

УДК 669.18

Рубан В.О., Стоянов О.М.

Аналітичні дослідження технології рафінування і легування металу на установці «ківш-піч»

Актуальність: Обробка металу на установці «ківш-піч» (УКП) є одним з найважливіших етапів позапічної обробки сталі, ключовими операціями якої є десульфуріація, легування, видалення і модифікування неметалевих включень, які пов'язані з затратами теплоти, що компенсується шляхом використання енергії електричної дуги і забезпечує задану температуру перед розливанням. Розвиток технологій позапічної обробки сталі на установці «ківш-піч» обумовлений необхідністю підвищення якості та конкурентоспроможності металургійної продукції шляхом зниження її матеріало- і енергоємності. Позапічна обробка сталі на УКП дозволяє регулювати хімічний склад розплаву в вузькому діапазоні (мікролегування), підтримувати задану температуру сталі певного сортаменту перед розливанням на машинах безперервного лиття заготівки (МБЛЗ), що в свою чергу впливає на формування структури та властивостей кінцевого продукту. Аналітичні дослідження роботи установки «ківш-піч» спрямовані на оптимізацію процесу позапічної обробки сталі, зменшенні втрат енергії та матеріалів, підвищенні продуктивності та якості кінцевої продукції. Таким чином актуальність досліджень ковшової обробки металу, можуть сприяти розвитку нових технологій та матеріалів, що забезпечать більш ефективну виробничу діяльність.

Мета роботи: Аналітичний огляд науково-технічної літератури, вітчизняних та закордонних патентів, присвячених розвитку технологій позапічної обробки сталі на установці «ківш-піч».

Наукова новизна: Встановлені основні вектори розвитку технологій і обладнання позапічної обробки сталі на установці «ківш-піч», які стосуються використання графітованих порожнистих електродів. Визначено позитивний вплив використання порожнистих електродів, на роботу установки «ківш-піч» за рахунок стабільного існування розряду електричної дуги, унеможливлення процесу розриву шару шлаку та покращення умов передачі теплоти безпосередньо металевому розплаву.

Наукові та практичні результати: виходячи з огляду технологій обробки сталі на установці «ківш-піч» використання графітованих порожнистих електродів в подальшому дасть змогу визначити раціональні втрати газу, що подається каналом електрода, провести дослідження його впливу на параметри лунки піделектродної зони та теплові режими роботи агрегату.

Ключові слова: установка «ківш-піч», графітований порожнистий електрод, рафінування, легування, модифікування, електрична дуга.

Вступ

У сучасному металургійному виробництві технології позапічної обробки сталі створює унікальні можливості щодо суміщення окремих елементів технологічної схеми «кисневий конвертер – МБЛЗ» в єдиний енерго- та ресурсозберігаючий комплекс.

При організації енергоефективного циклу виробництва сталі важливим завданням є поєднання процесу виплавки сталі з практично безперервним процесом її розливання на МБЛЗ при мінімізації втрат ентальпії в металі через теплові втрати при транспортуванні та обробці на установці «ківш-піч».

Використання новітніх матеріалів та технологій є одним із можливих напрямків розвитку виробництва сталі, що сприяють зменшенню витрат на енергопостачання та підвищенню продуктивності обладнання. Дослідження в області автоматизації та інтелектуалізації агрегатів позапічної обробки сталі також можуть покращити процес та зменшити кількість відхилень у якості кінцевої продукції [1].

Роль шлакового покриву під час обробки сталі на установці «ківш-піч»

Швидкість формування рідкого рафінуючого шлаку із твердих шлакоутворюючих матеріалів є важливою характеристикою роботи установки «ківш-піч». Швидке формування гомогенного (рідкорухливого) шлаку заданого складу, при рівнозначній тривалості його контакту з сталю, забезпечує кращі кінетичні умови для процесу десульфу-

рації металу [2]. Дані авторів [3] свідчать про те, що синтетичні шлаки досить довго зберігають рідкорухливий стан, який дозволяє ефективно використовувати їх для рафінування металу при позапічній обробці сталі.

