
ОДЕРЖАННЯ ТА ОБРОБКА РОЗПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2023.01.003>

УДК 621.74: 669.18 : 537.84

Смірнов О. М.*, д-р техн. наук, проф., зав. відділу;
e-mail: stalevoz@i.kiev.ua; ORCID 0000-0001-5247-3908

Осипенко В. В.**, ген. директор, e-mail: g.d.destal@ukr.net

Семірягін С. В.**, канд. техн. наук, доц., зам. ген. директора,
e-mail: td.destal@ukr.net, ORCID 0000-0002-8733-3216

Горюк М. С.*, канд. техн. наук, заст. зав. відділу;
e-mail: gormak72@gmail.com; ORCID 0000-0002-7561-6948

Семенко А. Ю.*, канд. техн. наук, наук. співроб.;
e-mail: semenko.au@gmail.com ; ORCID 0000-0002-0448-1636

Скоробагатько Ю. П.*, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: yulka.ukr@gmail.com, ORCID 0000-0002-1724-9895

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

** ТОВ НВП «Дніпроенергосталь» (Запоріжжя, Україна)

ПЕРЕМІШУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АГРЕГАТИВ «КІВШ – ПІЧ»

Повідомлення 1. СПОСОБИ ТА СИСТЕМИ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКИХ СПЛАВІВ У МЕТАЛУРГІЙНИХ АГРЕГАТАХ (Огляд)

На основі світових тенденцій у металургійній галузі, спрогнозовано особливості подальшого розвитку технологій одержання литої металопродукції в умовах постійного посилення вимог щодо енерго- та ресурсозбереження, екологічної і виробничої безпеки при одночасній необхідності підвищення якості лиття, розширенні номенклатури одержуваних сплавів та виробів з них. При цьому забезпечення надійної роботи і розширення функціональних можливостей агрегатів типу «ківш-піч» набуває особливого значення, оскільки саме в них відбувається комплексна позапічна обробка розплавів, що включає доведення за температурою та хімічним складом (у т. ч. легування і модифікування), видалення газів та неметалевих включень тощо. Зазначено, що для успішної реалізації перерахованих технологічних операцій агрегати «ківш – піч» оснащуються додатковими пристроями та системами, зокрема, для нагріву розплаву, вакуумування, продувки інертним газом (аргоном) і електромагнітного перемішування. Порівняльний аналіз різних способів перемішування рідкого металу – шляхом продувки газом та під дією зовнішнього змінного електромагнітного поля – показав, що більш ефективним та доцільним, особливо при одержанні відносно невеликих партій високоякісних і спеціальних сплавів в умовах металургійних міні-заводів, є електромагнітне перемішування. При цьому найбільш поширеними на металургійних підприємствах та серед дослідницьких розробок є

електромагнітні перемішувачі, дія яких ґрунтується на використанні біжучого магнітного поля. Показано, що, через фізичні особливості біжучого поля, застосування таких перемішувачів має певні обмеження, пов'язані з необхідністю у більшості випадків живлення їх низькою частотою, внесенням змін у конструкцію діючих металургійних агрегатів для встановлення перемішувача, а також з не завжди раціональними гідродинамічними режимами перемішування розплаву. Сформульовано вимоги щодо розробки і застосування більш простих за конструкцією та у експлуатації електромагнітних перемішувачів, які могли б ефективно працювати на агрегатах «ківш – піч», забезпечуючи їх тривале надійне функціонування при одержанні широкої номенклатури високоякісних сплавів.

Ключові слова: агрегат «ківш-піч», металевий розплав, продувка газом, електромагнітне перемішування.

Найбільш актуальними проблемами, з якими зіткнуться виробники литої металопродукції в найближчі десятиліття, будуть раціональне використання енергетичних і матеріальних ресурсів та додержання більш суворих вимог щодо викидів у довкілля за умови неухильного підвищення вимог до якості металопродукції. Virішення цих проблем потребує стратегічної реконструкції багатьох сталеплавильних цехів та оснащення їх новими високоефективними агрегатами. Як відомо, заведення переоснащення більшості металургійних підприємств є одним з пріоритетних для металургійного комплексу України.

