—15 June 2005. 1. P. Mo 1.2.1 - Mo 1.2.14.
19. Production and Development of large Blast Furnace from 2011 to 2014 in China / D. Zhou, S. Cheng, Y. Wang, X. Jiang. *ISIJ International*. Vol. 55 (2015), №12. pp. 2519-2524.
20. Iron Making - MECON limited. URL : http://www.meconlimited.co.in/Metals/Iron_Making.aspx
21. 5500 m³ Blast furnace project of Shougang Jingtang. URL: https://sgbsei.com/blast_furnace.html
22. Tata Steel limited Kalinaanagar Steel Plant Project highlights. URL: <https://www.tatasteel.com/tata-steel-brochure-19-20/inside-tata-steel.html>
23. Blastfurnace №3 was expanded from 4350 to 5600 m³ (POSCO). URL: <https://newsroom.posco.com/en/posco-gets-smart-pohang-blast-furnace-no-3>

24. Nippon Steel to renovate Blast furnace at Nagoya for \$ 450 million. URL : <https://www.reuters.com/article/nippon-steel-japan-idUSL4N2DI1BS>
25. JFE Steel starts №6 Blast Furnace renovation Work Chiba 5153 m³. URL : <https://www.kallanish.com/en/news/steel/market-reports/article-details/jfe-steel-starts-no6-blast-furnace-renovation-0922>
26. JFE Steel Corporation has announced that it has restarted the BF №4 at is Kurashiki plant inner volume was expanded from 5005 m³ to 5100 m³. URL : <https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/jfe-steel-restarts-blast-furnace-no-4-at-kurashiki-plant-1226375.htm>
27. Крячко Г. Ю. К вопросу о развитии доменного производства. *Сталь*. 2003. №5. С. 7-11.

References

1. Krasavtsev N. I. Perspektivi razvitiya domennogo proizvodstva. M.: Metallurgizdat, 1958. 558 p.
2. Mozharenko N. M., Bishinskaya E. D., Gorupaha V. V. Tendentsii izmeneniya proektnih profilei domennih pechei v sovremennih usloviyah. *Fundamental'nie I prikladnie problem chernoi metallurgii*, 2014. Vip. 29. P. 52-63.
3. Gudenau G.-V., Sasabe M., Kraibih K. Issledovaniya na ohlazhdennih domennih pechah v Yaponii. *Chemie metallic*. 1977. № 6-7. P. 13-17.
4. Doklad o razborke soderzhimogo domennoi pechi №1 zavoda Amagasaki / K. Narita, T. Sato, M. Maskava et. al. *Tetsu to Hagane*. 1980. №13. P. 1975-1984.
5. Gimmel'farb A. A., Volovik G. A., Levchenko V. E. Ratsional'nii profil' domennoi pechi I perspektivi ego razvitiya. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1987. №7. P. 32-41.
6. Metallurgiya chuguna : uch. dlya vuzov. 3-e izd., perer. I dop. / E. F. Vegman, B. N. Zherebin, A. N. Pohvisnev et. al. M. : IKTS «Akademkniga», 2004. 774 p.
7. Kapital'nii remont I zaduvka domennoi pechi №3 v Kvan'yane. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*. 2009. №4. P. 23-26.
8. Opit ekspluatatsii, viduvki, remonta I puska posle rekonstruktsii domennoi pechi ob'emom 2700 m³ / V. A. Sheremet, V. P. Lyaluk, A. V. Keuh et. al. *Bulleten' «Chernaya metallurgiya»*. 2010. №3. P. 50-59.
9. Kapital'nii remonts rekonstruktsiei domennoi № 4 OAO «Severstal'». V. N. Loginov, A. V. Zaharov, V. I. Netronin et. al. *Stal'*. 2007. № 6. P. 8-13.
10. Domennaya pech' №6 OAO NLMK – lutshii rossiiskii proekt / I. F. Kurunov, S. S. Lyapin, V. L. Emel'yanov et. al. *Metallurg*. 2008. №10. P. 40-45.
11. Stroitel'stvo firmoi ThyssenKrupp CSA novogo metallurgicheskogo kombinata v Braziliu / H.-U. Lindenberg, F.-V. Shefer, I. Igel'bursher. *Chemie metallic*. 2008. №2. P. 45-52.
12. Pohvisnev A. N., Abramov V. S., Krasavtsev N. I., Leonidov N. K. Domennoe proizvodstvo : pidruchnik. M.: Metallurgizdat, 1951. 707 p.
13. Izmenenie dut'evogo rezhima v protsese sovershenstvovaniya technologii viplavki chuguna na zavode im. Dzerzhinskogo / V. I. Loginov, G. Yu. Kryachko, O. A. Babenko et. al. *Metallurgicheskaya I gornorudnaya promishlennost'*. 1983. №1. P. 9-13.
14. Rezhimi raboti domennih pechei I vozduchoduvnih mashin v usloviyah nestabil'nosti proizvodstva / G. Yu. Kryachko, D. V. Pikalov, L. A. Safina-Valueva. *Bulleten' «Chernaya metallurgiya»*. 2010. №8. P. 26-30.
15. Panin V. N. Modernizatsiya diyuchih domennih tseviv Ukraini. «*Novini nauki Pridneproviya*» do naukovopraktichnoi konferentsii, prisvyachenoj 100-riчchyu vidomogo vchenogo G. A. Volovika : zb. naukovih dopovidei. Dnipropetrovs'k : «Dnipro-VAL», 2010. P. 39-43.
16. Rabota domennoi pechi na 100% okatishei na zavode v P'ombino / G. Perini, J. Merollari, U. Chiarotti et al. // *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*.
17. Design Innovation and Practice of Laiwu Steel 3# 4000 m³ Blast Furnace. URL: http://www.meconlimited.co.in/writereaddata/MIST_2016/sesn/tech_3/2.pdf
18. Masaaki Naito. Recent progress of practical BF operation in Japan and innovation trials for the future. *5th European Coce and Ironmaking Congress*, 12—15 June 2005. 1. P. Mo 1.2.1 - Mo 1.2.14.
19. Production and Development of large Blast Furnace from 2011 to 2014 in China / D. Zhou, S. Cheng, Y. Wang, X. Jiang. *ISIJ International*. Vol. 55 (2015), №12. pp. 2519-2524.
20. Iron Making - MECON limited. URL : http://www.meconlimited.co.in/Metals/Iron_Making.aspx
21. 5500 m³ Blast furnace project of Shougang Jingtang. URL: https://sgbsei.com/blast_furnace.html
22. Tata Steel limited Kalinganagar Steel Plant Project highlights. URL: <https://www.tatasteel.com/tata-steel-brochure-19-20/inside-tata-steel.html>
23. Blastfurnace №3 was expanded from 4350 to 5600 m³ (POSCO). URL: <https://newsroom.posco.com/en/posco-gets-smart-pohang-blast-furnace-no-3>
24. Nippon Steel to renovate Blast furnace at Nagoya for \$ 450 million. URL : <https://www.reuters.com/article/nippon-steel-japan-idUSL4N2DI1BS>
25. JFE Steel starts №6 Blast Furnace renovation Work Chiba 5153 m³. URL : <https://www.kallanish.com/en/news/steel/market-reports/article-details/jfe-steel-starts-no6-blast-furnace-renovation-0922>
26. JFE Steel Corporation has announced that it has restarted the BF №4 at is Kurashiki plant inner volume was expanded from 5005 m³ to 5100 m³. URL : <https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/jfe-steel-restarts-blast-furnace-no-4-at-kurashiki-plant-1226375.htm>
27. Kryachko G. Yu. K voprosu o razvitiu domennogo proizvodstva. *Stal'*. 2003. №5. P. 7-11.

УДК 621.771, 62-419.5

Носко М.І., Коноводов Д.В., Самсоненко А.А., Бобух О.С.

Аналіз формозміни сталевих сіток в алюмінієвому композиті в процесі прокатки-з'єднання.

M. Nosko, D. Konovodov, A. Samsonenko, O. Bobukh

Analysis of steel meshes deformation inside aluminum matrix during roll bonding.

Мета. Порівняти деформацію армованих композитних матеріалів з алюмінієвого сплаву з використанням у якості фази армування плетеної та просічно-втягнутої сталеві сітки.

Методика. Було виконано експериментальне дослідження впливу величини висотної деформації пакета на деформацію сталеві сітки, що використовується у якості фази для армування, під час прокатки алюмінієвих композитів. В якості фази для армування використовували дротяну та просічно-втягнутої сітку з нержавіючої сталі. Після прокатки досліджували вплив деформації на зміну кута комірки сітки в середині композиту.

Результати. Встановлено вплив висотної деформації на зміну форми та деформацію сталеві сітки між двома листами алюмінію в процесі спільної прокатки. Показано, що просічно-втягнута сітка є кращим шаром для армування композитів на основі алюмінію, отриманих методом прокатки, оскільки її коефіцієнти подовження нижчі, ніж у дротяної сітки. При цьому встановлено, що раціональне обтиснення при прокатці-з'єднанні становить понад 30%. Більш низьке обтиснення майже не викликає змін в розмірі ґраток, а деформація армованої сітки здійснюється лише за рахунок подовження і стиснення дротів.

Наукова новизна. Представлене дослідження є оригінальним, так як вперше проведено порівняння параметрів деформації фази армування під час прокатки композитів на основі сплаву алюмінію AA1050, армованого плетеною та просічно-втягнутою сталеві сіткою.

Практична значущість. Практична цінність представлених наукових результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані для вдосконалення методів розрахунку течії металів з різними значеннями опору деформації при спільній пластичній деформації в умовах високого відростатичного тиску.

Ключові слова: гаряча прокатка, спільна пластична деформація, армування, сталеві сітка, композит.

Abstract.

Purpose. Compare the deformation of reinforced aluminum alloy composite materials using braided and expanded steel mesh as the reinforcement phase.

Methodology. An experimental study was made of the effect of the high-altitude deformation of the package on the deformation of the steel mesh used as a phase for reinforcement during the rolling of aluminum composites. Braided and expanded steel mesh was used as a reinforcement phase. After rolling, the effect of deformation on the change in the angle of the mesh cell inside the composite was studied.

Findings. The influence of high-altitude deformation on the change in the shape and deformation of the steel mesh between two aluminum sheets during rolling is established. It has been shown that expanded steel mesh is the preferred layer for reinforcing aluminum-based composites obtained by rolling, since its elongation coefficients are lower than those of braided mesh. At the same time, it was found that the rational reduction during roll-bonding is more than 30%. Lower compression causes almost no changes in the size of the grid, and the deformation of the reinforced mesh is carried out only due to the elongation and compression of the wires.

Originality. The presented study is original, since for the first time a comparison was made of the deformation parameters of the reinforcement phase during the rolling of composites based on AA1050 aluminum alloy reinforced with braided and expanded steel mesh.

Practical value. The practical value of the presented scientific results lies in the fact that they can be used to improve the methods for calculating the flow of metals with different values of resistance to deformation under general plastic deformation under high hydrostatic pressure.

Key words: hot rolling, general plastic deformation, reinforcement, steel mesh, composite.

Вступ. Сьогодні під час створення низки виробів та вузлів агрегатів у машинобудуванні, авіаційній та ракетно-космічній техніці знаходять широке застосування високоміцні та легкі композиційні матеріали. Є підстави стверджувати, що механічні властивості конструкційних матеріалів, які застосовуються у теперішній час, не є достатніми для деяких перспективних виробів. Тому необхідні композиційні матеріали, в тому числі на основі алюмінію, з більш високим рівнем міцності або інших спеціальних властивостей. Одним з видів таких матеріалів є шаруваті композитні матеріали, зміцнення яких відбувається за рахунок застосу-

вання фази армування.

В даній роботі розглянуто процес гарячої прокатки листового алюмінієвого композиту, зі вставкою із сталеві сітки. Важливим фактором, який визначає якість отриманого композиту, є надійність зварювання двох шарів алюмінієвої матриці між собою у процесі прокатки. Дослідження зосереджено на вивченні поведінки різних видів сіток в алюмінієвому композиті зі зміною деформації під час процесу прокатки-з'єднання. Раціональна варіація наведених параметрів при прокатці може привести до покращення властивостей виробу, таких як зменшення ваги, збільшення міцності при

| | |
|------------------|--|
| Носко М.І., | |
| Коноводов Д.В., | |
| Самсоненко А.А., | |
| Бобух О.С. | |

ударі та підвищення вогнестійкості. Отримані таким чином композитні матеріали можуть використовуватися як захисні екрани, декоративні елементи та вихідні матеріали для конструкційних елементів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Багато авторів досліджували вплив прокатки на міцність з'єднання компонентів композиту. Наприклад, відомо, що більш високе обтиснення збільшує міцність на відшарування [1, 2]. Для з'єднання алюмінієвих шарів і сітки з аустенітної сталі сприятливе обтиснення для поліпшення механічних властивостей композиту становить 45% [3], виходячи з режиму руйнування при випробуваннях на розтягнення. У той же час в [4] було показано, що використання твердого сталевого сердечника у холоднокатаному композиті алюміній-сталь, при 10% обтиснення, міцність відшарування можна порівняти з міцністю на відшарування при гарячій прокатці, яка відбувається при обтисненнях 30% [1] і 35% [5]. В дослідженні [6] описано механізм з'єднання, який названо «Zir-bonding». При такому з'єднанні метал матриці оточує твердий дріт внаслідок його постійної овалізації та повороту. Це забезпечує механічну міцність з'єднання навіть при обтисненні всього 25%.

Підвищення температури прокатки покращує здатність до з'єднання більшості металів, як було доведено у [4] для різних комбінацій матриць та елементів армування. Подальший відпал стимулює дифузію між шарами, що, з одного боку, призводить до кращої міцності зв'язку, але, з іншого боку, також сприяє утворенню інтерметалідних фаз на межі поділу, які, в свою чергу, можуть мати різний вплив на властивості композиту в залежності від металів і сплавів [1, 4].

Використання армування високоміцним матеріалом дозволяє досягти підвищення механічних властивостей композиту, але його часткове руйнування в процесі виробництва може значно погіршити властивості готового виробу [7]. Це також обґрунтовує важливість знання та контролю параметрів деформації під час прокатки. На даний час немає надійного способу прогнозування деформації жорстких вставок із сітки, яка виготовлена зі сталі, всередині пакету. Незважаючи на те, що па-

раметри які мають вплив на з'єднання при прокатці плоских виробів та їх діапазон, добре описані в літературі, кількісні дані про прокатку-з'єднання композитів армованих сіткою є достатньо малочисельними.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є порівняння деформації армованих композитних матеріалів з алюмінієвого сплаву з використанням плетеної та просічно-витажною сітки у якості фази армування.

Для досягнення даної мети у дослідженні були поставлені наступні завдання: 1) визначити деформацію сітки всередині композиту, що має вплив на можливість з'єднання композиту під час прокатки та комплекс кінцевих експлуатаційних параметрів таких композитів, 2) порівняти поведінку різних типів сітки при прокатці армованих матеріалів.

Порівняння параметрів деформації сіток дозволить обґрунтовано обирати тип сітки при виробництві армованого алюмінієвого композиту.

Матеріали та методи дослідження. Плоский композит, що складається з двох зовнішніх шарів алюмінієвого сплаву і сітки з нержавіючої сталі в середині, був виготовлений методом прокатки-з'єднання. В якості матриці композиту використовувалися алюмінієвий сплав у вигляді тонких штаб:

Композит, що складається з двох пластин з алюмінієвого сплаву та вкладеною сіткою з нержавіючої сталі, був виготовлений методом прокатки-з'єднання. Матеріалом для матриці слугували тонкі листи з алюмінієвого сплаву AA 1050 з розмірами $3 \times 70 \times 200$ (h × b × l) мм. Хімічний склад сплаву алюмінієвої матриці наведено в табл. 1. В якості фази для армування використовували дротяну та просічно – витажну сітку з двох марок нержавіючої сталі EN 1.4301 та AISI 304 (рис. 1).

Розміри вічка сітки декілька відрізнялися, але периметр комірки, тобто відносна кількість фази армування були однаковими. Розміри вічка дротяної сітки складали 3×3 мм, а розміри вічка просічно – витажною сітки зі сталі AISI 304 складали 2×4 мм. Товщина сталевих сіток дорівнювала 0,5 мм. Хімічний склад сталей з яких виготовлено сітки, наведено в табл. 2.

Таблиця 1 – Хімічний склад алюмінієвого сплаву AA 1050

| Найменування сплаву | Хімічний склад, % | | | | | | |
|---------------------|-------------------|---------|---------|------------|--------|---------|--------|
| | Fe | Si | Ti | Al | Cu | Mg | Zn |
| AA1050 | до 0,5 | 0,3-0,7 | до 0,15 | 97,25-99,3 | до 0,1 | 0,4-0,9 | до 0,2 |

Таблиця 2 – Хімічний склад сталевих сіток

| Найменування сплаву | Хімічний склад, % | | | | | | |
|---------------------|-------------------|--------|--------|-----------|----------|--------|------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | N | Fe |
| EN 1.4301 | < 0,07 | < 1,00 | < 2,00 | 17,5-19,5 | 8,0-10,5 | < 0,10 | інше |
| AISI 304 | до 0,8 | до 0,8 | до 0,2 | 17 - 19 | 9 - 11 | до 0,2 | ~69 |

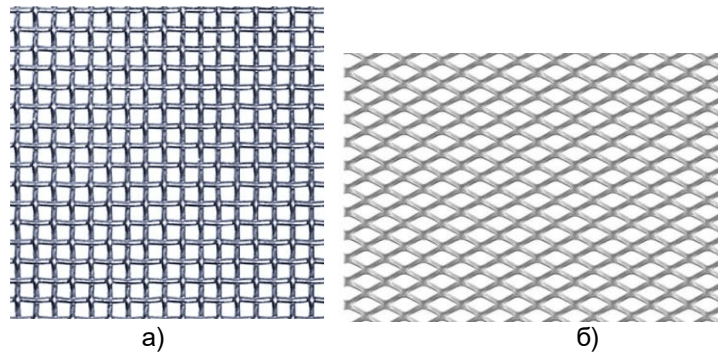


Рисунок 1 – Сітка, яка використовувалася при дослідженні: а – сталь EN 1.4301; б) сталь AISI 304

Було підготовлено два типи заготовок: композит з плетеною сіткою, орієнтованою під кутом 45 (по діагоналі) до напрямку прокатки (тип 1); композит з сіткою просічно-втяжного типу (тип 2).

Для забезпечення більшої стабільності перебігу процесу прокатки, заготовки скріплювались в кутах алюмінієвими заклепками.

Слід зазначити, що оптимальна температура для з'єднання шарів алюмінію у валках складає біля 500 °С, але це також призводить до того, що сталеві сітка з нержавіючої сталі стає крихкою при деформації. Таким чином, було вирішено провести попередню термообробку плетеної та просічно-втяжної сітки для підвищення їх пластичності під час проведення експериментальних досліджень.

Сітку з нержавіючої сталі нагрівали в печі та витримували протягом 5 хвилин при температурі 1050 °С. Потім охолоджували у воді для отримання високої пластичності та усунення зміцнення, яку отримав матеріал сітки в процесі її виготовлення. Потім елементи композитного матеріалу очищали етиловим спиртом, збирали у пакети та скріплювали по краях спереду та ззаду за допомогою алюмінієвих заклепок.

Отримання композитних матеріалів здійснювали на двовалковому прокатному стані. Діаметр робочих валків стана складав 250 мм. Процес прокатки проводили за один прохід, діапазон відносних обтисків складав від 20 до 50%. Перед прокаткою зразки нагрівали до температури 500 °С. Швидкість прокатки становила 0,4 м/с. З метою забезпечення достовірності результатів експерименту, для кожного набору параметрів виконували прокатку трьох зразків.

Після прокатки пакету, алюміній видаляли з використанням розчину гідроксиду натрію і вимірювали дрібнозернисту твердість сітки, а також її параметри деформації.

Результати дослідження. Після прокатки на стані дуо 250 складених заготовок-пакетів, отримали штаби армовані сіткою (рис. 2).

В якості основного параметру формозміни вічка сітки було обрано видовження вічка (μ_c). Видовження вічка розраховується як відношення довжини (діагоналі) вічка сітки після прокатки та довжини (діагоналі) вічка сітки до прокатки.

Тобто видовження вічка сітки μ_c дорівнює відношенню d_1/d_0 . На рис. 3, на прикладі плетеної сітки, показано розміри вічка, які використовували при розрахунку.

