

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЗЛИВКІВ У ВИЛИВНИЦІ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ОБІГРІВУ І ПЕРЕМІШУВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ*

І.В. Протоковілов, В.В. Барабаш

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lab38@paton.kiev.ua

Наведено результати фізичного моделювання гідродинамічних процесів при кристалізації зливків у виливниці в умовах електрошлакового обігріву і перемішування металеві ванни газовим струменем. Дослідження проводили на холодній прозорій моделі, яка імітує кристалізацію 205-тонного сталевого зливка у виливниці і дозволяє візуалізувати гідродинамічні процеси у металевій ванні та формування твердої фази. Отримані нові експериментальні дані щодо структури гідродинамічних течій при різних варіантах перемішування металеві ванни газовим струменем. Показано, що застосування газового струменя дозволяє створювати торіодальні течії розплаву з висхідними потоками, які розповсюджуються від сопла, що подає газ, і низхідними потоками біля стінок виливниці. Встановлено, що для ефективного перемішування всього об'єму металеві ванни і впливу на кристали, що ростуть на фронті кристалізації, фурму доцільно розташовувати по осі ванни, а глибину її занурення обирати в межах 70...80 % від глибини ванни. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: зливков, виливниця, фізичне моделювання, гідродинаміка, електрошлаковий обігрів, газовий струмінь, перемішування

Вступ. Сьогодні одним з найбільш поширених способів отримання великих ковальських зливків і слябів залишається класична технологія розливу сталі у виливниці. Даний процес характеризується наявністю великих об'ємів рідкого металу, який твердіє тривалий час в умовах малоінтенсивної теплової конвекції. Це призводить до значного розвитку ліквацийних і усадкових процесів і, як наслідок, фізичної та хімічної неоднорідності литого металу [1–5]. При подальшій термометалургійній обробці такі дефекти повністю усунути неможливо. Вони успадковуються виготовленими зі зливка поковками і напівфабрикатами, що призводить до погіршення механічних властивостей металу. Тому проблема вдосконалення технологій виготовлення великих зливків у виливниці досі залишається актуальною.

Одним із перспективних способів покращення умов твердіння металу і позбавлення дефектів усадкового і ліквацийного походження є комплексний тепловий і гідродинамічний вплив на металеву ванну [6]. Він може бути реалізований шляхом електрошлакового обігріву (ЕШО) і підживлення головної частини зливка та примусового перемішування металеві ванни газовим струменем. В цих умовах важливе значення має уявлення про характер і інтенсивність гідродинамічних течій в металеві ванні.

Експериментальні дослідження гідродинамічних процесів, які відбуваються при твердінні великих зливків, дуже складні і затратні. В цьому випадку доцільно застосовувати методи фізичного моделювання на холодних прозорих моделях з урахуванням критеріїв подібності [7–10].

Мета даної роботи — визначення впливу електрошлакового обігріву і примусового продування рідкого металу потоками газу на гідродинамічні процеси в металеві ванні при твердінні зливків у виливниці.

Методика проведення досліджень. Експерименти проводили на холодній прозорій фізичній моделі, яка дозволяє візуалізувати гідродинамічні процеси у ванні і формування твердої фази (рис. 1). Модель являє собою плоску ємність, що імітує повздовжній переріз 205-тонного ковальського зливка. Вона виконана у масштабі 1:15 з дотриманням геометричної подібності до натурального об'єкту. Нижня та бічні стінки моделі виготовлені з водоохолоджуваного профілю, а передня та задня стінки — з оптично прозорого матеріалу. У верхній частині ємності встановлені накладки з пінополістиролу, що імітують теплоізолюючі вкладки прибуткової надставки.

У якості модельної рідини, що імітує рідку сталь, застосовано розплав тіосульфату натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), який твердіє по дендритному механіз-

І.В. Протоковілов — <https://orcid.org/0000-0002-5926-4049>, В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>

*В експериментах приймав участь к.т.н. В.Б. Порохонько.

