

---

# КРИСТАЛІЗАЦІЯ ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ СПЛАВІВ

УДК 669.14:620.18

**А. В. Нарівський**, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, директор ФТІМС НАН України; e-mail: office@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1596-6401

**А. С. Нурадінов**, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;  
e-mail: nla\_73@ukr.net; ORCID 0000-0002-7286-8648

**В. П. Школяренко**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;  
e-mail: hvp@ukr.net; ORCID 0000-000153931077

**Г. О. Антонов**, канд. техн. наук; e-mail: geoant55@gmail.com;  
ORCID 0000-0001-9079-1691

**І. А. Нурадінов**, аспірант, e-mail: inuradinov@gmail.com;  
ORCID 0000-0001-8916-5247)

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

## ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ У ВЕЛИКИХ СТАЛЕВИХ ЗЛИВКАХ

Представлено результати фізичного моделювання процесів, які мають місце у великих сталевих зливках при їх твердінні. Вивчено закономірності розподілу конвективних потоків і температурних полів у зливку. Встановлено залежності величин теплових потоків до виливниці (форми), швидкостей кристалізації і переміщення двофазної зони від інтенсивності конвективних потоків у зливку. Показано, що конвективний рух розплаву впливає на рівномірність товщини закристалізованого шару сталі по висоті злиwkів. При незначному зниженні температури перегріву розплаву товщина шару, який твердне на поверхні зливку, збільшується в 2,4 рази. При усуненні конвективного переміщення розплаву у зливку товщина шару, який твердне, а також коефіцієнт і швидкість кристалізації сплаву однакові по всій висоті. Градієнт температур у металі при цьому змінюється тільки в напрямку від бічних поверхонь до центру зливка. Визначено, що конвекція у зливку є основною причиною утворення в донній його частині зони розплаву з підвищеною в'язкістю, в якій формується конус осадження неметалічних включень. При конвективному переміщенні рідкого металу підвищується також інтенсивність процесів теплообміну в зливках за рахунок зростання швидкості кристалізації і структурних перетворень в них. Для різних умов охолодження визначено параметри процесу твердіння дослідних сплавів та впливу конвекції розплаву в зливках на формування їх структур.

**Ключові слова:** сталевий зливко, кристалізація, структура, конвекція, тепло- та масообмін.

При твердінні великих ковальських злиwkів ( $\geq 30$  т) на відстані 25–30 % їх висоти від дна утворюється зона з охолодженим в'язким металом. У цій зоні накопичуються неметалеві включення (НВ), які разом з конвективними потоками надходять до неї з верхніх частин зливка [1–4]. При цьому в нижній частині зливка утворюється конус металу з НВ, в якому вміст оксидних включень в 5–6 разів

## Кристалізація та структуроутворення сплавів

перевищує їх концентрацію у верхніх горизонтах. Для того, щоб НВ не потрапляли в литі вироби, близько 30 % нижньої частини зливка видаляють, що суттєво знижує вихід придатної металопродукції.

В роботі вивчено процес утворення конусу осадження НВ в зливку на фізичній моделі з використанням сплаву камфена з трицикленом, який після твердіння залишається прозорим. Визначено закономірності розподілу конвективних потоків і температурних полів в зливках, величини теплових потоків від металу до виливниці, також швидкостей твердіння сталі і переміщення двофазної зони в ній.