У роботі [4] наведено результати досліджень щодо визначення швидкості формування рафінувального шлаку в 120-тонному ковші з сталю, яку розкисляли феросиліцієм. Кількість шлаку в ковші визначали за фактичною вагою присадок в ківш, а кількість пічного шлаку, що потрапив до агрегату, розраховували по зміні хімічного складу ковшового шлаку при постановці на «ківш-піч» і після присадок шлакоутворюючих та розкислювачів. Показано, що на десульфуруючу здатність шлаку впливає не лише його хімічний склад, а й кількість шлаку (кратність), що забезпечується кількістю присадок шлакоутворюючих. А з іншого боку, в роботі [2] показано, що при розчиненні шлакоутворюючих матеріалів на основі вапна витрачається досить велика кількість теплоти, що негативно впливає на техніко-економічні показники роботи установки «ківш-піч» при невиправданій збільшенні кількості шлаку (кратності). На практиці кратність шлаку зазвичай повинна становити 2,0 – 3,5%.

За літературними даними [2, 5], при рафінуванні сталі рідкими синтетичними шлаками для глибокої десульфуріації рекомендована його кількість в ковші 3 – 5 % від маси металу, тобто кратність шлаку повинна бути не менше 3. Така обробка дозволяє отримати ступінь десульфуріації сталі в досить широкому діапазоні 30 – 70 % на етапі випус-

ку плавки з конвертера в сталерозливний ківш. Також при роботі установки «ківш-піч», під час нагрівання електричною дугою, для забезпечення стійкого горіння дуги та зменшення тепловтрат, що відходять в атмосферу печі, слід забезпечувати товщину шару шлаку не менше довжини дуги.

В роботах [6, 7] зазначено, що при довжині електричної дуги 160 мм максимальна товщина шару шлаку має бути не більше 195 мм. У разі якщо проводиться короткочасне нагрівання металу і відсутня необхідність проведення десульфурзації металу, товщина шлаку повинна бути близько 1,5 довжини дуги. Якщо товщина шлакового покриву більше 1,6-1,8 довжини дуги, частина струму, що проходить через електроди, замикає їх через шлак, замість того, щоб проходити через електричні дуги і рідкий метал. При цьому шлак різко перегрівається.

Авторами роботи [6] визначено необхідну масу флюсу для різних умов фактичного формування шлаку в період обробки металу на УКП. Вивчено хімічний склад шлаку в період обробки металу на УКП та вплив окремих його компонентів на стійкість шлакового поясу ковша. Встановлено, що вміст MgO у шлаку на плавках поточного виробництва не опускається нижче 8,0 %. Такий вміст є достатнім, щоб не допустити додаткового зносу футерування ковша, і дозволяє відмовитися від використання магнієвого порошку при наведенні шлаку, що рафінує.

Товщина шлакового шару впливає на поглинання металом вуглецю з електродів. При тонкому шарі шлаку металом поглинається близько 2,0-2,5 ppm/хв вуглецю, а при збільшенні шару шлаку більше 1,6 – 1,8 довжини дуги електричний струм частково починає проходити через шлак, через що його температура може досягти 1800–1900 °C а швидкість нагріву металу різко знижується [5].

Авторами роботи [2] показано, що основні шлаки мають значну електропровідність, причому CaO збільшує електропровідність, а SiO₂ і Al₂O₃ її зменшують. Зі збільшенням товщини шлакового шару частина електричного струму замикає електроди через шлак замість того, щоб проходити через електричні дуги та рідкий метал. У цьому випадку шлак починає швидко перегріватися і при певній товщині шару його температура може досягати 1800-1900 °C, при цьому швидкість нагрівання сталі різко зменшується, незважаючи на безперервне підведення електроенергії, а передача теплоти до металу здійснюється тільки за рахунок перемішування зі шлаком.

За даними роботи авторів [6, 7], рекомендується, при тонкому шарі шлаку, працювати на знижених ступенях нагріву металу, це дещо зменшує витрати електроенергії і певною мірою покращує техніко-економічні показники процесу. Також авто-

ри рекомендують для економічної роботи агрегату, товщину шлакового шару на 20–25% більше довжини дуги.

Теплова робота установки «ківш-піч»

Порядок та час проведення операцій визначають витрати енергетичних та матеріальних ресурсів, тому схеми організації технологічних процесів на установці «ківш-піч» безперервно вдосконалюються.

Компенсація теплових втрат на установці «ківш-піч» металу здійснюється за рахунок його підігріву розрядом електричної дуги змінного або постійного струму.