© І.В. Протоковілов, В.В. Барабаш, 2025

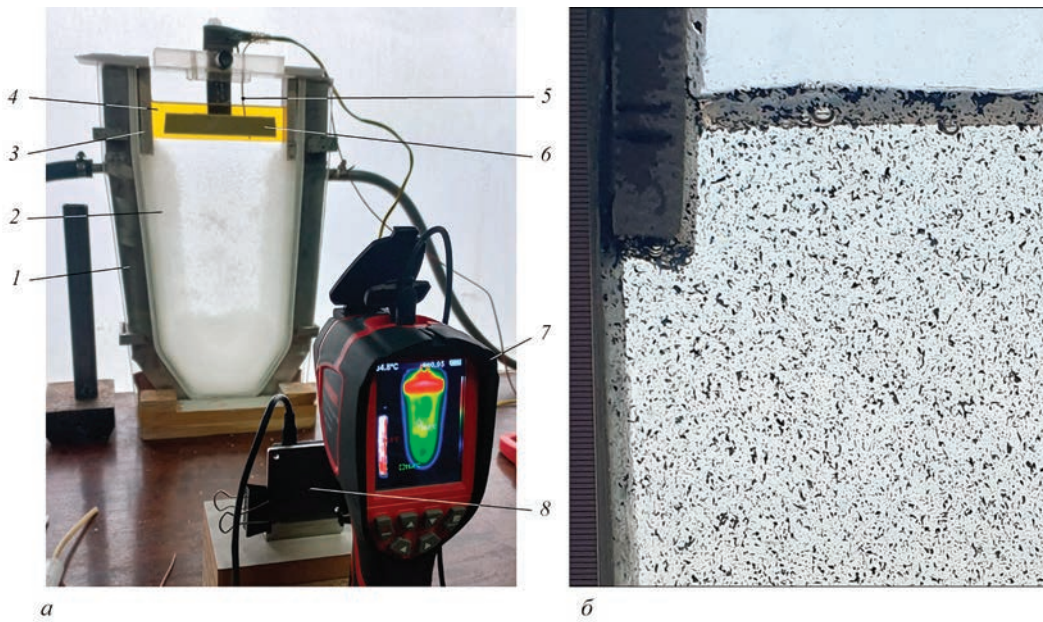


Рис. 1. Зовнішній вигляд фізичної моделі для дослідження гідродинамічних процесів при кристалізації зливка у виливниці (а) та зважені частки у модельному розплаві (б): 1 — водоохолоджувана стінка; 2 — стінка з оптично прозорого матеріалу; 3 — теплоізолюючі накладки; 4 — рідина, що моделює шлакову ванну; 5 — термопара; 6 — нагрівальний елемент; 7 — тепловізор; 8 — відеокамера

му і зберігає оптичну прозорість в твердому стані. Для візуалізації гідродинамічних потоків до розплаву тіосульфату натрію додавали барвний пігмент, який виділявся у вигляді зважених частинок з нейтральною (нульовою) плавучістю (рис. 1, б).

Відповідність гідродинамічних процесів, що відбуваються при моделюванні та в реальних умовах, оцінювали за допомогою критеріїв подібності: критерій Фруда (Fr), який характеризує співвідношення сил інерції та тяжіння; Рейнольдса (Re), що визначає характер гідродинамічних течій у розплаві (ламінарний чи турбулентний); Вебера (We), що базується на відношенні сил інерції рідини до сил поверхневого натягу рідини; Грасгофа (Gr), який визначає рух розплаву, викликаний неоднорідністю температурного поля.

