

Л. С. Молчанов<sup>1</sup>  
 О. С. Лантух<sup>1</sup>  
 Є. В. Синегін<sup>1</sup>

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕРОЗІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ФУТЕРІВКИ СТАЛЕРОЗЛИВНОГО КОВША В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

<sup>1</sup>Національна металургійна академія України, Дніпро

Метою роботи є визначення умов зменшення швидкості ерозійного руйнування потоками металевого розплаву футерівки сталерозливних ковшів. Супутнім і невід'ємним позитивним ефектом є зменшення забруднення сталі продуктами руйнування футерівки (екзогенними неметалевими включеннями). У статті розглянуто механізми руйнування вогнетривкої футерівки сталерозливних ковшів. Відмічено значний вплив ерозійного зносу футерівки ковша впродовж випуску сталі зі сталеплавильного агрегату та в процесі його наповнення на стійкість футерівки ковша. Запропоновано методу фізичного моделювання ерозійного зносу вогнетриву з використанням основних положень теорії подоби. Грунтуючись на  $\pi$ -теоремі, авторами запропоновані безрозмірні числа подібності, використовуючи які визначено масштаби моделювання, зокрема масштабні коефіцієнти для перерахунку твердості вогнетриву, густини рідини, лінійного масштабу моделі та швидкості руйнування вогнетриву. З використанням отриманих масштабів побудовано експериментальну установку та розроблено методику проведення експерименту. Для проведення експерименту використовували масштабні моделі ковшів зі стандартною і розробленою в ході попередніх досліджень схемою футерівки. Після проведення фізичного моделювання з використанням спеціальної методики виміряна глибина руйнування футерівки моделі ковша. За результатами вимірювання побудовано топографічну схему зносу футерівки модельного ковша для варіантів зі стандартною схемою футерівки та схемою, запропонованою авторами. Встановлено, що запропонована конструкція футерівки забезпечує захист «бійного місця» та зменшує інтенсивність розмивання потоками розплаву ділянки сполучення футерівки стін і днища ковша. Середня швидкість руйнування днища за використання футерівки запропонованої конструкції зменшилася на 18 %. Наукова новизна роботи полягає у розробці теоретичних основ фізичного низькотемпературного моделювання ерозійного руйнування високотемпературними металевими розплавами вогнетривкої футерівки ковшів та інших металургійних агрегатів. Практична значимість роботи полягає у розробці конструкції футерівки сталерозливних ковшів, яка забезпечує високі стійкість та водночас зменшення рівня забрудненості сталі екзогенними неметалевими включеннями.

**Ключові слова:** фізичне моделювання, ерозія, футерівка, сталерозливний ківш.

### Вступ

Сучасна футерівка металургійних ковшів є складним композиційним матеріалом, що складається з декількох компонентів. Це зумовлено особливостями її експлуатації, зокрема фізико-хімічними особливостями руйнування. Узагальнюючи відомості про досвід експлуатації вогнетривкої футерівки сталерозливних ковшів в промислових умовах, можна виділити такі найзначущі механізми руйнування вогнетривів [1]:

- механічний знос — руйнування за рахунок механічної ерозії, створеної дією металургійних розплавів, що обтікають вогнетривкий матеріал з високою швидкістю;
- термічне (термоциклічне) руйнування — чергування високотемпературного нагріву ковша з подальшим охолодженням протягом кампанії;

– хімічне руйнування — відбувається у об’ємі вогнетривкого матеріалу, за контакту з рідкими металевими й шлаковими та газовою окислювальною фазами, за рахунок утворення легкоплавких, летких сполук, що легко видаляються.

Серед перелічених механізмів руйнування вогнетривких матеріалів вплив кожного на окремі ділянки футерівки сталерозливного ковша неоднаковий, що викликано різними умовами експлуатації. Основним джерелом механічного (ерозійного) зносу вогнетривких матеріалів на етапі випуску плавки є взаємодія з високошвидкісними потоками рідких металевих і шлакових фаз. Враховуючи, що основним матеріалом для виконання футерівки сучасних металургійних агрегатів є переклазовуглецеві композиції, та виходячи з досвіду їх експлуатації, необхідно зазначити, що матеріали, які містять понад 10 % графіту, не утворюють тріщин від термічних напруг в процесі експлуатації, але при цьому їхня стійкість знижується через взаємодію зі шлаковими та металевими фазами [2].

