

**В. П. Піптюк, П. Г. Прокопенко, С. В. Греков, Г. О. Андрієвський**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШЛАКУ НА ПЕРЕМІШУВАННЯ КОВШОВОЇ  
ВАННИ ПРИ ДОННІЙ ПРОДУВЦІ МЕТОДОМ ФІЗИЧНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ**

*Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України*

Метою роботи є визначення впливу шлаку на процеси перемішування розплаву сталі у ковші при його донному продуванні. Дослідження методом фізичного моделювання проводили на прозорій моделі ковша при його донному продуванні без шару шлаку і при його наявності. В якості рідини металу використовували воду, а шлаку – соняшникову олію. Продувку ванни здійснювали повітрям з різними витратами. Контролювали товщину шару шлаку та площу оголення поверхні металу від нього. Визначали рівень електричної провідності водяної ванни в залежності від змінних факторів. Встановлено незначне зменшення електричної провідності імітатора розплаву (води) при наявності шлаку, а також збільшення товщини шару шлаку і площі оголення поверхні розплаву зі збільшенням витрат повітря. Виявлено чинники, що можуть бути застосовані для розрахунку гідродинамічних процесів при обробці сталі на установці «ківш-піч» з врахуванням шлакової складової. Показано, що при збільшенні витрат повітря у модельному ковші діаметр звільненої від шлаку (олії) поверхні води збільшується і при збереженні об'єму останнього збільшується товщина його шару. Показано доцільність продовження досліджень методом холодного фізичного моделювання гідродинаміки і тепло-, масообміну зі шлаком і без нього, що дозволить врахувати їх при гарячому моделюванні і в промислових умовах.

**Ключові слова:** ківш-піч, моделювання, шлак, розрахунку гідродинамічні процеси, електрична провідність

**Постановка проблеми.** Розробка нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів в сучасній металургії неможлива без використання експериментальних методів дослідження, які спрямовані, насамперед, на поліпшення якісних характеристик металу. Одним із сучасних методів дослідження процесів ковшової обробки сталі є холодне фізичне моделювання. Запровадження методу фізичного моделювання дозволяє суттєво знизити трудові і матеріальні витрати при проведенні експериментів, виявити чинники впливу на технологічний процес, описати явища в середовищі, що досліджується, підготувати вхідні дані для чисельного та гарячого фізичного моделювання і дослідно-промислового випробування для підтвердження експериментально отриманих результатів.

**Метою досліджень** є вивчення впливу шлакової складової на гідродинамічні процеси в прозорій ковшовій ванні при продуванні її повітрям методом холодного фізичного моделювання на водяній моделі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В попередній роботі започатковані модельні дослідження (використані методи холодного фізичного та чисельного моделювання) процесів гідродинаміки та тепло-, масопереносу, які відбуваються у водяній моделі ванни сталерозливного ковша (масштаб 1:6 відносно промислового ковша ємкістю 60т по металу, що використовується на ПрАТ «Дніпроспецсталь» (ПрАТ «ДСС»)) при продувці сталі аргоном під час обробки на УКП [1, 2]. Відмінністю теперішніх досліджень від попередніх є використання повітря (раніше використовувався азот) в якості газу для продувки ванни.

Попередньо в зв'язку з суперечливою інформацією що до раціонального розташування в ковші донних продувних фурм та ефективних режимів продувки ванни [3] в Україні [4-6] та за кордоном [7-9] здійснені відповідні фізичні та чисельні дослідження. З'ясовані закономірності впливу та встановлені раціональні варіанти розташування донних продувних фурм і режими продувки, наприклад, для ковша ємкістю 250 т [10]. Але перелічені роботи не враховували наявність шлаку в ковші, що безперечно вносило певні помилки в результати досліджень і викликало необхідність додаткових уточнень.