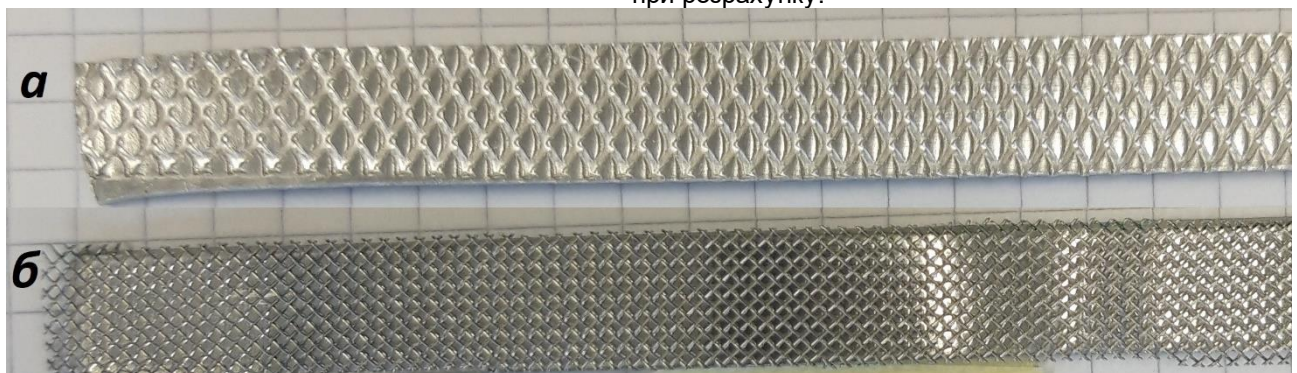


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд прокатаних зразків: а – з просічно-втяжною сіткою; б – з плетеною сіткою

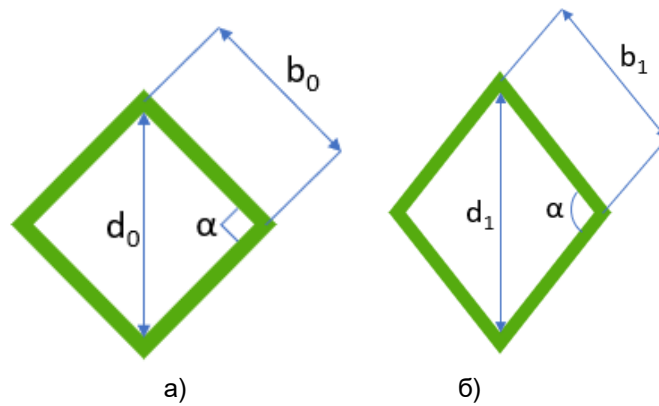


Рисунок 3 – Схема видовження вічка плетеної сітки: а – вічко сітки до деформації; б – вічко сітки після деформації

Довжину вічка d_1 можна розрахувати, знаючі розмір b_1 та кут розкриття сітки α , який вимірюється до та після прокатки. Отримані данні коефіцієнта μ_c та коефіцієнт видовження всього композиту при застосування у якості фази армування плетеної сітки наведено в табл. 3.

Особливість композиту армованого сіткою можна спостерігати при його руйнуванні. Вона полягає у розриві зразка в зонах між вузлами сітки. Завдяки сильному зчепленню між матрицею та дротами, що армують, ці дроти перешкоджають розвитку деформації.

Таблиця 3 - Геометричні параметри елементів сітки плетеного типу

| № серії | Обтиснення, % | Коефіцієнт видовження ґратки | Коефіцієнт видовження всього композиту |
|---------|---------------|------------------------------|--|
| 1 | 20 | 1,68 | 1,28 |
| 2 | 30 | 1,89 | 1,37 |
| 3 | 40 | 1,98 | 1,35 |
| 4 | 50 | 2,30 | 1,37 |

При прокатці композитів без сітки (тип 3) спостерігалось незначне відшарування у двох композитах, тоді як у армованих композитах (тип 1) відшарування не спостерігалось.

Для розрахунку параметрів деформації ґратки просічно-втяжної сітки у складі композиту була використана зазначена вище методика. Схему видовження вічка такої сітки показано на рис. 3.

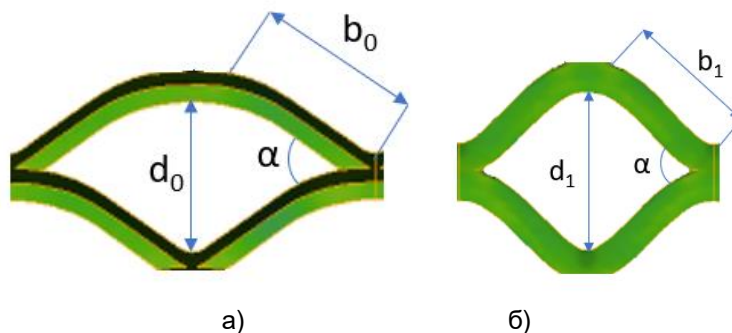


Рисунок 3 – Схема видовження вічка просічно-втяжної сітки: а – вічко сітки до деформації; б – вічко сітки після деформації

Геометричні параметри вічка сітки визначалися за допомогою мікроскопа. Результати розрахунку представлені в таблиці 4.

Візуальне спостереження прокатки пакетів показало, що при величині обтиснення до 30% може не забезпечуватися надійне з'єднання шарів у композитному матеріалі.

Таблиця 4 - Геометричні параметри елементів сітки просічно-втяжного типу

| № серії | Обтиснення, % | Кут між дротами ґратки, ° | Коефіцієнт видовження ґратки | Коефіцієнт видовження всього композиту |
|---------|---------------|---------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 20 | 82 | 1,55 | 1,25 |
| 2 | 30 | 90 | 1,75 | 1,40 |
| 3 | 40 | 105 | 1,85 | 1,65 |
| 4 | 50 | 110 | 2,20 | 1,83 |

Обговорення результатів. Експериментальні дані підтвердили, що поріг для ефективного обтиснення під час прокатки-з'єднання, з точки зору міцності з'єднання шарів, знаходиться вище 30 %. Більш низькі значення обтиснення не завжди забезпечують надійне з'єднання шарів, так як у цих умовах сітка деформується тільки за рахунок подовження і стиснення її вічка.

Кут між дротами вічка зі збільшенням обтиснення композиту при прокатці спочатку збільшується лінійно на 10 градусів на кожні 10% обтиснення, а при перевищенні значення обтиснення 40%, збільшення кута стає повільніше.

Зміна кута сітки залежно від тиску при прокатці дозволяє визначити величину обтиснення, необхідне для досягнення оптимального кута (90°) між дротами. Цей параметр становить близько 30% у цих експериментальних умовах. Даний вид орієнтації сітки всередині композитного матеріалу може призводити до зменшення неоднорідності властивостей матеріалу в різних напрямках.

Важливим фактором при прокатці є співвідношення між довжиною зони деформації та середньою товщиною штаби. Це співвідношення називається "фактором форми зони деформації" і використовується для поділу всіх випадків прокатки товстих, середніх та тонких штаб. Для кожного випадку існують характерні закономірності розподілу деформації по висоті штаби. При прокатуванні композитних матеріалів цей чинник дуже важливий при визначенні деформації різних складових пакета. Результати аналізу фактор форми зони деформації для діапазону обтиснень, що використовуються в поточному дослідженні, показали, що значення фактор форми відповідають випадку прокатки середніх та тонких штаб.

При обтисненні 20% та 30% відношення довжини деформаційної зони до середньої товщини штаби відповідно становить 2,2 та 2,8, що відповідає прокатці середніх штаб. При обтисненні 40% та 50% відношення довжини деформаційної зони до середньої товщини штаби становить 3,5 та 4,1, що відповідає прокатці тонких штаб.

Коефіцієнт подовження решітки в експерименті з плетеною сіткою μ_c дорівнює 1,68-2,3, що вище, ніж коефіцієнт подовження решітки з просічно-

витяжної сітки 1,55-2,2. Ця відмінність обумовлена способом з'єднання проводів в елементах сіток. У вузлах плетеної сітки дроти накладені і не мають жорсткого з'єднання, в той час як у просічно-витяжній сітці вузли суцільні. В результаті плетена сітка має рухомі частини у вузлах і більший коефіцієнт подовження решітки в порівнянні з просічно-витяжною сіткою.

Композит із плетеною сіткою має більшу нерівномірність деформації, ніж деформація самого композиту, що ускладнює досягнення бажаних параметрів сітки. Це також може призвести до руйнування сітки. З іншого боку, композит із просічно-витяжною сіткою має менший коефіцієнт подовження та більш рівномірну деформацію, що може стати важливою перевагою при виборі типу сітки для армування алюмінієвих композитів.

Висновки. Встановлено, що раціональне обтиснення при прокатці-з'єднанні становить більше 30%. Більш низьке обтиснення майже не викликає змін в розмірі вічка сітки, а деформація сітки здійснюється лише за рахунок подовження і стиснення дротів.

Визначено, що зміна кута сітки залежно від обтиснення при прокатці, дозволяє визначити величину обтиснення, яке необхідне для досягнення оптимального кута 90° між дротами. Цей параметр становить близько 30% у представлених експериментальних дослідженнях. Даний вид орієнтації сітки всередині композитного матеріалу може призводити до зменшення неоднорідності властивостей такого матеріалу.

Встановлено, що просічно-витяжна сітка за малих обтиснень має менший коефіцієнт видовження вічка ніж плетена сітка. Ці відбувається за рахунок того, що в просічно-витяжній сітці не має переплетених дротів, так як її отримують шляхом витягування сталевих листів. Це дозволяє зменшити ризик розриву сітки в місцях перехрещення дротів. Тому просічно-витяжна сітка є кращою в якості шару армування композитів на основі алюмінію, отриманих шляхом прокатки-з'єднання. Недоліки плетеної сітки обмежують можливості її промислового застосування в армованих композитах.

Бібліографічний опис

1. Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2010). Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process. *Materials Science and Engineering: A*. 527/9, 2320-2326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.069>
2. Abbasi, M., Toroghinejad, M., (2010). Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 560-563. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.003>
3. Haranich, Y., Y., Frolov, Y., V., (2016) Comprehensive analysis of metal– polymer sandwich composite manufacturing. *Obrabotka Material Davleniem (Treatment of Materials by Pressure)*. 2/45, 136-141.
4. Akramifard, H., Mirzadeh, H., Parsa, M., (2014). Cladding of aluminum on AISI304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, Microstructure, and *Mechanical Properties*. *Materials Science and Engineering: A*, 613, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.109>

5. Soltani, M., Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2012). The influence of TiO₂ nano-particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips. *Materials Science and Engineering: A*, 550, 367-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.089>
6. Frolov, Y., Stolbchenko, M. Grydin, O., Makeeva, H., Tershakovec, M., Schaper, M., (2019). Influence of strain parameters at rolling on the properties of wire-reinforced aluminium composites. *International Journal of Material Forming*, 12(4), 505-518. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1431-6>
7. Grydin, O., Stolbchenko, M., & Schaper, M. (2016). Twin-roll casting of carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced aluminum strips. In *Light Metals 2016* (pp. 1007-1012). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_168

References

1. Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2010). Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process. *Materials Science and Engineering: A*. 527/9, 2320-2326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.069>
2. Abbasi, M., Toroghinejad, M., (2010). Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 560-563. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.003>
3. Haranich, Y., Y., Frolov, Y., V., (2016) Comprehensive analysis of metal– polymer sandwich composite manufacturing. *Obrabotka Materialov Davleniem (Treatment of Materials by Pressure)*. 2/45, 136-141.
4. Akramifard, H., Mirzadeh, H., Parsa, M., (2014). Cladding of aluminum on AISI304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials Science and Engineering: A*, 613, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.109>
5. Soltani, M., Jamaati, R., Toroghinejad, M., (2012). The influence of TiO₂ nano-particles on bond strength of cold roll bonded aluminum strips. *Materials Science and Engineering: A*, 550, 367-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.089>
6. Frolov, Y., Stolbchenko, M. Grydin, O., Makeeva, H., Tershakovec, M., Schaper, M., (2019). Influence of strain parameters at rolling on the properties of wire-reinforced aluminium composites. *International Journal of Material Forming*, 12(4), 505-518. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1431-6>
7. Grydin, O., Stolbchenko, M., & Schaper, M. (2016). Twin-roll casting of carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced aluminum strips. In *Light Metals 2016* (pp. 1007-1012). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_168

УДК 669.18

Є.В. Синегін, С.В. Суховерхий

Аналітичні дослідження і характеристика методів рафінування сталі у промковшій МБЛЗ

Y.V. Synehin, S.V. Sukhovetskyi

Analytical studies and characteristics of steel refining methods in the CCM tundish

Актуальність: Постійно зростаючі вимоги до якості металопродукції та її собівартості спонукають до сталого розвитку технологій рафінування сталі, зокрема й від неметалевих включень, присутність яких в сталі суттєво знижує механічні властивості сталевих продуктів. Наразі рафінування сталі від неметалевих включень здійснюється починаючи з позапечної обробки сталі у сталерозливному ковші і закінчується на етапі розливання сталі. Найбільш ефективними методами рафінування сталі, що зумовило їх широке використання в промисловості, є продувка інертним газом, електромагнітне перемішування, модифікування та ін. Найбільш ефективним з погляду рафінування сталі є обробка на фінішних етапах виробництва, зокрема при розливанні сталі на МБЛЗ у проміжному ковші.

Мета роботи: з огляду на широке різноманіття технологій і методів рафінування сталі, зокрема й на етапі безперервного розливання сталі, виникає потреба в їх систематизації і класифікації, що дозволить краще оцінювати і порівнювати їх ефективність.

Наукова новизна: систематизовані і класифіковані методи рафінування сталі при безперервному розливанні сталі. На прикладі світового досвіду, ґрунтуючись на огляді останніх закордонних публікацій, розглянуто конкретне застосування і ефективність кожного типу методів.

Наукові та практичні результати: запропонована класифікація методів дозволить краще оцінювати їх ефективність та раціонально обирати доцільні методи та їх комбінації для кожного окремого виробництва, зокрема із урахуванням марки сталі. Також, виходячи з оцінки ефективності розглянутих методів, можна визначити додаткові резерви щодо їх вдосконалення.

Ключові слова: МБЛЗ, модифікування, електромагнітне перемішування, рафінування, неметалеві включення.

Relevance: Constantly growing requirements for the quality of metal products and their cost price encourage the sustainable development of steel refining technologies, in particular, from non-metallic inclusions, the presence of which in steel significantly reduces the mechanical properties of steel products. Currently, the steel refining from non-metallic inclusions starts from steel processing in the ladle and ends at the steel casting. The most effective methods of steel refining, which led to their wide use in industry, are argon blowing, electromagnetic stirring, modification, etc. The most effective from the point of view of steel refining is the processing at the final stages of production, in particular, when casting the billet at the CCM tundish.

The aim of the work: in view of the wide variety of technologies and methods of steel refining, in particular at the continuous casting, there is a need for their systematization and classification, which allow better evaluation and comparison of their effectiveness.

Scientific novelty: systematized and classified methods of steel refining during continuous casting of steel. On the example of world experience, based on a review of the latest foreign publications, the specific application and effectiveness of each type of method is considered.

Scientific and practical results: the proposed classification of methods makes it possible to better assess their efficiency and rationally choose appropriate methods and their combinations for each individual production, in particular, taking into account the steel grade. Also, based on the evaluation of the effectiveness of the considered methods, it is possible to determine additional reserves for their improvement.

Key words: CCM, modification, electromagnetic stirring, refining, non-metallic inclusions.

Наявність неметалевих включень (НВ) в сталі призводить до погіршення механічних характеристик сталі, а в деяких випадках може посилювати вплив корозії на метал. На сьогодні відомо багато методів видалення НВ зі сталі, недоліком яких є використання складного обладнання, дорогих додаткових матеріалів для обробки сталі тощо. Тому розробка недорогих і водночас ефективних методів видалення НВ зі сталі є актуальною задачею.

На підставі проведеного огляду методів видалення неметалевих включень зі сталі в процесі позапечної обробки й безперервного розливання сталі запропонована їхня класифікація на дві групи: механічні й фізико-хімічні (рисунк 1). До першої групи запропоновано віднести методи, що пе-

редбачають зміну картини циркуляційних потоків у ковші таким чином, щоб прискорити спливання НВ у шлакову фазу або їх вловлювання спеціальними керамічними фільтрами. До цієї групи належать продувка інертним газом [1-6], електромагнітне перемішування (ЕМП) [1,3,4,7-11,12,13], фільтрація [1,14-17] й установка в промковшій перегородок і порогів [1,18,19]. Методи другої групи, на відміну від першої, передбачають вплив на хімічний і фазовий склад, а також агрегатний стан включень. Підвищення ефективності видалення НВ у цьому випадку досягається за рахунок зниження їхньої температури плавлення й переведення їх у рідкий агрегатний стан, що полегшує їхню агрегацію та за рахунок укрупнення прискорює спливання. До цієї

| | |
|-----------------|--|
| Є.В. Синегін, | |
| С.В. Суховерхий | |

групи методів належать модифікування [1,20-22], обробка шлаковими сумішами [23,24] і методи раціонального розкислення й легування [25,26]. Додатковий ефект модифікування полягає в наданні неметалевим включенням глобулярної форми, що

знижує напруги в об'ємі твердого металу. Розглянемо детальніше особливості та ефективність застосування цих методів при розливанні на МБЛЗ (у промковші і в кристалізаторі) відповідно до запропонованої класифікації.

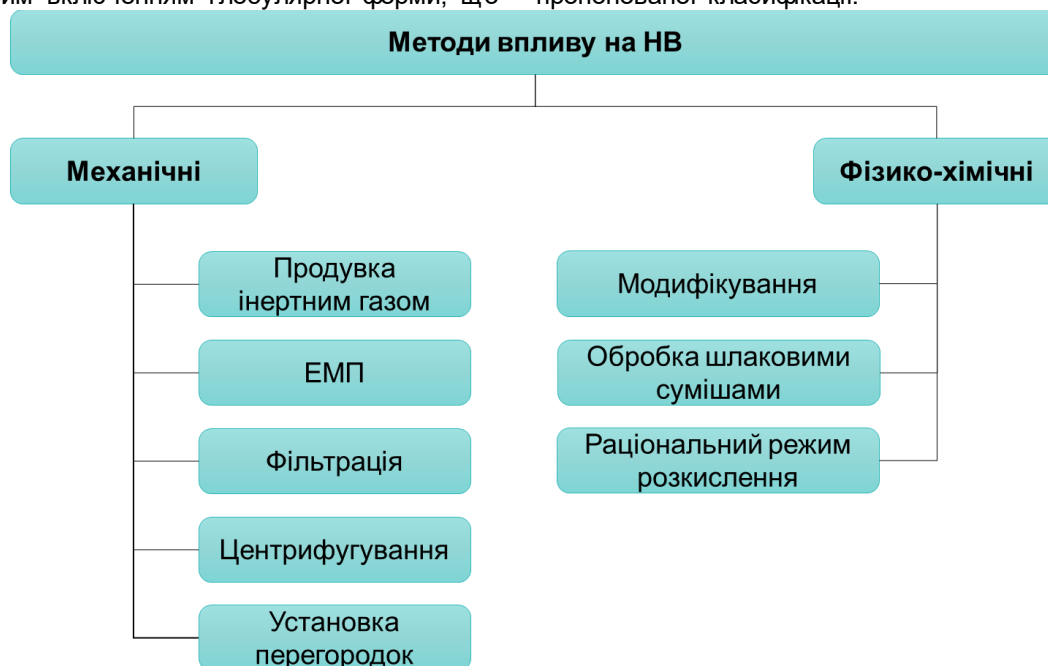


Рисунок 1 – Класифікація методів видалення НВ зі сталі

Механічні методи

Продувка інертним газом. Продувка сталі інертним газом є найбільш розповсюдженим методом позапічної обробки. Основна мета цієї операції – створення вимушеної циркуляції металу, що сприяє його гомогенізації як за температурою, так і за хімічним складом. Окрім цього вирішуються й деякі інші задачі позапічної обробки сталі, зокрема видалення НВ за рахунок флотації та спрямування потоків металу до шлаку, що сприяє швидшій і ефективнішій асиміляції НВ шлаком. Певною мірою відбувається й дегазація металу [27].

При безперервному розливанні є 3 принципові можливості вдування газу в розплав: через пористі вставки в днищі ковша, через порожнисті стопори, якими зазвичай регулюють витрату сталі з промковша та через спеціальне кільце у верхній частині стінки захисної труби [2,5,6].

Більшість наукових робіт акцентує увагу саме на дослідженні флотації НВ газовими бульбашками. Так у роботах [2,5] розроблено математичну модель для оцінки ефективності видалення НВ при продувці. Для цього було визначено ймовірність прикріплення НВ до бульбашки, яка за результатами розрахунків залежить лише від розмірів бульбашки та НВ. За результатами моделювання було встановлено, що при об'ємній витраті газу 15 нл/хв. бульбашки розміром понад 5 мм можуть видалити не більше ніж 10 % включень. За тієї ж витрати газу зменшення розміру бульбашок до 1 мм дозволяє видалити майже всі НВ розмі-

ром понад 30 мкм. Однак, у цьому випадку є ризик, що бульбашки таких розмірів, потрапивши у кристалізатор, не встигнуть вплинути і призведуть до утворення газових пухирів під кіркою заготовки. Тому, як оптимальний варіант, автори рекомендують бульбашки розміром 2-4 мм.

У роботах [3,28] запропоноване розміщення продувочних блоків у днищі промковша у формі кільцевих вставок навколо розливних стаканів у днищі промковша. За рахунок цього навколо стакану створюється завіса з газових бульбашок, а обробці піддаються саме ті порції металу, що витікають з промковша у кристалізаторі. Методами математичного і фізичного моделювання авторами роботи [3] було також підтверджено незначне збільшення резидентного часу перебування металу у промковші МБЛЗ, що також позитивно відбивається на видаленні НВ.

Електромагнітне перемішування. На МБЛЗ застосування ЕМП можливо у промковші і на струмках (у кристалізаторі, ЗВО та зоні остаточного тверднення) причому найбільшого поширення отримало саме друге. Для інтенсифікації видалення НВ з рідкої лунки заготовки у кристалізаторі застосовують технологію MEMS (*mold electromagnetic stirring*) – різновид індуктивного перемішування спрямований на створення обертового руху рідкого металу у кристалізаторі, що може застосовуватися за розливання усіх типів заготовок, звичайно низьколегованих, пружинних, холоднокатаних та середньовуглецевистих марок сталі.