Виходячи з вищевикладеного матеріалу, у статті наведено матеріали досліджень щодо механічного руйнування футерівки сталерозливних ковшів, а саме її донної частини. При цьому актуальність цієї теми досліджень зумовлена значним впливом ерозійного зносу футерівки на якість рідкого металу через забруднення екзогенними неметалевими включеннями. Зменшення кількості неметалевих включень, що переходять до розплаву за рахунок ерозійного зносу футерівки може бути досягнуте шляхом вибору геометричної форми робочого простору сталерозливного ковша, що буде сприяти раціональній організації потоків рідкого металевого розплаву при наповненні ковша.

### Методика проведення досліджень

На попередніх етапах досліджень встановлено, що зміна геометричних параметрів робочого простору сталерозливного ковша значною мірою впливає на ефективність видалення неметалічних включень [3]. При цьому вплив встановлених раціональних параметрів робочого простору сталерозливного ковша на особливості гідродинамічного руйнування є практично встановленими. Таким чином, *метою дослідження є встановлення впливу геометричних параметрів футерівки сталерозливного ковша на гідродинамічні особливості взаємодії вогнетривких матеріалів з високотемпературними металургійними розплавами (шлаки й метали).*

Дослідження гідродинамічних особливостей взаємодії футерівки сталерозливного ковша з металургійними розплавами здійснювали методом холодного моделювання, яке ґрунтується на використанні  $\pi$ -теореми [4].

Механічне або ерозійне руйнування футерівки струменем рідкого металу найінтенсивніше відбувається в області днища ковша на початку випуску сталі зі сталеплавильного агрегату. Очевидно, що не останню роль у руйнуванні відіграє імпульс струменя, величина якого залежить від прискорення вільного падіння  $g$ , об’ємної витрати рідини  $q$ , густини рідини  $\rho$  і висоти падіння струменя  $h$ . За параметр, що характеризує стійкість вогнетриву до ерозійного руйнування, приймаємо його міцність  $\sigma$ . Швидкість руйнування металургійними розплавами твердих тіл, зокрема і вогнетривів, на думку автора роботи [5] описується потоком маси  $m$ , який показує вагу вогнетриву, що відділилася від футерівки впродовж її контакту зі струменем з одиниці площі її поверхні.

В’язкістю рідини можна знехтувати оскільки, число Рейнольдса є автомодельним у випадку стійкого ламінарного або розвиненого турбулентного режиму течії [6]—[8]. За умов випуску сталі з конвертора в ківш швидкість потоків в останньому не перевищує 7 м/с, а число Рейнольдса для ковша ємністю 100 т та середнім діаметром робочого простору 2,5 м складає близько  $2,1 \cdot 10^7$ . Це відповідає другій автомодельній області числа Рейнольдса [4], [7], тобто в моделюванні достатньо забезпечити умову  $Re > 13000$ .

Функціональна залежність має вигляд

$$m = f(g, q, \rho, h, \sigma). \quad (1)$$

Загалом у розмірності присутні  $N = 6$  параметрів, що мають різну фізичну природу. До їх розмірності входять  $r = 3$  первинні одиниці вимірювання: кг, м, с. Тоді загальна кількість безрозмірних комплексів, що визначають розглянуту систему

$$\Pi = N - r = 6 - 3 = 3. \quad (2)$$

Числа подібності, отримані за методикою Маркова [6], наведені у табл. 1. Порядок величини більшості з них близький до нуля, що свідчить на користь їх адекватності.

Перш ніж розраховувати масштаб моделі, розрахуємо число ступенів свободи, які має розгля-

нута система. У розрахунку прийнято 5 величин ( $m$ ,  $q$ ,  $\rho$ ,  $l$  — лінійний розмір,  $\sigma$ ),  $g$  з масштабом 1:1 не враховуємо. Вони зв'язані між собою трьома обмежувальними умовами ( $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$ ). Тоді число ступенів свободи складе  $5 - 3 = 2$ , тобто лише для двох величин масштаб можна обрати довільно. До їхнього числа слід віднести  $\rho$  і  $l$ , оскільки для імітації рідкої сталі на моделі зручно використовувати воду.