На початок теперішніх досліджень з літературних джерел було відомо про результати закордонних та вітчизняних досліджень у відповідному напрямку відносно впливу шлаку на процеси обробки металу в ковші. Так, наприклад, в статті [11] M.Iguchi та ін. методом холодного фізичного моделювання оцінюються критичні швидкості потоків газу, яким продували водяну ванну, що спричиняє захват шлаку, а в статті [12] D. Mazumdar та ін. повідомляють про емпіричні кореляційні залежності відносно оцінки Plume зони навколо аргонової плями на поверхні шлаку в ківші. Також були відомі роботи по дослідженням поведінки шлаку в ковшовій ванні [13-15], спінюванню шлаку [16] для різних умов та його складів і вплив останнього на явища перемішування в ковшах. Автором статті [17] запропонована модель 3-х фазних потоків і поведінки інтерфейсу «шлак-метал» при перемішуванні аргоном розплаву в ковші. У більш пізній публікації M. Peranandhan та D. Mazumdar [18] пропонують модель аргонової плями в ковшовій ванні зі шлаковим покриттям.

В наведених публікаціях підкреслена важливість використання властивостей шлаку (насамперед міжфазного натягнення) та його складу для оцінки впливу на процеси перемішування ванни. Повідомляється, що наявність шлаку збільшує тривалість перемішування. Вказано на збільшення тривалості перемішування при скороченні швидкості потоків газу і збільшенні кількості фурм в ковші для продування ванни зі шлаком. Стверджується, що найбільший вплив на тривалість перемішування має кількість шлаку, а з фізичних властивостей на цю характеристику впливає поверхневий натяг та щільність шлаку.

Однак вказані узагальнені результати можна використати лише для якісної оцінки нижче розглянутих процесів, а для кількісної оцінки впливу шлаку в ванні певної ємкості з особливостями внутрішньої конфігурації (наприклад, при наявності посилення футерівки в бійній частині) вони не можуть бути використані, бо не враховують такі відмінності. Тому виникає необхідність проведення додаткових досліджень у відповідному напрямку.

**Основні матеріали дослідження.** Експериментальне обладнання в дослідженнях складалось з моделі сталерозливного ковша, наповненого дистильованою водою, донної продувної фурми, аналого-цифрового перетворювача з датчиками, термодатчика, а також металевої лінійки і секундоміра.

Ківш з прозорого органічного скла мав форму перевернутого усіченого конусу з верхнім діаметром 400мм і нижнім діаметром 345 мм, висотою 570 мм. У ковші встановлено перегородку, що імітує посилення футерівки в бійній частині і представляє собою площину, яка спирається на три точки: одна знаходиться на стінці ковша на висоті 325 мм, а дві інші - кінці хорди з центральним кутом  $88^\circ$  на днищі ковша. У днище ковша встановлена фурма, що має 25 отворів (загальна площа перерізу яких відповідає критерію подібності) в місці розташування в днищі, де вона знаходиться в промислових умовах (ПрАТ «ДСС»). Аналого-цифровий перетворювач - багатоканальний електронний прилад, який перетворює аналоговий сигнал в цифровий з визначенням електричної провідності досліджуваного середовища. Датчики розташовані групами (на висоті 30, 21 і 7 см) на стінках експериментального ковша по 4 каналам: 1 канал - на геометричному промені, що йде від центру днища і проходить через фурму, 2-й - на  $90^\circ$ , 3-й - на  $180^\circ$ , 4-й - на  $270^\circ$  проти годинникової стрілки від 1 каналу. Термодатчик призначався для заміру температури води, властивості якої можуть бути використані при подальшому чисельному дослідженні. Секундоміром визначали час продування.

На першому етапі досліджень проводили вивчення гідродинамічного стану ковшової ванни при різних (0,467л/хв, 0,733л/хв, 0,933л/хв, 1,2л/хв і 1,467л/хв) витратах повітря для продування через донну фурму без наявності шлаку, а на другому етапі - з наявністю шлакової складової. Прийняті витрати повітря відповідали промисловим витратам аргону (100л/хв, 200л/хв, 300л/хв, 400л/хв і 600л/хв) при обробці сталі на УКП. В якості розплавленого шлаку використали доступний матеріал рідкого стану - соняшникову олію, який за фізичними властивостями може бути застосований по критеріям подоби у водяній ванні – сталевому розплаві. Під час проведення експериментів початкова товщина шару шлаку (ванна без продувки) становила 14мм.

На протязі проведення експериментів з продуванням ванни здійснювали запис електричної провідності повітряно-водневого розчину (під час продування вода насичується повітрям) на багатоканальний регістратор. Крім того, на етапі з використанням олії проводили заміри товщини шлакового (олійного) шару і діаметру очищеної («оголеної») від нього поверхні води під час продувки (Рис. 1).