За рахунок обертання сталі неметалеві включення та газу із меншою у порівнянні з металом густиною спрямовуються до центральної частини безперервнолитої заготовки, звідки конвекційними потоками переносяться до дзеркала металу і асимілюються шлаком [7,8,10]. Згідно з даними комп'ютерного моделювання [12] електромагнітна мішалка MEMS, яка працює із силою струму 200 А та частотою 4 Гц, генерує в рідкому ядрі заготовки горизонтальний вихор із максимальною швидкістю обертання 0,27 м/с та глибиною близько 1,3 м. У роботі [11] шляхом промислового експерименту визначено оптимальне розташування ЕМП, необхідне для видалення НВ та зменшення сегрегації, що складає 510 мм від верхньої крайки гільзи кристалізатора.

За рахунок використання MEMS зменшується кількість НВ, особливо малих розмірів, та збільшується глибина їх розташування під кіркою заготовки [29]. До того ж MEMS пригнічує занурення струменя у рідку лунку заготовки, що позитивно впливає на видалення НВ та умови формування кірки [8,12]. Проте за даними роботи [12] надмірно інтенсивне перемішування може призвести до утворення зони негативної ліквіації вуглецю під кіркою заготовки. Крім того, застосування MEMS на слябових кристалізаторах призводить до неоднорідності товщини кірки по перерізу заготовки (утворення порівняно тонких областей на периферії широкої сторони) та збільшення кількості НВ на глибині 0-20 мм під поверхнею широкої грані (у той же час на глибині 20-40 мм ситуація кардинально змінюється) [9].

Порівняно із попередніми методами, використання ЕМП для коригування потоків у промковші є доволі обмеженим. За результатами аналітичного огляду знайдено лише один метод використання, що має назву CF-Tundish (*Centrifugal Tundish*), винайдений японськими вченими [1,13]. Промківш при цьому розділено на дві камери: ротаційну, у яку зі сталерозливного ковша витікає метал та у якій відбувається утворення горизонтального вихору за рахунок електромагнітного поля, та розливу, в якій метал розподіляється по струмках МБЛЗ. Використання електромагнітного перемішування за технологією CF Tundish дозволяє генерувати горизонтальний вихор зі швидкістю до 45 об./хв., що дозволяє ефективно видаляти майже 50 % НВ [1]. Очевидними недоліками цієї технології є необхідність у певному вдосконаленні проміжного ковша МБЛЗ, що ускладнює її впровадження на діючих МБЛЗ, встановлення додаткового складного і вартісного обладнання, а також додаткові експлуатаційні витрати (електричний струм, вода та ін.).

Фільтрація. Під фільтрацією мається на увазі осадження НВ на стінках каналів керамічних фільтрів за рахунок поверхневих сил. Окрім цього, позитивний ефект від їх використання обумовлений також збільшенням резидентного часу перебування металу в промковші, зменшенням об'єму застійних зон та спрямуванням потоків металу у на-

прямку шлаку для асиміляції ним НВ. Зокрема відома робота Польських вчених [14], які у промислових та напівпромислових умовах підтвердили ефективність використання мулітових і корундових фільтрів, які дозволяють знизити відносну площу НВ на 43-50 % і 53 % відповідно, знизити загальну кількість НВ приблизно на 50% для обох фільтрів та знизити загальний вміст кисню в металі на 22%. У роботі китайських вчених [17] шляхом математичного моделювання підтверджено збільшення ефективності видалення НВ розміром 1 мкм з 59,3 % (із використанням порогів і перегоронок) до 72,0 % (із використанням керамічних фільтрів). Решта знайдених робіт [1,15,16] присвячена визначенню оптимального розташування фільтрів та їх конструкції, зокрема форми, розмірів та розташування каналів. Незначним недоліком фільтрів є їх низька стійкість, висока вартість та швидше падіння температури металу при їх використанні [17].

Центрифугування. До цієї групи методів можна віднести розглянуте вище ЕМП, що створює горизонтальні вихори, у середину яких за рахунок відцентрової сили зтягуються НВ, а також методи, утворення вихрів за рахунок коригування гідродинамічної картини потоків як в промковші, так і в кристалізаторі. Зокрема утворення горизонтального вихору у промковші розглянуто у роботі [30], в якій до традиційної конструкції промковша запропоновано додати циліндричну камеру, до якої метал з промковша підводиться тангенціально. Утворений у цій камері вихровий рух рідини передається захисною трубою у кристалізатор.

Також відомі численні варіанти конструкції безнапірних заглибних стаканів, що ініціюють обертальний рух рідини в кристалізаторі за рахунок тангенціального розташування вихідних отворів [31-33] та розташування у порожнині стакану архімедового гвинта [34]. Авторами роботи [31] за результатами гідродинамічного моделювання підтверджена можливість видалення 50-53% неметалевих включень з розплаву.

Установка перегоронок. Основна мета цього устаткування – спрямування потоків металу у напрямку дзеркала металу, підвищуючи таким чином ефективність асиміляції неметалевих включень та зменшуючи об'єм застійних зон. Зазвичай використовують дві перегородки таким чином, що потік спочатку протікає попід однією, а потім, нашоувхуючись на іншу, що лежить на дні, спрямовується вгору до дзеркала металу. Ефективність використання перегородок суттєво залежить від їх розташування та конструкції промковша. Досить часто перегородки використовуються разом з продувочними пристроями та керамічними фільтрами [1,18,19].

Фізико-хімічні методи

Модифікування. Метою модифікування НВ є надання ним сферичної форми та переведення їх у рідкий агрегатний стан. Перше зменшує негативний вплив на механічні властивості сталі тих НВ, які не вдалося видалити зі сталі. Друге поліпшує умови коалесценції рідких НВ, їх спливання і аси-

міляцію шлаковою фазою. Найбільш розповсюдженими модифікаторами є лужноземельні (Ca, Mg, Ba) та рідкоземельні метали (Ce, La, Pr, Nd, Y).

Позитивний вплив кальцію на сфероїдизацію алюмінатів відмічено в роботі [21]. Позитивний досвід використання силікобарію у комплексі з матеріалами, що містять кальцій, наведено у роботі [22].

У роботі [20] використання РЗМ не лише змінює форму НВ, а й зменшує їх розміри. При цьому автори наголошують на тому, що надмірне збільшення витрати РЗМ погіршує якість сталі. Зокрема найбільше зменшення відносної площі НВ на 75 % спостерігається при вмісті РЗМ 150 ppm. При вмісті РЗМ менше 50 ppm модифікуються лише оксиди і окисульфід, проте не модифікуються сульфід. При вмісті РЗМ понад 150 ppm відбувається утворення великих НВ. Зокрема при вмісті РЗМ 2900 ppm суттєво збільшуються розміри та кількість НВ.

Обробка шлаковими сумішами. У роботі [23] авторами виконане детальне дослідження умов видалення включень, зокрема умов їх асиміляції шлаковою фазою. За отриманими результатами, асиміляція рідких НВ відбувається набагато легше, аніж твердих. Крім того, погіршувати асиміляцію будь-яких НВ може підвищення в'язкості шлаку та його гетерогенізація.

Досліджуючи вплив Rb_2O (до 10 %) у складі ковшового шлаку на установці ківш-піч, автори робо-

ти [24] автори зафіксували суттєве зменшення середнього діаметру залишкових НВ до 3,0 мкм та різке зменшення їх кількості.

Раціональний режим розкислення. Цей напрямок включає як розробку технології комплексного розкислення, так і режимів введення феросплавів. Так на ВАТ «Виксунський металургійний завод» були проведені експерименти з вдосконалення технології комплексного розкислення у ковші колісної мартенівської сталі. Найкращий результат показала технологія, що передбачає введення 2 кг/т феросиліцію, 256 г/т алюмінію та 1,2 кг/т силікокальцію. Для зв'язування розчиненого в сталі кисню під час випуску давали алюміній. За рахунок цього міст кисню в металі зменшувався до 0,004 % і повністю зникали крихкі силікати [26].

Висновок

На думку авторів, значної уваги заслуговують методи центрифугування, реалізація яких у процесах позапічної обробки й безперервного розливання можлива за допомогою електромагнітного перемішування й за рахунок тангенціального підведення металу в ротаційну камеру. За рахунок тангенціального спрямовування потоку можливо створювати вихровий рух металу у проміжному ковші та кристалізаторах. Такі метод дозволяють відмовитися від встановлення електромагнітних мішалок та зменшити експлуатаційні витрати на розливання сталі.

Перелік посилань

1. Sahai, Y. (2016). Tundish Technology for Casting Clean Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions B*. DOI: 10.1007/s11663-016-0648-3
2. Zhang, L., Aoki, J., & Thomas, B. (June 2006). Inclusion Removal by Bubble Flotation in a Continuous Casting Mold. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37B, pp. 361-379.
3. Qin, X., Cheng, C., Li, Y., Zhang, C., Zhang, J., & Jin, Y. (February 2019). A Simulation Study on the Flow Behavior of Liquid Steel in Tundish with Annular Argon Blowing in the Upper Nozzle. *Metals*, 9(225). DOI:10.3390/met9020225
4. Sang-ik Chung, Young-Ho Shin & Jong-Kyu Yoon (1992). Flow Characteristics by Induction and Gas Stirring in ASEA-SKF Ladle. *ISIJ International*, 32(12), pp. 1287-1296.
5. Aoki J., Zhang L., Thomas B.G. (2005). Modeling of Inclusion Removal in Ladle Refining. 3rd Internat. Congress on Science & Technology of Steelmaking, Charlotte, NC, May 9-11, pp. 319-332.
6. Thomas B.G., Dennisov A., Bai H. (1997). Behavior of Argon Bubbles during Continuous Casting of Steel. *Proceedings of ISS 80th Steelmaking Conference, Chicago, April 13-16*, pp. 375-384.
7. Lei, H., Jiang, J., Yang, B., Zhao, Y., Zhang, H., Wang, W., & Dong, G. (February 2018). Mathematical Model for Collision-Coalescence Among Inclusions in the Bloom Continuous Caster with M-EMS. *Metallurgical and Materials Transactions B*. DOI: 10.1007/s11663-018-1186-y
8. Yanbin Yin, Jiongming Zhang, Qipeng Dong & Qinghai Zhou (2018). Mathematical modelling of inclusion motion and entrapment in billet mould with effect of electromagnetic stirring. *Ironmaking & Steelmaking*. DOI: 10.1080/03019233.2018.1540519
9. Yanbin Yin, Jiongming Zhang, Shaowu Lei & Qipeng Dong (October 2017). Numerical Study on the Capture of Large Inclusion in Slab Continuous Casting with the Effect of In-mold Electromagnetic Stirring. *ISIJ International*, 347. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-347
10. H. Q. Yu & M. Y. Zhu (2012). Influence of electromagnetic stirring on transport phenomena in round billet continuous casting mould and macrostructure of high carbon steel billet. *Ironmaking and Steelmaking*, 8(39), pp. 574-584. DOI: 10.1179/0301923312Z.00000000058
11. Guifang Zhang, Yuehua Ding & Zhe Shi (2013). Effect of Position of Electromagnetic Stirring on Inclusion Behaviors in Billet. *Advanced Materials Research*, 805-806, pp. 1716-1719. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.1716
12. Wenjie Zhang, Sen Luo, Yao Chen, Weiling Wang & Miaoyong Zhu (January 2019). Numerical Simulation of Fluid Flow, Heat Transfer, Species Transfer, and Solidification in Billet Continuous Casting Mold with M-EMS. *Metals*, 9(66). DOI: 10.3390/met9010066

13. Ogura S., Onishi M., Kitaoka H., Sakurai M., Sakuraya T., Tanino Y., Terashima T., Tomiyama Y., Nabeshima Y., Miki Y., Moriwaki S., Yasukawa N. (1995). System for removing non-metallic foreign matter in molten metal. *United States Patent No. 5,429,655*.
14. Bulkowski L., Galisz U., Kania H., Kudliński Z., Pieprzycza J., Barański J. (2012). Industrial Tests of Steel Filtering Process. *Archives of Metallurgy and Material, Vol. 57, Is. 1*, pp. 363-369. DOI: 10.2478/v10172-012-0035-2
15. Jin Y., Dong X., Yang F., Cheng C., Li Y., Wang W. (2018). Removal Mechanism of Microscale Non-Metallic Inclusions in a Tundish with Multi-Hole-Double-Baffles. *Metals, 8*, 611. DOI:10.3390/met8080611
16. Fang Q., Zhang H., Luo R., Liu C., Wang Y., Ni H. (2019). Optimization of flow, heat transfer and inclusion removal behaviors in an odd multistrand bloom casting tundish. *Journal of Materials Research and Technology*, DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.10.064
17. Wang Q., Liu Y., Huang A., Yan W., Gu H., Li G. (2019). CFD Investigation of Effect of Multi-hole Ceramic Filter on Inclusion Removal in a Two-Strand Tundish. *Metallurgical and Materials Transactions B*, DOI: 10.1007/s11663-019-01736-4
18. Amel F. Boudjabi, Ahmed Bellaouar, Mohammed Lachi & Nadim El Wakil (2010). Non-Isothermal Fluid Flow in a Continuous Casting Tundish. *Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Istanbul. Turkey*.
19. Смірнов О.М. Безперервне розливання сталі [Підручник] / О.М. Смірнов, С.В. Куберський, Є.В. Штепан. – Алчевськ: ДонДТУ, 2011. – 518 с.
20. Šuler, B., Burja, J., & Medved, J. (2019). Modification of non-metallic inclusions with rare-earth metals in 50CrMoV13-1 steel. *Materiali in Tehnologije*, pp. 441-447. DOI: 10.17222/mit.2018.271
21. Ren Q., Yang W., Cheng L., Zhang L., Conejo A.N. (2019). Formation and Deformation Mechanism of Al₂O₃-CaS Inclusions in Ca-Treated Non-Oriented Electrical Steels. *Metallurgical and Materials Transactions B*, DOI: 10.1007/s11663-019-01739-1
22. О механизме образования и модифицирования неметаллических включений при ковшевой обработке стали сплавами силикобария / Б.Ф.Белов, А.И. Троцан, Я.П. Карликова, И.В. Рябчиков, И.В. Паренчук // Новые материалы и технологии в металлургии та машинобудуванні. – 2018. – №1. – С. 41-48.
23. Bruno Henrique Reis, Wagner Viana Bielefeldt & Antônio Cezar Faria Vilela (April 2014). Absorption of non-metallic inclusions by steelmaking slags - A review. *Journal of Materials Research and Technology, 3(2)*, pp. 179-185. DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.03.011
24. Chen C., Jiang Z., Li Y., Sun M., Qin G., Yao C., Wang Q., Li H. (2018). Effect of Rb₂O on Inclusion Removal in C96V Saw Wire Steels Using Low-Basicity LF Refining Slag. *ISIJ International*, DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-385
25. Cécile Nicolai, Jean-François Carton, Alexis Vauchereta, Philippe Jacquet (January 2018). Deoxidation Impact on Non-Metallic Inclusions and Characterization Methods. *Journal of Casting & Materials Engineering, 1(4)*, pp. 97-102. DOI: 10.7494/jcme.2017.1.4.97
26. Оптимизация неметаллических включений в железнодорожных колёсах повышенной эксплуатационной стойкости / Г.П. Барина, О.С. Калинина, А.А. Кононов, Г.А. Филиппов, А.А. Шишов // Сталь. – 2003. – № 5. – С. 67-69.
27. Пат. на корисну модель. Україна. МКИ В21D 11/00. Спосіб рафінування флокочутливої рідкої сталі від водню / Бойченко С.Б., Проїдак Ю.С., Синегін Є.В. – № 90886; Заявл. 27.01.2014; Опубл. 10.06.2014. Бюл. № 11. – 4 с.
28. Smirnov, A.N.; Efimova, V.G.; Kravchenko, A.V. (2014). Design of a permeable annular refractory injection block for the tundish refining of steel. *Refractory Industrial Ceramic, Vol. 55*, pp. 173–178.
29. Trindade L.B., Nadalon J.E.A., Vilela A.C.F., Vilhena M.T.M.B., Soares R.B. (2007). Numerical Modeling of Inclusion Removal in Electromagnetic Stirred Steel Billets. *Steel Research International, Vol. 78*, pp. 708-713.
30. Ni P., Jonsson L.T.I., Ersson M., Jönsson P.G. (2016). A New Tundish Design to Produce a Swirling Flow in the SEN during Continuous Casting of Steel. *SCANMET V "5th International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking"*.
31. Hackl G., Nitzl G., Tang Y., Eglsäer C., Chalmers D. (2015). Innovative Flow Control Refractory Products for the Continuous Casting Process. *AISTech 2015 Proceedings*, pp. 2436-2442.
32. Гуштин В.Н. Создание закручивающего эффекта расплава в кристаллизаторах с помощью безнапорных разливающих стаканов / В.Н. Гуштин, В.М. Паршин, А.В. Куклев // Сталь. – 2006. – № 12. – С. 21-23.
33. Хлопонин В.Н. Механическое перемешивание и торможение потока металла в кристаллизаторе МНЛЗ / В.Н. Хлопонин, Е. Шумахер, И.В. Зинковский // Сталь. – 2010. – №1. – С. 33-37.
34. Tsukaguchi Y., Hayashi H., Kurimoto H. et al. (2009). Development of Swirling Flow Submerged Entry Nozzles for Slab Casting. *Tetsu-to-Hagane, 1(95)*, pp. 33-42.

Селегей А.М., Іващенко В.П., Безшкуренко О.Г.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ І ОБЛАДНАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Selegei A.M., Ivashchenko V.P., Bezshkurenko O.H.

ANALYSIS OF MODERN THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL METHODS AND EQUIPMENT AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF LOADING OF BLAST FURNACES

Розглянуто сучасний стан аналітичного забезпечення технології доменного виробництва. Проаналізовано основні методи, розроблені провідними науково-конструкторськими організаціями з металургії, що застосовуються для ефективного управління доменною плавкою. Показано, що технологія завантаження доменної печі має вирішальне значення для ефективності отримання чавуну. Обладнання моніторингу сучасних доменних печей дозволяє отримувати широкий спектр інформації, що може бути використана для оперативного ефективного корегування ведення доменної плавки. Використання вказаної інформації надає широкі можливості для забезпечення найраціональніших техніко-економічних показників процесу виплавки чавуну. В зв'язку з цим приділено значну увагу особливостям обладнання та технології для завантаження шихтових матеріалів у піч.

Розглянуті основні експлуатаційні характеристики для обладнання доменних печей, що забезпечує завантаження шихтових матеріалів в ракурсі забезпечення раціонального окружного та радіального розподілу шихти на колошнику. Це, в свою чергу дає змогу дотримуватися заданої програми завантаження та рудних навантажень. Наданий опис способів завантаження за допомогою безконусного завантажувального пристрою лоткового типу. Проаналізований процес руху потоку шихтових матеріалів по трактах безконусного завантажувального пристрою. Окремо розглянуті ділянки направляючих тічок, ділянка руху шихти в колошниковому просторі. Виявлені недоліки та переваги існуючих методик розрахунку динамічних параметрів шихтових матеріалів на відповідних ділянках.

Наведений опис послідовності роботи обладнання, що забезпечує завантаження шихтою доменної печі та рекомендації для підвищення ефективності алгоритмів роботи агрегатів. Окремо розглянуті методи для визначення геометричних та динамічних параметрів руху шихтових матеріалів у разі їх випуску з накопичувальних бункерів завантажувального пристрою доменної печі. Наведені аналітичні залежності для визначення витрати шихтових матеріалів з випускного отвору та швидкості витоку шихти.

Розглянутий процес формування стовпа шихти у доменній печі. Серед основних чинників, що впливають на формування необхідного рудного навантаження вдовж радіусу колошника виділено програму завантаження та гранулометричний склад шихтових матеріалів які постачаються на колошник. Також показано, що найефективнішим завантаженням доменної печі шихтовими матеріалами вважається такий спосіб, при використанні якого забезпечується оптимальне значення рудного навантаження із забезпеченням необхідної газоприємності стовпа шихтових матеріалів. Таким чином визначені основні напрямки ефективного удосконалення технології доменної плавки для забезпечення найкращих техніко-економічних показників та значним зниженням питомої витрати сировини.

The current state of analytical support of blast furnace technology is considered. The main methods developed by leading research and design organizations in metallurgy, which are used for effective management of blast furnace smelting, are analyzed. It is shown that the loading technology of the blast furnace is of crucial importance for the efficiency of iron production. Monitoring equipment for modern blast furnaces allows you to obtain a wide range of information that can be used for prompt and effective correction of blast furnace smelting. The use of the specified information provides ample opportunities to ensure the most rational technical and economic indicators of the iron smelting process. In this regard, considerable attention was paid to the features of equipment and technology for loading batch materials into the furnace.

The main operating characteristics for the equipment of blast furnaces, which ensure the loading of charge materials in the angle of ensuring the rational circumferential and radial distribution of the charge on the blast furnace, are considered. This, in turn, makes it possible to adhere to the specified loading program and ore loads. A description of how to load using a coneless tray-type loading device is provided. The process of movement of the flow of charge materials along the paths of the coneless loading device is analyzed. Sections of the guide shafts, section of the movement of the charge in the blast furnace space are considered separately. Disadvantages and advantages of the existing methods of calculating the dynamic parameters of charge materials at the relevant sites are revealed.

The description of the sequence of operation of the equipment, which ensures the charging of the blast furnace charge, and recommendations for increasing the efficiency of the algorithms of the aggregates are given. The methods for determining the geometric and dynamic parameters of the movement of charge materials in the case of their release from the storage hoppers of the loading device of the blast furnace are considered separately. Analytical dependences are given for determining the flow of charge materials from the outlet and the charge leakage rate.