У цьому випадку система обмежена 3 умовами:

$$\begin{cases} \pi_1 = idem, \\ \pi_2 = idem \\ \pi_3 = idem \end{cases} \text{ або } \begin{cases} k_m \cdot k_\rho^{-1} \cdot k_l^{-0,5} = 1, \\ k_\sigma \cdot k_\rho^{-1} \cdot k_l^{-1} = 1, \\ k_q \cdot k_l^{-2,5} = 1, \end{cases} \quad (3)$$

де  $k_m$ ,  $k_q$ ,  $k_\rho$ ,  $k_l$ ,  $k_\sigma$  — масштаби, відповідно, потоку маси, об'ємної витрати рідини, лінійних розмірів та міцності вогнетриву.

Таблиця 1

Критерії подібності для описання ерозійного зносу вогнетривів

Параметр	Величина	Одиниця вимірювання	Масштаб	Безрозмірний критерій	Величина критерію
$m$	$10^{-2}$	кг/(м <sup>2</sup> ·с)	—	$\pi_1 = \frac{m}{\rho\sqrt{gh}}$	$10^{-7}$
$\sigma$	$10^4$	Н/м <sup>2</sup> = кг/(м·с <sup>2</sup> )	—	$\pi_2 = \frac{\sigma}{\rho gh}$	$10^{-1}$
$\rho$	$10^3$	кг/м <sup>3</sup>	кг	—	—
$g$	$10^1$	м/с <sup>2</sup>	с	—	—
$h$	$10^0$	м	м	—	—
$q$	$10^{-1}$	м <sup>3</sup> /с	—	$\pi_3 = \frac{q}{\sqrt{g \cdot h^5}}$	$10^{-3}$

Після логарифмування системи (3), отримуємо систему лінійних параметричних рівнянь:

$$\begin{cases} \lg k_m = \lg k_\rho + 0,5 \lg k_l, \\ \lg k_\sigma = \lg k_\rho + \lg k_l, \\ \lg k_q = 2,5 \lg k_l. \end{cases} \quad (4)$$

Система рівнянь (4) розв'язується в програмі MathCAD матричним методом. Для її розв'язання необхідно спочатку задатися величиною масштабів параметрів, які вибрано довільно. У табл. 2 подані розраховані масштаби вибраних параметрів.

Таблиця 2

Величини параметрів для моделі і натурального зразка, їх масштаби та області визначення вибраних чисел подібності

Параметри та числа подоби	Натура	Модель	Масштаб
Потік маси $m$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$4,15 \cdot 10^{-4}$	1:36
Міцність вогнетриву $\sigma$ , Н/м <sup>2</sup>	40000	221	1:181
Густина рідини $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7200	1000	1:7,2
Прискорення вільного падіння $g$ , м/с <sup>2</sup>	9,81	9,81	1:1
Висота падіння струменя $h$ , м	3...4	0,12...0,16	1:25
Об'ємна витрата рідини $q$ , л/с	58...77	0,018...0,024	1:3182
$\pi_1$	$3,3 \cdot 10^{-7} \dots 3,8 \cdot 10^{-7}$		—
$\pi_2$	0,1...0,2		—
$\pi_3$	$5,8 \cdot 10^{-4} \dots 1,2 \cdot 10^{-3}$		—

Моделювання припускало проведення серії з 5 послідовних наливів для моделі ковша з базовою моделлю футерівки й прогресивної. Зазначені конструкції дизайну футерівки ковшів показані на рис. 1.

При цьому, процес експлуатації футерівки сталерозливних ковшів у ході експерименту макси-

мально наближений до промислових умов. Так завдяки конструкції експериментальної установки (рис. 2) контролювались висота падіння струменя і тривалість витікання рідини, що імітує металевий розплав.

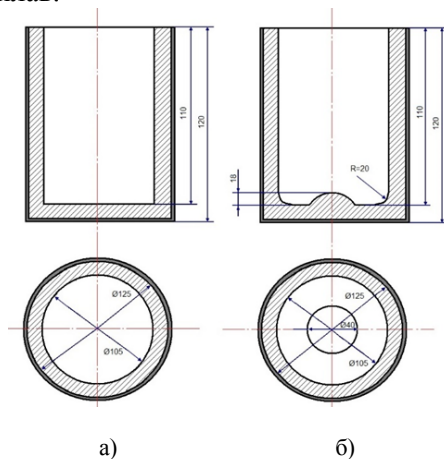


Рис. 1. Ескіз конструкції футерівки сталерозливних ковшів: а — традиційної конструкції; б — розробленої конструкції