На розвитку концепції побудови установок «ківш-піч» фокусують зусилля провідні європейські виробники металургійного обладнання: «SMS», «Demag», «VAI-Fuchs» (Німеччина), «Danieli» (Італія). Всі ці підприємства свої перші агрегати «ківш-піч» збудували на початку чи середині 80-х років минулого століття.

Як показує практика роботи низки металургійних підприємств, загальне зниження температури в ході позапічної обробки сталі масового сортаменту становить 50–60 °C і більше, при виробництві спеціальних марок сталі з технологією одноразового або подвійного вакуумування від 150 °C до 250–300 °C, відповідно [8].

Протягом останніх двох десятиліть УКП безперервно вдосконалювалися як у технологічному, так і в конструкційному плані. Це дозволило досягти дуже високих показників які стосуються якості сталі, та енерго- і ресурсозбереження при її позапічній обробці і розливанні. Більше того, на практиці переконливо доведено високу конкурентоспроможність УКП практично для всього діапазону місткості сталерозливних ковшів які використовуються на сучасних металургійних підприємствах.

За даними робіт [8 – 10] швидкість нагріву при позапічній обробці металу на установках «ківш-піч» складає 2–5 °C/хв і залежить від ряду технологічних параметрів: акумуляція теплоти і окислення електродів; кількість і швидкість введення шлакоутворюючих матеріалів; витрат та режиму продувки аргоном; акумуляція теплоти кладки; товщини шару шлакового покриву; середньої температура розплаву; стану продувних блоків.

Установка «ківш-піч» – великий споживач електричної енергії. Тому підвищення ефективності використання УКП наразі є актуальними у світлі проблем із виробництвом та розподілом електроенергії. Для підвищення ефективності використання електроенергії необхідно розглянути розподіл та перетворення енергії в агрегаті. В роботі [11] показано основні статті енергетичного балансу установки «ківш-піч» представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Енергетичний баланс установки «ківш-піч».

Стаття балансу	Ємність ковша 160 т.	
	ГДж	%

Активна електроенергія	22,95	100
Витрати енергії в короткій мережі	2,52	11
Втрати енергії з поверхні розплаву та шлаку	5,01	21,8
Втрати енергії через футерування ковша	2,55	11
Нагрівання розплаву, реакції хімічних добавок	4,15	18
Енергія на нагрів металу та шлаку	8,72	38

У той же час у роботі [2], крім вищевказаних, наводяться додаткові статті теплових втрат на УКП (наприклад, з газами, що відходять, і охолоджувальною водою), величина яких коливається в межах від 4 до 29 %. Значення теплового ККД установок «ківш-піч» за цими даними перебуває у межах 43–47 % і перевищує середню величину цього параметра [12].

Електрична енергія, що підводиться до установки «ківш-піч», перетворюється на теплову, яка частково втрачається у короткій мережі та електрородах. Крім того, відбуваються суттєві теплові втрати з газами, що відходять, охолоджуючою водою, а також із поверхні ковша [8].

Авторами робіт [13, 14] проведені дослідження, які направлені на розрахунок теплового балансу агрегатів позапічної обробки металу. Зазначено, що швидкість нагріву розплаву при товщині шлаку в ковші 150–200 мм на 16-му ступені напруги трансформатора складає 4 °C/хв, а на 12-му – близько 3 °C/хв. Проведені дослідження показали, що така швидкість нагрівання спостерігається далеко не завжди і пов'язана зі зміною інтенсивності теплообміну в системі дуга-шлак-метал. Спостерігаються відхилення швидкості нагрівання близько ± 30 %, викликані різними причинами і, у тому числі, погіршенням умов горіння дуг при недостатній товщині шлаку, а також відхиленнями в роботі системи управління дуговою установкою.

За даними роботи [6], підтверджено, що ступінь засвоєння електроенергії залежить від умов теплообміну між електричною дугою та металом, які залежать, у свою чергу, від форми, розміру та характеру роботи дуги. Дані параметри визначаються параметрами роботи електродугового пристрою (ЕДП) агрегату. При роботі ЕДП між графітованими електродами та металом утворюється стовп дуги, що складається із суміші нейтральних газових частинок, електронів, іонів та атомів, пари матеріалу електродів та металу.