Сучасні технологічні системи виробництва стали передбачають виплавку напівпродукту переважно в конвертері або дуговій сталеплавильній печі і подальше комплексне доведення стали за хімічним складом, температурою та якістю в агрегаті «ківш – піч». При цьому обов'язковим елементом такої обробки є примусове перемішування рідкої ванни – шляхом продувки інертним газом (аргоном) або під впливом електромагнітного поля [1–4].

Вельми поширеним способом, особливо при позапічній рафінуючій обробці розплаву в міксерах, ковшах, агрегатах «ківш – піч», є перемішування за допомогою газових струменів [2, 3]. Процес реалізується шляхом занурення в об'єм рідкометалевої ванни в агрегаті фурми, через яку під високим тиском вдувається інертний газ (як правило, аргон). У цьому разі, струмінь газу в рідкометалевій ванні дробиться на окремі бульбашки, які, спливаючи до поверхні розплаву, перемішують його, і при цьому одночасно видаляються водень та оксидні включення.

Для інтенсифікації таких процесів аргон вдувають через продувні фурми і пористі пробки. Це дозволяє зменшити розмір бульбашок та одночасно збільшити тривалість перебування їх у розплаві і загальну площу міжфазної поверхні.

Основна перевага розглянутого способу – можливість реалізації різних режимів перемішування металу, у т. ч. з високою інтенсивністю та в імпульсному режимі, що сприяє більш повному рафінуванню розплаву від неметалевих включень і газів, усереднення його температури та хімічного складу. Перемішування за допомогою газових струменів також може бути поєднане з іншими способами впливу на рідкий метал (вакуумування, плазмово-дуговий нагрів, введення легуючих і модифікуючих реагентів в струмінь газу тощо).

Однак зазначений спосіб не позбавлений і ряду суттєвих недоліків, зокрема: суттєве зниження температури металевого розплаву в процесі продувки, що вимагає використання джерел додаткового нагріву для компенсації таких теплових втрат; наявність фурми або пористої пробки, що контактують з розплавом, надійність яких залежить від їх термостійкості та від фізико-хімічної взаємодії їх матеріалу з металом і шлаком; складність організації перемішування значних обсягів розплаву, пов'язана з необхідністю подолання суттєвого металостатичного тиску та переміщення зони вдування (фурми) по об'єму розплаву як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках; навіть за високих значень інтенсивності перемішування, сам характер руху рідкого металу (напрямок та розподіл потоків в об'ємі) має симетричний стосовно зони вдування газу вигляд, що обумовлює розшарування розплаву як по

температурі, так і за хімічним складом по об'єму рідкометалевої ванни, призводить до утворення застійних зон з низькою ефективністю перемішування; недостатня ефективність видалення твердих неметалевих включень, особливо дрібних, при одержанні високоякісних сплавів; зміна розміру бульбашок безпосередньо в процесі їх сплиття, що не забезпечує стабільність умов перемішування розплаву.

Вплив на розплав електромагнітним полем також є досить поширеним та ефективним методом перемішування металу в металургійних агрегатах, зокрема, ковшах. Це пояснюється такими перевагами електромагнітного перемішування: розташування електромагнітного пристрою ззовні агрегату (поблизу його бічної стінки або під днищем), що забезпечує безконтактне (індукційне) введення енергії в розплав без застосування контактуючих з розплавом механічних пристроїв (мішалок, фурм тощо) і зумовлена цим більша стабільність та надійність як самого способу, так і пристроїв для його реалізації; рівномірне виділення енергії безпосередньо в самому об'ємі рідкого металу без утворення зон підвищеної турбулентності та значних застійних зон, як при продувці газовими середовищами; збереження суцільності поверхні розплаву і шлакового покриву; регулювання в досить широких межах інтенсивності та напрямку руху розплаву в об'ємі агрегату за рахунок відносно простого регулювання потужності перемішувача і можливості електричного реверсування поля; можливість створення вихрових структур та локальних розріджень в об'ємі розплаву; можливість комбінування з іншими способами фізико-хімічної дії на рідкий сплав (обробка реагентами, продувки рафінуючими газовими середовищами, нагрів за допомогою зовнішніх джерел, вакуумування тощо).