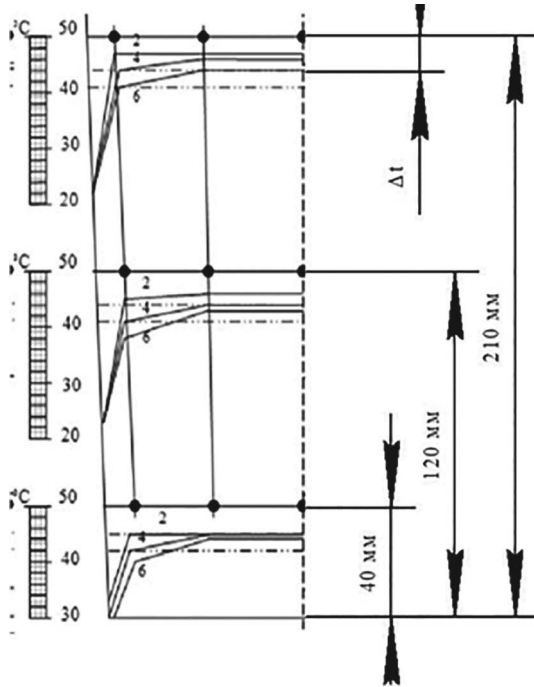


Рис. 1. Розподіл температури у перерізах зливків: 2, 4, 6 – час процесу твердіння сплаву, хв

Розподіл температури в перерізах модельних зливків на трьох горизонтах по висоті через кожні 2 хв. представлено на рис. 1. Величину перегріву модельного сплаву ( $\Delta t$ ) визначали за різницею між температурою нагрівання ( $t_1$ ) та його температурою ліквідус  $t_n$  ( $\Delta t = t_1 - t_n$ ).

При нагріванні розплаву камфена на 2 °C вище за температуру ліквідус (за масштабом процесу моделювання відповідає перегріву вуглецевих сталей на 60 °C) з початку твердіння спостерігається досить висока швидкість кристалізації зливка. По мірі подальшого охолодження ця швидкість зменшується через зростання товщини шару затверділого металу (рис. 2, крива I).

З підвищенням температури нагрівання сплавів на 4 і 8 °C більше за температуру ліквідус (відповідає перегріву вуглецевих сталей на 120 і 240 °C), швидкості їх кристалізації в початкові моменти незначні (рис. 2, криві II і III). По мірі відведення надлишкового тепла перегріву металу, швидкості кристалізації сплавів зростають і досягають максимальних значень через

150 і 350 с, відповідно. Після цього швидкості твердіння сплавів зменшуються, що негативно впливає на дисперсність структури в зливках [5]. При перегріві модельного сплаву від 2 до 8 °C максимальні значення швидкостей кристалізації зливків зменшуються в 2–2,5 рази, при однакових умовах їх охолодження (рис. 2).

$R$ , мм/с

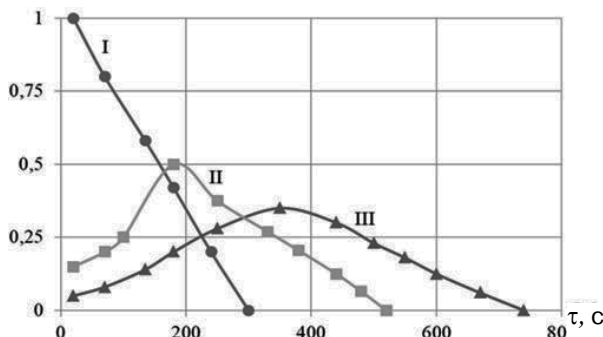


Рис. 1. Швидкість кристалізації модельних зливків залежно від температури перегріву розплаву: I – 2 °C; II – 4 °C; III – 8 °C

В реальних умовах твердіння у зливках (особливо великих) утворюються конвективні потоки. Від інтенсивності цих потоків залежать розподіли температури і металевих домішок, процеси теплообміну і формування неоднорідностей в зливках, а також структура і властивості закристалізованих сплавів. Прямими вимірюваннями визначили, що при переміщенні конвективних потоків від верхнього до нижнього горизонту зливка температура модельного сплаву зменшується (рис. 3, а, криві 1, 2).