The process of formation of a charge column in a blast furnace is considered. Among the main factors affecting the formation of the necessary ore load along the radius of the blast furnace, the loading program and the granulometric composition of the charge materials supplied to the blast furnace are highlighted. It is also shown that the most effective

| | |
|------------------|--|
| Селегей А.М., | |
| Іващенко В.П., | |
| Безшкуренко О.Г. | |

loading of the blast furnace with charge materials is considered to be the following method, when used, the optimal value of the ore load is ensured while ensuring the necessary gas permeability of the column of charge materials. In this way, the main directions of effective improvement of the blast furnace smelting technology to ensure the best technical and economic indicators and a significant reduction in the specific consumption of raw materials have been determined.

Над програмами завантаження доменних печей в різний час працювало досить велика кількість наукових і проектних організацій. На території України провідними організаціями з цього напрямку є Український державний університет науки і технологій та Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова. У наукових працях Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова виконані: аналітичний огляд засобів контролю профілю поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі, аналіз використання одержуваної з їх допомогою інформації, обґрунтована роль структури стовпа шихтових матеріалів в досягненні високої ефективності доменної плавки [1,2]; розроблені технологічні вимоги до установки стаціонарних систем вимірювання профілю поверхні засипу і представленої ними інформації [1,3,4,5]; розроблені алгоритми використання математичних моделей, що описують елементи структури стовпа шихтових матеріалів в печі і т.п.

В Українському державному університеті науки і технологій питаннями доменної плавки займалися такі видатні вчені як професори Ковшов В.М., Бочка В.В., Чистяков В.Г. Петренко В.О. [6–10]. В роботі [9] відзначається, що оптимізація розподілу шихти і газів по перетину верхньої частини шахти забезпечує не тільки зниження витрати коксу і збільшення продуктивності доменної печі, а й створює передумови для максимального використання інших заходів щодо підвищення ефективності доменної плавки. Показано, що високі техніко-економічні показники роботи доменної печі можуть бути досягнуті тільки при такому розподілі матеріалів і газів по перетину верхньої частини шахти, при якому можливості досягнення максимального для конкретних умов плавки ступеня використання газового потоку узгоджуються з умовами збереження сталості ходу печі. Також визначено, що зменшення нерівномірності в розподілі шихти і газів по радіусу колошника є одним з найважливіших шляхів підвищення ефективності роботи сучасних доменних печей.

На сьогоднішній день існують два основні класи завантажувальних пристроїв доменних печей, які експлуатуються і проектується для металургійних підприємств України [11]. Крім цього, існує ряд оригінальних конструкцій завантажувальних пристроїв, які не знайшли широкого поширення в нашій країні [12,13].

До першого класу пристроїв слід віднести пристрої конусного типу, в яких одні й ті ж елементи є і газозапірними і обмежують переміщення шихтових матеріалів [11,12].

До другого класу відносяться безконусні завантажувальні пристрої, конструктивні особливості яких дозволяють розділити функції газозапірання і відсікання потоку шихтових матеріалів [11].

До переваг конусних пристроїв (найбільшого поширення набуло двоконусне) слід віднести відносну простоту конструкції та експлуатації, невисоку вартість. Однак вони дозволяють значно менше ніж безконусні апарати впливати на параметри потоку шихтових матеріалів. При проведенні сучасних доменних плавок з використанням різних шихтових матеріалів це набуває все більшого значення для ефективності роботи, виборі раціональних параметрів технології, а також для підвищення якості виплавленого чавуну.

Теоретичними і експериментальними дослідженнями встановлено, що для печей невеликого об'єму (до 2000 м³) цілком достатньо застосування завантажувальних пристроїв конусного типу. При експлуатації доменних печей більшого об'єму необхідне застосування безконусних завантажувальних пристроїв, причому з найкращого боку показали себе пристрої з розподільником шихти лоткового типу. Однак єдиної методики, яка б дозволяла враховувати більшість техніко-економічних показників печі, що будується або реконструюється і визначала б, який тип завантажувального пристрою буде найбільш раціональним для його подальшої успішної експлуатації, на сьогодні не існує.

Слід зазначити, що більшість доменних печей України і ближнього зарубіжжя не будуються знову, а зазнають змін в процесі реконструкції. Тому все більш актуальною стає задача вписання завантажувальних пристроїв в існуючі габарити печі. Багато металургійних підприємства йдуть шляхом заміни двоконусних завантажувальних пристроїв на БЗП лоткового типу, які в значній мірі перевершують за можливостями варіювання параметрами розподілу шихтових матеріалів по поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику печі.

Більшість досліджень, проведених раніше [3,9,14,15] при розгляді розподілу шихти на колошнику, поклалися на експериментальні дані, отримані в процесі задування та експлуатації доменних печей. Однак в умовах проектування і вдосконалення нових завантажувальних пристроїв та технологічних прийомів ведення плавки велике значення має теоретичний опис процесу руху потоків шихтових матеріалів по перевантажних трактах доменної печі. Більш того, сучасні засоби контролю ведення плавки [1–3, 16–21] дозволяють оперативно коригувати параметри завантаження, маючи конкретні параметри течії потоку конкретних шихтових матеріалів. Для ефективної корекції потоків шихти необхідна широка теоретична база, підтверджена експериментальними дослідженнями,

Завантаження сучасних доменних печей здійснює розгалужена система технологічних комплексів і обладнання, яка повинна відповідати критері-

ям продуктивності, надійності та довговічності. На існуючому етапі в Україні експлуатуються доменні печі різних об'ємів і, відповідно, з різним обладнанням, що забезпечує технологічний процес отримання чавуну. Важливою частиною системи завантаження доменної печі є система подачі шихти з рудного двору на колошник. Найбільшого поширення набули системи шихтоподачі зі скіповим та конвеєрним способом транспортування. Системи зі скіповими підйомниками отримали широке застосування на доменних печах обсягом до 2000 м³. У разі, якщо обсяг печі вище, застосовують підйомник конвеєрного типу [22].

Швидкість руху стрічки конвеєрів - 2 м/с, кут підйому похилого конвеєра 10°30', довжина 509м, обсяг вагових воронко агломерату, коксу і окатишів 25 м³, максимальна маса дози добавки 3т.

Система шихтоподачі доменної печі об'ємом 5000 м³ принципово відрізняється від системи шихтоподачі доменних печей з скіповим завантаженням шихти, як послідовністю технологічних операцій, так і компонованням діючого обладнання [23].

Відповідно до технологічної схеми роботи системи шихтоподачі, після розвантаження вагової воронки каналу включаються грохоти, які здійснюють набір чергової дози і відсів дрібних фракцій. Надалі, згідно заданої програми, порядку роботи каналів і темпу завантаження печі [24], відкривається затвор і живильниками здійснюється видача матеріалу з вагової воронки на горизонтальний конвеєр.

Найбільшого поширення в світі отримав безконусний завантажувальний пристрій з лотковим розподільником шихти, що випускається фірмою «Поль Вюрт» (Люксембург), (рис 1.1) [11].

Шихтові матеріали, що подаються стрічковим конвеєром (скіпом) за допомогою пересувної воронки 1 з поворотними заслінками направляються в один з двох паралельно розташованих шлюзових накопичувальних бункерів 3, обладнаних верхнім 2 і нижнім 5 газоушільнюючими тарілчастими клапанами з гумовим ущільненням, а також шихтовим затвором 4 секторного типу. Останній служить для захисту нижнього клапана від стирання шихтою і регулювання часу випорожнення бункера, який розрахований на прийом порції залізородного матеріалу або коксу. Для контролю за витоком матеріалу з бункерів 3 передбачено безперервне зважування їх за допомогою месдоз.

Привод приймальної воронки, газоушільнюючих клапанів і шихтових затворів - централізований гідравлічний. Поворот заслінок робочих органів, клапанів і затворів здійснюється від гідроциліндрів, що гойдаються. Лоток отримує рух від встановленого на куполі печі електромеханічного приводу. Розподіл матеріалів на колошнику з використанням БЗП проводиться обертовим розподільником шихти, за допомогою якого можна здійснювати чотири способи завантаження матеріалів в доменну піч [25]:

- кільцеве завантаження;
- багатокільцеве (спіральне) завантаження;
- секторальне завантаження;
- орієнтоване (точкове) завантаження.

У разі кільцевого завантаження кожна порція матеріалу зсипається в доменну піч по одній траєкторії, тобто, коли лоток-розподільник не змінює свого кутового положення під час обертання. При багатокільцевому (спіральному) завантаженні траєкторія руху матеріалу змінюється в міру вивантаження в піч однієї порції. Секторне завантаження забезпечує розосередження матеріалу в певному секторі колошника за рахунок переміщення лотка-розподільника в його межах. Точкове завантаження здійснюється при зупиненому лотку-розподільнику, що направляє потік матеріалу в обмежений заданий район колошника. Секторне і точкове завантаження використовуються короткочасно, тільки в разі порушення ходу печі (газового потоку), в зв'язку з цим проходить тільки в ручному режимі. Решта типів завантажень здійснюються в автоматичному режимі. В [25] відзначається, що величина окружної нерівномірності розподілу матеріалів залежить, перш за все, від швидкості обертання розподільника шихти, маси порції, часу зсипання матеріалів з проміжного бункера, а також обраного порядку вивантаження їх щодо «гаражних» положень. В основному при роботі доменної печі оцінка окружної нерівномірності проводиться по розкиду точок показань периферійних терморпар, який за нормальних умов роботи доменної печі не повинен перевищувати 150°С. Основним режимом завантаження на печах з БЗП, є багатокільцевий цикл з подачею певної кількості коксу в осьову зону колошника. Тривалість вивантаження однієї порції шихтових матеріалів залежить від ємності бункерів, кута розкриття шихтового затвора який задається, гранулометричного складу компонентів шихти і повинна бути не менше для доменних печей:

- об'ємом 1719 м³ - 50сек,
- 2000 м³ - 70сек,
- 2700 м³ - 80сек,
- 3200 м³ - 90сек,
- 5000 м³ - 110сек.

Використання конвеєрної системи для подачі шихти на колошник визначається високою продуктивністю сучасних доменних печей, що також вимагає надійної роботи обладнання. У зв'язку з цим вибір структурної схеми шихтоподачі повинен ґрунтуватися на фактичних характеристиках надійності обладнання, що застосовується.

Сьогодні відома велика кількість конструкцій завантажувальних пристроїв доменних печей, окрім конусного та безконусного. Більшість з них не отримали світового поширення. Стримуючим фактором у розвитку конструкцій завантажувальних пристроїв була неможливість встановлення повної картини рельєфу засипу шихтових матеріалів на колошнику. З розвитком засобів спостереження за станом засипу шихти на колошнику роз-

ширюються можливості корекції завантаження матеріалів в піч для поліпшення техніко-економічних показників доменної плавки.

Двоконусні завантажувальні апарати відрізняються відносною простотою конструкції і експлуатації. Загальним недоліком цього класу пристроїв є вузький діапазон регулювання розподілу шихти по радіусу колошника і порушенні картини розподілу через неможливість зміни взаємного розташування в процесі відкривання великого конуса.

Нерівномірність розподілу шихтових матеріалів на колошнику призводить до нерівномірності розподілу газового потоку, і як наслідок, до збільшення питомої витрати коксу, зниження техніко-економічних показників доменної плавки.

Боротися з окружною нерівномірністю дозволяє розподільник шихти, що обертається. Більшою мірою відбувається боротьба з так званим «канальним» ходом печі. Застосування обертового розподільника шихти значно спрощує виготовлення і експлуатацію завантажувального апарату, ускладнює його обслуговування. Крім того, в цьому випадку потрібна нова методика визначення параметрів течії шихтових матеріалів з можливістю корекції по ходу роботи печі з досягненням найбільш оптимального результату.

Одним із напрямків поліпшення розподілу шихтових матеріалів у разі застосування конусних завантажувальних апаратів є використання додаткових елементів розподілу [26-32]. Причому вони можуть встановлюватися як в колошниковому, так і в міжконусному просторі. Деякі конструкції дозволяють проводити селективне завантаження. Прикладом може служити завантажувальний пристрій, запропонований в [27].

Деякі автори пішли шляхом установки розподільників шихтових матеріалів нижче великого конуса засипного апарату [28,29].

Багато досліджень присвячено поліпшенню розподілу шихтових матеріалів за допомогою розробки алгоритму спільної роботи елементів завантажувального апарату. Наприклад, спільні операції перекидання скіпа і одночасної зміни швидкості обертання розподільника [30]. Або зміна швидкості відкривання великого конуса для підзавантаження периферії колошникового простору печі [31-32].

На металургійних підприємствах основним споживачем енергоносіїв є доменна піч, тому підвищення ефективності доменної плавки має пріоритетне значення для екологічного балансу [33]. Створення умов для раціонального протікання газодинамічних процесів у доменній печі сприяє зниженню енергетичних витрат. Тому створення умов оптимального завантаження є передумовою для поліпшення екологічного стану доменного цеху та металургійного комбінату у цілому.

Питанням теоретичного визначення кінематичних і геометричних характеристик частинок шихтових матеріалів у завантажувальних пристроях доменних печей присвячено значну кількість досліджень [1,3,4,9,12,14,15,18,24].

Особлива увага завжди приділяється вивченню процесу руху шихти в колошниковому просторі. Спочатку математична модель динаміки шихти була розроблена для конусних завантажувальних пристроїв, оскільки в процесі еволюції обладнання завантаження доменних печей домінував саме цей клас пристроїв.

Головними параметрами, які потрібно визначити, є [34]:

- характеристики вектора швидкості сходу шихти з великого конуса або лотка-розподільника (модуль, напрямок);

- траєкторії польоту шихти в колошниковому просторі;

- точка зустрічі потоку шихти з поверхнею засипу на колошнику, а також характеристики вектора швидкості шихти в зазначеній точці.

Кінцевим завданням є визначення геометрії рельєфу засипу на колошнику, оскільки саме він є одним з основних критеріїв, які впливають на ведення доменної плавки [35-36].

Рельєф і рівень засипу багато в чому визначають хід доменної плавки, її енергетичний баланс, а також якість виробленого чавуну [37]. Нерівномірність роботи доменної печі тісно взаємопов'язана зі зміною стану профілю і рівня засипу, а також швидкості сходу шихтових матеріалів [38]. У статті детально розглянуті застосування радіоізотопного аналізатора профілю поверхні засипу шихти РІАП-2М, а також експериментальні дані про характеристики рельєфу шихти на колошнику при використанні типового двоконусного завантажувального пристрою. В ході роботи профілеміру досліджувалися взаємозв'язки параметрів технологічного стану доменної печі з параметрами профілю поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику. Наведено інформацію про швидкість сходу шихтових матеріалів, температури різних ділянок масиву шихтових матеріалів, геометричні характеристики рельєфу шихти на колошнику доменної печі. Матеріали досліджень можуть бути хорошим фундаментом для перевірки теоретичної моделі поведінки шихтових матеріалів при їх завантаженні на колошник. До недоліків слід віднести відсутність аналізу поведінки сипучого матеріалу, визначення аналітичних залежностей кінематики потоку, а також прогнозування роботи при змінах вхідних параметрів процесу.

Розрізняють радіальне та окружне розподілення шихти на колошнику [39]. Сукупність цих понять дає найбільш повну картину про геометрію шихтових матеріалів на колошнику. Прогнозування, моніторинг та аналіз зміни зазначених розподілів дає можливість найбільш раціональним чином забезпечувати рудне навантаження і, як наслідок, значним чином впливати на ефективність доменного процесу в кожному конкретному випадку. В роботах [39,40] проведено дослідження даних передпускових випробувань серед яких:

- траєкторії зсипання матеріалів з лоткового розподільника (за допомогою забеленого крейдю

відбійника газовідборних зондів і спеціальної дослідницької машини);

- координати точки зустрічі траєкторій з циліндричною стінкою колошника;
- вимір профілю засипу шихтових матеріалів в печі;
- відбір проб матеріалів в печі по чотирьом взаємно перпендикулярним діаметрам;
- визначення товщини шарів коксу і залізородних матеріалів;
- сегрегація матеріалів по гранулометричному складу.

Великий обсяг досліджень дає інтегральну картину про параметри роботи БЗП лоткового типу з урахуванням значної кількості факторів, що впливають на процес [41]. Важливим моментом досліджень було визначення ширини потоку матеріалів при сходженні з лотка-розподільника [42-43]. Згідно з результатами дослідження, поперечний переріз потоку коксу складає 1,4 м, залізозмісної частини шихтових матеріалів - 1,0 м. Проведені дослідження дозволили ІЧМ створити комплекс рекомендацій для інтенсифікації та забезпечення ефективності процесу завантаження для доменної печі №5 ЧерМК. На жаль, автори не зробили спроб аналітичної апроксимації залежностей, отриманих експериментальним шляхом, з метою подальшого отримання універсального методу розрахунку закономірностей поведінки шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі, обладнаної БЗП.

Перш ніж потрапити на поверхню засипу на колошнику шихта рухається з бункера БЗП через шихтовий затвор по похилих тічках в центральну приймальну трубу і далі падає на лоток-розподільник. Потім шихта сходить з лотка, вільно рухається в колошниковому просторі і потрапляє на поверхню засипу. Більшість дослідників [44-45] для прогнозування рельєфу засипу розраховують траєкторії на ділянці сходження шихти з лотка-розподільника до приземлення на поверхню засипу. В [44] відзначається, що застосування БЗП на доменних печах об'ємом 3000 м³ і вище дає можливість знижувати витрати коксу в межах 10-15 кг та тону виробленого чавуну. Розрахунок траєкто-

рій руху шихтових матеріалів надзвичайно ускладнений недостатньою визначеністю сил тертя при русі частинок шихти по трактам БЗП, коефіцієнтів відновлення швидкості при зіткненні частинок шихти з елементами завантажувального тракту. У статті наведені чисельні значення швидкостей сходу шихти з лотка БЗП. Згідно з дослідженнями авторів статті для доменної печі № 9 Арселлор-Міттал Кривий Ріг зміна кута нахилу лотка-розподільника по відношенню до осі його обертання в межах 18,5-36,5 градусів призводить до зміни швидкості сходу 6,8-6,13 м/с. Показано вплив частоти обертання лотка-розподільника на зміну швидкості сходу частинок шихти. Збільшення частоти обертання лотка-розподільника з 2 до 13 об/хв. при куті нахилу 52° до вертикалі призводить до зміни радіальної складової швидкості сходу частинок з лотка на 8-10%. Крім цього зазначено, що при розрахунку швидкості частинок слід враховувати опір потоку колошникових газів на ділянці траєкторії від кінця лотка-розподільника до поверхні засипу. На рис. 1. наведені графічні результати даного дослідження.

Робота [39] присвячена тенденціям розвитку обладнання систем завантаження доменних печей; наведені результати досліджень систем завантаження нових і реконструйованих печей великого об'єму; розглянуті основні прийоми управління радіальним і окружним розподілом шихтових матеріалів на поверхні засипу колошника. Вперше інтегровано розглянуті технологічні вимоги, що пред'являються до систем завантаження доменних печей, обладнаних БЗП. Система завантаження розбита на кілька підсистем:

- підсистема дозування і формування порцій;
- підсистема транспортування шихти;
- підсистема шлюзування і дозування шихти.

Крім усього іншого, детально розглянуті циклограми завантаження і приведена оригінальна методика розрахунку пропускної здатності всієї системи завантаження, а також відзначено, що найбільш вузьким місцем у цій системі є комплекс устаткування завантажувального пристрою доменної печі.

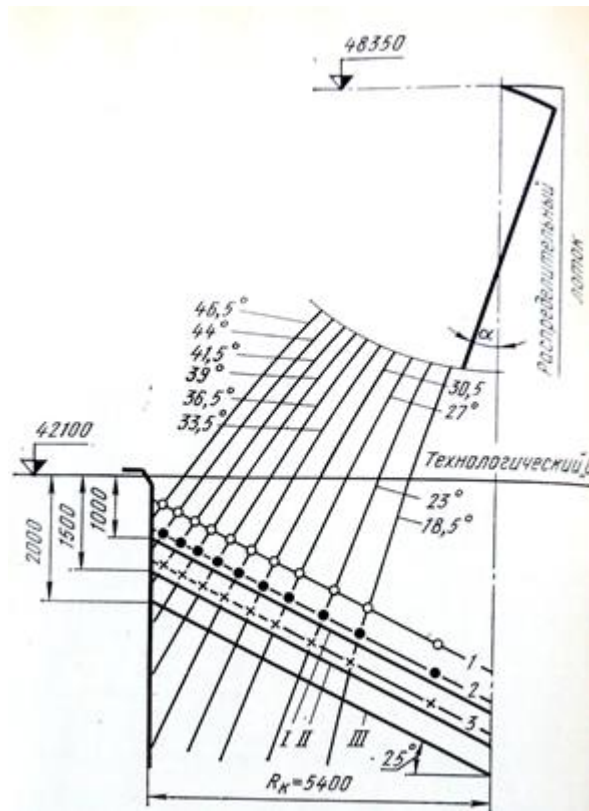


Рис. 1. Траекторії шихтових матеріалів.

Разом з тим в дослідженні розглянуто важливий спосіб управління окружним розподілом за допомогою шихтових затворів БЗП. Ефективним є регулювання відкриття шихтового затвора бункера в межах кожного обороту лотка-розподільника так, щоб у заданий сектор колошника потрапило біль-

ша або менша кількість шихтових матеріалів. Управління зміною прохідного перетину шихтового затвора дозволяє регулювати окружний розподіл як окремо для коксу і залізовмісних матеріалів, так і спільно.