При роботі електрода розряд електричної дуги постійно переміщується по всій площині торця електроду, при цьому напрямок та місце контакту з поверхнею ванни рідкого металу теж постійно змінюється. Причому такі коливання дуги та місця її контакту поверхнями не можливо попередити заздалегідь. Таким чином, постійне переміщення дуги з одного місця на інше змінює характер горіння дуги, впливає на стійкість її горіння та теплообмін із розплавом сталі. Співвідношення довжини дуги та товщини шару покривного шлаку на поверхні металу має значний вплив на ефективність роботи ЕДП та стійкість горіння дуги, так як при

цьому змінюються умови теплообміну дуги з навколишнім середовищем [6].

На думку авторів роботи [15], визначення оптимальної кількості шлаку проводиться дослідним шляхом і підбирається для кожної марки сталі, при висоті шару шлаку на 25–30% більше довжини дуги, оскільки теплові втрати з поверхні дуги, яка виступає за межі шару шлаку, є більшими, ніж з поверхні дуги, яка повністю занурена в шлак.

В роботах авторів [16, 17], визначено приріст температури при нагріванні на різних ступенях, що дозволило оцінити коефіцієнт засвоєння електричної енергії розплавом. Чисельне дослідження режимів нагріву здійснювали для умов рівномірного продування ковшової ванни аргоном з інтенсивністю від 100 до 2800 л/хв на ківш. Протягом 5 хвилин здійснюється нагрівання металу зі швидкістю 1,6 – 3,9 °C/хв від 6-го до 10-го ступеню роботи трансформатора відповідно. Визначено, що різниця між максимальною та мінімальною температурою в шарах металу знижується від поверхні ванни до днища ківша та змінюється, залежно від досліджуваних режимів продування та нагріву, у поверхневому шарі від 12,8 до 55,1 °C, на половині висоти від 7,4 до 26,6 °C та від 5,0 до 15,5 °C у придонному шарі.

Режим роботи електродугового пристрою визначає ефективність нагрівання сталі на установці «ківш-піч». При цьому основними факторами, що впливають на ефективність роботи ЕДП, є стійкість і стабільність горіння електричних дуг і, як наслідок, ефективність передачі тепла від них металевому розплаву. Тобто, вирішивши завдання підвищення ефективності роботи ЕДУ, можна знизити витрати електроенергії при позапічній обробці сталі та зменшити тривалість її обробки.

Використання графітованих порожнистих електродів при позапічній обробці сталі на УКП

Оскільки основним джерелом теплової енергії для нагріву сталі при позапічній обробці є електрична дуга, яка утворюється за допомогою графітованих електродів. Вартість електродів при виплавці сталі складає одну з істотних витратних статей готової продукції, тому актуальним завданням при зниженні собівартості готової продукції є зменшення питомої витрати електродів.

В процесі високотемпературного нагріву ГЕ відбувається його фізичне і хімічне руйнування, внаслідок утворення локально перегрітих зон в об'ємі електроду, а також окислення його поверхні газами які потрапляють в зону високих температур [18].

Автори роботи [19] приводять дані щодо вартості електродів при виплавці сталі і показують, що цей показник становить 8–12,5 % в собівартості сталі і залежить, в першу чергу, від витрат електроду. При цьому приведені дані характерні лише для виплавки металу в електропечах і не можуть бути в повній мірі використані при обробці металу на установці «ківш-піч». Варто зазначити, що графіт має низьку стійкість до окислення, взаємодія з киснем розпочинається при температурі більш 500 °С.

Результати досліджень [20] показують, що основними факторами, які визначають витрату електроду є фізичне і хімічне руйнування. До фізичного відносять – теплові і механічні навантаження, а до хімічного – окислення бічної поверхні, знос торця електрода внаслідок сублімації графіту в дузі. Тоді як за даними [21], зазначено, що руйнування відбувається внаслідок окислення атмосферою печі бічної поверхні електрода і розкисненого торця яке складає 55–75%, електричної ерозії робочої поверхні електрода, по якій переміщується активна пляма дуги – 15–25%, механічного руйнування – 10–20%.

На початку 50-х років були проведені перші експерименти з використанням графітованих порожнистих електродів (ГПЕ) на електродугових сталеплавильних печах, що забезпечило стабілізацію електричної дуги та зниження рівня науглецювання металу. Дослідження проводилися на печах ємністю 5–125 т з відношенням $d_{\text{отв}}/d_{\text{ел}}$ в межах 0,05–0,45 ($d_{\text{отв}}$ – діаметр отвору електрода, $d_{\text{ел}}$ – діаметр електрода). За цією технологією через порожнистий електрод подається захисний газ (аргон, азот або їх суміші), що знижує знос електродів. Електрична дуга концентрується на кромці внутрішнього отвору порожнистого електрода та стає масивною, займаючи практично вертикальне положення [22, 23].