Слід визнати, що абсолютні значення інтенсивності перемішування рідкого металу газом загалом вищі, ніж із застосуванням електромагнітних сил (рис. 1) [5]. Однак, як уже зазначалося, одним із суттєвих недоліків газового перемішування є формування у розплаві значних застійних зон і обумовлене цим температурне та хімічне розшарування за об'ємом ванни, а також інтенсивна (іноді з виплесками) турбулізація рідкого металу біля поверхні і слабка – у придонній зоні. Внаслідок більш сприятливої структури руху розплаву в агрегаті при електромагнітному перемішуванні безповоротні втрати металу (окислення, перехід у шлакову фазу) в 1,2–2,5 рази нижче, ніж при продувці інертним газом, особливо при високій інтенсивності [5–7].

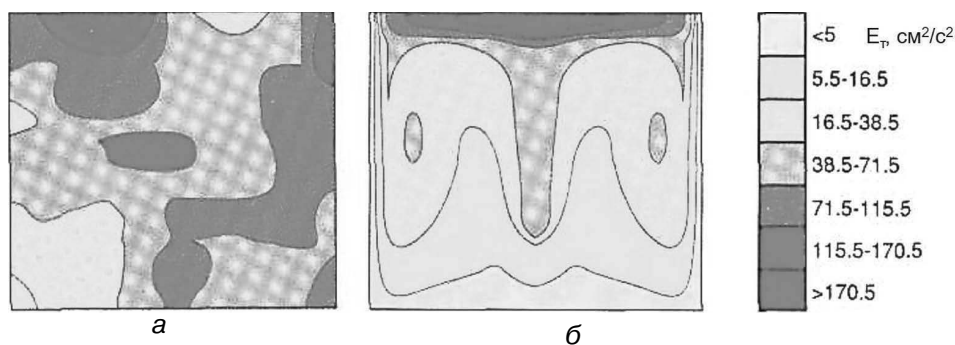


Рис. 1. Розподіл енергії турбулізації E_t у металевому розплаві при його перемішуванні в ковші за допомогою електромагнітних сил (а) або при продувці інертним газом (б) [5]

На підставі вищевикладеного, можна зробити порівняння характерних технологічних ефектів, що так чи інакше при перемішуванні розплаву в металургійних агрегатах за рахунок впливу електромагнітних полів і продувки аргоном металу через розташований в днищі спеціальний блок (що містить пористу пробку), наведено в таблиці.

Загалом застосування електромагнітного перемішування при плавці та приготуванні сплавів в умовах металургійних міні-заводів, за різними оцінками

Порівняння характерних ефектів при перемішуванні розплаву в металургійному агрегаті

Технологічна ознака	Електромагнітне перемішування	Продувка інертним газом
1	2	3
Фазовий склад рідкометалевої ванни	Наявна лише одна фаза – металевий розплав	Наявні щонайменше дві фази – металевий розплав і газ, що вдувається в нього
Взаємодія зі шлаком	Шлак практично не перемішується і не потрапляє вглиб у рідкометалевої ванни	Шлак перемішується досить активно (залежно від інтенсивності продувки) і потрапляє у рідкометалеву ванну
Характеристика примусових конвективних потоків	Потоки мають усталений циркуляційний характер, набуваючи максимальної швидкості поблизу місця розташування перемішувача (бічна стінка або днище агрегату)	Конвективні потоки розвиваються згідно з уявленнями про спливаючий догори газометалевий стовп; при цьому їх розвиток характеризується високою турбулентністю та наявністю т. зв. «мертвих» зон
Інтенсивність перемішування	Досить висока, однак у рідкометалевій ванні все одно є зони з відносно низькою швидкістю руху потоків	За тих же питомих енергетичних параметрах, приблизно на 20-30% вище, ніж при електромагнітному; однак у рух залучається не весь об'єм ванни
Вторинне окислення розплаву	Практично не спостерігається	Вельми значне внаслідок оголення частини дзеркала металу при продувці

[5–12], дозволяє: підвищити продуктивність плавильного обладнання на 15–40%; знизити угоряння металу в середньому на 20–25%; зменшити утворення шлаків на стінках печей, міксерів та ковшів; знизити енерговитрати на плавку і приготування сплавів на 10–20%, скоротити час їх одержання на 20–30% за рахунок зменшення кількості корекцій хімічного складу та забезпечення високої гомогенності розплаву (відхилення масової частки елементів у різних зонах рідкометалевої ванни не перевищують $\pm 5\%$ від їх середнього вмісту); ліквідувати надмірний перегрів металу в окремих зонах агрегату і забезпечити вирівнювання його температури по всьому об'єму рідкометалевої ванни, завдяки чому різниця в температурі розплаву в різних зонах не перевищує $\pm(5-10)$ К.