Нижче наведені розрахункові залежності для даних критеріїв подібності:

$$Fr = V^2/gL, Re = VL/\nu,$$

$$We = \rho V^2 L / \sigma, Gr = g\beta(T_p - T_c)L^3/\nu^2,$$

де V — швидкість потоків (м/с); g — прискорення вільного падіння (м/с²); L — характерний розмір (м); ν — кінематична в'язкість рідини (м²/с); ρ — густина рідини (кг/м³); σ — коефіцієнт поверхневого натягу (Н/м); β — коефіцієнт теплового розширення (1/К); T_p — температура розплаву (К); T_c — температура стінки виливниці (К).

Значення відповідних фізичних параметрів і критеріїв подібності, розрахованих для моделі і натурального процесу, надані у табл. 1, 2. У обох випадках критерій Fr значно менше 1, що вказує на

Таблиця 1. Фізичні параметри моделі і натурального процесу

Параметр	Фізична модель (тіосульфат натрію)	Натурний процес (сталь)
Температура розплаву (T_p), °С	68	1520
Температура стінки виливниці (T_c), °С	20	850
Швидкість потоків (V), м/с	0,01	0,015
Характерний розмір (L), м	0,07	0,5
Коефіцієнт теплопровідності (λ), Вт/м·К	0,55	30
Густина (ρ), кг/м ³	1670	7000
Кінематична в'язкість (ν), м ² /с	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$
Коефіцієнт поверхневого натягу (σ), Н/м	0,09	1,6
Коефіцієнт теплового розширення (β), 1/К	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Таблиця 2. Значення критеріїв подібності для фізичної моделі і натурального процесу

Критерій подібності	Фізична модель	Натурний процес
Fr	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
Re	$7,0 \cdot 10^2$	$8,8 \cdot 10^3$
We	0,13	0,49
Gr	$7,3 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^{10}$

домінування сил тяжіння над інерційними силами. Це характерно для процесів із стійкими конвективними потоками рідини, без значних коливань і сплесків. Критерій We також в обох випадках менше 1, що говорить про домінування сил поверхневого натягу над інерційними силами і стабільність поверхонь розплавів та відсутність розривів цих поверхонь. Критерій Gg як для натурального процесу, так і для моделі, має дуже високі значення, що свідчить про значний вплив природної конвекції на рух обох розплавів. Значення критерію Re в натурному процесі перевищує критичне значення $Re_c \approx 2300$, що вказує на можливість утворення турбулентних течій розплаву сталі.

Загалом, аналіз критеріїв подібності вказує на відповідність досліджуваних процесів в моделі і натурному об'єкті та можливість якісної (репрезентативної) оцінки гідродинамічних процесів, що відбуваються при твердінні розплаву сталі у виливниці з допомогою розробленої фізичної моделі.

Тіосульфат натрію плавили в муфельній печі, потім подавали в модельну ємність з використанням сифонного розливу при температурі 68...72 °С.

Для моделювання процесу ЕШО на поверхню розплаву наливали олію, яка імітувала шлакову ванну. Олію підігрівали за допомогою зануреного в нього нагрівального елемента, її температуру підтримували на рівні 52...62 °С. Температуру розплаву контролювали за допомогою термопари та тепловізора «Wintact WT3160».

Примусове перемішування розплаву здійснювали за рахунок продування газом. Для цього використовували керамічну трубку з металевим соплом (фурму), яку занурювали у розплав на різну глибину і в різних місцях (по осі і зі зміщенням від осі). Продування здійснювали періодично по 30...60 с. В якості газу використовували аргон, який подавали з такою витратою, що не призводила до неприпустимого збудження вільної поверхні ванни. Гідродинамічні потоки в розплаві вивчали шляхом аналізу відеозаписів по руху у ньому зважених часток.

Експерименти проводили при традиційній схемі твердіння зливка (без зовнішнього впливу), з використанням ЕШО, а також з використанням ЕШО та при різних варіантах перемішування металеві ванни газовим струменем.

Результати експериментів і обговорення.

