
КРИСТАЛІЗАЦІЯ ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ СПЛАВІВ

УДК 669.18-146:546.3

А. С. Нурадінов, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;
e-mail: nla_73@ukr.net)

А. В. Нарівський, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України

І. А. Нурадінов, e-mail: inuradinov@gmail.com

В. І. Курпас, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

О. О. Ясинська, канд. техн. наук, наук. співроб.
e-mail: yasinskaalena@gmail.com

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

ПРОЦЕСИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ В СТАЛЕВИХ ЗЛИТКАХ ПРИ ТЕПЛОСИЛОВИХ ДІЯХ НА МЕТАЛ

При створенні сучасної техніки та обладнання використовують унікальні масивні сталеві вироби, які виготовляють з великих (до 600 т) ковальських злитків. Процеси кристалізації крупних злитків супроводжуються процесами утворення в них хімічної та фізичної неоднорідностей, нерівномірним розподілом неметалевих включень і домішок та інших дефектів. Зниження якості крупних злитків на стадії кристалізації обумовлено тим, що одночасно відбувається багато фізико-хімічних, гідродинамічних та теплофізичних процесів при переході сталі з рідкого стану в твердий. У цей період твердіння в злитку утворюється багато дефектів, які неможливо усунути при подальших технологічних операціях одержання виробів з нього. Процеси виготовлення масивних сталевих злитків є складними та недостатньо вивченими, що пов'язано з труднощістю проведення таких досліджень і обмеженою кількістю публікацій за їх результатами. Дослідження процесів структуроутворення і кристалізації великих злитків та розроблення способів керування ними є актуальною проблемою сучасного сталеплавильного виробництва.

Ключові слова: сталевий злиток, фізичне моделювання, теплосилова дія, інтенсивність тепловідведення, кристалізація, структуроутворення, сегрегація.

Під час твердіння сталі у злитках відбуваються процеси тепло- і масопереносу, зародження та росту кристалів, сегрегації домішок, утворення дендритної неоднорідності, неметалевих включень, газоусадкових та інших дефектів. При повільній кристалізації злитків, що одержують за звичайними промисловими технологіями, створюються сприятливі умови для процесів формування у них вказаних дефектів. В даній роботі для зменшення або усунення таких дефектів в злитках підвищували швидкість процесів їх кристалізації за допомогою теплосилових дій на метал при різній інтенсивності його охолодження. Дослідження проводили на прозорій моделі за методикою [1].

Інтенсивність процесів зародження і росту кристалів, а також розміри структурних зон в злитках залежать від температурного градієнту $G = dt/dx$ перед фронтом твердіння рідкого металу. Процеси зародкоутворення в сплавах відбуваються

швидше при наявності у них твердих часток, які змочуються розплавом. При підвищених швидкостях твердіння сплаву збільшується кількість центрів кристалізації в ньому і диспергується структура злитку.

При кристалізації злитків в реальних умовах величину температурного градієнту біля фронту кристалізації сталі, з урахуванням конвективного переміщення розплаву, можна визначити за формулою [2]:

$$G = \frac{P_e \cdot q_{кр}}{\rho \cdot C} = \frac{W \cdot q_{кр} \cdot L}{\rho \cdot C \cdot a}, \quad (1)$$

де $P_e = \frac{W \cdot L}{a}$ – критерій Пекле; L – протяжність двофазної зони у злитку; C – теплоємність сплаву; a – коефіцієнт теплопровідності; W – швидкість конвективних потоків у розплаві; $q_{кр}$ – теплота кристалізації сплаву.

Температурний градієнт у металі зменшується по мірі наближення від бічної поверхні до центру злитка. В результаті цього змінюється структура злитку в його горизонтальному перерізі. При збільшенні температурного градієнту у розплаві підвищується швидкість (R) кристалізації злитків [3]:

$$R = \frac{\lambda}{q_{кр} \cdot \rho} \cdot G, \quad (2)$$

де λ , ρ – теплопровідність і густина розплаву.