Сучасні електромагнітні перемішувачі (ЕМП), що встановлюються на різних металургійних агрегатах, являють собою багатофазні пристрої біжучого магнітного поля.

Відомі два основних варіанти розташування ЕМП біжучого поля – під днищем агрегату і на його бічній стінці [5–11]. Донне розташування забезпечує більшу компактність розміщення обладнання [5, 6, 10]. Крім того, такий ЕМП порівняно легко може використовуватися для двох агрегатів, що розташовані поруч, перемішуючись під ними і працюючи поперемінно на кожному з них. При цьому всі комунікації та підключення закриті і не становлять небезпеки для персоналу та цехового транспорту. Однак таке розміщення ЕМП має й свої суттєві недоліки.

По-перше, у донній частині агрегату металостатичний напір досягає максимального значення. Тому товщина футеровки подини є найбільшою порівняно з іншими зонами. Це збільшує немагнітний зазор, що перешкоджає проникненню електромагнітного поля в розплав та зменшує ефективність перемішування, і практично повсюдно для живлення донних ЕМП необхідно використовувати низьку

частоту електричного струму, оскільки глибина проникнення електромагнітного поля в оброблюване середовище в загальному вигляді обернено пропорційна частоті електричного струму. Як наслідок, необхідно застосовувати спеціальні дорогі за вартістю перетворювачі частоти. Також при використанні низької частоти в кілька разів зростає сила струму i , відповідно, нагрівання електромагнітних систем, що призводить до суттєвого збільшення енерговитрат та підвищення вимог до системи водяного охолодження ЕМП. Крім того, донні ЕМП мають великі габарити та масу порівняно з іншими типами перемішувачів.

По-друге, при нижньому розташуванні ЕМП значно ускладнюється його установка на вже діючий агрегат, а також монтаж і технічне обслуговування, що пов'язано з підвищеною небезпекою для персоналу. Необхідно або піднімати агрегат на значну висоту над рівнем підлоги в цеху, або виконати під ним відповідний приямок, що виходить за один з бічних габаритів, і застосовувати спеціальний пристрій для переміщення та кріплення ЕМП.

Навпаки, пристрої для електромагнітного перемішування, що встановлюються на бічних стінках печей, міксерів і агрегатів «ківш – піч» (рис. 2) [6] на такій висоті, щоб при роботі ЕМП зона його дії завжди була нижчою від рівня розплаву в агрегаті, позбавлені подібних недоліків, забезпечуючи безконтактне виділення значної потужності у об'ємі ванни і ширші можливості з управління інтенсивністю та напрямом руху рідко-металевих потоків. У такому разі середній металостатичний напір у зоні установки ЕМП вдвічі менший, ніж на дні ванни. Відповідно, зменшується і величина немагнітного зазору. Тому бічні ЕМП можна живити від електромережі стандартною для світової промисловості частотою 50–60 Гц. Всі елементи бічних ЕМП доступні зовнішньому візуальному контролю, і його монтаж та технічне обслуговування здійснювати значно простіше, ніж у випадку з донним ЕМП. Габаритні розміри та маса бічних ЕМП менші, ніж у відповідних донних ЕМП за тієї ж електричної потужності та продуктивності.

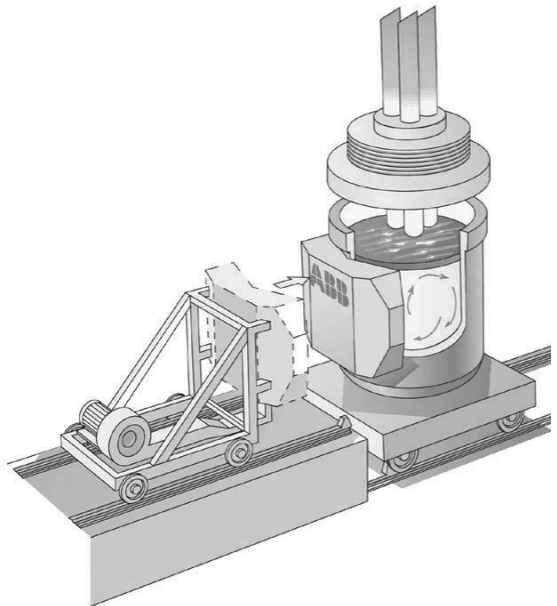


Рис. 2. Розташування ЕМП біжучого магнітного поля на бічній стінці агрегату «ківш–піч» [6]