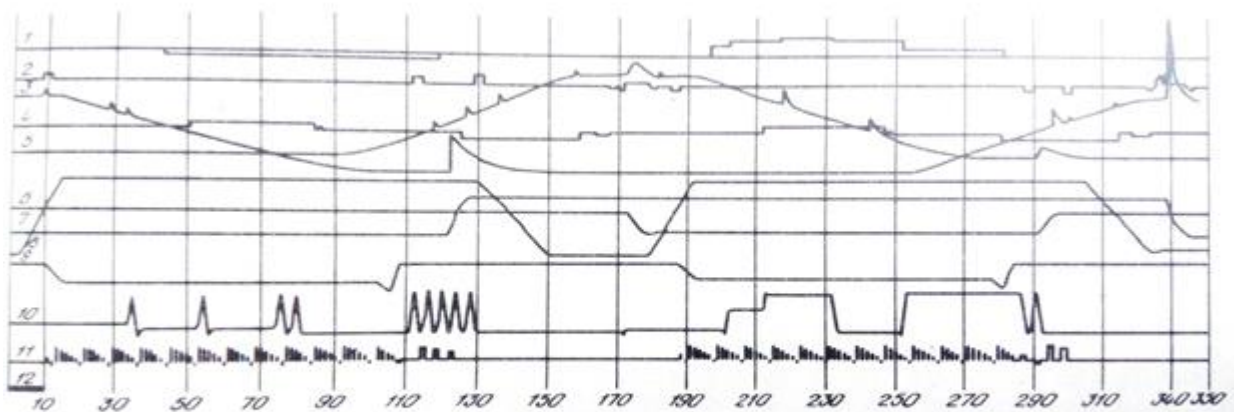


Рис. 8. Экспериментальная циклограмма работы механизмов системы загрузки ДП-6 НЛМК:

1 – выгрузка материала на конвейер; 2 – работа ГК; 3 – вес материала в Б2; 4 – сигналы контрольных точек; 5 – вес материала в Б1; 6, 7 – давление в Б1 и Б2; 8 – работа зонда; 9 – работа ШЗ; 10, 11 – изменение угла и вращения лотка;

Рис. 2. Експериментальна циклограма роботи механізмів системи завантаження доменної печі великого об'єму.

У монографії [45] відзначено, що техніко-економічна доцільність застосування БЗП визна-

чається трьома основними факторами: підвищенням довговічності обладнання та зменшенням ви-

трат на його ремонт; гнучкістю і ефективністю управління розподілом шихти, що збільшує ступінь використання відновного потенціалу газів; можливістю реалізації автоматичного контролю і управління розподілом шихти і газового потоку в печі, що забезпечує обґрунтованість і оперативність заходів по оптимізації процесу доменної плавки. До ключових факторів, що визначають пропускну здатність системи завантаження і висоту завантажувального пристрою, відносяться сумарний об'єм, кількість бункерів і їх конструктивне виконання. Сумарний обсяг двох бункерів повинен становити 2-3% від об'єму доменної печі.

Тут же запропоновано оригінальну методику розрахунку траєкторій шихтових матеріалів в колошниковому просторі печей великого об'єму. Методика включає в себе експериментальне визначення положення вершин гребеня при двох або більше кутах нахилу лотка і розрахунок за цими даними початкової швидкості сходу частинок шихти з лотка. Така методика дозволяє збільшити точність розрахунків, по ній розраховані траєкторії для печей об'ємом 3200 - 5500 м³ і перевірені при задувці.

У монографії [47] представлені результати теоретичних і прикладних досліджень, спрямованих на поглиблення знань процесу доменної плавки і вдосконалення технології; наведені результати досліджень, розрахунків застосування нового обладнання системи завантаження доменних печей; викладено досвід освоєння, випробувань і науково-технічного супроводу роботи сучасних доменних печей великого об'єму і реконструйованих печей, оснащених БЗП. Зокрема зазначено, що в найближчій перспективі буде збережено тенденцію до скорочення витрат коксу для виробництва чавуну за допомогою доменного процесу. Це пов'язано з рядом факторів, серед яких скорочення запасів коксівного вугілля, посилення екологічних вимог до металургійних підприємств, подорожчання сировини тощо. Важливим результатом аналітичних досліджень процесів завантаження доменної печі є розробка так званого критерію режиму завантаження, який включає в себе параметр положення центра ваги рудного навантаження на радіусі колошника, що визначає ступінь використання газу, співвідношення величин осьового та периферійного душників і розподіл газового потоку в залежності від опору шихтових матеріалів в кільцевих зонах з урахуванням швидкості їх сходу. Аналітичний вираз для визначення критерію виглядає наступним чином [46-47]:

$$K = \Pi \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{Q}{F} \cdot \frac{1}{U} \cdot \frac{P}{\Delta P / \xi}, \quad (1.1)$$

де $\frac{l_1}{l_2}$ - відношення величин душників у осі та на периферії колошника;

Q, P - вихід і тиск колошникового газу;

$\frac{\Delta P}{\xi}$ - відношення перепаду тиску газу в печі до питомого опору шару рудних матеріалів і коксу;

F - площа колошника;

U - швидкість сходу матеріалів в печі.

Тобто це є співвідношення величин осьового та периферійного душників і розподіл газового потоку в залежності від опору шихтових матеріалів в кільцевих зонах з урахуванням швидкості її сходу.

За допомогою розглянутого критерію виникає можливість якісного та кількісного визначення впливу характеристик завантаження на хід всієї доменної плавки. Використання такого критерію створює теоретичні основи для розробки раціональних методик і програм завантаження доменних печей, обладнаних БЗП та іншими типами завантажувальних пристроїв.

В роботі [48] відзначається, що використання БЗП, а також сучасних систем контролю і управління, дозволяє давати кількісну оцінку характеру розподілу шихтових матеріалів на колошнику. Згадується алгоритм «Траєкторія», розроблений в ІЧМ НАН України, реалізований в складі АСУ завантаження доменних печей [49]. Поєднання аналітичного та експериментального досліджень формує новий експериментально-аналітичний підхід як більш ефективний інструмент вибору раціональних параметрів доменної плавки.

Для ефективного аналітичного дослідження руху шихти в колошниковому просторі необхідно повністю задати вектор швидкості сходу шихти з лотка. З цієї метою аналізують рух шихти по лотку-розподільнику. Багато дослідників отримують кінематичні характеристики руху шихти по лотку за допомогою розв'язання задачі Коші для диференціальних рівнянь руху матеріальної точки [50-52]. У дослідженнях зроблено спробу комплексного розрахунку кінематичних параметрів руху шихтових матеріалів по лотку-розподільнику БЗП із застосуванням циліндричних координат, а також з аналітичним визначенням початкових умов руху частинки шихтових матеріалів по лотку-розподільнику БЗП. Отримано рівняння для визначення швидкості сходу частки шихти з лотка з урахуванням складного руху точки по циліндричній поверхні лотка. Диференціальне рівняння руху частинки вздовж лотка-розподільника отримано у вигляді:

$$\ddot{z} = g \cos \alpha + 2R\omega \sin \alpha \cos \theta \dot{\theta} + \omega^2 \sin \alpha (z \sin \alpha - R \cos \alpha \cos \theta) - \mu |\vec{n}| \frac{\dot{z}}{|V|}, \quad (1.2)$$

де z - координата частинки уздовж лотка;

α - кут нахилу розподільного лотка до осі печі;

R - радіус перерізу лотка;

ω - кутова швидкість обертання розподільника;

θ - кут підйому частинки на стінку лотка;

μ - коефіцієнт тертя ковзання матеріалу шихти по поверхні лотка-розподільника;

n - нормальна реакція поверхні лотка на частку шихтових матеріалів одиничної маси;

V - швидкість руху частинки по лотку

$$\vec{V} = \sqrt{R\dot{\theta}^2 + \dot{z}^2} \quad (1.3)$$

Нормальну реакцію запропоновано визначати наступним чином:

$$|\vec{n}| = g \sin \alpha \cos \theta - 2\omega (\dot{z} \sin \alpha \sin \theta + R \dot{\theta} \cos \alpha) + R\omega^2 - \\ - \omega^2 \sin \alpha \cos \theta (z \cos \alpha + R \sin \alpha \cos \theta) + R \dot{\theta}^2 \quad (1.4)$$

Представлена методика була великим кроком вперед в разі аналітичного визначення кінематики шихтових матеріалів по ділянці від випускного отвору накопичувального бункера БЗП до поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі. Вперше була проведена спроба комплексного аналітичного дослідження поведінки шихти в трактах БЗП. Основним недоліком методу є те, що при дослідженні математична модель ґрунтується для якоїсь середньої точки перетину (наприклад центра маси). Параметри ж потоку матеріалів визначалися на основі відступу траєкторій від основної, які збігаються при накладанні. На жаль, в цьому випадку врахувати такий важливий параметр як крупність матеріалу при аналітичному дослідженні дуже важко. Але з практики відомо, що шихта різної крупності має різні траєкторії при сході з лотка-розподільника.

В [51] рух розглядається для точки, що є центром мас поперечного перерізу потоку шихтових матеріалів на лотку. До цієї точки прикладають всі сили і визначають її кінематичні характеристики і траєкторію. Розрахункові дані узагальнюються на всі точки поперечного перерізу потоку. Таким чином, приймається, що характеристики потоку розраховані. Для врахування виду матеріалу змінюють коефіцієнт тертя матеріалу шихти об поверхню лотка-розподільника, або ж вводять узагальнене значення загального коефіцієнта опору руху шихти по лотку. Швидкість сходу частинок шихтових матеріалів з лотка розподільника пропонується визначати наступним чином:

$$V_{\Sigma} = \vec{V}_k + V_z = \vec{V}_{kx} + \vec{V}_{ky} + \vec{V}_z; \quad (1.5)$$

$$V_z = nR_{\text{вп}}; R_{\text{вп}} = L \sin \alpha - (B-h) \cos \alpha, \quad (1.6)$$

де V_{kx}, V_{ky} горизонтальна і вертикальна складова швидкості сходу частинок шихти з лотка;

V_k, V_z - тангенціальна складова сумарної швидкості сходу V_{Σ} ;

α - кут нахилу лотка до осі печі;

$R_{\text{вп}}$ - радіус обертання точки сходу частинок;

n - частота обертання лотка;

L - довжина робочої частини лотка;

B - відстань від осі нахилу лотка до нижньої твірної його робочої поверхні;

h - відстань між центром перетину потоку і нижньої твірної поверхні лотка, що визначає розташування точки сходу частинок щодо зазначеної твірної.

У дослідженні також визначено, що при інженерних розрахунках коефіцієнт еквівалентного опору руху частинок по лотку слід приймати рівним 0,8, причому для будь-якого виду рухомого шихтового матеріалу.

Початкові умови руху по лотку також визначаються з попереднього ділянки руху шихти. Знову ж для характерних точок визначають кінематичні характеристики і узагальнюють їх на весь потік.

Коефіцієнт тертя та еквівалентного опору визначаються на основі промислових експериментів проведених в своїй більшості при передпусковому завантаженні доменних печей.

В роботі [52] наведено великий масив даних про параметри траєкторій шихти в колошниковому просторі печі, але, на жаль, не вказані аналітичні залежності, на підставі яких отримані дані.

Сучасні доменні печі обладнані засобами контролю рельєфу поверхні засипу шихти на колошнику, які дозволяють з великою точністю фіксувати зміни геометрії поверхні. В [53] завдяки оперативним даними про стан рельєфу поверхні на колошнику виникає можливість більш радикального розподілу шихтових матеріалів, а також зменшення окружної нерівномірності. Таким чином виникає необхідність провести корекцію параметрів управління завантаженням шихти. Для цього потрібна комплексна математична модель, що описує рух шихтових матеріалів від випускних отворів бункерів БЗП до поверхні засипу на колошнику.

В роботі [7] показано вплив завантаження і роботи бункерів БЗП на розподіл шихти на колошнику, а також на показники доменної плавки в цілому. В [53] немає аналітичних залежностей, які б дали можливість дослідити параметри руху шихти всередині бункера і вплив цих параметрів на рельєф шихти на колошнику.

У монографії [54] наведено комплексне аналітичне дослідження руху шихтових матеріалів по трактах БЗП. Докладно описані детерміновані математичні моделі траєкторії зсипання шихти з лотка, руху по лотку, руху по тічці і вертикальній трубі, що передує лотку. Кінематичні характеристики руху шихтових матеріалів визначалися за допомогою розв'язання задачі Коші для диференціальних рівнянь руху на відповідних ділянках. Перевагою підходу є отримання аналітичних залежностей, які на стадії проектування обладнання дають можливість в широких діапазонах досліджувати вплив різних чинників на кінематичні характеристики шихти на всіх ділянках. До недоліку методики слід віднести визначення початкової швидкості руху шихти з накопичувального бункера БЗП. Витрата Q визначена за допомогою емпіричної формули, яка враховує тільки середній діаметр частинок шихти

d і площу відкриття вантажного клапана S . Але не врахований тип матеріалу, його фізико-механічні характеристики і форма випускного отвору.

$$Q = \frac{0,738 \cdot S^{1,287}}{d^{0,075}} \quad (1.7)$$

Це негативно позначається на точності результатів, отриманих з використанням даної залежності.

У монографії [55] детально описана автоматична система моніторингу за рельєфом поверхні шихтових матеріалів за допомогою радіолокації. Наведено дані про зміну окружний і радіальної нерівномірності для доменної печі №9 Арселлор Міттал Кривий Ріг, а також дані про швидкість опускання шихти. Показано вплив параметрів завантаження на колошнику на швидкість сходу матеріалів і ефективність доменної плавки. Експериментальні дані отримані в [55] добре висвітлюють ефективність роботи обладнання шихтоподачі, проте немає залежностей, які б так чи інакше прогнозували зміну ходу печі при зміні параметрів завантаження.

В [56] описані основні технологічні неполадки, що виникають при роботі доменної печі. Більшість з них пов'язані з розподілом шихти на колошнику. Їх усунення також неможливо без корекції параметрів руху шихти на завантажувальному пристрої доменної печі.

В [57] сформульовані обмеження для тривалості вивантаження порцій з бункера бесконусного завантажувального пристрою, показана залежність окружної нерівномірності розподілу шихти на колошнику від зміни витрати шихтових матеріалів з бункера завантажувального пристрою. Наведено залежності для визначення звичайної витрати шихти з бункера.

Для залізорудної складової:

$$Q_{ж} = k_{ж} \cdot \sin \alpha \cdot S^{1,75} \cdot \frac{\sqrt{g}}{d_{ж}}, \quad (1.8)$$

для коксу

$$Q_{к} = k_{к} \cdot \sin \alpha \cdot S^{1,75} \cdot \frac{\sqrt{g}}{d_{к}}, \quad (1.9)$$

де Q - об'ємна витрата матеріалу;

k - чисельні коефіцієнти;

S - площа випускного отвору;

α - кут нахилу осі випускного отвору;

d - середні діаметри частинок матеріалу.

В аналітичних залежностях беруть участь геометричні параметри бункерів, врахований середній розмір частинок шихтових матеріалів. Результати дослідження добре корелюються з експериментальними даними. Враховано ступінь відкриття шихтового затвора. До недоліків залежностей слід віднести той факт, що фізико-механічні характеристики того чи іншого шихтового матеріалу

враховані чисельними коефіцієнтами для коксу і руди відповідно.

В [58] досліджено швидкість витікання шихтових матеріалів з бункерів БЗП:

$$V = \lambda \sqrt{2g \left(2,1R - \frac{3,4\tau}{\gamma} \right)}, \quad (1.10)$$

де V - швидкість руху матеріалу;

R - критичний радіус;

γ - об'ємна маса матеріалу;

τ - початковий опір зрушенню;

λ - коефіцієнт витоку.

У розрахунках присутні ряд коефіцієнтів, вибір і природа яких не обґрунтовані. Така методика не може бути застосована для розрахунку різних конструкцій бункерів в силу індивідуального емпіричного підбору коефіцієнтів.

В [59] Виконано узагальнення існуючої термінології і особливостей формування раціональних режимів завантаження доменної печі, обладнаної БЗП. Наведено типову програму завантаження, структурну схему елементів завантаження, якісний вплив кутів завантаження на окружну і радіальну нерівномірності. Шляхи вдосконалення завантаження доменної печі дають можливість розширити напрямки подальших розробок у цій галузі.

В [60] наведені великі експериментальні дослідження профілю засипу на колошнику і впливу різних чинників на його зміну. Проведена кількісна та якісна оцінка без теоретичних розрахунків.

В [61] розглянуто роботу приводу лотка-розподільника БЗП, отримані осцилограми, що дозволяють стежити за навантаженнями на приводі і часом зсипання шихтових матеріалів.

Робота [62] присвячена глибокому розгляду процесів формування рельєфу поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі з витоків і до сучасності. Наведено оригінальну методику для визначення основних показників – середнього рудного навантаження, рудних навантажень у рівновеликих кільцевих зонах, а також відносного обсягу матеріалів, розміщених в конкретній кільцевій зоні. Згідно з матеріалами дослідження середнє рудне навантаження за цикл дорівнює:

$$R_{ср} = \frac{\gamma \cdot A}{1-A}, \quad (1.11)$$

$$\text{де } A = \sum_1^i \frac{R_i \cdot \delta_i}{\gamma + R_i},$$

γ - відношення насипних мас залізовмісних матеріалів і коксу;

R_i - рудне навантаження у конкретній кільцевій зоні;

δ_i - частка об'єму матеріалу, завантаженого за цикл в i -у кільцеву зону.

Розрахунок середнього рудного навантаження за загальноприйнятими нормами ведення доменної плавки дає можливість оцінити якість розподі-

лу шихтових матеріалів по призначених позиціях (кутах нахилу) лотка-розподільника БЗП. Практика показує, що показники розподілу вуглекислого газу і приватних рудних навантажень тісно пов'язані між собою, причому коефіцієнт кореляційного зв'язку між ними в більшості випадків становить 0,8. В [62] виявлено, що за результатами експериментальних досліджень і моделювання особливостей руху шихтових матеріалів в шихтових трактах двобункерних БЗП спостерігається неспівпадіння осей подачі потоку шихти на робочій поверхні лотка-розподільника. Встановлено, що нерівномірність зсипання шихтових матеріалів на поверхню засипу колошника корелює зі швидкістю обертання лотка, довжиною лотка, характеристиками матеріалу, рівнем засипу, кутом нахилу лотка до осі печі, а також характеристик його футерування. У матеріалах дослідження вказана важливість застосування прогресивного методу радіолокаційного вимірювання параметрів рельєфу поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі. Наведено радіолокаційні картини розподілу шихтових матеріалів по діаметру колошника за цикл завантаження з 9 порцій на доменній печі №9 АрселлорМіттал Кривий Ріг. Відзначено, що створення нових методів, програм завантаження і розподілу шихтових матеріалів, заснованих на розрахунку показників розподілу, є важливим науково-виробничим завданням. Наведено радіолокаційні картини розподілу шихтових матеріалів по діаметру колошника за цикл завантаження з 9 порцій на доменній печі №9 АрселлорМіттал Кривий Ріг.

У статті [63] наведені систематизовані геометричні дані про поверхню засипу на колошнику доменної печі, отримані із застосуванням гамма-профілемеру. Автори звертають увагу, що згідно з проведеним експериментальним дослідженням профіль поверхні з лійкою в осьовій зоні отримували тільки при задування доменної печі; при роботі печі в нормальному режимі рельєф був близький до рівної поверхні.

В роботі [64] проведено глибокі експериментальні дослідження на моделі безконусного завантажувального пристрою, геометричні розміри агрегатів і експериментальних шихтових матеріалів вибиралися на основі теорії розмірностей для визначення розмірних комплексів. На моделі досліджена окружна нерівномірність на колошнику експериментальної установки в залежності від ряду параметрів ведення доменної плавки. В роботі показано, що відносно великий розкид експериментальних точок пов'язаний з впливом співвідношення площі вихідного отвору воронки і нижнього клапана бункера, величиною кута між напрямками потоків шихти з бункера і з воронки.

В [65] розглянуто особливості розподілу дуття в доменних печах великого об'єму і взаємозв'язок розподілу шихти і дуття. Виявлено механізм виникнення локальних зон на поверхні засипу шихти на колошнику доменної печі №9 АрселлорМіттал Кривий Ріг. Відзначається, що неосьовий рух ших-

ти в направляючій трубці, розташованій після похилих тічок бункерів БЗП, обумовлює створення окружної нерівномірності на засипу колошника. Показано, що кривою зустрічі шихти і поверхні засипу є окружність неправильної форми, причому їх центри зміщені до стінки печі в напрямку, протилежному розвантаженню бункера. Доведена необхідність створення автоматизованої підсистеми управління завантаженням на колошнику за допомогою БЗП.

В оглядовому матеріалі [66] розглянуті питання завантаження доменних печей об'ємом понад 3500 м³. Акцентовано увагу на тому факті, що найбільш перспективною системою завантаження таких печей є система з БЗП. Розглянуто аспекти подальшої модернізації автоматизованих систем управління підсистеми завантаження шихти в печі, які керують колошниковими пристроями.

Таким чином, на сьогоднішній день програми завантаження шихти в доменну піч базуються на методиках, заснованих на емпірико-практичних розрахунках з великою кількістю коефіцієнтів, одержуваних експериментальним шляхом. В існуючих методиках розрахунку кінематичних параметрів руху шихти по трактах завантажувальних пристроїв доменних печей не враховується весь комплекс факторів, які безпосередньо впливають на процес формування поверхні засипу на колошнику доменної печі, і як наслідок рудного навантаження. Серед вищевказаних чинників слід зазначити фракційний склад шихти, її гранулометрію, фізико-механічні характеристики. В першу чергу це коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя матеріалу при взаємодії з елементами систем завантаження доменних печей.