Авторами роботи [24] відзначено підвищення стійкості склепіння установки «ківш-піч» при використанні графітованого порожнистого електрода на 9% та стійкості футерування стін на 12%. Стійкість дуги можна розглядати як її здатність зберігати постійний електричний опір на протязі якогось часу, на яку впливають наступні фактори: склад атмосфери в зоні горіння дуги; температура атмосфери в зоні горіння дуги; форма та стан кінців електродів. Взаємодія цих факторів і визначає довжину дуги та її електричний опір [25, 26].

У роботі проведені дослідження роботи електросталеплавильної печі на порожнистих електродах. Відзначено, що при цьому струмове навантаження по фазах набуло більш стабільного характеру і в залежності від умов роботи фаз збільшилося в середньому на 20 – 30 %. Зазначено збільшення використання потужності у періоди нестабільного електричного режиму з 84–85 до 93–94 %, підвищення ККД нагріву на 5–7 %, та зниження витрат електроенергії до 15 % при застосуванні порожніх електродів [27].

При обробці ГПЕ знижується довжина дуги (за підтримки струму системою автоматики) за рахунок поліпшення теплообміну зростає температура шлаку. Швидкість струменів збільшує питому поверхню взаємодії між шлаком і металом шляхом емульгування шлаку. В свою чергу висока температура шлаку сприяє інтенсивному протіканню масообмінних та теплообмінних процесів при позапічній обробці [28].

В роботах [29–31] було проаналізовано використання графітованих порожнистих електродів на установці «ківш-піч» для обробки металу. Встановлено, що подача газів через отвір в електроді позитивно впливає на параметри обробки металу. Зокрема, покращуються умови десульфурзації металу, скорочується час обробки, а також спостерігається тенденція до зменшення витрат електроду.

Авторами роботи [32] підтверджено, що інжекція молекулярних газів, зокрема діоксиду вуглецю, позитивно впливає на потужність стабілізованої аргоном електричної дуги, але це може призвести до окислення компонентів розплаву. У ході експериментів було виявлено, що 20% інжекції діоксиду вуглецю призводить до збільшення потужності електричної дуги. Застосування 3% пропану і 3% метану також дає позитивні результати. Проте, наявність шлаку на дзеркалі металу впливає на асиміляцію кисню розплавом, яка коливається від 10 до 28%.

Проведені дослідження впливу інжекції молекулярних газів на видалення нітрогену з металу [33]. Інкєкція 10 % водню та 5 % метану призводять до утворення на поверхні металу відповідно ціанідної (синильної) кислоти та аміаку внаслідок чого вміст нітрогену в металі зменшувався з 200 до 20 ppm впродовж 80 хв. Також спостерігалось збільшення вмісту водню в металі у 2–4 рази, однак шляхом вдування чистого аргону наприкінці обробки його вміст повертався до початкового, при цьому не показано вірогідність отримання заданих концентрацій.

Для забезпечення стабільного існування електричного розряду над поверхнею ванни рідкого металу необхідна наявність газового середовища. Використання графітованого порожнистого електрода при обробці металу на УКП, показало позитивний вплив на формування та існування електричного розряду, покращення умов десульфурзації металу, зменшення часу обробки та зниження витрат електрода [34–37].

Висновки

На думку авторів значної уваги заслуговує дослідження використання порожнистих електродів при позапічній обробці сталі на УКП. Після проведеного аналітичного огляду було встановлено, що немає достатньої наукової інформації щодо теоретичних аспектів формування температурних режимів при використанні графітованих порожнистих електродів. Крім того, дослідження не встано-

вили впливу подачі газу через порожнистий електрод на температурні характеристики як зовнішньої поверхні, так і внутрішнього каналу електрода, що

може суттєво впливати на витрати електрода внаслідок хімічного і фізичного впливу.