Так, на практиці можлива реалізація різноманітних режимів руху розплаву (рис. 3), коли створюються необхідні умови для рівномірного перемішування розплаву по висоті ковша (а), прискорення процесу скачування шлаку з поверхні розплаву (б), керованого порушення суцільності шлакового покриву (відкриття так званого «ока» або «вікна») з метою введення легуючих та модифікуючих добавок (в), а також орієнтації руху циркуляційних потоків металу на положення введеного реагенту (г).

Крім того, в останні роки набули розвитку процеси суміщеної дії електромагнітного поля та рухомих газових середовищ, а також вакууму для обробки високоякісних марок спеціальних сталей в агрегаті «ківш – піч» [6, 13, 14]. Це дозволило у 1,3–1,7 рази збільшити ступінь дегазації розплаву та видалення з нього неметалевих включень.

При цьому слід зазначити, що, в силу фізичної природи біжучого магнітного поля, використання пристроїв, які його створюють, пов'язано з низкою технологічних особливостей і потребує застосування певних специфічних технічних рішень.

Насамперед, вплив біжучого поля на металеві розплави чиниться виключно в площині розташування індуктора і обмежується його габаритами по ширині (якщо він розташований у вертикальній площині) або по висоті (якщо індуктор розташо-

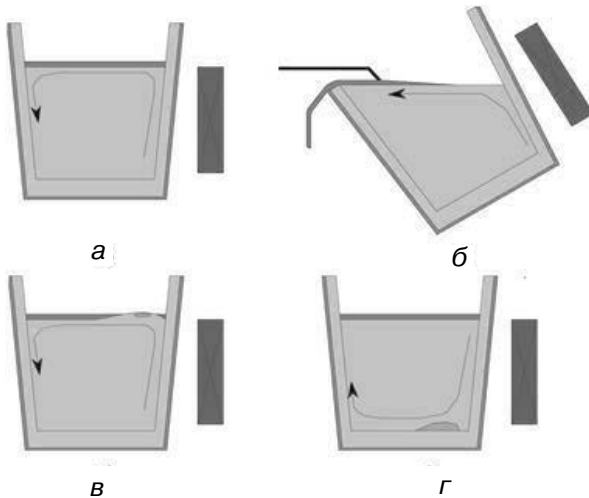


Рис. 3. Основні ситуативні схеми примусового перемішування сталі за допомогою ЕМП біжучого магнітного поля для агрегатів «ківш – піч» [5]: а – електромагнітне перемішування розплаву; б – розвиток процесів скачування шлаку та дегазації сталі; в – відкриття шлакового «вікна» («ока») для введення легуючих; г – спрямування потоків розплаву на введену добавку

вується по горизонталі до стінки агрегату). Залучення в рух інших шарів розплаву, що не перебувають в межах проекції габаритів індуктора, відбувається лише завдяки його в'язкості рідкого металу, і інтенсивність такого перемішування швидко спадає при віддаленні у будь-якому напрямку від площини індуктора.

Тож для інтенсифікації перемішування розробляються складніші пристрої. Так, наприклад, було створено двовісну електромагнітну систему (DAEMS – double-axis electromagnetic system) [17–19], в якій на об'єм розплаву в ковші в горизонтальній площині накладаються обертове магнітне поле частотою 50 Гц і біжуче поле частотою 1200 Гц у вертикальній площині. Це дозволяє інтенсифікувати обробку рідкого сплаву, змінювати інтенсивність його перемішування та впливати на

форму вільної поверхні, що особливо важливо при реагентній фізико-хімічній обробці.

Інша особливість полягає в тому, що для забезпечення ефективної роботи бічних перемішувачів біжучого магнітного поля, в конструкцію металургійного агрегату необхідно вносити зміни в місці установки перемішувача. Як мінімум металевий кожух стінки в цьому місці має бути виготовлений з немагнітного матеріалу (наприклад, спеціальних марок нержавіючої сталі), щоб уникнути екранування поля [6]. Однак і цього недостатньо у разі, якщо перемішувач працює на промисловій частоті (50–60 Гц). Тоді необхідно виконувати спеціальне поглиблення у футеровці агрегату із зовні, щоб максимально наблизити перемішувач до місця контакту розплаву зі стінкою [6, 8, 9, 11]. Найчастіше в цьому місці взагалі роблять наскрізне вікно, в яке вставляють спеціальний високостійкий (в термічному, хімічному та механічному розумінні) вогнетривкий блок, одразу за яким розташований перемішувач. Більш того, іноді в цьому блоці виконуються U- або Ш-подібні канали для інтенсифікації перемішування [11].