У літературних джерелах не виявлено єдиного науково обґрунтованого підходу до опису формування рудного навантаження на колошнику, який оперував би параметрами потоку сипучого матеріалу, починаючи від приймальної воронки на завантажувальному пристрої і закінчуючи точкою приземлення шихти на поверхню засипу.

Однак завжди слід пам'ятати, що формування так званого «заданого» профілю засипу шихтових матеріалів на колошнику печі не є остаточним чинником досягнення найкращих техніко-економічних показників доменної плавки. Найважливішими є показники газодинаміки. На сучасних доменних печах є в наявності широкий спектр моніторингового обладнання, що слідує за показниками плавки. Вагомими з точки зору технології є дані розподілення шихтових матеріалів у печі та дані щодо розподілу вмісту газів по радіусу колошника. Аналізуючи товщини та характеристики шарів шихтових матеріалів, що отримуються завдяки аналізу даних радарної системи моніторингу за поверхню засипу та поєднуючи ці дані з вмістом газів стає можливим ефективно корегування керуючих впливів БЗП для досягнення максимальної продуктивності печі, мінімального розходу енергоносіїв при використанні шихтових матеріа-

лів з конкретними характеристиками, що змінюються по ходу роботи доменного цеху.

Використання даних радарних систем моніторингу колошникової зони дає змогу чітко визначити товщини шарів шихтових матеріалів та прогнозувати газодинаміку печі. Але це не обумовлює відмову від використання теоретичних методик, які описують рух шихтових матеріалів по трактах БЗП та у колошниковому просторі. Ці методики дають відповідь на питання на скільки змінювати керуючі впливи БЗП для заданої корекції параметрів шарів шихтових матеріалів для раціоналізації газодинаміки доменної печі.

В роботі [47] структура стовпа шихти також розглядається з позицій оптимального газорозподілу. При цьому підкреслюється, що проблема оптимізації параметрів газорозподілу не може бути вирішена тільки на основі аналізу явищ газомеханіки і вимагає врахування низки процесів, обумовлених розподілом шихти, станом фурменної області та інших елементів структури шарів і зон матеріалів в печі. Відзначається, що накопичення рідких продуктів плавки погіршує рівномірність розподілу по перетину печі і величину ступеня використання газу CO внаслідок скорочення розмірів просторової течії газу.

Управління рівнем розплаву рідкого чавуну впливає на газодинамічні зони доменної печі, тому ефективно видалення рідких продуктів плавки займає важливе місце серед заходів, що забезпечують чіткість і надійність роботи доменної печі [67-77].

Велика кількість досліджень присвячено аналізу руху шихтових матеріалів в системі завантаження доменних печей, обладнаних конусними завантажувальними пристроями [12,78-83].

Сучасні автоматизовані системи шихтоподачі доменних печей об'єднують такі локальні підсистеми автоматичного контролю і регулювання [84]:

- завантаження накопичувальних бункерів;
- набору і дозування компонентів шихти;
- транспортування і завантаження матеріалів в доменну піч;
- відбору і підготовки представницьких проб матеріалів і продуктів доменної плавки для аналізу;
- автоматичного визначення фізичних властивостей шихтових матеріалів в потоці (вологості і ситового складу коксу, механічної міцності і газопроникності насипних мас агломерату і коксу);
- управління шихтовкою доменної плавки.

Створення загальної системи автоматизованого управління шихтоподаванням, що включає представлені локальні підсистеми, має ґрунтуватися на теоретичному дослідженні закономірностей руху шихтових матеріалів по трактах всього комплексу машин і механізмів, що забезпечують ефективно завантаження доменних печей з широким діапазоном зміни факторів, що впливають на процес. Така система повинна забезпечувати прогнозування поведінки потоків шихти і, як наслідок,

формування стовпа шихтових матеріалів в печі, а також хід доменної плавки. Пов'язування роботи обладнання підсистем вимагає однозначного теоретичного опису зміни фізико-механічних, геометричних, кінематичних і динамічних властивостей матеріалу при переході з однієї підсистеми в іншу. Важливим фактором є отримання моделей поведінки матеріалу, розроблених на основі одних і тих же фізико-механічних підходів, узагальнень і обмежень. Кінцевим результатом загальної системи автоматизованого управління всього комплексу обладнання систем завантаження доменних печей повинно стати визначення необхідних регулюючих впливів всього ланцюжка регуляторів комплексу системи подавання шихти для забезпечення бажаних результатів плавки.

Складність інтегрованої автоматизованої системи шихтоподачі полягає в ряді чинників:

- велика кількість впливають параметрів;
- неоднозначний вплив ряду факторів на технологічний процес;
- необхідність визначення ряду параметрів шихтових матеріалів в динаміці.

Крім того, система повинна забезпечувати безперебійне визначення робочих значень параметрів в умовах відсутності кількох значень вхідних параметрів (поломка реєструючих приладів, датчиків і т.п.). Це можливо лише в разі адекватного внесення «штучних» значень, впливаючих на процес факторів, яке не призведе до різкої зміни параметрів управління системою шихтоподачі і, як наслідок, порушення опускання стовпа шихти і всього процесу доменної плавки.

Розробка ефективної автоматизованої системи управління подавання шихти можлива тільки для конкретної доменної печі зі своїм індивідуальним обладнанням і технологічними параметрами, але підходи до вирішення завдань з теоретичного визначення регулюючих впливів повинні бути уніфіковані.

Таким чином, технологічний процес виробництва чавуну із застосуванням доменного процесу визначальним чином залежить від ефективності роботи систем завантаження шихтових матеріалів в піч. Літературний пошук показав, що на сьогодні немає комплексного опису роботи всіх систем шихтоподачі, який би підходив для будь-якого обладнання і враховував би всі основні фактори, що впливають на рух потоку шихти для якого справедливі закони механіки суцільного середовища. У зв'язку з цим, комплексний опис взаємозв'язків і закономірностей між параметрами потоку шихти і характеристиками систем шихтоподачі з урахуванням впливу на технологічний процес доменної плавки є актуальним.

Для отримання нового комплексного опису процесів, що відбуваються в системах завантаження сучасних доменних печей необхідно вирішити такі завдання:

- виявити закономірності зміни параметрів руху шихтових матеріалів в підсистемах завантаження

на колошник доменної печі які б ґрунтувалися на одному теоретичному підході, який би враховував увесь комплекс факторів, що впливають на процес;

- визначити кінематичні і геометричні характеристики потоку шихтових матеріалів по елементам завантажувальних пристроїв з урахуванням гранулометричного складу;

- в разі використання БЗП створити комплексний опис закономірностей витоку матеріалів з шихтових бункерів, який би враховував зміну гранулометричного складу матеріалів та геометричні особливості конструкції;

- створити єдину комплексну методику, засновану на теоретичних дослідженнях, яка б описувала послідовний рух шихтових матеріалів по елементах систем шихтоподачі доменних печей з низу до верху і його вплив на ведення доменної плавки.

Аналіз наукової та промислової технічної інформації показав, що на сьогоднішній день актуальним є рішення комплексної проблеми управління доменними печами обладнаними як конусними так і безконусними завантажувальними пристроями. Сучасні системи завантаження дозволяють не тільки регулювати параметри засипу на колошнику, але і показати реальну картину її рельєфу. У зв'язку з тим, що фізико-хімічні, гранулометричні параметри шихтових матеріалів, що завантажуються в доменну піч постійно змінюються, для найбільш раціонального ведення плавки необхідно постійно змінювати керуючі впливи систем завантаження. Тому створення теоретичного і практичного комплексу заходів, які дозволять в режимі реального часу визначати необхідні параметри управління доменною плавкою і проводити швидко і точно їх корекцію, є важливим науковим завданням.

З огляду на вищевикладений матеріал основними завданнями, які повинні бути ефективно вирішені для найефективнішого ведення доменної плавки, є:

- дослідження закономірностей і характеру течії потоку шихтових матеріалів з бункерів БЗП з урахуванням гранулометрії та геометричних особливостей накопичувальних бункерів;

- встановлення зв'язку між гранулометриєю, фізико-механічними характеристиками шихтового матеріалу, як насипного вантажу і кінематичними параметрами його руху по трактах завантажувальних пристроїв доменних печей;

- дослідження взаємозв'язку параметрів витоку шихтових матеріалів з конусного затвора завантажувального пристрою доменної печі з гранулометричними і якісними характеристиками шихти;

- вивчення процесів взаємодії потоку шихтових матеріалів з перевантажувальними трактами завантажувальних пристроїв для встановлення початкових кінематичних даних, що визначають тра-

екторію потоку у колошниковому просторі доменної печі;

- визначення впливу комплексу керуючих факторів завантажувального пристрою на формування рельєфу поверхні засипу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі;

- розробка методів оперативної корекції завантаження шихтових матеріалів в доменну піч для досягнення її найкращого ходу при будь-яких змінах опускання стовпа шихти в печі та гранулометричних характеристик шихти;

- визначення раціональних кутів відкриття шихтових затворів бункерів БЗП, кутів положення лотка-розподільника для досягнення необхідних геометричних характеристик поверхні засипу на колошнику доменної печі і, як наслідок, найкращої газодинаміки.

- забезпечення раціонального розподілення рудного навантаження вздовж радіуса колошника і загального рудного завантаження.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що існуючі на сьогоднішній день методики розрахунку кінематичних параметрів руху потоку шихти по трактах систем завантаження доменної печі ґрунтуються на розгляді характерної точки перетину і подальшого узагальнення її характеристик на весь потік.

2. Аналіз літературних джерел показав, що немає єдиного математичного апарату, який би дозволив описувати кінематику потоку шихти по всіх трактах завантаження печі з можливістю широкої автоматизації процесу в цілому.

3. Дослідження сучасних методик і програм завантаження доменних печей дозволило визначити, що вони не можуть оперативно проводити корекцію керуючих параметрів при швидкій зміні умов завантаження

4. Визначено основні недоліки систем завантаження доменних печей як з конусними так і безконусними завантажувальними пристроями, сформульовані подальші напрямки раціоналізації керуючих параметрів.

5. Глибокий аналіз використовуваних на сьогоднішній день методик і програм завантаження доменних печей показав, що не знайдено аналітичну кореляцію між кінематикою потоку шихтових матеріалів з їх гранулометричним складом. Практичні дані про роботу доменних печей свідчать про наявність такої кореляції.

6. Показано, що в інтегральному вигляді проблема вдосконалення технології доменної плавки на основі управління рельєфом поверхні засипу шихти не вирішувалась. Обґрунтовано подальші напрямки досліджень щодо вдосконалення технології завантаження доменної печі з використанням інформації, отриманої за допомогою радарних комплексів, що дозволило сформулювати основні завдання роботи

Перелік використаних літературних джерел.

1. Сторожик Д.А. Определение пропускной способности конусного затвора с учетом переходных процессов. / Д.А. Сторожик, В.Д. Сергиенко, Н.Г. Селегей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1982. – №2. С. 142-144.
2. Щиренко Н.С. Механическое оборудование доменных цехов / Н.С. Щиренко – М.: Металлургиздат., 1962. – 524 с.
3. Ганин Д.Р. Анализ способов оценки эквивалентного диаметра гранул окомкованой агломерационной шихты в условиях ОАО «Уральская сталь». / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов / Теория и технология металлургического производства. – 2015 – №1. С. 5-11.
4. Реконструкция и освоение систем загрузки доменных печей / [Большаков В. И., Иванча Н. Г., Муравьева И. Г., Шулико С. Т., Шутылев Ф. М.] – Бюл. НТЭИ Черная металлургия. Аглодомное приложение, 2005. – 56 с.
5. Выдувка доменной печи объемом 5000 м3 на капитальный ремонт 1–го разряда / [Можаренко Н. М., Шулико С. Т., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С. Орел Г. И., Листопадов В. С., Дмитренко К. А.] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2004. – Вып. 8. – С. 130–138.
6. Деклараційний пат. Україна, 43970 А С21В7/24, G01R27/04. Спосіб визначення параметрів засипки шихти в доменній печі / Кукушкін О. М., Головка В. І., Михайловський М. В, Ізюмський М. М., Муравйова І. Г., Тригуб І. Г. – заяв. 01.08.2000; опубл. 15.01.2002, Бюл. №1.
7. Чистяков В.Г. Исследование формирования поверхности засыпи на колошнике современными загрузочными устройствами с целью интенсификации доменной плавки: диссертация на соискание ученой канд. техн. наук: 05.16.02 / Владимир Григорьевич Чистяков. – Днепропетровск. – 1981. – 156 с.
8. Иванча Н.Г. Исследование выгрузки порций шихты из бункеров загрузочных устройств доменных печей / Н.Г. Иванча, В.И.Вишняков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии – 2011 С. 70-79.
9. Ковшов В.И., Петренко В.А., Набока В.И., Ткач А.А., Заблочкий П.А. теория загрузки и газогидродинамики доменной печи Под ред. проф. Ковшова В.И. и Петренко В.А. – Днепропетровск: ТОВ «ЛизуновПресс», 2015. – 175с.
10. A blast furnace model to optimize the burden distribution / [G. Danloy, J. Mignon, R. Munnix, G. Dauwels, L. Bonte] – Ironmaking conference proceedings, 2001. – P. 37–48.
11. Mauricio Roche, Mikko Helle and Henrik Saxén. Principal Component Analysis of Blast Furnace Drainage Patterns. Processes, DOI:10.3390/pr7080519
12. Ashish Agrawal, Swapnil C. Kor, Utpal Nandy, Abhik R. Choudhary, Vineet R. Tripathi (2016). Real-time blast furnace hearth liquid level monitoring system. Ironmak. Steelmak., DOI 10.1080/03019233.2015.1127451.
13. Hiroshi Mio, Yoichi Narita, Kaoru Nakano, Seiji Nomura (2019). Validation of the Burden Distribution of the 1/3-Scale of a Blast Furnace Simulated by the Discrete Element Method. Processes, 8(1), 6, DOI: 10.3390/pr8010006
14. Yong Feng, Ziran Yuan (2020). Discrete element method modeling of granular flow characteristics ?ansi-tion in mixed flow. Comp. Part. Mech., DOI 10.1007/s40571-019-00309-1.
15. Yoichi Narita, Hiroshi Mio, Takashi Orimoto, Seiji Nomura (2017). DEM Analysis of Particle Trajectory in Circumferential Direction at Bell-less Top. ISIJ International, Vol. 57, DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-560
16. Henna Tangri, Yu Guo, Jennifer S. Curtis (2019). Hopper discharge of elongated particles of varying aspect ratio: Experiments and DEM simulations. Chemical Engineering Science: X, Volume 4, 100040, DOI 10.1016/j.cesx.2019.100040.
17. YangXu, JianXu, Chengfeng Sun, KaihuiMa, Cheng Shan, Liangying Wen, Shengfu Zhang, Chenguang, Bai (2018). Quantitative comparison of binary particle mass and size segregation between serial and parallel type hoppers of blast furnace bell-less top charging system. Powder Technology, Volume 328, DOI 10.1016/j.powtec.2018.01.020
18. Nicolin Govendera, Daniel N. Wilke, Chuan-Yu Wu, Ugur Tuzun, Hermann Kureck (2019). A numerical investigation into the effect of angular particle shape on blast furnace burden topography and percolation using a GPU solved discrete element model. Chemical Engineering Science Volume 204, DOI 10.1016/j.ces.2019.03.077.
19. Jiangfeng Wan, Fugang Wang, Guanghui Yang, Sheng Zhang, Mengke Wang, Ping Lin, Lei Yang (2018). The influence of orifice shape on the flow rate: A DEM and experimental research in 3D hopper granular flows. Powder Technology, Volume 335, DOI 10.1016/j.powtec.2018.03.041.
20. Qi Luo, Qijun Zheng and Aibing Yu (2017). From Micro to Macro: A Comparative Study of DEM and FEM in Modeling Hopper Flow. Springer Proceedings in Physics, vol. 188, DOI 10.1007/978-981-10-1926-5_102.

21. Алабужев П.М. Теория подобия и размерностей. Моделирование. / П.М. Алабужев, В.Б. Геронимус Л.М., Минкевич, Б.А. Шеховцов. М.: Высшая школа 1968, 206с.
22. Веников А.А. Теория подобия и моделирования. / А.А. Веников, Г.В. Веников М.: Высшая школа, 1984, – 439с.
23. Петренко В.А. Исследование хода восстановительных процессов в доменной печи. / В.А. Петренко, В.Н. Ковшов, В.И. Верещак, В.П. Иващенко. Монография. Днепропетровск: Институт технологии 2000, 112с.
24. Иващенко В.П. Определение параметров выгрузки шихты из бункеров бесконусного загрузочного устройства доменной печи. / В.П. Иващенко, Р.В. Кирия, А.Н. Селегей, В.И. Головкин, М.А. Рыбальченко, Г.А. Папанов, С.Н. Селегей // Сборник научных трудов горного университета. Днепр: 2017. Вып. 52 – С. 192-198. Библиогр.: 5 назв.
25. Кирия Р. В. Описание процесса истечения сыпучего груза из бункера с помощью структурно-механических моделей / Р.В. Кирия // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2009. – Випуск 3(62). – С. 3–19.
26. В.И. Головкин, М.А. Рыбальченко, А.Н. Селегей. Определение геометрических параметров доз шихтовых материалов с целью определения их секундных объемов. ДВНЗ «Криворізький національний університет Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. Випуск 100. Кривий Ріг 2015.
27. Selegej A. The parameters of burden flow from the bins of bell-less top charging system of blast furnaces. / A. Selegej, V. Ivaschenko, Chistyakov, V. Golovko // Naukovi visnyk Natsionalnoho hirnychogo univertyetu –2020/ №3, – С. 41-46.
28. В.Л. Покрышкин, В.И. Большаков, И.Т. Хомич, В.П. Грищенко, А.Ю. Зарембо Особенности распределения материалов в доменной печи объемом 5000м³ бесконусным загрузочным устройством / Сталь №11, 1982г. С.13-16
29. Большаков В.И. Научные основы совершенствования оборудования систем загрузки доменных печей / В.И. Большаков // Черная металлургия. Наука, технология, производство. Под ред. проф. И.Г. Узлова Тематический сборник науч. тр. М.: «Металлургия», 1989 С. 63-71.
30. Ковшов В.Н. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи. / В.Н. Ковшов, В.А. Петренко. Монография. Днепропетровск: Институт технологии 1996, 125с.
31. Оптимизация состава и режима загрузки шихтовых материалов с целью повышения эффективности доменной плавки / [Большаков В. И., Гладков Н. А., Шутылев Ф. М., Тогобицкая Д. Н.] – Сталь, 2001.– №4. – С.6–10.
32. Современные методы сбережения энергии в доменном производстве [Ковшов В. Н., Бочка В. В., Сулименко Е. И., Петренко В. А.] / Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2008. – №16. – С. 177–186.
33. Некоторые особенности работы доменной печи при повышении интенсивности плавки / [Бочка В. В., Иващенко В. П., Ковшов В. Н., Сулименко Е. И., Куприков Р. А.] – Новини науки Придніпров'я, збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю Г. А. Воловіка, 2010. – С. 50–53
34. Ковшов В.Н. Численный анализ процессов доменной плавки / В.Н. Ковшов, В.П. Иващенко, В.А. Петренко – Днепропетровск, 2014. – 131с.
35. Формирование рациональной структуры столба шихтовых материалов в доменной печи / [Никитин Л. Д., Долинский В. А., Бугаев С. Ф. и др.] – Металлург, 2004. – №2. – С. 26–28.
36. Большаков В. И. Перспективы управления ходом доменной печи с использованием результатов измерения профиля засыпи / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2004. – №4. – С. 81–84.
37. Плискановский С.Т. Оборудование и эксплуатация доменных печей / С.Т. Плискановский, В.В. Полтавец. – Днепропетровск: Пороги, – 2004. – -495 с.
38. С.А. Бадин, М.Т. Бузоверя, Г.Ю. Воронин, С.Т. Шулико. Поверхность засыпи шихты и ее связь с параметрами доменной плавки. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии Сб. научных трудов Киев, Наукова думка 1995. С. 77-85
39. Большаков В.И. Теория и практика загрузки печей М. Металлургия, 1990. 256с.
40. Большаков В. И. Оценка формирования слоев шихты на колошнике доменной печи с помощью радиолокационного профилемера / [Большаков В. И., Муравьева И. Г., Семенов Ю. С., Шулико С. Т.] – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2006. – №3. – С. 5–10.
41. Большаков В.И., Лебедь В.В. Исследование взаимосвязи распределения температуры и химического состава газового потока по радиусу доменной печи // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск, ИЧМ НАН Украины. – 2006. – №13.– С. 27-35.
42. Большаков В.И. Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом: Обзор. Информ (Черная металлургия, сер. Производство чугуна) / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин, Ф.М. Шутылев. // Ин-т Черметинформация – 1983 – Вып. 2 32с.