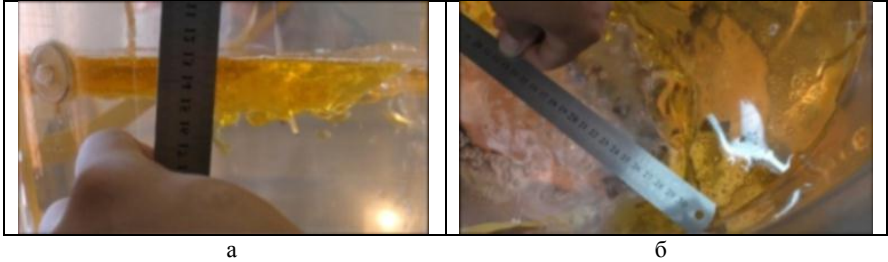


Рисунок 1 – Заміри товщини шару шлаку (олії) (а) та діаметру вільної від нього поверхні води під час продувки ванни повітрям (б)

Порівняння впливу шлакового шару (олії) на перемішування повітряно-водневого розчину проводили при наведених вище однакових витратах повітря. Зіставляли дані в відповідних каналах розташування датчиків на однаковій висоті від днища ківшу. На рис.2 наведено дані за 4 каналами датчиків, що розташовані на висоті 21 і 30 см від днища ковша, при витратах повітря 0,933л/хв відповідно.

На рис.2 представлено виявлені високочастотні коливання електричної провідності, що зумовлено проходженням повітря між двома електродами окремого датчика і швидкоплинністю гідродинамічного процесу. Такі ж коливання є на датчиках на висоті 7 см (не показані на малюнках). У цілому наведені дані дають уявлення про об'ємну картину електричної провідності у шарах води, які прилягають до стінок модельного ковша, при перемішуванні повітряно-водневого розчину за рахунок продувки повітрям через донну фурму.

Наведені результати свідчать про незначне зменшення, в цілому, електричної провідності розплаву при наявності шлаку. Таким чином, в цьому випадку, слід очікувати збільшення тривалості гомогенізації - перемішування, що підтверджує результати закордонних досліджень в цьому питанні. Наведені на рис.2а фіксовані значення електричної провідності розчину зі шлаком (олією) більші від значення цієї ж характеристики без шлаку. Така порівняльно відмінна картина виникла, ймовірно, тому, що розташований датчик (по каналу 1) знаходиться близько до поверхні розподілу фаз «повітря-вода» у вільній від шлаку (олії) зоні. Повітря, яким продувається розчин, у цій зоні з'єднується з атмосферним, але інші датчики на тій же висоті ванни вкриті шлаком,

який, ймовірно, заважає насиченню води газом зовні і сприяє її насиченню внутрішньо. Таким чином, при наявності шлаку (олії) вода насичується повітрям, ймовірно, більше, ніж без шлаку (газ, що продувається, залишає розчин, рухаючись у верхніх шарах води у ківші). На менших по висоті шарах повітряно-водного розчину (21 і 7см) спостерігається таке ж взаємне розташування (на рисунку) електричних характеристик, що і на вкритих шлаком у верхньому шару (30см) при витратах повітря 0,933л/хв і при інших досліджених його витратах.