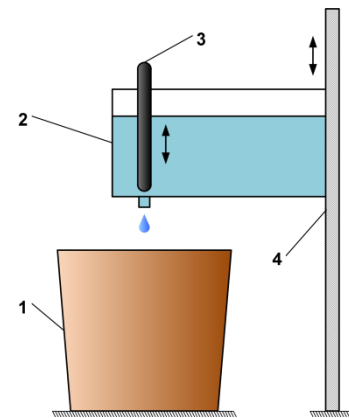


Рис. 2. Схема експериментальної установки для моделювання випуску металу в сталерозливний ківш: 1 — ківш; 2 — ємність з водою; 3 — стопорний пристрій; 4 — стійка

З метою імітації футерівки сталерозливного ковша з розрахованою міцністю (див. табл. 2) застосовували піщано-глинисту суміш у співвідношенні 21:5, яку формували у кожух ковша за шаблоном у вологому стані. Сушіння футерівки здійснювалося природно, витримуючи впродовж 10 діб за температури 28...30 °С.

Вивчення процесу ерозійного руйнування футерівки сталерозливного ковша здійснювалося за такою методикою. Після наповнення ковша на установці (див. рис. 2), ківш витримували впродовж 2...3 хвилин, після чого воду зливали через верхню крайку ковша. Кожна кампанія футерівки моделі сталерозливного ковша допускала послідовне прийняття 5 плавок. З метою виключення помилок в проведенні експерименту передбачено повторення кожного експерименту по 5 разів і виведення середніх показників глибини руйнування футерівки.

Після закінчення кожного експерименту в серії проводили механічне сканування поверхні футерівки моделі сталерозливного ковша й характеру її руйнування. Воно передбачало встановлення у ківш відцентрованої направляючої, уздовж якої рухався вимірювальний пристрій (шаблон), за допомогою якого штангенциркулем визначали зміну розмірів робочого простору порівняно з початковими величинами. Точність вимірювання складала 0,1 мм.

З метою отримання докладнішої інформації про моделювання процесу руйнування футерівки в ході експлуатації сталерозливного ковша його поверхня футерівки була розсічена чотирма площинами (рис. 3), що проходять через вертикальну вісь моделі ковша (площини I-I; II-II; III-III; IV-IV). При цьому в донній частині ковша уздовж лінії перетинання кожної з площин виділялося 5 точок: 0 — центр донної частини («бійне» місце); 1 — 25 % радіуса донної частини; 2 — 50 % радіуса донної частини; 3 — 75 % радіуса донної частини й 4 — 100 % радіуса донної частини. З метою уточнення зношування футерівки у вертикальному напрямку уздовж проекції кожної із площин на бічній поверхні стін футерівки виділяли 5 точок: 0' — ділянка з'єднання донної частини футерівки й стін ковша; 1' — 25 % висоти робочого простору ковша; 2' — 50 % висоти робочого простору ковша; 3' — 75 % висоти робочого простору ковша й 4' — 100 % висоти робочого простору ковша.

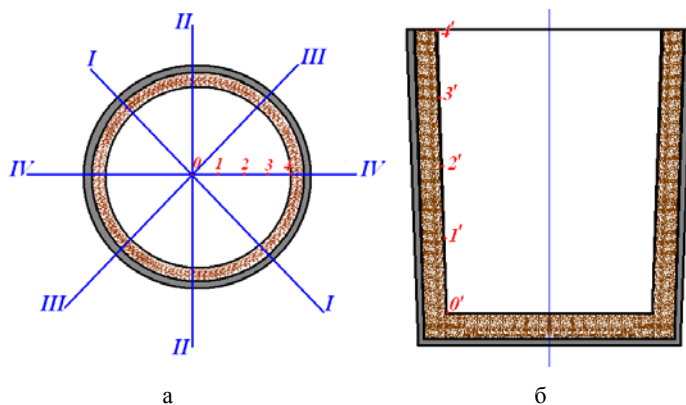


Рис. 3. Схема зняття топографії руйнування футерівки сталерозливного ковша за «холодного» моделювання: а — вертикальна проекція; б — горизонтальна проекція по напівплощині I—0

Результати проведених досліджень гідродинамічних особливостей руйнування футерівки сталерозливних ков-

шів у процесі експлуатації й впливу на цей процес конструкційних особливостей футерівки показані на рис. 4. В ході виконання досліджень отримана топографія ерозійного руйнування футерівки сталерозливного ковша в процесі експлуатації для стандартної конструкції та оптимізованої (рис. 4а, б). Таким чином, у випадку застосування футерівки обох конструкцій спостерігається значний знос уздовж лінії О—II, що пов'язано з особливостями проведення експерименту (вздовж цієї лінії здійснювався злив рідини, що імітувала розплав після наповнення).