Очевидно, що такі технічні нововведення є економічно можливими і доцільними лише в разі виготовлення відносно малих партій високоякісних марок спеціальних сталей, які виробляються в агрегатах місткістю не більше 50 тонн у умовах металургійних міні-заводів.

Висновки

В умовах постійного посилення вимог до якості литої металопродукції, техніко-економічних показників її виробництва та дотримання екологічної безпеки, істотно зростає роль агрегатів «ківш-піч» у частині забезпечення успішного проведення необхідних технологічних операцій з рафінування, вакуумування, легування, модифікування рідких сплавів, у т. ч. з використанням примусового перемішування розплаву.

Для організації такого перемішування на сьогодні головним чином використовуються системи продувки розплаву інертним газом або електромагнітні перемішувачі (як правило, біжучого магнітного поля). При цьому, через певні фізичні, технічні та технологічні аспекти, електромагнітне перемішування є більш ефективним і перспективним способом, особливо при отриманні високоякісних та спеціальних сплавів.

При цьому відомі електромагнітні перемішувачі біжучого поля мають ряд особливо-

стей конструкції і функціонування, що стримує розширення їх застосування. Для підвищення конкурентоспроможності електромагнітного перемішування як способу слід прагнути до використання перемішувачів відносно простої конструкції, що живляться струмом промислової частоти, можуть забезпечувати різні режими руху розплаву, є мобільними і не вимагають для своєї установки внесення істотних змін в конструкцію металургійних агрегатів.

Особливої уваги та вивчення потребує питання щодо стійкості вогнетривкої футеровки агрегатів «ківш–піч» в умовах інтенсивного перемішування розплаву, необхідності застосування при цьому хімічно агресивних шлакових та флюсових середовищ, великої кількості різних легуючих та модифікаторів.

Список літератури

- 1 Смирнов А. Н., Зборщик А. М. Внепечное рафинирование чугуна и стали. Донецк: Изд-во «Ноулидж», 2012. 179 с.
- 2 Дюдкин Д. А., Бать С. Ю., Гринберг С. Е., Маринцев С. Н. Производство стали на агрегате ковш-печь. Донецк: ООО Юго-Восток, 2003. 300 с.
- 3 Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. II. Основы технологии ковшевой металлургии. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
- 4 Berg B., Carlsson G., Bramming M. Ladle Metallurgy – Influence of Different Stirring Methods // Scandinavian Journal of Metallurgy. 1985, No. 14. P. 299–305.
- 5 Eidem M. Induction causes a stir // Steel Times International. 1996. № 7. P. 38–39.
- 6 The ABB Group. URL: <https://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products>.
- 7 Шалимов А. Г. Анализ эффективности перемешивания металл в ковше на основе новых шведских разработок. Сталь. 2004. № 1. С. 25–30.
- 8 Тир Л. Л., Столов М. Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. М.: Металлургия, 1975. 224 с.
- 9 Л. Л. Тир, М. Я. Столов. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах: 2-ое изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1991. 280 с.
- 10 SINFONIA TECHNOLOGY CO., LTD. JAPAN. URL: <https://www.sinfo-t.jp/eng/stirrer/principle.htm> , <https://www.sinfo-t.jp/eng/stirrer/Default.htm>
- 11 Non ferrous casting – Equipment MHD Technology / “Krāsainie lējumi”, Riga, Latvia. 2004.
- 12 Дубоделов В. И, Фиксен В. Н., Горюк М. С., Слажнев Н. А., Скоробагатько Ю. П. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости. Металл и литье Украины. 2008. № 6. С. 12–18.
- 13 Bjorn Gabrielsson, Brendan Connolly, Steve Lubinski, Sean Cowden, Hongliang Yang. Hydrogen Control of Large Bottom-Poured Forging Ingots at Ellwood Quality Steels // The 3rd International Conference “Ingot, Casting, Rolling, Forging ICRF-2018. P. 174–188.
- 14 Bjorn Gabrielsson, Brendan Connolly, Steve Lubinski, Sean Cowden, Hongliang Yang. Hydrogen Control of Large Bottom-Poured Forging Ingots at Ellwood Quality Steels. AISTech 2019. The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Pittsburgh, Pa., USA. Iron & Steel Technology, July 2020. P. 52–62.
- 15 Дубоделов В. И. Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литья стали // В. И. Дубоделов, А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко, А. П. Верзилов. Киев: Наукова думка, 2018. 263 с.
- 16 Смирнов А. Н., Куберский С. В., Эссельбах С. Б. и др. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов. Алчевск: ДонГТУ, 2013. 320 с.
- 17 Sh. Taniguchi, K. Maitake, M. Okubo, T. Ando, K. Ueno: Proc. EPM2003, (2003), P. 339–343.
- 18 Sh. Taniguchi, K. Ueno, S. Shimasaki, M. Okubo, T. Ando, H. Kasahara: Tetsu-to-Hagane, 92 (2006), P. 364–371.