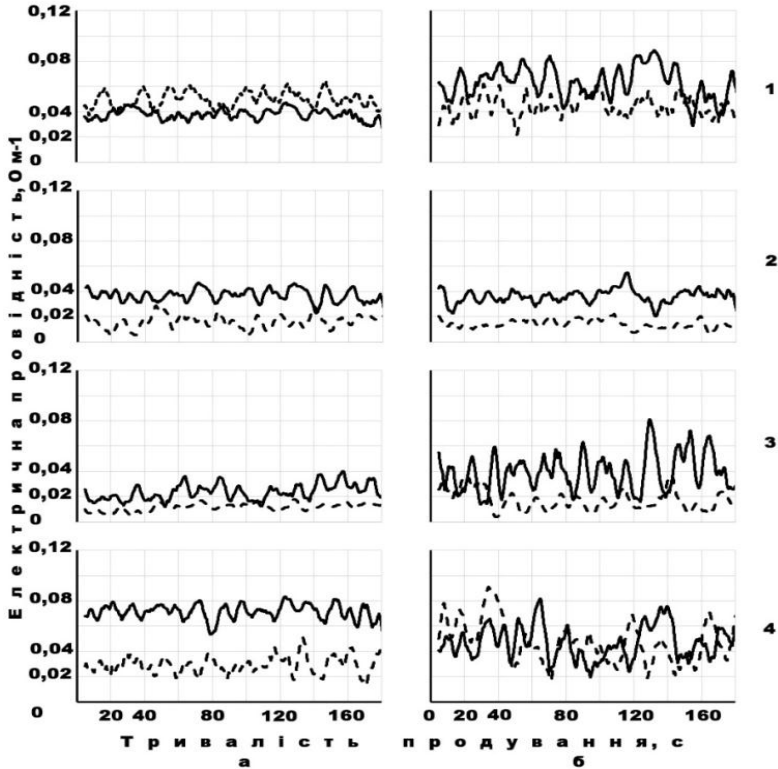


Рисунок 2 – Коливання електричної провідності (середня козвна величина) повітряно-водного розчину при продуванні повітрям (0,933л/хв) без шлаку (олії) – суцільна лінія і зі шлаком (олією) - перервна лінія. Датчики розташовані на висоті 30 (а) і 21 (б) см. Номер каналу вказаний праворуч

При інших витратах повітря теж спостерігались високочастотні коливання електричної провідності повітряно-водного розчину до значення  $0,13 \text{ Ом}^{-1}$  (при витратах повітря 1,2 л/хв у датчику,

розташованому на висоті 30см від дна ківша, що на 4-му каналі) з аналогічною нестабільною поведінкою середовища, що досліджується.

Обробка отриманих «зашумлених» даних проводилась в середовищі програми «Excel» з використанням значень середнього ковшного, які показані суцільною і перервною лініями. Це дозволило згладити високочастотні коливання дослідних даних і свідчило про нестабільність дослідного середовища до електричної провідності.

Подальша обробка даних подібного характеру потребує пошуку алгоритму відокремлення головного сигналу від високочастотного. Це дозволяють ефективно робити спеціалізовані програми, які адаптовані до окремих видів вихідних сигналів дослідного середовища. Алгоритм вирішення такої складної наукової задачі методами прикладної математики, яка виходить за рамки виконаних досліджень, ймовірно, може вплинути і скорегувати подальші висновки що до результатів холодного фізичного моделювання.

На рис.3 представлено співвідношення електричної провідності повітряно-водневого розчину без наявності олійного шлакового покриву до цієї ж характеристики з наявністю шлаку.

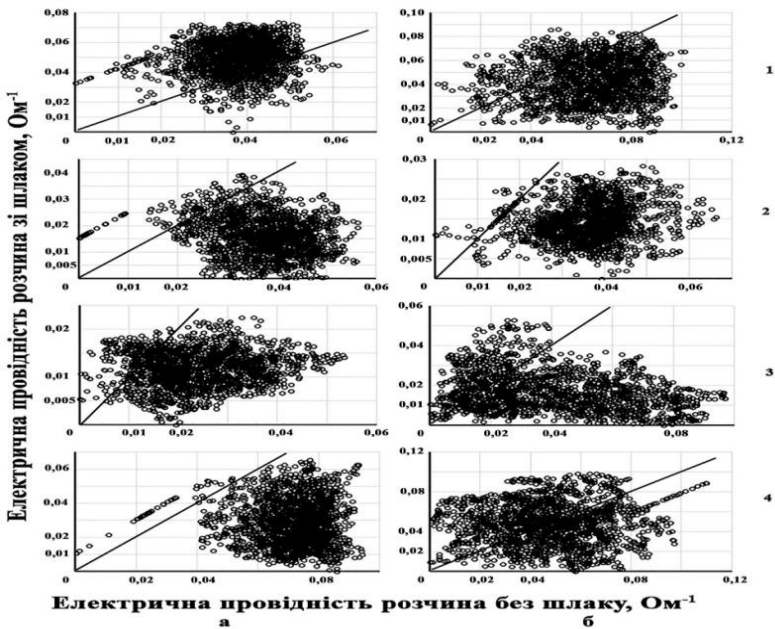
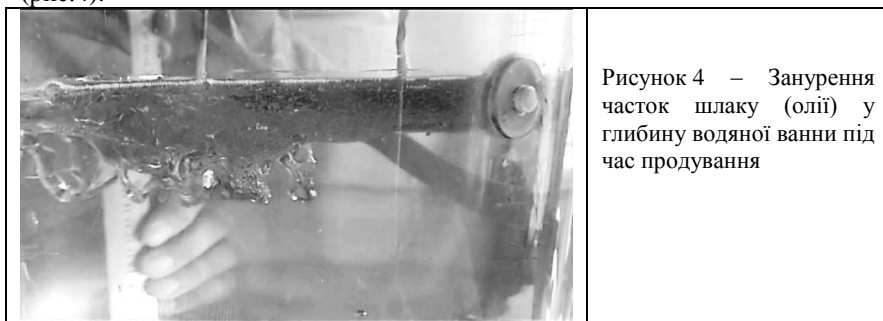