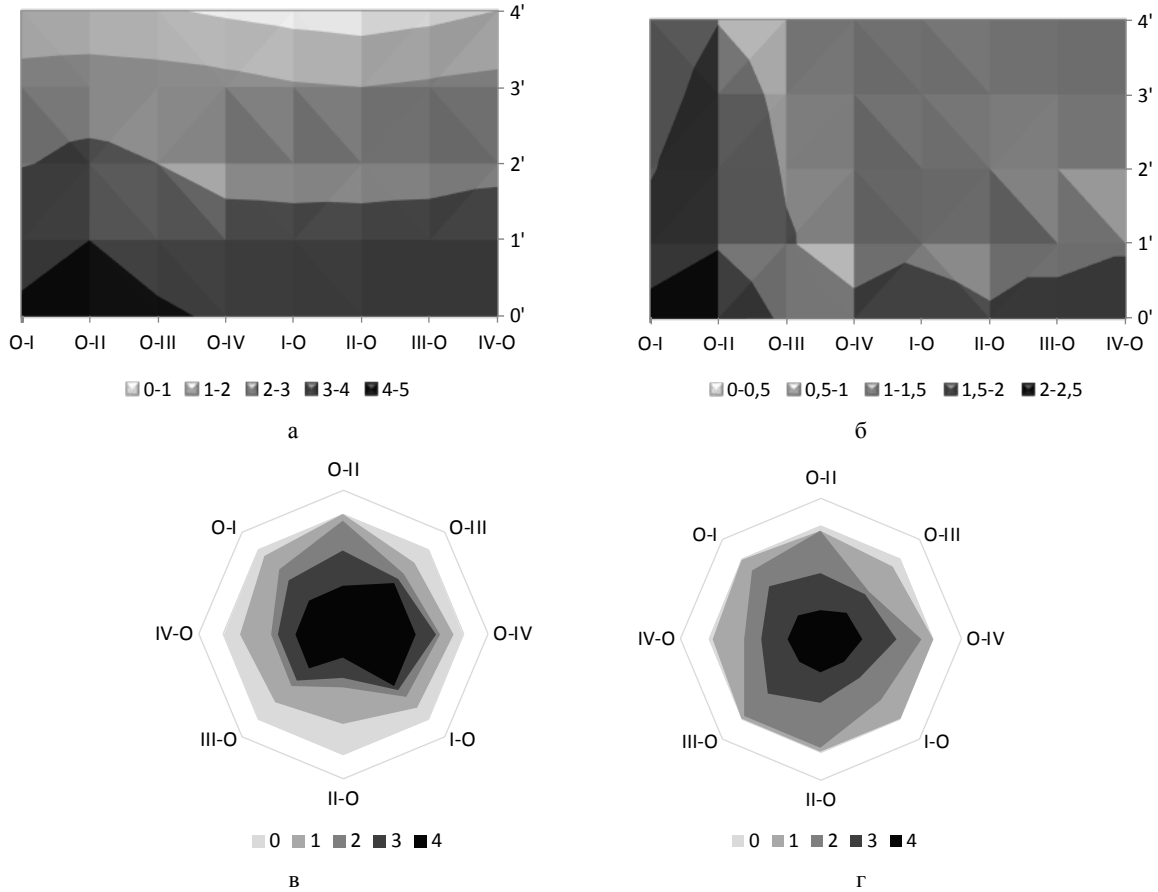


Рис. 4. Топографія зносу футерівки на моделі ковша (числа біля кольорових маркерів — глибина зносу в міліметрах): а — стіна базовий варіант; б — стіна розроблений варіант; в — днище базовий варіант; г — днище розроблений варіант

Що стосується особливостей топографії руйнування футерівки стандартної конструкції, то згідно з даними, які наведено на рис. 4а спостерігається значний ерозійний знос практично до  $\frac{1}{2}$  висоти робочого простору ковша, що викликано значною турбулізацією потоків розплаву. За рахунок цього значно підвищується енергія потоку рідини, що руйнує футерівку. Середня швидкість руйнування днища склала 0,73 мм/плавку.