Залежно від величини співвідношення градієнта температури до швидкості кристалізації сплаву G/R в злитках формуються різні структурні зони. При середніх значеннях ($\leq 5,5 \cdot 10^7$) цього відношення у злитку, разом з поверхневим шаром глобулярних кристалів, утворюється зона стовпчастих дендритів. При менших величинах відношення ($\leq 9 \cdot 10^3$) – зі структурою, що близька до рівноосної [4]. Залежно від інтенсивності охолодження злитків структура в їхньому горизонтальному перерізі може формуватися без окремої із вказаних зон, але з утворенням іншої.

Формування зони стовпчастих кристалів відбувається при послідовній кристалізації та порівняно малому переохолодженні рідкого металу. За нею, в напрямку до центру злитка, утворюється зона з неорієнтованими дендритами. На цьому етапі твердіння сталі у злитку досягають значного розвитку конвективні потоки, які збагачуються твердою фазою внаслідок часткового руйнування кристалів або їх гілок. У злитку, разом з гравітаційним переміщенням двофазних потоків розплаву, може відбуватися об'ємне твердіння сплаву. В результаті цього у центрі злитка утворюється зона з рівноосними або глобулярними кристалами. На структуру в злитках, разом з температурним градієнтом, значно впливають домішки у сплаві. При підвищеному вмісті домішок у сплаві необхідно збільшувати температурний градієнт у рідкому металі для одержання заданої структури злитка.

Автори вивчили вплив умов твердіння сплаву на розподіл температури і конвективних потоків розплаву в злитку. Інтенсивність відведеного тепла від дослідного сплаву регулювали температурою попереднього нагрівання моделі злитка (табл. 1). Визначили, що температура сплаву в злитках, по мірі віддалення від верхнього горизонту до нижнього, зменшується (рис. 1). При цьому температурний перегрів розплаву мало залежить від інтенсивності його охолодження й повністю зникає в нижній частині злитка.

При підвищеній інтенсивності відведення тепла (критерій $Bi \gg 1$) спостерігаються перепади температури по горизонтальному перерізу в злитку (рис. 1, а). Видно, що перегрів сплаву над температурою «ліквідус» знімається за 2 хвилини його твердіння. При цьому по периметру злитка утворюється шар закристалізованого сплаву, товщина якого на середині висоти складає ~ 17 мм. Аналогічний розподіл температури в злитку спостерігається при охолодженні його з середньою інтенсивністю (рис. 1, б). На початку повільного твердіння металу ($Bi \ll 1$) градієнт температур по перерізу

злитка не перевищує температурний інтервал кристалізації сплаву (рис. 1, в). При цьому температура розплаву повільно знижується від t_n до t_c зі збереженням у злитку тривалий час рідкої та твердої фаз сплаву.