Рисунок 3. Співвідношення електричної провідності повітряно-водневого розчину без наявності олійного шлакового покриву до цієї ж характеристики з наявністю шлаку при розташуванні датчиків на висоті 30 (а) і 21см (б). Суцільна лінія – рівність електричних провідностей розплаву зі шлаком і без нього.

Характер отриманих експериментальних результатів можна пояснити тим, що поряд з височастотним коливанням електричної провідності у дослідженій системі одночасно частково спостерігаються їх значення у протифазній чи однаковій (окремі значення розташовані по прямій) спрямованості коливань.

У експериментах мали місце такі гідродинамічні явища, як закручування газового потоку від донної фурми до поверхні води, а також його незначні коливання у вертикальній площині розрізу ковша, що вплинуло на значне зменшення кореляційного коефіцієнту наведених малюнків (рис.3а-3б 1-4). На електричну провідність повітряно-водного розчину впливає коагуляція повітряних бульбашок (взаємне поглинання окремих бульбашок на електродах датчиків зменшує досліджувану характеристику). В цілому наведені на рис.3 співвідношення значень електричної провідності свідчать про незначне збільшення цієї характеристики зі шлаком (більшість співвідношень (крім рис.3-1а) лежить нижче суцільної лінії), що підтверджує дані на рис.2.

Олія (шлак) завдяки меншій густині в порівнянні з водою розташовувалась на поверхні останньої рівномірним шаром. На початку продувки з будь-якими витратами повітря у рамках досліджень виникав окремий водяний бугор (так званий бурун) на поверхні води над фурмою завдяки вихідним потокам повітряно-водного розчину. Горизонтальні потоки створювали умови для оголення поверхні води від шлаку (олії). При цьому поверхня розподілу фаз (води і масла) характеризувалась нестабільністю, низхідні потоки води захвачували незначну частину олії і втягували у глибину. При цьому утворювались протуберанці глибиною до 0,1 висоти ковша. При збільшенні витрат повітря кількість протуберанців і їх глибина зростали. Іноді малі частки олії відокремлювались і втягувались низхідними потоками до половини висоти ванни ковша (рис.4).



Результати виконаних досліджень представлено у таблиці. З наведених в табл. даних видно, що при збільшенні витрат повітря у модельному ковші діаметр звільненої від шлаку (олії) поверхні води

збільшується і при збереженні об'єму останнього збільшується товщина його шару.

Таблиця. Результати досліджень розміру вільної від шлаку (олії) поверхні розчину і товщини його шару

Експериментальні дослідження		
Витрати повітря, л/хв	Діаметр поверхні ванни вільної від шлаку (олії), мм	Товщина шару шлаку (олії), мм
0,467	150	15
0,733	160	16
0,933	190	18
1,200	220	19
1,467	250	21

### Висновки

Проведено дослідження перемішування водяної ванни в моделі ковша при продуванні крізь донну фурму методом холодного фізичного моделювання з урахуванням наявності шлакового шару і без нього. Зіставлення сигналів реєстратора електричної провідності повітряно-водневого розчину виявило незначне зменшення електричної провідності імітатора розплаву при наявності шлаку. Виявлено допоміжні чинники, що можуть бути застосовані при подальшому вдосконаленні програмного продукту для розрахунку гідродинамічних процесів при обробці сталі на УКП з врахуванням шлакової складової. Доцільним є продовження досліджень методом холодного фізичного моделювання гідродинаміки і тепло-, масообміну зі шлаком і без нього поряд з відповідними чисельними дослідженнями, що дасть змогу виявити залежність додаткових чинників впливу і зробити уточнення в отримані результати та врахувати їх при гарячому моделюванні і в промислових умовах.