- 19 Sh. Taniguchi, Sh. Shimasaki, N. Yoshikawa, K. Ueno, S. Umeki, K. Takahashi, Yan Chen. Recent efforts of EPM application to environmental technology at Tohoku University // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials "EPM 2006". October 23–27, 2006. Sendai, Japan. P. 677–682.

Надійшла 05.02.2023

References

- 1 Smirnov A. N., Zborshchik A. M. (2012). Extraordinary refining of cast iron and steel. Donetsk: "Knowledge" Publishing House, 179 p. [in Russian].
- 2 Dyudkin D. A., Bat S. Yu., Grinberg S. E., Maryntsev S. N. (2003). Production of steel on a ladle-furnace unit. Donetsk: OOO Yugo-Vostok, 300 p. [in Russian].
- 3 Kneppel G. (1984). Deoxidation and vacuum treatment of steel. Part II. Fundamentals of ladle metallurgy technology. Metallurgy, 414 p. [in Russian].
- 4 Berg B., Carlsson G., Bramming M. (1985). Ladle Metallurgy – Influence of Different Stirring Methods. Scandinavian Journal of Metallurgy, no. 14, pp. 299–305 [in English].
- 5 Eidem M. (1996). Induction causes a stir. Steel Times International, no. 7, pp. 38–39 [in English].
- 6 The ABB Group. URL: <https://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products> [in English].
- 7 Shalimov A. G. (2004). Analysis of the efficiency of mixing metal in a ladle based on new Swedish developments. Steel, no. 1, pp. 25–30 [in Russian].
- 8 L. L. Tir, M. Ya. Stolov. (1975). Electromagnetic devices for melt circulation control in electric furnaces. Metallurgy, 224 p. [in Russian].
- 9 L. L. Tir, M. Ya. Stolov. (1991). Electromagnetic Devices for Melt Circulation Control in Electric Furnaces: 2nd ed., Revised. and additional. Metallurgy, 280 p. [in Russian].
- 10 SINFONIA TECHNOLOGY CO., LTD. JAPAN. URL: <https://www.sinfo-t.jp/eng/stirrer/principle.htm>, <https://www.sinfo-t.jp/eng/stirrer/Default.htm> [in English].
- 11 Non ferrous casting – Equipment MHD Technology / "Krāsainie lējumi", Riga, Latvia. – 2004 [in English].
- 12 Dubodelov V. I., Fixsen V. N., Goryuk M. S., Slazhnev N. A., Skorobagatko Yu. P. (2008). Modern devices for electromagnetic mixing of aluminum melts in high-capacity furnaces and mixers. Metal and Casting of Ukraine, no. 6, pp. 12–18 [in Russian].
- 13 Bjorn Gabrielsson, Brendan Connolly, Steve Lubinski, Sean Cowden, Hongliang Yang. Hydrogen Control of Large Bottom-Poured Forging Ingots at Ellwood Quality Steels // The 3rd International Conference "Ingot, Casting, Rolling, Forging ICRF-2018, pp. 174–188 [in English].
- 14 Bjorn Gabrielsson, Brendan Connolly, Steve Lubinski, Sean Cowden, Hongliang Yang. Hydrogen Control of Large Bottom-Poured Forging Ingots at Ellwood Quality Steels // AISTech 2019 – The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Pittsburgh, Pa., USA. – Iron & Steel Technology, July 2020, pp. 52–62 [in English].
- 15 Dubodelov, V. Y., Smirnov, A. N., Efymova, V. H., Kravchenko, A. V., Verzylov, A. P. (2018). Hydrodynamic and physico-chemical processes in tundishes for continuous casting of steel. Kyiv: Naukova dumka, 264 [in Russian].
- 16 Smirnov A. N., Kubersky S. V., Esselbach S. B. et al. (2013). Electric arc and electromagnetic treatment of melts. Alchevsk: DonGTU, 320 p. [in Russian].
- 17 Sh. Taniguchi, K. Maitake, M. Okubo, T. Ando, K. Ueno: Proc. EPM2003, (2003), pp. 339–343. [in English].
- 18 Sh. Taniguchi, K. Ueno, S. Shimasaki, M. Okubo, T. Ando, H. Kasahara: Tetsu-to-Hagane, 92 (2006), pp. 364–371 [in English].