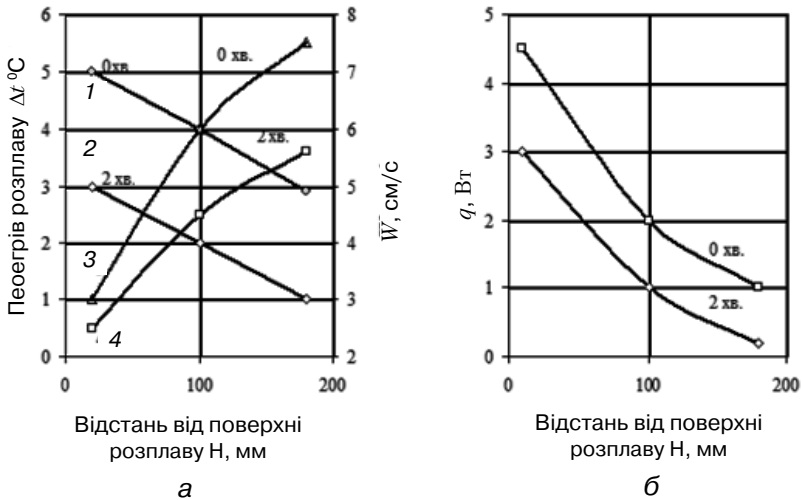


Рис. 3. Температура ( $\Delta t$ ) перегріву модельного розплаву, швидкість ( $W$ ) конвективних потоків (а) і величина теплових потоків (б) по висоті зливка при твердненні

При цьому швидкості конвективних потоків у зливку навпаки, у мірі віддалення від поверхні розплаву, істотно (майже в 3 рази) зростають (рис. 3, а, криві 3, 4).

Від режиму руху конвективних потоків (ламінарний або турбулентний) істотно залежать теплообмінні процеси в зливку при твердненні. Кількість тепла перегріву сплаву, що відводиться від нього, залежить від коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha$ ) та різниці температур між металом в потоці і фронтом його тверднення ( $\Delta t$ ). При допущенні, що температура поверхні на фронті кристалізації приблизно дорівнює температурі ліквідусу сплаву ( $t_n$ ), величину теплового потоку ( $q$ ) можна визначити згідно залежності [2]:

$$q = \alpha (t_1 - t_3), \quad (1)$$

де  $t_1$  – температура перегріву розплаву.

Критеріальне рівняння процесу теплообміну в рідині, що рухається, має такий вид [6]:

$$Nu = 0,175 (Gr \cdot Pr)^{1/3}, \quad (2)$$

де  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$  – критерії Нуссельта, Грасгофа і Прандтля.

При значеннях критерію Прандтля, які близькі до одиниці ( $Pr \cong 1$ ), величину коефіцієнта тепловіддачі для ламінарного режиму переміщення металевих розплавів можна визначити за рівнянням [2]:

$$\alpha = 0,6 \cdot \left( \frac{W}{H} \right)^{0,5} \cdot A, \quad (3)$$

де  $W$  – швидкість конвективних потоків;  $H$  – відстань від дзеркала металу в зливку;  $A$  – коефіцієнт, якій залежить від теплофізичних характеристик сплаву.

З урахуванням рівняння (3) величина теплового потоку, що підводиться конвекцією до границі тверднення сплаву, дорівнює:

$$q = 0,6 \cdot \left( \frac{W}{H} \right)^{0,5} \cdot A \Delta t. \quad (4)$$

Величина теплового потоку, яку розраховували за рівнянням (4), зменшується

## Кристалізація та структуроутворення сплавів

в напрямку від верхнього горизонту зливка до нижнього (рис. 3, б). Це обумовлено тим, що при переміщенні розплаву вниз частина тепла від перегрітого сплаву передається фронту твердіння конвекцією. Підвищений об'єм перегрітого розплаву у верхній частині зливка зменшує швидкість процесу кристалізації сплаву. В результаті цього зростає час існування конвективних потоків в верхньому горизонті зливка. За допомогою прямих вимірювань і розрахунків визначили, що величина теплового потоку, який передається конвекцією від перегрітого металу фронту кристалізації сплаву, у верхній частині зливка в 2 рази більша порівняно з нижньою.

Однак, не все тепло, що підводиться від перегрітого сплаву до фронту його кристалізації, передається виливниці. Частина цього тепла витрачається на додаткове нагрівання рідкого металу. При підвищенні температури перегріву розплаву зменшується інтенсивність процесу твердіння сплаву і можливе підплавлення закристалізованого шару в зливку.