43. Большаков В.И. Оптимизация программ загрузки доменной печи лотковым распределителем / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин, Ф.М. Шутылев. // *Сталь* – 1985 – С.56-59.
44. Бюллетень Научно-технологической информации Черная металлургия 1985 вып. 20(1000) В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо. Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи.
45. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей / Большаков В. И. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
46. Доменное производство «Криворожстали». Монография под ред. члена-корреспондента НАН Украины В.И. Большакова, Днепропетровск 2004 376с.
47. В.И. Большаков. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки
48. Критерий режима загрузки доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, С.Т. Шулико // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2001. – №6. – С. 5-8.
49. Аналитическое исследование процессов доменной плавки. И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, А.Е. Меркулов, Днепропетровск ЧМП «Экономика», 2011, 206с.
50. Результаты внедрения алгоритма «Траектория» в составе АСУ загрузки доменной печи / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Н.А. Гришкова // *Автоматизация технологических процессов и управления производством в черной металлургии. МЧМ СССР. М. Металлургия, 1987. –С.30-33.*
51. В.И. Большаков, И.Е. Варивода, Н.А. Рослик Ф.М. Шутылев. Влияние движения шихты по трактам загрузочного устройства на окружное распределение в доменной печи. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов Киев. «Наукова думка» 1995. С. 57 - 68.
52. В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, А.С. Сало. Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка. Сборник научных трудов Вопросы производства чугуна в доменных печах МЧМ СССР (ИЧМ) М. Металлургия, 1984г.
53. Семенов Ю.С., Шумельчих Є.І., Горупаха В.В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. -Дніпро : Домінанта Прінт, 2018.- 260с.
54. Радиолокационный контроль металлургических процессов. Головки В.И., Кукушкин О.Н., Михайловский Н.В., Потапов А.В., Смоктий В.В., Хасянов А.Ф. Днепропетровск: Журфонд, 2010-428с.
55. Ковшов В.И., Петренко В.А., Набока В.И., Ткач А.А., Заблоцкий П.А. теория загрузки и газогидродинамики доменной печи Под ред. проф. Ковшова В.И. и Петренко В.А. – Днепропетровск: ТОВ «ЛизуновПресс», 2015. – 175с.,
56. Верховська А.О. Підвищення ефективності роботи доменної печі: монографія. Запорізька державна інженерна академія. Запоріжжя: ЗДІА, 2012-98с.
57. Плискановский С.Т., Полтавец В.В. неполадки в работе доменных печей. Предупреждение и устранение. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 301с.
58. Исследование выгрузки порции шихты из бункеров загрузочных устройств доменных печей) Н.Г. Иванча, В.И. Вишняков // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. Трудов – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины, 2011. – вып.23 – с.70-79 – Библиограф. 5 назв.*
59. В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Особенности исчисления шихтовых материалов из бункера бесконусного загрузочного устройства / *Металлургия и коксохимия* . – Вып.88 – Киев: Техника – 1985 С.31-34
60. В.И. Большаков, В.В. Лебедь, А.А. Жеребицкий Особенности управления загрузкой шихты на современных доменных печах / *Фундаментальные и прикладные СБ. Науч. Трудов ИЧМ «ФППЧМ»*. – Вып. 25. – 2012. – С.13-24
61. В.Л. Покрышкин, В.И. Большаков, И.Т. Хомич, В.П. Грищенко, А.Ю. Зарембо Особенности распределения материалов в доменной печи объемом 5000м³ бесконусным загрузочным устройством / *Сталь* №11, 1982г. С.13-16
62. В.И. Большаков, Ф.М. Шутылев, Рациональный режим работы вращающегося распределителя шихты бесконусного загрузочного устройства. / *Сталь* №3,1988г. С.17-20
63. Большаков В. И. Управление загрузкой и распределением шихты на колошнике и эффективность доменной плавки / Большаков В. И. – *Познание процессов доменной плавки: Коллективный труд под редакцией Большакова В. И., Товаровского И. Г.* – Днепропетровск: «Пороги». 2006. – С. 87–109.
64. Исследование формирования профиля поверхности засыпи и структуры столба шихты в доменной печи / [Смоляк В. А., Щербицкий Б. В., Евсеева Н. Т., Василенко В. И.] – *Сталь*, 1974. – №2. – С. 100–103.

65. Ковшов В. Н. Исследование окружного распределения шихты бесконусным засыпным устройством с вращающимся лотком / Ковшов В. Н., Чистяков В. Г., Зозуля Г. С. – Металлургия и коксохимия. – К.: Техника, 1979. – № 62. – С. 34–37.
66. Большаков В. И. Взаимосвязь распределения шихты и дутья в доменной печи объемом 5000 м³ / Большаков В. И., Шулико С. Т., Листопадов В. С. – Металлургическая и горнорудная промышленность, 2003. – №6. – С. 3–8.
67. Распределение шихты и газового потока в доменной печи большого объема / [Большаков В. И., Варивода И. Е., Шулико С. Т., Шутылев Ф. М., Васинев Г. К. – Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы первой Международной науч. - техн. конференции – Череповец: ЧГУ, 1998. – С. 15–18
68. Алымов Г.И. Эксплуатационные характеристики и надежность машин, обслуживающих чугунные летки доменных печей / Г.И. Алымов, В.Т. Пиляев, А.Н. Селегей, С.Г. Сподин. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – №4. – С.9-13.
69. Селегей А.Н. К расчету охлаждения буровой штанги машины для вскрытия летки доменной печи / А.Н. Селегей, Б.Б. Потапов, Ю.А. Мушенков // Новости науки Приднепровья. – 2005. – №6. – С.51-53.
70. Грачев К.Г. Об устойчивости штанги бурового инструмента машин для вскрытия чугунных леток доменных печей / К.Г. Грачев, В.И. Пурис, А.Н. Селегей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006.], – №1 – С.19-23.
71. Селегей А.Н. Экспериментальное определение осевой нагрузки буровой штанги машины для вскрытия чугунных леток доменных печей / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков, Н.П. Стадничук // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2006. – №2(4) – С.108-111.
72. Селегей А.Н. Определение крутящего момента на буровой штанге машины для вскрытия чугунной летки доменной печи при ударно-вращательном способе бурения / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007 – №2 – С.22-25.
73. Селегей А.Н. Определение вращающего момента, прилагаемого к буровому инструменту машины вскрытия чугунной летки доменной печи / А.Н. Селегей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №3/1(27) – С.38-40.
74. Селегей А.Н. Экспериментальное определение нагрузок при вскрытии чугунной летки / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2007. – №3 – С.108-110.
75. Селегей А.Н. О динамическом нагружении трансмиссии механизма бурения машин для вскрытия чугунных леток доменных печей / А.Н. Селегей, Ю.А. Мушенков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – №3 – С. 141-142.
76. Селегей А.Н. Определение рациональных геометрических параметров бурового инструмента машины для вскрытия чугунных леток доменных печей / Селегей А.Н., Мушенков Ю.А. // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2009. – №6 – С.89-91.
77. Алымов Г.И. Современные тенденции в проектировании технологического оборудования для доменного производства / Г.И. Алымов, В.И. Кузнецов, А.Н. Селегей, Д.В. Полишкевич // Доменное производство XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков, М.: 12-16 апреля 2010. С. 235-237.
78. Обоснование рациональных энергосиловых параметров машин для вскрытия чугунной летки доменной печи Металлургическая и горнорудная промышленность – 2012. – №6 – С.64-66.
79. Грузинов В. К. Управление газовым потоком в доменной печи программной загрузкой / Грузинов В. К. – ГНТИ ЧЦМ, Свердловск, 1960. –214с.
80. Ковшов В. Н. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи / В. Н. Ковшов, В. А. Петренко – Институт технологии. Днепропетровск, 1996. – 124 с.
81. Ковшов В. И. Моделирование доменного процесса / Ковшов В. И., Петренко В. А., Верещак В. И. – Институт технологии. Днепропетровск, 1997. – 109 с.
82. В.А. Петренко Интенсификация процессов газодинамики и массообмена в доменной плавке Дн-ск, Институт технологий, 2000, монография 272 с. ISBN 966-7386-12-0.
83. Головки В. И. Научное обоснование и применение микроволновой техники для информационного обеспечения АСУ ТП в металлургии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Днепропетровск, НГУ, 2005. –473 с.
84. Доменный процесс по экспериментальным данным / Труды Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина, 1949, – №2 – 346 с. 18.

УДК 621.777.

М. І. Медведєв, О. С. Бобух, ,

Удосконалення технології виробництва труб з корозійностійких сталей і титанових сплавів.

M. Medvedev O. Bobukh

Improvement of the technology of production of pipes from corrosion-resistant steels and titanium alloys.

Ціль роботи. Удосконалення технології виробництва безшовних труб з корозійностійких сталей аустенітного класу і титанових та цирконієвих сплавів. Розробка технічних рішень по визначенню раціональних температуро-деформаційних і швидкісних режимів пресування труб та експандування попередньо свердлених заготовок, які забезпечують виконання вимог нормативних документів а саме вимог іноземних стандартів [ASTME, DIN та інш.], ГОСТ, ДСТУ, а також зниження витратного коефіцієнту металу.

Методика досліджень. При визначенні математичної залежності раціональних температуро-деформаційних параметрів пресування труб і експандування попередньо свердлених заготовок були використані дані експериментальних досліджень пресування труб з різних сталей і сплавів.

Результати. Розроблено ряд технічних рішень по визначенню математичної залежності температур нагрівання заготовок від деформаційних параметрів (коефіцієнта витяжки при пресуванні труб), швидкості пресування, температури максимальної пластичності, залежності величини зерна аустеніта від параметрів технології пресування (температури нагрівання заготовок, геометричних параметрів заготовок та інструменту, тимчасового опору розриву) та інші.

Наукова новизна. Визначені раціональні температуро-деформаційні режими пресування труб з корозійностійких аустенітних сталей і титанових сплавів для авіаційної промисловості і атомної енергетики.

Практична значущість. Розроблені режими реалізовані при розробки технології виробництва труб на вітчизняних та іноземних пресових установках з забезпеченням вимог нормативної документації.

Ключові слова: корозійностійкі сталі, сплави, пресування труб

The purpose of the work. Improvement of the production technology of seamless pipes from corrosion-resistant steels of the austenitic class and titanium and zirconium alloys. Development of technical solutions for determining rational temperature, deformation and speed regimes of pipe pressing and expansion pre-drilled blanks, which ensure the fulfillment of the requirements of regulatory documents, namely the requirements of foreign standards [ASTME, DIN, etc.], GOST, DSTU, as well as a reduction in the consumption coefficient of the metal.

Research methodology. When determining the mathematical dependence of the rational temperature-deformation parameters of pipe pressing and expansion of pre-drilled blanks, data from experimental studies of pipe pressing made of various steels and alloys were used.

Results. A number of technical solutions have been developed to determine the mathematical dependence of workpiece heating temperatures on deformation parameters (coefficient of extraction during pipe pressing), pressing speed, temperature of maximum plasticity, dependence of the austenite grain size on the parameters of the pressing technology (heating temperature, geometric parameters of workpieces and tools, temporary resistance to rupture) and others.

Scientific novelty. Rational temperature-deformation regimes for pressing pipes made of corrosion-resistant austenitic steels and titanium alloys for the aviation industry and nuclear power are determined

Practical significance. The developed regimes were implemented during the development of pipe production technology at domestic and foreign press installations to ensure the requirements of regulatory documentation.

Key words: corrosion-resistant steels, alloys, pipe pressing

Відомо [2-4 та ін.], що отримання якісних корозійностійких товарних труб з нержавіючих сталей аустенітного класу із забезпеченням регламентованої структури у відповідність до вимог нормативних документів (ГОСТ 5639-82, ASTM A312 і E112 і ін.) є досить трудомістким. Це зумовило розробку ряду технічних рішень по оптимізації технології пресування труб з аустенітних сталей і нікелевих сплавів.

Так, в роботі [4] запропоновано для виробництва труб з аустенітних сталей з регламентованою структурою здійснюють нагрів заготовки до температури 0,75-0,8 температури плавлення сталі, потім деформують заготовку пресуванням з витяжкою 3-30, витримують пресвибір (трубу) на повітрі протягом 35-95 с і після цього охолоджують у воді, при цьому швидкість деформування встановлюють залежно від необхідної зерен структури

| | |
|-----------------|--|
| М. І. Медведєв, | |
| О. С. Бобух | |

і технологічних параметрів, визначаючи її за формулою:

$$U = -3,9343 \sigma_B + 1,2684 T_{\text{деф}} + 3,3558 \frac{D_K^2 - d_i^2}{D_{\text{тр}}^2 - d_i^2} + 0,1859 \tau - 3,2557 \text{Д} - 939,62, \quad (1)$$

де U – швидкість деформування, мм/с; σ_B – тимчасовий опір розриву, кТ/мм²; $T_{\text{деф}}$ – температура деформації, °С; D_K – максимальний діаметр контейнера преса, з якого можна отримати заданим розмір труб, мм; $D_{\text{тр}}$ – діаметр труби, мм; d_i – діаметр голки; τ – час витримки виробу (труби) на повітрі, с; Д – показник зеренної структури (середній діаметр зерна аустеніту), мкм.

При заданій величині зерна і відомих технологічних параметрах діаметр контейнера вибирається максимально можливим (для даного пресового обладнання) з умов допустимих зусиль пресування і по залежності (1) розраховується необхідна величина швидкості деформування.

Якщо розрахункова величина швидкості деформування входить в діапазон технічно можливих для даного преса швидкостей переміщення пресштемплеля, то вибір швидкості деформування вважається закінченим, проводиться установка даної швидкості на пресі і процес пресування здійснюється з реалізацією рекомендованих вище технологічних параметрів.

Якщо розрахункову швидкість деформування неможливо реалізувати на даному пресовому обладнанні, то обраний коефіцієнт витяжки кори-

гується до тих пір, поки розрахункова швидкість не потрапить в технічно можливий діапазон.

Даний спосіб успішно реалізується на трубопресових установках ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН».

В роботі [5] запропоновано спосіб пресування труб шляхом зміни умов охолодження пресованих труб в залежності від технологічних параметрів процесу пресування, які забезпечують отримання регламентованого середнього діаметру зерна (структури металу труб), яке відповідає вимогам вітчизняних та міжнародних стандартів з корозійної стійкості труб.

Поставлена задача вирішена тим, що в способі пресування труб з аустенітних сталей, що включає нагрів порожнистих заготовок до температури максимальної пластичності, пресування в кільцевий зазор утворений матрицею та голкою і подальше охолодження у воді, при цьому згідно з роботою [5] пресування здійснюють з коефіцієнтом витяжки в межах 5-30 та швидкостями деформування в межах 100-350 мм/с, витримують пресовану трубу на повітрі в межах 35-95 с перед охолодженням у воді, при цьому середній діаметр зерна аустеніту готових труб визначають за формулою:

$$D = 0,39 T_{\text{деф}} + 1,03 \mu - 0,307 V_{\text{пр}} - 1,2 \sigma_B + 0,057 \tau - 288,6, \quad (2)$$

де:

D – середній діаметр зерна аустеніту готових труб, мкм;

$T_{\text{деф}}$ – температура максимальної пластичності деформованого металу, °С;

μ – коефіцієнт витяжки при пресуванні труб;

$V_{\text{пр}}$ – швидкість деформування, мм/с;

σ_B – межа міцності деформованого металу при температурі деформації, кгс/мм²;

τ – час витримки труби на повітрі, с.

В залежності від геометричних розмірів пресованих труб і деформаційних параметрів процесу для обраної марки сталі визначають температуру максимальної пластичності з літературних даних, наприклад за результатами випробувань на гаряче скручування зразків, визначають коефіцієнт витяжки при пресуванні труби, який повинен знаходитись в межах 5-30, для температури максимальної пластичності визначають міцність деформованого металу та час витримування пресованої труби на повітрі і проводять подальше охолодження у воді, а потім розраховують середній діаметр зерна аустеніту пресованих труб згідно з даними роботи [5]. При відхиленні середнього діаметру зерна аустеніту від вимог нормативних документів проводять корегування технологічних параметрів до відповідності значень середнього діаметру зерна аустеніту вимогам вітчизняних та міжнародних стандартів з корозійної стійкості.

Для отримання товарних труб аустенітного класу з регламентованої структурою (величиною зерна 6-7 бали за ГОСТ 5639-82 або ASTM E112)

в роботі [6] запропоновано здійснювати нагрів заготовок перед експандуванням до температури, яка визначається залежністю

$$T_{\text{екс}} = 1180^\circ\text{C} \left(1 + \frac{\ln \mu_{\text{екс}}}{100} \right)$$

(3)

де $\mu_{\text{екс}}$ – коефіцієнт витяжки при експандуванні, який знаходиться в діапазоні 1,0-1,59, а підігрів гільз перед пресуванням до температур $T_{\text{прес}}$, яка в 1,017-1,034 вище, ніж температура нагріву заготовок перед експандуванням.

Дані параметри нагріву заготовок і підігріву гільз встановлені експериментально на пресовій установці 44,0 МН ПрАТ «СЕНТРАВІС

ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» і успішно реалізували при пресуванні труб аустенітного класу з регламентованою зереною структурою.

Для отримання товарних труб аустенітного класу з регламентованої структурою (величиною зерна 6-7 бала за ГОСТ 5639-82 або ASTM E112) в роботі [7] запропоновано здійснювати нагрів за-

готовок перед пресуванням до температури, яка визначається залежністю

$$T = 1140 \left(1 + \frac{\mu_{\text{пр}}}{100} \right) \quad (4)$$

T – температура нагріву заготовок, °С

μ – коефіцієнт витяжки при пресуванні труб, що дорівнює 5-30.

В залежності від геометричних розмірів труб і деформаційних параметрів процесу для обраної марки сталі визначають коефіцієнт витяжки при пресуванні труби, який повинен знаходитись в межах 5 – 30. Далі згідно з корисною моделлю визначають температуру нагріву заготовок, наносять на зовнішню та внутрішню поверхні технологічне мастило та проводять пресування труби в кільцевий зазор, утворений матрицею та голкою і подальше охолодження в воді.

Спосіб реалізовано на пресовій установці 16,0 МН при виготовленні труб наступних типорозмірів: 57х6,0 мм, 89х5,0мм та 88,9 х 19,05 мм. Матеріалом заготовок була аустенітна сталь TP304H.

Коефіцієнти витяжки для труб 57х6,0мм, 89х5,0мм та 88,9х9,05мм склали 30, 20,1 і 8,7 відповідно. Температура нагріву заготовок відповідно корисної моделі склали для труб 57х6.0 мм -1180 °С, для труб 89х5,0 мм - 1170 °С і для труб 88,9х19,05 мм - 1165 °С.

В разі застосування технологічних режимів запропонованих в роботі [7] пресовані труби відповідали вимогам нормативних документів (в тому числі вітчизняних та міжнародних) по середньому діаметру зерна аустеніту, з номером зерна 6-7

Для отримання гарячепресованих труб із заданим ГОСТ 9940-81 рівнем шорсткості внутрішньої поверхні в роботі [8] запропоновано процес пресування проводити з урахуванням розробленого поєднання основних технологічних параметрів (температури, ступеня і швидкості деформації), які забезпечують формування структурних змін в високолегованих і низькопластичних сталях (в тому числі і сплавах аустенітного класу на нікелевої основі).

При пресуванні труб проводиться нагрів заготовок до температури 1130-1180°С, нанесення скломастила, отримання порожнистої гільзи на вертикальному гідравлічному пресі, підігрів гільзи, нанесення скломастила і наступне пресування на трубопрофільном пресі з коефіцієнтом витяжки 3-18 в діапазоні температур 0,88-0,91 температури оплавлення кордонів зерен, при цьому швидкість деформування $V_{\text{пр}}$ – в процесі отримання порожнистої гільзи визначається з відповідності

$$V_{\text{пр}} = \frac{200}{\mu_{\text{пр}}} (1 \pm 0,1), \quad (5)$$

де $\mu_{\text{пр}}$ – коефіцієнт витяжки при прошивці або експандуванні.

Даний спосіб реалізований на ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» при виробництві труб з високолегованого сплаву ВНС53П в діапазоні типорозмірів труб $\varnothing 95 \times 4,5-12$ мм у відповідність з вимогами ГОСТ 9940-81 по шорст-

кості зовнішньої і внутрішньої поверхні ($R_z < 40$ мкм).

З метою забезпечення високої якості зовнішньої поверхні труб за рахунок наявності тонкого нерозривного шару скломастила між інструментом (внутрішньої втулкою контейнера преса) і металом, що деформується, в роботі [9] запропоновано в заготовці, що має форму циліндра, на її бічній поверхні з обох торців виконують потовщення, діаметр які визначають із залежності $D_{yг} = D_k - 1$ мм, а їх довжина $L_{yг}$ складає $0,1 L_{\text{заг}}$, де $D_{yг}$ – діаметр потовщення, мм; D_k – діаметр втулки контейнера в холодному стані, мм; $L_{\text{заг}}$ – довжина заготовки, мм.

Використання запропонованої заготовки для пресування труб із сплавів на основі нікелю, титану та інших матеріалів дозволило виготовляти труби з якістю зовнішньої поверхні, що відповідають вимогам нормативної документації, зокрема вимогам ГОСТ 21975-76.

З метою забезпечення високої якості внутрішньої поверхні гільз в процесі експандування попередньо свердлених заготовок в роботі [10] запропонована оправлення для експандування заготовок спеціальної форми (підвищеної довжини робочої частини), використання якої забезпечує рівномірну подачу скломастила в осередок деформації. При цьому оправлення для експандування заготовок, що складається з носка, конічної і циліндричної частини, відрізняється тим, що довжина конічної частини визначається залежністю:

$$L_{\text{кон}} = \frac{D_{\text{цил}}}{2tg\alpha}, \quad (6)$$

де $L_{\text{кон}}$ – довжина конічної частини оправлення, мм; $D_{\text{цил}}$ – діаметр циліндричної частини оправлення, мм; α – кут конусності оправлення; $\alpha = 18$ ($1 - \lg 2\mu_{\text{экс}}$); $\mu_{\text{экс}}$ – коефіцієнт витяжки при експандуванні.

З метою підвищення якості зовнішньої поверхні труб з аустенітних сплавів на нікелевій і залізонікелевій основі в роботах [11,12] запропоновано використовувати раціональну обкатку зовнішньої поверхні заготовок після свердління зі ступенем деформації 0,005-0,025, при цьому ступінь деформації при обкатці визначається зі співвідношення:

$$\varepsilon = \frac{D_n - D_k}{D_n}, \quad (7)$$

де D_n – зовнішній діаметр до обкатки, мм; D_k – зовнішній діаметр після обкатки, мм.