У випадку використання оптимізованої конструкції футерівки (рис. 4б) турбулентність потоків, які контактують з футерівкою, зменшується, що призводить до зменшення швидкості руйнування. На топографії руйнування ця закономірність відображається у зменшенні загальної області руйнування футерівки до  $\frac{1}{4}$  висоти ковша. Середня швидкість руйнування склала 0,59 мм/плавку.

Таким чином, відповідно до проведених досліджень, встановлено, що з переходом від раціональної конструкції до оптимізованої забезпечує зменшення швидкості руйнування на 18,1 %.

### Висновки

Проаналізовано ефективність запропонованої конструкції футерівки сталерозливного ковша щодо зменшення інтенсивності руйнування вогнетривів. Встановлено, що запропонована конструкція футерівки забезпечує захист «бійного місця» та зменшує інтенсивність розмивання потоками розплаву ділянки сполучення футерівки стін і днища ковша. Середня швидкість руйнування днища за використання футерівки запропонованої конструкції зменшилася на 18 %.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Watanabe, Y. Kusaka, and N. Shinoda, "High Carbon Magnesia Refractories," *Taikabutsu Refractories*, vol. 31, no. 262, pp. 593-596, 1979.
- [2] В. И. Пишида, «Совершенствование технологии производства стали в конвертерах для повышения стойкости их футерівки.» Дис. канд. техн. наук, металлургический факультет, НМетАУ, Днепропетровск, 2007.
- [3] L. S. Molchanov, Y. V. Synehin, O. S. Lantukh, and I. S. Ryshkova, "Research of Non-metallic Inclusions Removal in Teeming Ladles of Various Design," *Journal of Engineering Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. C1-C4, 2018.
- [4] А. А. Гухман, *Применение теории подобия к исследованию процессов теплообмена*. Москва, СССР: Высшая школа, 1974.
- [5] К. Ф. Чмирков, «Вдосконалення технології одержання сталі в конвертерах малої ємкості при використанні залізівмісних брикетів, що містять карбід кремнію.» дис. канд. техн. наук, металургійний факультет, НМетАУ, Дніпро, 2017.
- [6] Б. Л. Марков, и А. А. Кирсанов, *Физическое моделирование в металлургии*. Москва, СССР: Металлургия, 1984.
- [7] А. А. Гухман, *Введение в теорию подобия*, изд. 2-е доп. Москва: Высшая школа, 1973, 296 с.
- [8] В. Д. Румянцев *Теория тепло- и массообмена*. Учебное пос. Днепропетровск: Пороги, 2006, 532 с.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.12.2018

**Молчанов Лавр Сергійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри металургії сталі, e-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua ;

**Лантух Олександр Сергійович** — аспірант кафедри металургії сталі, e-mail: Shurik.dp.ua@gmail.com ;

**Синегін Євген Володимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедри металургії сталі, e-mail: Sinegin.ev@gmail.com .