В нижніх частинах великих зливоків під дією феростатичного тиску метал краще контактує з виливницею, що забезпечує більш інтенсивний тепловідвід від зливка, ніж у верхньому його горизонті. На початку процесу тверднення у верхній частині зливка практично миттєво утворюється зазор між виливницею та металом, а інтенсивність відведення тепла від сплаву зменшується. В результаті цього у частині зливка зростає об'єм перегрітого розплаву та підвищуються швидкості його конвективного руху, що сприяє уповільненню або зупинці росту кристалів в сплаві при твердінні.

Конвекційний рух розплаву в зливку перешкоджає рівномірній передачі тепла від перегрітого сплаву фронту його кристалізації. В результаті цього при твердненні зливка по його висоті формується шар металу різної товщини (рис. 4, табл. 1).

З наведених даних (для четвертої хвилини твердіння сплаву) видно, що температура металу на нижньому горизонті в 1,1 рази менша, а товщина твердого шару в 2,4 рази більша, ніж у верхній частині зливка. При незначному зниженні температури розплаву на нижньому і середньому горизонтах зливка коефіцієнт твердіння і швидкість росту кристалів збільшується у 4–5 разів. Причини значного зростання твердого шару сплаву в нижній половині зливка (рис. 4) при малому

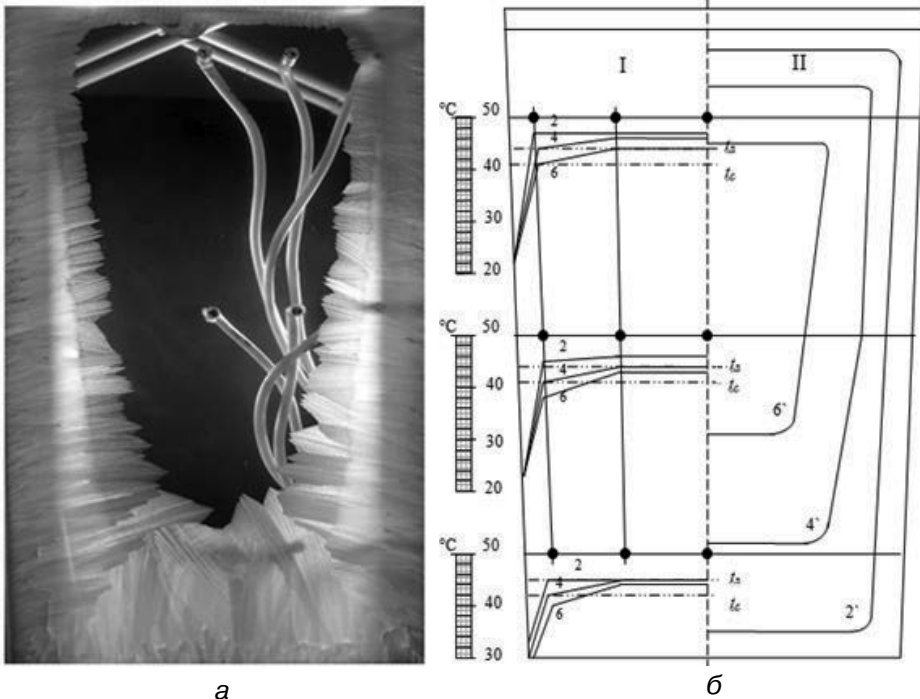


Рис. 4. Характер (а) і параметри (б) процесу твердіння зливка при однаковому всебічному тепловідводі від сплаву: цифри у кривих – час процесу кристалізації зливка; I – розподіл температур у розплаві; II – схема процесу твердіння зливка

**Таблиця 1**

**Параметри твердіння модельного зливка на 4-й хвилині процесу при наявності природної конвекції в розплаві**

Відстань від дна зливка, мм	Температура розплаву на осі зливка, °С	Товщина закристалізованого сплаву, (ξ) мм	Коефіцієнт твердіння сплаву (κ), мм/хв <sup>0.5</sup>	Швидкість кристалізації, мм/хв
210	47	11	5,5	1,38
120	45	14	7,0	1,75
40	45	25	12,5	3,13
Вертикально від дна зливка	45	55	27,5	6,88

зниженні температури є дискусійними серед металургів. Зараз існують теорії послідовної і об'ємної кристалізації сплавів, в яких не враховано конвективний рух розплаву в зливках у процесі їх формування.