Крім того, запропоновано після завершення процесу раціональної обкатки на зовнішній поверхні формувати додаткові заглиблення глибиною 0,5 мм, шириною 10 мм при радіусі сполучення 25 мм на відстані 30 мм одного від іншого. Одночасно додаткові поглиблення формуються по гвинтовій лінії.

Використання даної підготовки заготовок до пресування забезпечує:

отримання на поверхні заготовки тонкого шару дрібнозернистої структури деформованого металу, а також ущільнення і закачування дефектів пористої структури;

додаткові поглиблення на зовнішній поверхні заготовок дозволяють захоплювати і рівномірно розподіляти великий обсяг мастильного матеріалу;

формування додаткових заглиблень на зовнішній поверхні по гвинтовій лінії забезпечує високу технологічність процесу пресування металу і рівномірне спрацьовування інструменту (втулок контейнера трубопрофільних преса).

В роботі [13] запропоновано вдосконалення способу пресування труб з аустенітних сплавів на основі нікелю, титану та інших важкодеформованих матеріалів шляхом визначення раціональних деформаційних параметрів експандуванні попередньо свердлених заготовок, що забезпечують високу пластичність металу при експандуванні і якість зовнішньої і внутрішньої поверхні заготовок (гільз).

При цьому в способі виготовлення труб із застосуванням гарячого експандування попередньо свердлених заготовок і пресування труб за один цикл преса, що включає нагрів заготовок, нанесення на зовнішню і внутрішню поверхні технологічного мастила, послідовні операції роздачі попередньо свердлених заготовок з конічним розширенням отвору в торці заготовки, зверненого до пресшайби, запропоновано використовувати спеціальний експандуючий наконечник і пресування труби в кільцевий зазор, утворений матрицею і голкою трубопрофільного преса, а експандування заготовок виробляють прошивною групою трубопрофільного преса зі ступенем деформації 10-20%, при цьому величину ступеня деформації визначають із залежності:

$$\varepsilon = \frac{D_k^2 - d_{\text{экс}}^2}{D_3^2 - d_{\text{св}}^2}, \quad (8)$$

де D_k – діаметр контейнера трубопрофільних преса, мм; $d_{\text{экс}}$ – діаметр калібрує експандуючого наконечника, мм; D_3 – діаметр заготовки, мм; $d_{\text{св}}$ – діаметр свердління заготовки під експандуванні, мм.

Вищевказаний захід реалізовано при виробництві труб з аустенітних сталей і сплавів на нікелевій і залізонікелевій основі в виробничих умовах на ПрАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН» і ТОВ ВО «Оскар».

В роботі [10] вирішена задача вдосконалення способу гарячого пресування труб з важкодеформованих металів шляхом зміни параметрів нагріву порожнистої заготовки за рахунок чого забезпечується регламентування високого рівня пластичності металу готових труб та їх відповідність вимогам нормативних документів (а саме, вимогам міжнародних стандартів, ГОСТ і ТУ), а також зниження витратного коефіцієнту металу.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі виробництва труб з важкодеформованих матеріалів, у тому числі зі сплавів на основі нікелю, титану, цирконію, методом гарячого пресування попередньо просвердлених заготовок, що включає нагрів заготовок, нанесення на зовнішню та внутрішню поверхні технологічного мастила, пресу-

вання труби в кільцевий зазор, який утворюється матрицею та голкою, відповідно до корисної моделі температуру нагріву заготовки визначають за формулою:

$$T_n = T_{\text{пл}} + K \left(\frac{1000}{S_r} - 20 \right), \quad (9)$$

де $T_{\text{пл}}$ – температура максимальної пластичності деформованого металу, $^{\circ}\text{C}$;

K – коефіцієнт пропорційності ($K=6$ – для вуглецевих, легованих та аустенітних нержавіючих сталей, $K=10$ – для феритних нержавіючих, титанових, нікелевих та цирконієвих сталей);

S_r – товщина стінки гільзи, мм.

Технічним результатом запропонованого способу є забезпечення мінімальних силових умов пресування та високого рівня механічних властивостей готової труби, які відповідають вимогам нормативної документації, при одночасному зниженні витратного коефіцієнту металу.

Даний результат досягається завдяки запропонованим умовам нагріву заготовок, а саме залежність температури нагріву від температури максимальної пластичності й товщини стінки гільз, які дозволяють отримати механічні властивості у відповідності до вимог нормативних документів, а саме ГОСТ, ТУ та ASTM. В основі даної роботи лежить вирішення задачі вдосконалення способу гарячого пресування труб з важкодеформованих матеріалів шляхом зміни параметрів нагріву порожнистої заготовки за рахунок чого забезпечується регламентування високого рівня пластичності металу готових труб та їх відповідність вимогам нормативних документів (а саме, вимогам міжнародних стандартів, ГОСТ і ТУ), а також зниження витратного коефіцієнту металу.

В роботі [15] вирішена задача вдосконалення способу гарячого пресування труб з важкодеформованих матеріалів шляхом зміни параметрів нагріву порожнистої заготовки за рахунок чого забезпечується регламентування високого рівня пластичності металу готових труб та їх відповідність вимогам нормативних документів (а саме, вимогам міжнародних стандартів, ГОСТ і ТУ), а також зниження витратного коефіцієнту металу.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі виготовлення труб з важкодеформованих матеріалів, у тому числі корозійностійких сталей і сплавів на основі нікелю, титану, цирконію, методом гарячого пресування порожнистих заготовок, що включає нагрів заготовок, нанесення на зовнішню та внутрішню поверхні технологічного мастила, пресування труби в кільцевий зазор, який утворюється матрицею та голкою, відповідно до розробок роботи [15] температуру нагріву заготовки (T_n) визначають за формулою:

$$T_n = T_{\text{пл}} - K \left[10 - \frac{100}{\mu_{\text{пр}}} \right], \quad (10)$$

де $T_{\text{пл}}$ – температура максимальної пластичності деформованого металу, $^{\circ}\text{C}$;

K – коефіцієнт пропорційності ($K=10$ – для вуглецевих, легуваних та аустенітних нержавіючих сталей, $K=6$ – для феритних нержавіючих, титанових, нікелевих та цирконієвих сталей)

$\mu_{пр}$ – коефіцієнт витяжки при пресуванні.

Рекомендовані параметри процесу нагріву гільз були визначені експериментально.

Технічним результатом запропонованих режимів є забезпечення мінімальних силових умов пресування та високого рівня механічних властивостей готової труби, які відповідають вимогам нормативної документації, при одночасному зниженні витратного коефіцієнту металу.

В роботі [16] вдосконалено спосіб гарячого пресування труб з важкодеформованих матеріалів шляхом зміни параметрів нагрівання і швидкості деформування при експандуванні попередньо свердленої заготовки за рахунок чого забезпечується регламентування високого рівня якості внутрішній поверхні готових труб та їх відповідність вимогам нормативних документів (а саме, вимогам міжнародних стандартів, ГОСТ і ТУ), а також зниження витратного коефіцієнту металу.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі виготовлення труб з важкодеформованих металів, в тому числі сплавів на основі нікелю, титану, цирконію, що включає нагрівання попередньо свердлених заготовок, нанесення технологічного мастила, їхнє експандування, підігрівання отриманих гільз до температури яка дорівнює $0,8 T_{пл}$, ($T_{пл}$ – температура оплавлення меж зерен) – температура максимальної пластичності, пресування в кільцевий зазор, який утворено матрицею та голкою, коли нагрівання заготовок перед експандуванням здійснюють до температури (T_e), яку визначають за формулою $T_e = 1080^{\circ}\text{C} \left(1 + \frac{\ln \mu_e}{3}\right)$, де μ_e – коефіцієнт витяжки при експандуванні, що дорівнює 1,0-1,3, а швидкість деформування при експандуванні визначають за формулою $V=180/\mu_e$.

Рекомендовані параметри процесу нагріву та швидкості деформування гільз були визначені експериментально.

Результатом запропонованого способу є забезпечення якості внутрішній поверхні готової труби, які відповідають вимогам нормативної документації, при одночасному зниженні витратного коефіцієнту металу, який досягається завдяки запропонованим умовам нагріву заготовок, а саме залежність температури нагріву від коефіцієнту витяжки при експандуванні, а також швидкості деформування при експандуванні, що дозволяють отримати характеристики якості внутрішній поверхні пресованих труб у відповідності до вимог нормативних документів, а саме ГОСТ, ТУ та ASTM.

Для забезпечення можливості виготовлення труб підвищеної довжини також зменшення витратного коефіцієнту металу в роботі [17] вдосконалено

спосіб виробництва труб з важкодеформованих матеріалів, у тому числі зі сплавів на основі нікелю, титану, цирконію, методом гарячого пресування порожнистих заготовок, що включає нагрів заготовок, нанесення на зовнішню та внутрішню поверхні технологічного мастила, пресування труби в кільцевий зазор, який утворюється матрицею та голкою, відповідно до даних роботи [17] пресування здійснюють на голці, яка по довжині має різний діаметр, де передній кінець $l_{пк}$ становить 0,1 - 0,2 загальної довжини l_r , та діаметр $d_{пк}$ який менше діаметру основного тіла голки d_T , що формує внутрішню поверхню труби, при цьому діаметр переднього кінця голки визначають із спів-

відношення $\ln \mu_{пк} = \frac{1}{2} \ln \mu_T$, де: $\mu_{пк}$ – коефіцієнт витяжки при пресуванні переднього кінця труби; μ_T – коефіцієнт витяжки при пресуванні основної частини труби, при

$$\mu_T = \frac{D_K^2 - d_T^2}{D_T^2 - d_T^2}, \quad \mu_{пк} = \frac{D_K^2 - d_{пк}^2}{D_T^2 - d_{пк}^2}. \quad \text{де: } D_K -$$

діаметр контейнера преса, мм; D_T – діаметр труби, мм; d_T – діаметр тіла голки, мм; $d_{пк}$ – діаметр переднього кінця голки, мм.

Рекомендовані параметри процесу пресування заготовок були визначені експериментально.

Результатом впровадження запропонованого способу є забезпечення раціональних силових умов пресування при одночасному зниженні витратного коефіцієнту металу.

Висновки.

Розроблено ряд технічних рішень по визначенню математичної залежності температур нагрівання заготовок від деформаційних параметрів

(коефіцієнта витяжки при пресуванні труб), швидкості пресування, температури максимальної пластичності), залежності величини зерна аустеніта від параметрів технології пресування (температури нагрівання заготовок, геометричних параметрів заготовок та інструменту, тимчасового опору разриву) та інші. Розроблено ряд технічних рішень по визначенню математичної залежності температур нагрівання заготовок від деформаційних параметрів. Розроблені режими реалізовані при розробки технології виробництва труб на вітчизняних та іноземних пресових установках з забезпеченням вимог нормативної документації.

Література

1. Прессование стальных труб и профилей / Г. И. Гуляев, А. Е. Притоманов, О. П. Дробич и др. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.
2. Горячее прессование труб и профилей / Ю. В. Манегин, А. Е. Притоманов, Т. Шпиттель, А. Кнаушнер. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.

3. Медведев М. И., Гуляев Ю. Г., Чукмасов С. А. Совершенствование процесса прессования труб. – М.: Металлургия, 1986. – 149 с.
4. А. с. 1561302 (СССР) Способ изготовления изделий из аустенитных сталей / Медведев М. И., Блощинский Г. П., Притоманов Л. Е. и др. Оpubл. в Б. И. 1988. – №29. – с. 27.
5. Пат. 148925 Україна. Спосіб пресування труб з аустенітних сталей МПК(2021.01) В21С 23/00, В21С 37/00/ Медведев М.І., Фролов Я.В., Шифрін Е.І., Бобух О.С.; Володілець Національна Металургійна Академія України.-№ u 2021 02667; заявл. 21.05.2021, опубл. 29.09.2021, Бюл №39.
6. Патент №77963. Україна, МПК В21С 23/08 Спосіб виготовлення труб 23/з аустенітних сталей / Приватне Акціонерне Товариство «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН», Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади; Панченко С. А., Горгуль С. І., Медведев М. І. та ін. – у 2012 06408. – Заявл. 28.05.2012. Опубл. 11.03.2013 / Офіційний бюл. №5.
7. Пат.151101 Україна. Спосіб виготовлення труб з аустенітних сталей МПК (2022.01) В21/00, В21С 37/00, В21С 23/02 (2006.01 / Медведев М.І., Фролов Я.В., Бобух О.С., Самсоненко А.А.; Володілець Український державний університет науки і технологій - № U 2022 00340; заявл.28.01.2022. опубл.01.06.2022, Бюлл.№22
8. Патент 18726, Україна, МПК В21С 23/08 Спосіб виготовлення труб з високолегованих сталей та сплавів / Державний науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості (ВНІПІ), Нікопольський Південно-трубний завод (НПТЗ); Блощинський Г. П., Притоманов О. Е., Царьков О. К., Медведев М. І. та ін. – 96240157 Заявл. 13.09.93. Опубл. 25.12.97 / Офіційний бюл. №6
9. Пат. 142540 України. Заготовка для пресування труб. МПК (2020.01) В21С23/00 / Фролов Я. В., Медведев М. І., Бобух О. С., Андреев В. В.; Блощинський Г. П.; заявник та власник Національна металургійна академія України. – № u202000119; заявл. 08.01.2020; опубл. 10.06.2020, Бюл. №11. – 5 с. – <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1438997/>.
10. Пат. 143981 України. Оправка для експандування заготовок. МПК (2020.01) В21С23/00 G01L1/04 / Фролов Я. В., Медведев М. І., Бобух О. С., Андреев В. В., Бондаренко С. В.; Блощинський Г. П.; заявник та власник Національна металургійна академія України. – № u202001201; заявл. 24.02.2020; опубл. 25.08.2020, Бюл. №16. – 5 с. – <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1449472/>.
11. Пат. 144171 України. Спосіб пресування труб із важкодеформованих металів. МПК В21С 23/08 (2006.01) / Проїдак Ю. С., Медведев М. І., Фролов Я. В., Бобух О. С., Даїрбекова Г. С.; Жаслан Р. К.; заявник та власник Національна металургійна академія України; Карагандінській государственний індустріальний університет. – № u 2020 01904; заявл. 18.03.2020; опубл. 10.09.2020, Бюл. №17. – 7 с. – <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1451534/>.
12. Патент KZ №5429 Способ прессования труб из труднодеформируемых металлов. МПК В21С 23/08/ Проїдак Ю.С., Медведев М.И., Фролов Я.В., Бобух А.С.,---ДаирбековаГ.С.,Жаслан Р.К., Заявитель и владелец НМетАУ и КарГИУ(KZ) Заявка №2020/0369 Опубл. 11.12.2020 бюл №50 (<https://gosreestr.kazpatent.kz/utilitymodel/Detail/doc?numbr=326488>)
13. Пат. 129083 Україна. Спосіб виготовлення труб з металів, які важко деформуються. МПК (2018.01) В21С 23/00, В21С 37/00 / Проїдак Ю. С., Фролов Я. В., Медведев М. І., Безпалова Н. О., Блощинський Г. П.; Куценко М. О.; заявник та власник Національна металургійна академія України. - № u201802826; заявл. 20.03.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. №20. – 6 с. – <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/240037/>.
14. Пат. 148267 Україна. Спосіб виготовлення труб з важкодеформівних металів.МПК В21С 23/08 (2006.01) Медведев М.І., Фролов Я.В., Шифрін Е.І., та інш .; заявник та власник Національна металургійна академія України. № U 2021 01267, заявл.15.03.2021 опубл. 21.07.2021 Бюлл.№29
15. Пат. 151552 Україна . Спосіб виготовлення труб з важкодеформівних металів.МПК В21С 23/00, В 21С 37/06 Медведев М.І., Бобух О.С., Самсоненко А.А., Березос В.О.Володілець Український державний університет науки і технологій - № U 2022 01221; заявл.14.04.2022,опубл.10.08.2022, Бюлл.№32
16. Пат.151902 Україна Спосіб виготовлення труб з важкодеформівних металів.МПК В21С 23/00, В 21С 37/00 Медведев М.І., Бобух О.С., Самсоненко А.А., Березос В.О.Володілець Український державний університет науки і технологій - № U 2022 01498; заявл.10.05.2022, опубл.10.08.2022, Бюлл.№39.
17. Пат.151620 Україна Спосіб виготовлення труб з важкодеформівних металів.МПК В21С 23/00, В 21С 37/00 Медведев М.І., Бобух О.С., Самсоненко А.А., Березос В.О.Володілець Український державний університет науки і технологій - № U 2022 01672 заявл. 24.05.2022, опубл.17.08.2022, бюлл.№33

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| КРИВЕНКО В.В., ГРИШЕНКО С.Г., ОЛЬШАНСКИЙ В.И., ФІЛІППОВ І.Ю., ЗАМКОВОЇ О.В., ШЕПЛЯКОВ І.А., ОВЧАРУК А.Н. МЕТАЛУРГІЙНА ОЦІНКА МАРГАНЦЕВОРУДНОЇ СИРОВИНИ ЕЛЕКТРОТЕРМІЇ ФЕРОСПЛАВІВ | 5 |
| КРЯЧКО Г.Ю., СІГАРЬОВ Є.М. ПРО ПІДХОДИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ | 11 |
| НОСКО М.І., КОНОВОДОВ Д.В., САМСОНЕНКО А.А., БОБУХ О.С. АНАЛІЗ ФОРМОЗМІНИ СТАЛЕВИХ СІТОК В АЛЮМІНІЄВОМУ КОМПОЗИТІ В ПРОЦЕСЕ ПРОКАТКИ-З'ЄДНАННЯ | 19 |
| Є.В. СИНЕГІН, С.В. СУХОВЕЦЬКИЙ АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОМКОВШІ МБЛЗ | 25 |
| СЕЛЕГЕЙ А.М., ІВАЩЕНКО В.П., БЕЗШКУРЕНКО О.Г. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ І ОБЛАДНАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ | 30 |
| М. І. МЕДВЕДЄВ, О. С. БОБУХ, УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОПІ ВИРОБНИЦТВА ТРУБ З КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ І ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ. | 46 |
| ЗМІСТ | 52 |
| CONTENT | 53 |

CONTENT

| | |
|---|----|
| КРИВЕНКО В.В., ГРИШЕНКО С.Г., ОЛЬШАНСКИЙ В.И., ФІЛІППОВ І.Ю., ЗАМКОВОЇ О.В., ШЕПЛЯКОВ І.А., ОВЧАРУК А.Н. | 5 |
| МЕТАЛУРГІЙНА ОЦІНКА МАРГАНЦЕВОРУДНОЇ СИРОВИНИ ЕЛЕКТРОТЕРМІЇ ФЕРОСПЛАВІВ | 5 |
| КРИВЕНКО В.В., ГРИШЕНКО С.Г., ОЛЬШАНСКИЙ В.И., ФІЛІППОВ І.Ю., ЗАМКОВОЇ О.В., ШЕПЛЯКОВ І.А., ОВЧАРУК А.Н. | 5 |
| МЕТАЛУРГІЙНА ОЦІНКА МАРГАНЦЕВОРУДНОЇ СИРОВИНИ ЕЛЕКТРОТЕРМІЇ ФЕРОСПЛАВІВ | 5 |
| КРЯЧКО Г.Ю., СІГАРЬОВ Є.М. | 11 |
| ПРО ПІДХОДИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ | 11 |
| KRYACHKO G., SIGAREV E. | 11 |
| ABOUT APPROACHES TO DESIGN RATIONAL PROFILE OF BLAST FURNACES | 11 |
| НОСКО М.І., КОНОВОДОВ Д.В., САМСОНЕНКО А.А., БОБУХ О.С. | 19 |
| АНАЛІЗ ФОРМОЗМІНИ СТАЛЕВИХ СІТОК В АЛЮМІНІЄВОМУ КОМПОЗИТІ В ПРОЦЕСЕ ПРОКАТКИ-З'ЄДНАННЯ | 19 |
| M. NOSKO, D. KONO VODOV, A. SAMSONENKO, O. BOBUKH | 19 |
| ANALYSIS OF STEEL MESHES DEFORMATION INSIDE ALUMINUM MATRIX DURING ROLL BONDING | 19 |
| Є.В. СИНЕГІН, С.В. СУХОВЕЦЬКИЙ | 25 |
| АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ У ПРОМКОВШІ МБЛЗ | 25 |
| Y.V. SYNEHIN, S.V. SUKHOVETSKYI | 25 |
| ANALYTICAL STUDIES AND CHARACTERISTICS OF STEEL REFINING METHODS IN THE CCM TUNDISH | 25 |
| СЕЛЕГЕЙ А.М., ІВАЩЕНКО В.П., БЕЗШКУРЕНКО О.Г. | 30 |
| АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ І ОБЛАДНАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ | 30 |
| SELEGEI A.M., IVASHCHENKO V.P., BEZSHKURENKO O.H. | 30 |
| ANALYSIS OF MODERN THEORETICAL AND TECHNLOGCAL METHODS AND EQUIPMENT AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF LOADING OF BLAST FURNACES | 30 |
| М. І. МЕДВЕДЄВ, О. С. БОБУХ, , | 46 |
| УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОПІ ВИРОБНИЦТВА ТРУБ З КОРОЗИЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ І ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ | 46 |
| M. MEDVEDEV O. BOBUKH | 46 |
| IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF PIPES FROM CORROSION-RESISTANT STEELS AND TITANIUM ALLOYS. | 46 |
| ЗМІСТ | 52 |
| CONTENT | 53 |