Перелік літературних посилань

1. Украинская Ассоциация Сталеплавильщиков. Информационный портал о черной и цветной металлургии. Режим доступа: (<https://uas.su/books/2011/minizavod/32/razdel32.php>) (дата звернення: 13.10.2019)
2. Дюдкин, Д. А. Производство стали на агрегате ковш-печь / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг, С.Н. Маринцев; Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Дюдкина Д.А. – Донецк: ООО «Юго-Восток, ЛТД», 2003. – 300 с.
3. Курпас, С.И. Тепловые условия синтезирования шлаков на основе конечных сталеплавильных шлаков для внепечной обработки железоуглеродистых сплавов / С.И. Курпас, В.Л. Найдек // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 3. – С. 15–18.
4. Дюдкин, Д.А. Пути ресурсосбережения при внепечной обработке стали / Д.А. Дюдкин, С.Е. Гринберг, А.В. Грабов и др. // *Сталь*. – 2002. – №3. – С. 55 – 56
5. Смирнов А.Н., Зборщик А.М. Внепечное рафинирование чугуна и стали: Учебное пособие. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 186 с.
6. Переворочаев, Н.М. Совершенствование электрических и технологических режимов доводки металла на установке ковш-печь / Н.М. Переворочаев, Б.П. Крикунов // *Металл и литье Украины*. – 2011. – №9–10. – С. 39–45.
7. Сарычев А.Ф., Совершенствование технологии обработки конвертерной стали / А.Ф. Сарычев, А.Д. Носов, В.Ф. Коротких и др. // *Сталь*. – 2002. – № 7. С. 19–22.
8. Металлургические мини-заводы: Монография / Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохова Л.В., Цупрун А.Ю. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 469 с.
9. Пиптюк, В.П. Параметры моделирования тепловых процессов в ванне установки ковш-печь / В.П. Пиптюк, В.Ф. Поляков, С.Е. Самохвалов, И.А. Павлюченков, И.В. Крикент, И.Н. Логозинский, Е.Н. Дымченко, С.В. Греков, А.Г. Чичерин // *Процессы литья*. – 2009. – №5. – С. 34–41.
10. Ковшовая доводка стали / В.А. Вихлевщук, В.С. Харахулаг, С.С. Бродский и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
11. Математическое моделирование теплоэнергетических процессов в агрегате ковш-печь в условиях ООО «МЗ «Днепросталь» / Есаулов Г.А., Климчик Ю.В., Жаданос А.В., Гасик М.И., Кукушкин О.Н., // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 5. – С. 23–27.
12. Динамическая модель теплоэнергетических процессов в электротермическом агрегате ковш-печь для создания АСУ / А.В. Жаданос, О.Н. Кукушкин, И.В. Деревянко и др. // *Теория и практика металлургии*. – 2007. – № 2, т. 3. – С. 64–69.
13. Kumar, S. Transient radiative transfer / S. Kumar, K. Mitra // *Radiative Transfer-1. Proceedings of the First International Symposium on Radiation Transfer, August 1995., Kusadasi, Turkey, ICHMT*. – 1995. doi: 10.1615/ICHMT.1995.RadTransfProc.340
14. Bergman, T.L. Radiation heat transfer in manufacturing and materials processing / T.L. Bergman, R. Viskanta // *Radiative Transfer-1. Proceedings of the First International Symposium on Radiation Transfer, August 1995., Kusadasi, Turkey, ICHMT*. – 1995. doi: 10.1615/ICHMT.1995.RadTransfProc.50
15. Особенности современного оборудования и технологий внепечной обработки стали / В.П. Пиптюк, В.Ю. Болотов, И.А. Павлюченков, И.Н. Логозинский // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровськ.: ИМ НАН України, 2005. – Вип. 11. – С. 67-79. – Бібліогр.: 35 назв. – рос.*
16. Моделирование теплового состояния состояния ковшевой ванны установки ковш-печь мощностью 35 МВ·А / В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, В.Ф. Поляков, В.В. Моцный, С.Н. Павлов, В.А. Кондрашкин, Ю.П. Махлай // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровськ.: ИМ НАН України, 2011. – Вип. 23. – С. 137-141.*
17. Данные для численного исследования теплового состояния ковшевой ванны большой емкости при обработке расплава на УКП / В.П. Пиптюк, В.Ф. Поляков, А.Б. Ковура, А.А. Травинчев, С.Н. Павлов, И.Л. Бузун, В.А. Кондрашкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. –Днепропетровськ.: ИМ НАН України, 2009. – Вип. 19. – С. 152-159.*
18. Поживанов, А.М. Повышение качества конвертерной стали путем продувки аргоном в ковше / А.М. Поживанов, П.И. Югов, В.В. Рябов [и др.] // *Экспресс-информация. Ин-т «Черметинформация»*. – 1979. – № 6. – С. 3–20.
19. Пути снижения удельного расхода графитированных электродов на электродуговых сталеплавильных печах / О.М. Грудницкий, Р. А. Исхаков, В. М. Коробов, // *Литье и металлургия*. – 2011. – С. 35–36.