Без урахування конвективного переміщення розплаву, при однаковій інтенсивності процесу бічного тепловідведення, коефіцієнт тверднення (κ) сплаву повинен бути постійним по всій висоті зливка. Розрахунок за формулою  $\xi = \kappa \sqrt{\tau}$ , при відомих значеннях ξ і τ свідчить про те, що на четвертій хвилині процесу формування зливка коефіцієнт твердіння зливка дорівнює  $\kappa = \frac{\xi}{\sqrt{\tau}} = 5,5 \text{ мм/хв}^{0.5}$ . Товщина шару сплаву, який затверднув, при цьому на всіх горизонтах зливка повинен складати  $\xi = \kappa \sqrt{\tau} = 5,5 \sqrt{4} = 11 \text{ мм}$ . В реальних умовах кристалізації сплаву значення цих параметрів по висоті зливка істотно відрізняються (рис. 4, табл. 1).

Для визначення впливу конвекції розплаву на швидкість процесу його кристалізації розрахуємо тепловий баланс шару сплаву, що твердне, у зливку [8]. Товщина цього шару метала залежить від кількості тепла, яке він передає виливниці:

$$q_1 = \frac{\lambda_k}{\xi} \Delta t_{кр}, \tag{5}$$

де  $\lambda_k$ ,  $\Delta t_{кр}$  – теплопровідність закристалізованого шару метала і градієнт температури по його товщині; ξ – товщина шару.

Кількість теплоти, яка підводиться до фронту твердіння металу, складається з виділеного тепла при кристалізації сплаву  $q_{кр}$  і від перегріву розплаву в зливках  $q_{пер}$  [9]:

$$q_2 = q_{кр} + q_{пер}. \tag{6}$$

У процесах кристалізації сплавів практично завжди дотримуються умови рівноваги, тому  $q_1 \cong q_2$ :

$$\frac{\lambda_{кр}}{\xi} \Delta t_{кр} = q_{кр} + q_{пер}. \tag{7}$$

Рівняння (7) дозволяє визначити товщину металу, який затверднув, в зливку:

$$\xi = \frac{\lambda_{кр} \cdot \Delta t_{кр}}{q_{кр} + q_{пер}}. \tag{8}$$

Видно, що чим більша температура перегріву розплаву, тим менша товщина шару сплаву, що твердне, та швидкість його кристалізації.

## Кристалізація та структуроутворення сплавів

Розплав за час переміщення від верхньої частини зливка до нижньої віддає тепло перегріву фронту твердіння сплаву. Кількість цього тепла можна визначити з рівняння [1]:

$$q = \alpha (t - t_n) F \tau, \quad (9)$$

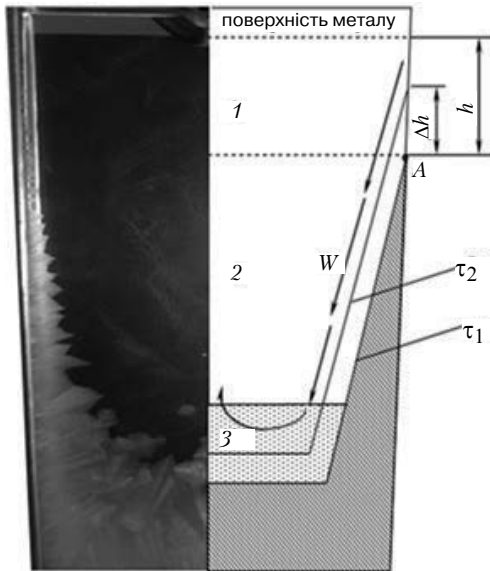


Рис. 5. Схема формування зливка при конвективному переміщенні розплаву у ньому: 1 – зона перегрітого розплаву; 2 – зона з температурного розплаву, яка дорівнює  $t_n$ ; 3 – зона переохолодженого розплаву

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $t$  – температура перегріву розплаву;  $t_n$  – температура ліквідус даного сплаву;  $F$  – площа поверхні теплообміну (фронту кристалізації);  $\tau$  – час переміщення перегрітого об'єму розплаву уздовж поверхні теплообміну. В рівнянні (9) параметри ( $\tau$  і  $\alpha$ ) залежать від швидкості конвективних потоків розплаву  $W$ , тому їх значення по висоті зливка різні.