Національна металургійна академія України, Дніпро

**L. S. Molchanov<sup>1</sup>**  
**O. S. Lantukh<sup>1</sup>**  
**Ye. V. Synehin<sup>1</sup>**

## Physical Modeling of Erosion Destruction of Teeming Ladle Lining in the Process of Its Exploitation

<sup>1</sup>National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro

*The aim of the work is to determine the conditions for reducing the rate of erosion destruction of teeming ladles lining by flows of liquid metal. A concomitant and inherent positive effect is the reduction of steel pollution by the products of lining destruction (exogenous non-metallic inclusions). In the article there have been discussed the mechanisms of destruction of the refractories of teeming ladles. It is observed a significant effect of erosive destruction of the lining during the steel production from the steelmaking unit and in the process of its filling on its life. The authors have proposed a method of physical modeling of erosive destruction of refractories using the basic principles of the similarity theory. Based on the  $\pi$ -theorem, the authors proposed dimensionless similarity numbers, based on which the model scales were determined, in particular, the scale factors for the refractory hardness, fluid density, linear scale of the model and the rate of destruction of refractory. Using the obtained scales, the authors assembled an experimental facility and developed the methodology of an experiment. For the experiment, large-scale models of ladles with standard and developed scheme of lining were used. After carrying out physical modeling, the depth of lining destruction of the ladle model has been measured using a special technique. Based on the results of measurement, a topographic scheme of the lining destruction of the model ladle for the standard and proposed lining has been drawn. It has been determined that the developed lining design provided protection for the "impact zone" and reduced the intensity of lining erosion in the area of joint the walls and the bottom of the ladle by the flows of liquid metal. The average rate of destruction of the bottom when using the developed design of the lining is reduced by 18%. The scientific novelty of the work consists in the development of the theoretical foundations of the physical low-temperature modeling of erosive destruction of the ladles lining and other metallurgical units by high-temperature metal melts. The practical significance of the work is the lining design of the teeming ladles, which provides a long life of the teeming ladles with a simultaneous decrease in the level of steel pollution by exogenous nonmetallic inclusions.*

**Keywords:** physical modeling, erosion, lining, teeming ladle.

**Molchanov Lavr S.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Steel Metallurgy, e-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua ;

**Lantukh Oleksandr S.** — Post-Graduate Student of the Chair of Steel Metallurgy, e-mail: Shurik.dp.ua@gmail.com ;

**Synehin Yevhen V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Steel Metallurgy, e-mail: Sinegin.ev@gmail.com

Л. С. Молчанов<sup>1</sup>  
А. С. Лантух<sup>1</sup>  
Е. В. Синегин<sup>1</sup>

## Физическое моделирование эрозионного разрушения футеровки сталеразливочного ковша в процессе эксплуатации

<sup>1</sup>Национальная металлургическая академия Украины, Днепр

Целью работы является определение условий уменьшения скорости эрозионного разрушения потоками металлического расплава футеровки сталеразливочных ковшей. Сопутствующим и неотъемлемым положительным эффектом является уменьшение загрязнения стали продуктами разрушения футеровки (экзогенными неметаллическими включениями). Рассмотрены механизмы разрушения огнеупорной футеровки сталеразливочных ковшей. Отмечено значительное влияние эрозионного износа футеровки ковша в течение выпуска стали из сталеплавильного агрегата и в процессе его наполнения на стойкость футеровки ковша. Предложена методика физического моделирования эрозионного износа огнеупоров с использованием основных положений теории подобия. Основываясь на  $\pi$ -теореме авторами предложены безразмерные числа подобия, исходя из которых были определены масштабы моделирования, в частности масштабные коэффициенты для пересчета твердости огнеупоров, плотности жидкости, линейного масштаба модели и скорости разрушения огнеупоров. С использованием полученных масштабов авторами собрана экспериментальная установка и разработана методика проведения эксперимента. Для проведения эксперимента использовали масштабные модели ковшей со стандартной и разработанной в ходе предыдущих исследований схемами футеровки. После проведения физического моделирования авторами с использованием специальной методики была измерена глубина разрушения футеровки модели ковша. По результатам измерения была построена топографическая схема износа футеровки модельного ковша для вариантов со стандартной схемой футеровки и схемой, предложенной авторами. Установлено, что предложенная конструкция футеровки обеспечивает защиту «бойного места» и уменьшает интенсивность размывания потоками расплава участков соединения футеровки стен и днища ковша. Средняя скорость разрушения днища при использовании футеровки предложенной конструкции уменьшена на 18 %. Научная новизна работы состоит в разработке теоретических основ физического низкотемпературного моделирования эрозионного разрушения высокотемпературными металлическими расплавами огнеупорной футеровки ковшей и других металлургических агрегатов. Практическая значимость работы заключается в разработке конструкции футеровки сталеразливочных ковшей, обеспечивающей высокую стойкость сталеразливочных ковшей с одновременным уменьшением уровня загрязненности стали экзогенными неметаллическими включениями.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, эрозия, футеровка, сталеразливочный ковш.

**Молчанов Лавр Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии стали, e-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua ;

**Лантух Александр Сергеевич** — аспирант кафедры металлургии стали, e-mail: Shurik.dp.ua@gmail.com ;

**Синегин Евгений Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии стали, e-mail: Sinegin.ev@gmail.com