### Бібліографічний список

1. *Подготовка* оборудования для физического моделирования процессов обработки расплава в сталеразливочном ковше / Пиптюк В.П., Прокопенко П.Г., Греков С.В. и др. // Сб. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии»: Днепропетровск. - 2014. - Вып.28. - С.161-169.
2. *Опробование* оборудования для моделирования тепловых процессов обработки расплава на установке ковш-печь/ Пиптюк В.П., Прокопенко П.Г., Греков С.В. и др. // Сб. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии»: Днепропетровск. - 2015. - Вып.30. -С.199-207.



3. *Актуальные проблемы создания агрегатов ковшовой обработки жидкой стали.* Ч.1. Обработка при атмосферном давлении / А.В.Протасов // *Сталь*. - 2010. - №10. - С.22-28.
4. *Компьютерное моделирование процессов перемешивания металла в ковше при продувке аргоном* / Смирнов А.Н., Салмаш И.Н. // *Электротметаллургия*. - 2014. - №2. - С.21-26.
5. *Опробование* комбинированной продувки металла в ковше аргоном в условиях ОАО «Запорожсталь» / Онода К.К., Жаворонков Ю.И., Бойченко Б.М. и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. -2010. -№7. - С.216-218.
6. *Исследование влияния вариантов компоновки донного продувочного узла на перемешивание расплава аргоном на двухпозиционной установке ковш-печь мощностью 45 МВ А* / Пиптюк В.П., Павлов С.Н., Самохвалов С.Е. и др.// *Металлургическая и горнорудная промышленность*. -2010. -№7. - С.213-215.
7. *Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace: Part 1, Heat and Mass Transfer* / V. Logar, D. Dovzan, I. Škrjanc // *ISIJ International*, Vol. 52, 2012, No. 3, PP. 402–412.
8. *Mixing Time and in Liquid Circulation Rate Steelmaking Ladles with Vertical Gas Injection* / H.Turkoglu, B. Farouk // *ISIJ International*, Vol. 31, 1991, No. 12, PP. 1371-1380.
9. *Numerical Simulation of Three Dimensional Fluid Flow and Mixing Process in Gas-stirred Ladles* / M.-Y. Zhu, I. Sawada, N. Yamasaki et. al. // *ISIJ International*. Vol. 36, 1996, No. 5.PP. 503-511.
10. *Efficient Configuration for the Vent System of a 250-Ton Steel Pounding Ladle* / Pipyuk V.P., Mos'pan V.V., Motsnyi V.V. et. al. // *Scopus, Metallurgist*, July 2016, Vol.60, Issue 3, PP. 380-383.
11. *Evaluation of Critical Gas Flow Rate for the Entrapment of Slag Using a Water Model* / M.Iguchi, Y.Sumida, R.Okada et.al. // *ISIJ International*, Vol.34, 1994, No. 2, PP. 164-170.
12. *Some Considerations Concerning Empirical Correlations for Plume (Spout) Eye Area in Slag Covered Metallic Melts* / D.Mazumdar, W.Evans // *ISIJ International*, Vol. 43, 2003, No. 12, PP. 2076–2078.
13. *Effect of Slag Properties on Mixing Phenomena in Gas-stirred Ladles by physical Modeling* / A.M. Amaro-Villeda, M. A. Ramirez-Argaez, A. N.Conejo // *ISIJ International*, Vol. 54, 2014, No. 1, PP. 1–8.
14. *Recent Advances in the Fluid Dynamics of Ladle Metallurgy* / G.Irons, A.Senguttuvan, K. Krishnapisharody // *ISIJ International*, Vol. 55, 2015, No. 1, PP. 1–6.
15. *Mixing Models for Slag Covered, Argon Stirred Ladles* / S.P. Patil, D. Sftish, M. Peranandhanathan et.al. // *ISIJ International*, Vol. 50, 2010, No. 8, PP. 1117–1124.
16. *Phizical Modelling of Slag Foaming for Various Operating Conditions and Slag Compositions* / D.Lotun, L.Pilot // *ISIJ International*, Vol.45, 2005, No.6, PP.835-840.
17. *Modeling of Three-phase Flows and Behavior of Slag/Steel Interface in an Argon Gas Stirred Ladle* / B. Li, H.Yin, C.Q. Zhou et.al.// *ISIJ International*, Vol. 48, 2008, No. 12.PP. 1704–1711.
18. *Modeling of Slag Eye Area in Argon Stirred Ladles* / M. Peranandhanthan, D. Mazumdar // *ISIJ International*, Vol. 50, 2010, No. 11, PP. 1622–1631.