Відомо, що кристалізація сплаву починається після зниження температури його перегріву до  $t_{\text{лікв}}$ . Тому в початковий період твердіння сплаву кристали в ньому зароджуються не в поверхових шарах зливка, а на відстані (точка A, рис. 5), де температура перегріву металу дорівнює  $t_{\text{лікв}}$ .

Для виключення впливу процесу конвекції в рідкому металі на товщину металу, що затверднув, по висоті зливка модельний сплав кристалізували у виливниці (фізична модель), яку розташовували в горизонтальному положенні. При формуванні зливка в горизонтальній виливниці змінюються

розподіл температури в сплаві та кінетика його твердіння (рис. 6, а). Видно, що температури розплаву на всіх горизонтах зливка однакові, а їх градієнт в модельному сплаві спостерігається тільки в напрямку від бічних стінок виливниці до центру зливка. При цьому змінюються параметри процесу кристалізації сплаву в зливку (табл. 2).

Видно, що фронт кристалізації модельного сплаву рівномірно переміщується від бічних граней виливниці до центру (рис. 6, а) з одночасним формуванням структури зливка (рис. 6, б). При відсутності конвекційного руху розплаву зменшуються інтенсивність процесів теплообміну між зливком і виливницею та темп кристалізації сплаву. В результаті цього змінюється розташування структурних зон в зливку: зростає приблизно на 20 % час повного його тверднення.

Результати досліджень свідчать про те, що при однаковій інтенсивності відведення тепла через бокові стінки виливниці по всій висоті у зливку утворюються наступні температурні зони (рис. 5):

- зона з перегрітим металом, температура якого перевищує  $t_{\text{лікв}}$  сплаву. Висота цієї зони  $h$  визначається швидкістю процесу відведення тепла перегріву від розплаву, що рухається в конвективному потоці вздовж внутрішньої поверхні виливниці. При цьому інтенсивність процесу тепловідведення перегріву розплаву залежить від швидкості конвекційних потоків і коефіцієнта теплопередачі [10]. Зародження кристалів у цій зоні не відбувається;

- зона, в якій перегрів розплаву в конвективному потоці дорівнює  $t_{\text{лікв}}$  сплаву. У цій зоні відбувається пошарове твердіння сплаву і зменшується інтенсивність передачі тепла виливниці. При переміщенні розплаву конвективними потоками в нижню частину зливка температура його знижується, сприяє більш інтенсивному зростанню товщини металу, який твердне; об'єм переохолодженого розплаву в нижній частині