- 19 Sh. Taniguchi, Sh. Shimasaki, N. Yoshikawa, K. Ueno, S., K. Takahashi, Yan Chen. Recent efforts of EPM application to environmental technology at Tohoku University // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials "EPM 2006". October 23–27, 2006. Sendai, Japan, pp. 677–682 [in English].

Received 05.02.2023

O. M. Smirnov*, *Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department;*

e-mail: stalevoz@i.ua; ORCID 0000-0001-5247-3908

V. V. Osypenko**, *CEO LTD; e-mail: g.d.destal@ukr.net;*

S. V. Semiryagin**, *PhD (Engin.), Associate Professor, Deputy CEO;*

e-mail: td.destal@ukr.net; ORCID 0000-0002-8733-3216

M. S. Goryuk*, *PhD (Engin.), Deputy of Head of the Department;*

e-mail: gormak72@gmail.com; ORCID 0000-0002-7561-6948

A. Yu. Semenko*, *PhD (Engin.), Researcher; e-mail: semenko.au@gmail.com;*

ORCID 0000-0002-0448-1636

Yu. P. Skorobagatko*, *PhD (Engin.), Senior Researcher;*

e-mail: yulka.ukr@gmail.com; ORCID 0000-0002-1724-9895

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**LTD Scientific and Manufacturing Enterprise Dneproenergostal (Zaporizhzhia, Ukraine)

STIRRING OF METAL MELTS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE «LADLE – FURNACE» UNITS.

Message 1. METHODS AND SYSTEMS FOR STIRRING OF LIQUID ALLOYS IN METALLURGICAL AGGREGATES (REVIEW)

Based on the global trends in the metallurgy, the features of the further development of technologies for the cast metal productions are predicted. At the same time, there is considered the constant tightening of requirements for energy and resource saving, environmental and work safety, with the simultaneous need to improve the quality of casting, widening the range of obtained alloys and products from them. Also, ensuring reliable operation and expanding the functional capabilities of "ladle – furnace" units has particular importance, since they provide the complex out-of-furnace processing of melts, including averaging on temperature and chemical composition (at alloying and modifying too), removal gases and non-metallic inclusions, etc. It is noted that for the successful implementation of the listed technological operations, "ladle – furnace" units are equipped with additional devices and systems for heating the melt, vacuuming, blowing with inert gas (argon) and electromagnetic stirring. A comparative analysis of different methods of liquid metal stirring (by gas blowing and under the action of an external alternating electromagnetic field) showed that electromagnetic stirring is more effective and appropriate, especially at manufacturing relatively small batches of high-quality and special alloys on metallurgical mini- mills. At that, the most common at metallurgical enterprises and among research developments are electromagnetic stirrers of travelling magnetic field. There are indicated that applications of such stirrers have certain limitations due to physical characteristics. It relates to the need (in most cases) to supply them with a low frequency, making changes to the design of operating metallurgical aggregates for installation of the stirrer, as well as with not always rational hydrodynamic modes of melt stirring. The requirements concerning the development and application of electromagnetic stirrers for "ladle – furnace" units were formulated. Such devices should be simpler in design and operation, ensuring their long-term reliable working at obtaining a wide range of high-quality alloys.

Keywords: "ladle – furnace" unit, metallic melt, gas blowing, electromagnetic stirring.