На рис. 2, а наведена структура гідродинамічних течій модельного розплаву після його розливу. Вона характеризується низхідними потоками рідини, які локалізовані в доволі вузькому об'ємі безпосередньо біля водоохолоджуваних стінок ємності. Швидкість таких низхідних потоків становить біля 4,8 мм/с. Висхідні потоки розплаву розосереджені по всій центральній частині ванни і їх швидкість в середньому становить 1,5 мм/с

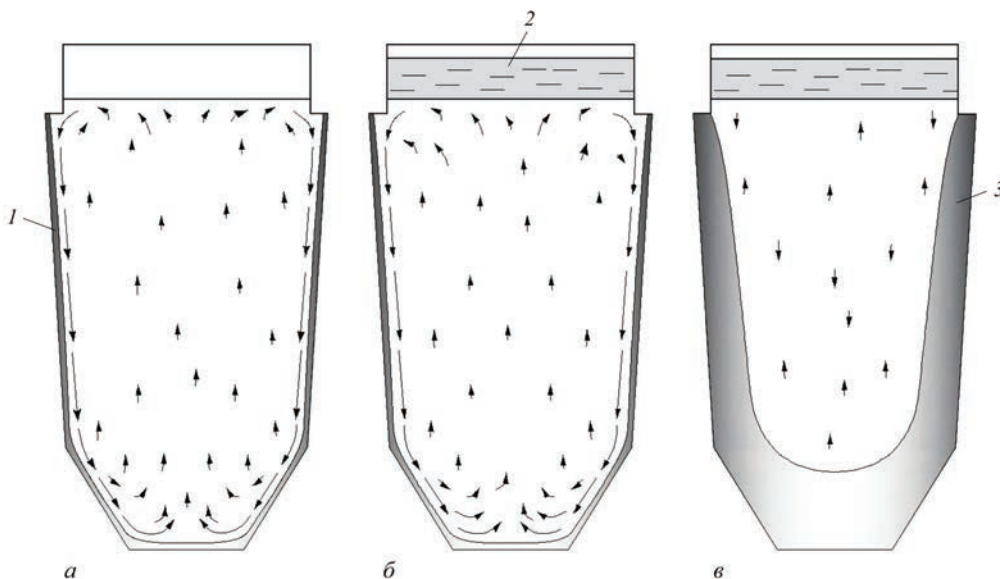


Рис. 2. Структура гідродинамічних течій розплаву: а — без зовнішнього впливу; б — з ЕШО; в — з ЕШО після формування шару застиглому зливка (1 — стінка ємності; 2 — рідина, що імітує шлакову ванну; 3 — застиглий шар зливка)

(рис. 3, 1). Вочевидь така структура течій виникає внаслідок термогравітаційної конвекції, викликані охолоджуючою дією стінок ємності.

Застосування ЕШО мало змінило структуру і інтенсивність течій розплаву (рис. 2, б). Низхідні потоки рідини швидкістю до 4,2 мм/с мали місце біля стінок ванни на відстані не більш ніж 20 мм, а малоінтенсивні висхідні потоки були розосереджені в центральній частині ванни (рис. 3, 2). Проте через 20 хв після розливу розплаву, коли на стінках ємності сформувався шар застиглої гіосульфату натрію, структура течії суттєво змінилася — течії розплаву практично повністю зупинилися по всьому об'єму ванни (рис. 2, в; рис. 3, 3). Тобто в умовах, коли охолоджуючий вплив стінок ємності через формування на них застиглої гіосульфату натрію суттєво зменшується, а підведення тепла за рахунок ЕШО здійснюється в верхніх шарах ванни, чинники для виникнення термогравітаційної конвекції відсутні. Такі умови твердіння металу, з відсутністю перемішування розплаву, не можна вважати сприятливими для подолання ліквідаційних явищ при твердінні зливків. В цьому випадку доцільно використовувати примусове перемішування металеві ванни.