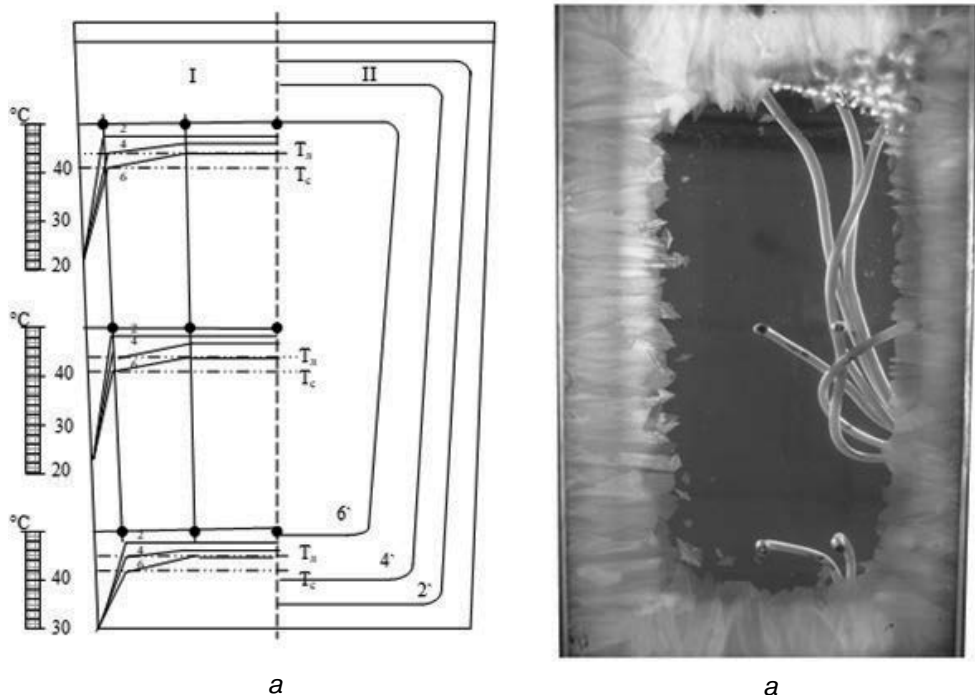


Рис. 6. Параметри твердіння (а) і характер формування структури зливка (б) при відсутності конвективних потоків в розплаві: I – розподіл температури металу на різних рівнях зливка; II – процес твердіння зливка

**Таблиця 2**

**Параметри процесу твердеання зливка на 4-й хвилині формування зливка без конвекційного руху розплаву в ньому**

Відстань від дна зливка, мм	Температура розплаву на осі зливка, °C	Товщина закристалізованого сплаву, ( $\xi$ ) мм	Коефіцієнт затвердіння ( $\kappa$ ), мм/хв <sup>0,5</sup>	Швидкість кристалізації, мм/хв
210	45	17	8,5	2,13
120	45	17	8,5	2,13
40	45	17	8,5	2,13
біля дна зливка	45	17	8,5	2,13
в поверхневих шарах зливка	45	17	8,5	2,13

зливка, у якій відбувається подальше зростання швидкості твердіння сплаву і з появою у ньому окремих кристалів, які з верхніх шарів розплаву опускаються вниз.

Таким чином, на процеси формування структури і властивостей в зливках впливають:

- перегрів розплаву, який заливають у виливницю (форму);
- швидкість і розподіл конвективних потоків розплаву, які переміщуються у зливку при твердінні;
- інтенсивність процесів передачі тепла від перегрітого розплаву фронту кристалізації сплаву та поверхнею зливка виливниці.

## Список літератури

1. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. Москва: Metallurgy, 1976. 552 с.
2. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. Москва: Новые технологии, 2004. 784 с.
3. Хворинов Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали. Москва: Mashgiz, 1958. 392 с.
4. Гуляев Б.Б. Затвердевание и неоднородность стали. Москва: Metallurg-izdat, 1958. 228 с.
5. Нурадинов А.С., Прыгунова А.Г., Шейгам В.Ю. и др. Физические методы управления формированием структуры металлов. *Металл и литье Украины*. 2020. №2. С. 64-71.
6. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена. Москва: Высшая школа, 1974. 328 с.
7. Скребцов А.М., Кладити А.Т. Размывание потоками расплава твердой поверхности из того же материала. *Процессы литья*. 2000. №3. С. 37-43.
8. Нурадинов А.С. Исследование влияния теплофизических и динамических воздействий на кристаллизацию и структурообразование литых заготовок. *Диссертация кандидата технических наук*. Киев, 1998. 188 с.
9. Itayama S., Tozawa H. and Sorimachi K. Control of early, solidification of strand cast slabs by horizontal mold oscillation synchronized with vertical mold oscillation. *Steelmaking conference proceedings*. 1994. P. 366-368.
10. Вейник А.И. Термодинамика литейной формы. Москва: Машиностроение, 1968. 338 с.