## Reference

1. *Podgotovka* oborudovaniya dlya fizicheskogo modelirovaniya protsessov obrabotki rasplava v stalerazlivochnom kovshe / Piptyuk V.P., Prokopenko P.G., Grekov S.V. i dr. // Sb. tr. ICHM NANU «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chornoy metallurgii»: Dnepropetrovsk. - 2014. - Vyp.28. - S.161-169.
2. *Oprobovaniye* oborudovaniya dlya modelirovaniya teplovykh protsessov obrabotki rasplava na ustanovke kovsh-pech'/ Piptyuk V.P., Prokopenko P.G., Grekov S.V. i dr. // Sb. tr. ICHM NANU «Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chornoy metallurgii»: Dnepropetrovsk. - 2015. - Vyp.30. -S.199-207.
3. *Aktual'nyye* problemy sozdaniya agregatov kovshovoy obrabotki zhidkoy stali.CH.1. Obrabotka pri atmosfernom davlenii / A.V.Protasov // Stal'. -2010. - №10. -S.22-28.
4. *Komp'yuternoye* modelirovaniye protsessov peremeshivaniya metalla v kovshe pri produvke argonom / Smirnov A.N., Salmash I.N. // Elektrometallurgiya. - 2014. - №2. - S.21-26.
5. *Oprobovaniye* kombinirovannoy produvki metalla v kovshe argonom v usloviyakh OAO «Zaporozhstal'» / Onoda K.K., Zhavoronkov YU.I., Boychenko B.M. i dr. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. -2010. -№7. - S.216-218.
6. *Issledovaniye* vliyaniya variantov komponovki donnogo produvochnogo uzla na peremeshivaniye rasplava argonom na dvukhpozitsionnoy ustanovke kovsh-pech' moshchnost'yu 45 MV A / Piptyuk V.P., Pavlov S.N., Samokhvalov S.Ye. i dr.// Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. -2010. -№7. - S.213-215.
7. *Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace: Part 1, Heat and Mass Transfer* / V. Logar, D. Dovzan, I. Škrjanc // ISIJ International, Vol. 52, 2012, No. 3, PP. 402–412.
8. *Mixing Time and in Liquid Circulation Rate Steelmaking Ladles with Vertical Gas Injection* / H.Turkoglu, B. Farouk // ISIJ International, Vol. 31, 1991, No. 12, PP. 1371-1380.
9. *Numerical Simulation of Three Dimensional Fluid Flow and Mixing Process in Gas-stirred Ladles* / M.-Y. Zhu, I. Sawada, N. Yamasaki et. al. // ISIJ International. Vol. 36, 1996, No. 5.PP. 503-511.
10. *Efficient Configuration for the Vent System of a 250-Ton Steel Pounding Ladle* / Piptyuk V.P., Mos'pan V.V., Motsnyi V.V. et. al. // Scopus, Metallurgist, July 2016, Vol.60, Issue 3, PP. 380-383.
11. *Evaluation of Critical Gas Flow Rate for the Entrapment of Slag Using a Water Model* / M.Iguchi, Y.Sumida, R.Okada et.al. // ISIJ International, Vol.34, 1994, No. 2, PP. 164-170.
12. *Some Considerations Concerning Empirical Correlations for Plume (Spout) Eye Area in Slag Covered Metallic Melts* / D.Mazumdar, W.Evans // ISIJ International, Vol. 43, 2003, No. 12, PP. 2076–2078.
13. *Effect of Slag Properties on Mixing Phenomena in Gas-stirred Ladles by physical Modeling* / A.M. Amaro-Villeda, M. A. Ramirez-Argaez, A. N.Conejo // ISIJ International, Vol. 54, 2014, No. 1, PP. 1–8.
14. *Recent Advances in the Fluid Dynamics of Ladle Metallurgy* / G.Irons, A.Senguttuvan, K. Krishnapisharody // ISIJ International, Vol. 55, 2015, No. 1, PP. 1–6.
15. *Mixing Models for Slag Covered, Argon Stirred Ladles* / S.P. Patil, D. Sftish, M. Peranandhanathan et.al. // ISIJ International, Vol. 50, 2010, No. 8, PP. 1117–1124.