На рис. 4 наведені структури гідродинамічних течій розплаву при застосуванні продування газом струменем. Отримані дані свідчать, що продування газом створює інтенсивні тороїдальні течії розплаву з висхідними потоками, які розповсюджуються від сопла, що подає газ, і низхідними потоками біля стінок ємності. Це створюється через висхідний рух бульбашок газу, які поширюються від сопла і, в свою чергу, залучають розплав до руху. При цьому течії розплаву формуються

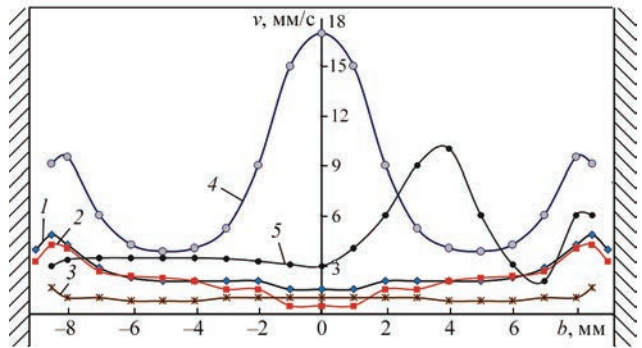


Рис. 3. Розподіл швидкості потоків по ширині ванни (b) на горизонті $0,75 \times h_{\text{ванни}}$ при різних схемах моделювання: 1 — без зовнішнього пливу; 2 — з ЕШО; 3 — з ЕШО через 20 хв після розливу; 4 — з перемішуванням при зануренні фурми по осі на 80 % від глибини ванни; 5 — з перемішуванням при асиметричному зануренні фурми на 50 % від глибини ванни

переважно у горизонтах, які знаходяться вище сопла, що подає газ. Тобто, при витратах газу, які не призводять до неприпустимого збудження вільної поверхні ванни, газовий струмінь не розповсюджується помітно нижче сопла. Внаслідок цього, при зануренні фурми на глибину 30 % від повної глибини ванни, примусове перемішування розплаву відбувалося лише в незначному об'ємі, зосередженому в верхніх шарах по центру ємності (рис. 4, а). При цьому потоки розплаву не доходили до фронту кристалізації.

При збільшенні глибини занурення фурми збільшувався об'єм розплаву, який був залучений до тороїдального руху (рис. 4, б), і тільки коли фурма була занурена на глибину не менш ніж 70...80 % від повної глибини ванни, тороїдальний рух формувалася в усьому її об'ємі (рис. 4, в). В цих умовах примусові потоки розплаву омивали фронт кристалізації по всій його протяжності.