20. Грудницкий, О.М. Особенности эксплуатации графитированных электродов на электродуговых сталеплавильных печах / О.М. Грудницкий, В.М. Коробов, Р.А. Исхаков // *Материалы VII Междунар. конф. «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах»*. Мариуполь, 2006. – 6–8 сентября. – С. 36–37.
21. Крамаров, А. Д. *Электрометаллургия сталей и ферросплавов: учеб.* / А. Д. Крамаров, А. Н. Соколов. – М.: Металлургия, 1976. – 440 с.
22. Семкин, И.Г. *Внепечная плазменная металлургия: учеб.* / И.Г. Семкин, А. П. Коптев, А. П. Морозов. – Магнитогорск, 2000. – 490 с.
23. Огороков, Н.В. Влияние трубчатых электродов на тепловую работу дуговой электросталеплавильной печи / Н.В. Огороков, Л.Е. Никольский, А.В. Егоров // *Изв. вузов. Черная металлургия*. –1962. – № 9. – С. 105–109.
24. Brosovic J. A. // *Iron and steel Engineer*. –1959. – V. 36, № 11.
25. Schwabe W.E. Electrical and thermal factor in UHP arc furnaces designoperation / W.E. Schwabe // *9th Internacional congress UIE*. – Cannes. – october, 1980. – S. 4–11.
26. Schwabe W. E. // *Iron and steel Engineer*, 1957. – V. 34, № 6.
27. Von, K. // *Schulz. Electrowarme*. – 1958. – № 7.
28. Колибус, В.В. Десульфурация металла при плазменной и плазменно-индукционной плавке / В.В. Колибус, А.П. Коженко, В.Н. Демидик // *Прогрессивные способы плавки для фасонного литья*. – Киев: ПланУССР, 1978. – С. 34–39.
29. Dongping, Z. Influence of Hollow Electrode Ar-CO₂ Injection on Carbon Content in Ladle Furnace / Z. Dongping, Z. Huishu, J. Zhouhua, G. Wei, L. Huabing, C. Zhaoping // *Advanced Materials Research*. – 2011. – № 250–253. – S. 3864 – 3867. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.3864
30. Dongping, Z. Influence of Electrode Argon-Hydrogen Co-injection on Carbon Content in a Alternating Current Ladle Furnace / Z. Dongping, Z. Huishu, J. Zhouhua, G. Wei, C. Zhaoping // *Advanced Materials Research*. – 2011. – № 239–242. – S. 2361 – 2364 doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.2361
31. Dongping, Z. Influence of Electrode Argon-Hydrogen Co-injection on Carbon Content in a Alternating Current Ladle Furnace / Z. Dongping, Z. Huishu, J. Zhouhua, G. Wei, L. Huabing, C. Zhaoping // *Advanced Materials Research*. – 2011. – № 402. – S. 142 – 146 doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.402.142
32. Neuschtz, D. Power increase and metallurgical effects during arc heating of liquid steel due to the addition of molecular gases / D. Neuschtz, I. Hahn, D. Spirine, L. Storsberg // *Steel Research*. – 1999. – № 70. – S. 309–313.
33. Neuschtz, D. Nitrogen Removal and Arc Voltage Increase in EAF Steelmaking by Methane Injection into the Arc / D. Neuschtz, D. Spirine // *Steel Research International*. – 2003. – № 74. – S. 19–25. doi: 10.1002/srin.200300156
34. Schwabe, W.E. Experimental result with hollow electrodes in electric steel furnaces. / W.E. Schwabe // *Proceedings AISE*. – 1957. – S. 448.
35. *The Iron and Coal Trades Review*. – 1960. – V. 180. № 4778. – S. 353–358.
36. Пат. 2.744.945 США. *Iron and Steel Engineer / Johnson (США)* – 1957. – V. 34. №6. – S. 84–91.
37. Низяев, К.Г. Особенности нагрева стали независимой электрической дугой / К.Г. Низяев, В.М. Душа, В.В. Керницкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №7. – С. 147–149.