16. *Physical Modelling of Slag Foaming for Various Operating Conditions and Slag Compositions* / D.Lotun, L.Pilot // ISIJ International, Vol.45, 2005, No.6, PP.835-840.
17. *Modeling of Three-phase Flows and Behavior of Slag/Steel Interface in an Argon Gas Stirred Ladle* / B. Li, H.Yin, C.Q. Zhou et.al.// ISIJ International, Vol. 48, 2008, No. 12,PP. 1704–1711.
18. *Modeling of Slag Eye Area in Argon Stirred Ladles* / M. Peranandhanthan, D. Mazumdar // ISIJ International, Vol. 50, 2010, No. 11, PP. 1622–1631.

***В. П. Пиптюк, П. Г. Прокопенко, С. В. Греков, Г. А. Андриевский***

**Исследования влияния шлака на перемешивание ковшовой ванны при донной продувке методом физического моделирования**

Целью работы является определение влияния шлака на процессы перемешивания расплава стали в ковше при его донной продувке. Исследование методом физического моделирования проводили на прозрачной модели ковша при его донной продувке без слоя шлака и при его наличии. В качестве жидкости металла использовали воду, а шлака - подсолнечное масло. Продувку ванны осуществляли воздухом с различными расходами. Контролировали толщину слоя шлака и площадь обнажения поверхности металла от него. Определяли уровень электрической проводимости водяной ванны в зависимости от переменных факторов. Установлено незначительное уменьшение электрической проводимости имитатора расплава (воды) при наличии шлака, а также увеличение толщины слоя шлака и площади обнажения поверхности расплава с увеличением расхода воздуха. Выявлены факторы, которые могут быть применены для расчета гидродинамических процессов при обработке стали на установке «ковш-печь» с учетом шлаковой составляющей. Показано, что при увеличении расхода воздуха увеличивается диаметр освобожденной от шлака (масла) поверхности воды и при сохранении объема последнего увеличивается толщина его слоя. Показана целесообразность продолжения исследований методом холодного физического моделирования гидродинамики, тепло- и массообмена со шлаком и без него, что позволит учесть их при горячем моделировании и в промышленных условиях.

**Ключевые слова:** ковш-печь, моделирование, шлак, расчета гидродинамические процессы, электрическая проводимость

***V. P. Pipetuk, P. G. Prokopenko, S. V. Grekov, G. O. Andrievsky***

**Investigation of the effect of slag on mixing of a bucket bath at bottom blowing by a method of physical modeling**

The purpose of the work is to determine the effect of slag on the processes of mixing the steel melt in the ladle during its bottom purge. The study by physical modeling was carried out on a transparent bucket model with its bottom purge without slag layer and, if any, it was present. Water was used as the liquid of the metal, and slag was sunflower oil. The bath was washed with air at various costs. Controled the thickness of the slag layer and the surface area of the metal surface from it. The level of conductivity of a water bath was determined depending on the variables. A slight decrease in the electrical conductivity of the melt mist (water) in the presence of slag is

observed, as well as an increase in the thickness of the slag layer and the surface area of the melt surface with increasing air flow. The factors which can be applied for the calculation of hydrodynamic processes during the processing of steel on the "ladle-furnace" installation, taking into account the slag component, are revealed. It is shown that when the air flow increases, the diameter of the water released from the slag (oil) increases, and when the volume of the latter is stored, the thickness of its layer increases. The expediency of continuation of researches by cold physical modeling of hydrodynamics, heat and mass transfer with and without slag is shown, which will allow them to be taken into account in hot modeling and in industrial conditions.

**Keywords: ladle furnace, modeling, slag, calculation of hydrodynamic processes, electrical conductivity**

*Стаття надійшла до редакції збірника 24.10.2018 року,  
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування  
(Протокол засідання редакційної колегії збірника №1  
від 26 грудня 2018 року)  
Рецензенти: д.т.н., В.А.Гладких; А.П.Шевченко*