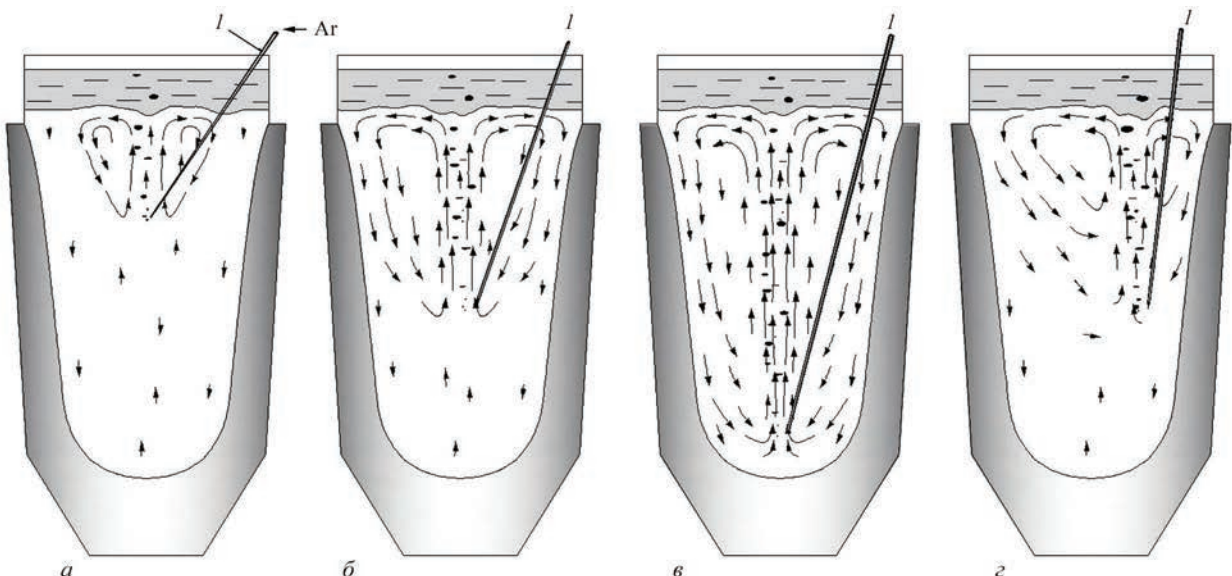


Рис. 4. Структура гідродинамічних течій при продуванні газом: а — занурення фурми на 30 % від глибини ванни; б — на 50; в — на 80; г — асиметричне занурення фурми; 1 — фурма

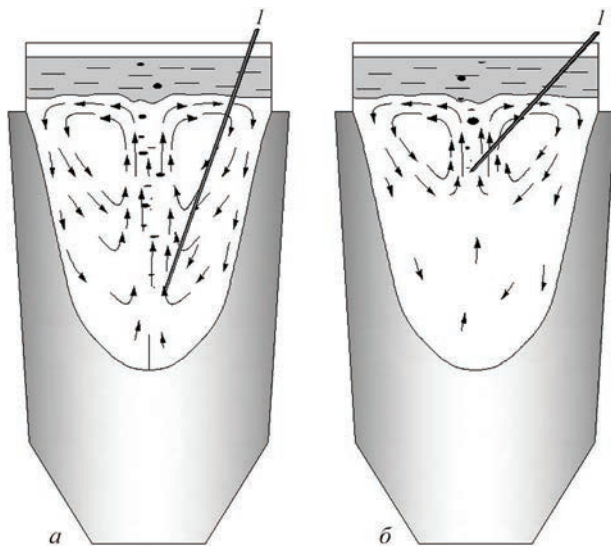


Рис. 5. Структура гідродинамічних течій при продуванні газом після 2-х годин з початку експерименту: *а* — занурення фурми (1) на 70 % від глибини ванни; *б* — на 28 %

Максимальна швидкість висхідних потоків по осі ванни становила 17,0 мм/с, а низхідних потоків біля стінок ємності — 9,5 мм/с (рис. 3, 4).

Аналогічна описаній вище структура течій мала місце і при застосуванні перемішування після 2-х годин з початку експерименту, коли сформувалось біля 50 % об'єму зливка (рис. 5, *а*, *б*).

При асиметричному розташуванні фурми у ємності створювався асиметричний тороїдальний рух розплаву рис. 4, *з*. При цьому з одного боку ємності потоки розплаву омивали фронт кристалізації, а з протилежного — ні. Таку структуру течії не можна вважати ефективною для впливу на структуроутворення зливка і ліквідаційні процеси

на фронті кристалізації. Виключення може бути, якщо в процесі продування забезпечити переміщення фурми, наприклад, по колу на деякій відстані від стінки виливниці.

На рис. 6 наведено розподіл температур модельної рідини по перерізу ємності в експериментах без застосування перемішування розплаву і з перемішуванням (із зануренням фурми на глибину 70 % від глибини ванни). Як свідчать наведені дані, перемішування розплаву призводить до вирівнювання температури по висоті ванни (рис. 6, 2). Такий перерозподіл температури в донній частині ванни має зменшити протяжність двофазної зони і, відповідно, розвиток ліквідаційних процесів, які відбуваються при твердінні зливка.