Надійшла 07.05.2021

## References

1. Efimov V. A. (1976). Casting and crystallization of steel. Moscow: Metallurgy, 552 p. [in Russian].
2. Efimov V. A., Eldarkhanov A. S. (2004). Technologies of modern metallurgy. Moscow: New technologies, 784 p. [in Russian].
3. Khvorinov N. I. (1958). Crystallization and heterogeneity of steel. Moscow: Mashgiz, 392 p. [in Russian].
4. Gulyaev B. B. (1958). Solidification and heterogeneity of steel. Moscow: Metallurg-izdat, 228 p. [in Russian].
5. Nuradinov A. S., Prygunova A. G., Sheigam V. Y. et al. (2020). Physical control methods for the formation of the structure of metals. *Metal and casting of Ukraine*. No. 2, pp. 64–71. [in Russian].
6. Gukhman A. A. (1974). Application of the theory of similarity to the study of heat and mass transfer processes. Moscow: Higher School, 328 p. [in Russian].
7. Skrebtsov A. M., Kladiti A. T. (2000). Blurring by melt flows of a solid surface made of the same material. *Casting processes*. No. 3, pp. 37–43.
8. Nuradinov A. S. (1998). Investigation of the influence of thermophysical and dynamic effects on crystallization and structure formation of cast billets. *Dissertation of the candidate of technical sciences*. Kiev, 188 p. [in Russian].
9. Itayama S., Tozawa H. and Sorimachi K. (1994). Control of early, solidification of strand cast slabs by horizontal mold oscillation synchronized with vertical mold oscillation. *Steelmaking conference proceedings*. Pp. 366–368. [in English].
10. Veinik A. I. (1968). Thermodynamics of a casting mold. Moscow: Mechanical engineering, 338 p. [in Russian].

Received 07.05.2021

**A. V. Narivskiy**, *Dr. Sci. (Engin)*, Corresponding Member of the NAS Of Ukraine,  
Director of the PhTIMA of the NAS of Ukraine;

*e-mail: office@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1596-6401*

**A. S. Nuradinov**, *Dr. Sci. (Engin)*, Leading Research Scientist;

*e-mail: nla\_73@ukr.net; ORCID 0000-0002-7286-8648*

**V. P. Shkoliarenko**, *PhD (Engin.)*, Senior Research Scientist; *e-mail: hvp@ukr.net;*  
*ORCID 0000-000153931077*

**G. O. Antonov**, *PhD (Engin.)*; *e-mail: geoant55@gmail.com;*

*ORCID 0000-0001-9079-1691*

**I. A. Nuradinov**, *Leading Research*; *e-mail: inuradinov@gmail.com;*

*ORCID 0000-0001-8916-5247*

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

### PROCESSES OF STRUCTURE FORMATION IN LARGE STEEL CASTINS

*The results of physical modeling of the processes that occur in large steel ingots during solidification are presented. The regularities of the distribution of convective flows and temperature fields in the ingot are studied. The dependences of the values of heat flow from the ingot to the mold, the rates of crystallization, and movement of the two-phase zone of the solidifying alloy on the intensity of convective flows are established. It is proved the decisive importance of the convective movement of the melt on the unevenness of the solidifying metal crust along with the height of the ingots. It is shown that with a slight decrease in the temperature of the solidifying melt the thickness of the crust increases by 2.4 times. If convection of the melt along the height of the ingot is excluded, the parameters of its solidification (crust thickness, solidification coefficient, and crystallization rate) have the same values over the entire height. In this case, the temperature gradient in the solidifying alloy changes only in the direction from the side heat-removing faces to the axis of the ingot. It is found that convection of the solidifying melt is the main reason for the formation of a zone with increased viscosity in the bottom of the ingots in which a cone of nonmetallic inclusions deposits is formed. Also, the convective movement of liquid metal increases the intensity of heat transfer processes in solidifying ingots due to the increase in rates of crystallization and structural transformations. For different cooling modes, the parameters of the solidification process of the studied ingots were determined as well as the influence of convection on the formation of ingots structure.*

**Keywords:** *steel ingot, crystallization, structure, convection, heat and mass transfer.*