Загалом, отримані результати підтверджують перспективність застосування газового струменя для перемішування розплаву, вирівнювання температури в об'ємі ванни і впливу на ліквідаційні процеси при твердінні зливків у виливниці. Для ефективного перемішування всього об'єму металеві ванни і впливу на кристали, що ростуть на фронті кристалізації, фурму доцільно розташовувати в межах 70...80 % від глибини ванни. В цих умовах низхідні потоки розплаву досягають дна ванни і далі розповсюджуються вверх вздовж всього фронту кристалізації. При цьому максимально припустимі витрати газу, які визначаються його тиском і діаметром сопла, обмежуються збудженням вільної поверхні ванни, розбризкуванням розплаву і погіршенням стабільності процесу.

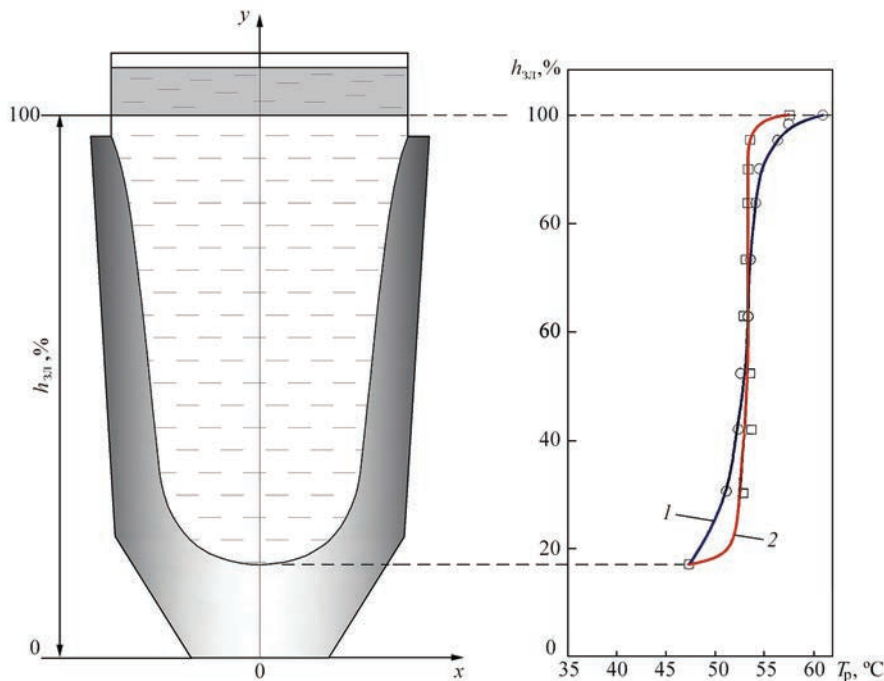


Рис. 6. Розподіл температури по висоті модельної рідини без (1) і з перемішуванням (2)

Отримані результати будуть використані в подальших дослідженнях при оптимізації параметрів продування газом при литті у виливницю модельних сталевих зливків.

Висновки

1. Розроблено фізичну модель для дослідження гідродинамічних процесів в металевій ванні при литті зливків в виливницю в умовах електрошлакового обігріву та перемішування газовим струменем.

2. Показано, що при традиційній схемі лиття біля стінок виливниці формуються низхідні потоки розплаву, а висхідні потоки розосереджені по всій центральній частині ванни і мають меншу швидкість. По мірі утворення на стінках виливниці застиглому шару металу швидкість гідродинамічних потоків по всьому об'єму ванни суттєво зменшується, аж до повної зупинки.

3. Встановлено, що застосування ЕШО не призводить до помітної зміни структури і швидкості гідродинамічних течій розплаву.

4. Показано, що продування газом створює інтенсивні тороїдальні течії розплаву з висхідними потоками, які розповсюджуються від сопла, що подає газ, і низхідними — біля стінок ємності. При цьому течії розплаву формуються переважно у об'ємах рідини, які знаходяться вище сопла, що подає газ.

5. Встановлено, що для ефективного перемішування всього об'єму металеві ванни і впливу на кристали, що ростуть на фронті кристалізації, фурму доцільно розташовувати по осі ванни, а глибину її занурення обирати в межах 70...80 % від глибини ванни.

Список літератури/References

1. Smirnov, A.N., Makurov, S.L., Safonov, V.M., Tsuprun, A.Yu. (2009) *Large ingot*. DNTU, Donetsk, Veber [in Russian].
2. Maidorn, C., Blind, D. (1985) Solidification and segregation in heavy forging ingots. *Nuclear Engineering and Design*, 84(2), 285–296. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(85\)90199-2](https://doi.org/10.1016/0029-5493(85)90199-2)
3. Sang, B.G., Kang, X.H., Liu, D.R., Li, D.Z. (2010) Study on macrosegregation in heavy steel ingots. *Inter. J. of Cast Metals Research*, 23(4), 205–210. DOI: <https://doi.org/10.1179/136404610X12665088537374>
4. Pickering, E.J., Al-Bermani, S.S., Talamantes-Silva, J. (2015) Application of criterion for A-segregation in steel ingots. *Master. Sci. and Technol.*, 31(11), 1313–1319. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000692>
5. Honghao, Ge, Fengli, Ren, Jun, Li et al. (2018) Modeling of ingot size effects on macrosegregation in steel castings. *J. of Materials Proc. Technology*, 252, 362–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.004>.
6. Shapovalov, V.O., Biktagirov, F.K., Barabash, V.V. et al. (2024) New method for improving physical homogeneity of steel ingots. In: *Proc. of the VII Inter. Conf. on Welding and Related Technologies*, 7–10 October 2024, 21–24. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003518518-4>
7. Marx, K., Rodl, S., Schramhauser, S., Seemann, M. (2014) Optimization of the filling and solidification of large ingots. *La Metallurgia Italiana*, 106(11–12), 11–19.
8. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B., Biktagirov, F.K. et al. (2019) Physical modeling of ingot crystallization in a mold under conditions of electroslag heating and feeding. *Suchasna Elektrometal.*, 3, 3–9 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.01>
9. Eldarkhanov, A.S., Efimov, V.A., Nuradinov, A.S. (2001) *Processes of formation of castings and their modeling*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
10. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2017) Physical modeling of electrode metal drop transfer in ESR with superposition of pulsed magnetic fields. *Suchasna Elektrometal.*, 3, 9–13 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2017.03.02>

STUDIES OF HYDRODYNAMIC PROCESSES AT THE CRYSTALLIZATION OF INGOTS IN A MOLD UNDER CONDITIONS OF ELECTROSLAG HEATING AND STIRRING OF THE METAL POOL

I.V. Protokovilov, V.V. Barabash

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: lab38@paton.kiev.ua

The results of physical simulation of hydrodynamic processes at the crystallization of ingots in a casting mold under conditions of electroslag heating and stirring of the metal pool by a gas jet are presented. The studies were carried out on a cold transparent model that simulates the crystallization of a 205-ton steel ingot in a casting mold and allows visualizing hydrodynamic processes in the metal pool and forming a solid phase. New experimental data on the structure of hydrodynamic flows at various options of stirring the metal pool by a gas jet were obtained. It is shown that the use of a gas jet allows creating toroidal melt flows with upward flows spreading from the gas-supplying nozzle and downward flows near the walls of the casting mold. It was established that for effective stirring of the entire volume of the metal pool and to affect the crystals growing on the crystallization front, it is advisable to place the gas tuyere along the axis of the pool and choose its immersion depth within 70...80 % of the pool depth. 10 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: ingot, mold, physical simulation, hydrodynamics, electroslag heating, gas jet, stirring

Отримано 19.02.2025

Отримано у переглянутому вигляді 03.03.2025

Прийнято 10.04.2025