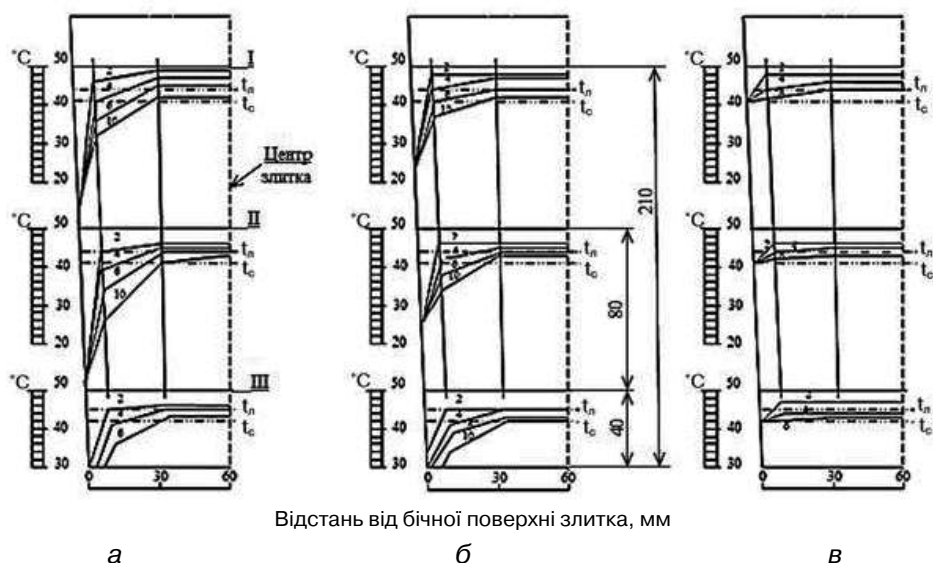


Рис. 1. Розподіл температури в горизонтальних перерізах злитків при різній інтенсивності відведення тепла від дослідного сплаву: а – висока; б – середня; в – низька; цифри біля кривих – час твердіння, хв.; I, II та III – верхній, середній та нижній перерізи у злитках

При інтенсивному відведенні тепла (критерій $Bi \gg 1$) від сплаву ширина двофазної зони у ньому мінімальна (рис. 1, а), яка при повільному охолодженні злитку (критерій $Bi \ll 1$) збільшується на всю його глибину (рис. 1, в). Двофазні зони, які утворюються в злитку, однорідні за будовою і не мають окремих ділянок зі сплавом у твердо-рідкому або рідко-твердому стані. В умовах повільного охолодження зливка зменшуються температурний градієнт в рідкому металі, а також інтенсивність відведення тепла від нього до фронту кристалізації сплаву. В результаті цього знижується швидкість просування фронту твердіння сплаву по перерізу зливка, що підтверджується розподілом у ньому ізотерм температури солідус сплаву (рис. 2).

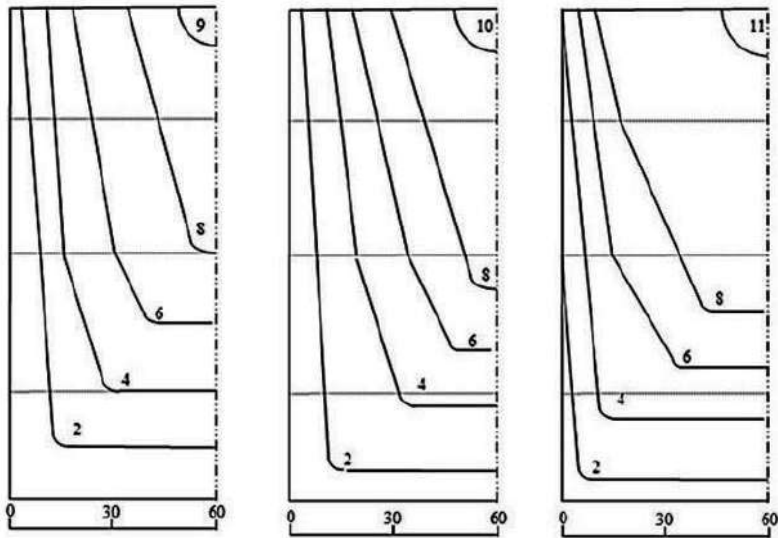
Швидкість переміщення цих ізотерм збільшується в напрямку від верхнього горизонту зливка до нижнього і залежить від інтенсивності охолодження сплаву. Градієнт температур по висоті зливка забезпечує безперервне переміщення до низу нагрітих об'ємів розплаву вздовж фронту кристалізації сплаву з підвищенням ступеня їхнього переохолодження. Інтенсивність охолодження цих об'ємів металу залежить від швидкості конвективного їх переміщення по висоті зливка.

Швидкість конвективних потоків вздовж фронту кристалізації дослідного сплаву визначали за формулою [5]:

$$W = \sqrt{g \beta H (t - t_{cr})}, \quad (3)$$

де H – відстань від фронту твердіння металу; g – прискорення вільного падіння; β – коефіцієнт об'ємного розширення; t – температура розплаву в потоці; t_{cr} – температура на поверхні фронту твердіння сплаву.

Швидкість конвективного руху розплаву вздовж фронту твердіння сплаву збільшується по мірі віддалення від верхнього горизонту зливка до нижнього (рис. 3, а). При цьому підвищуються величина критерію Нуссельта і коефіцієнт



Відстань від бічної поверхні злитка, мм

а

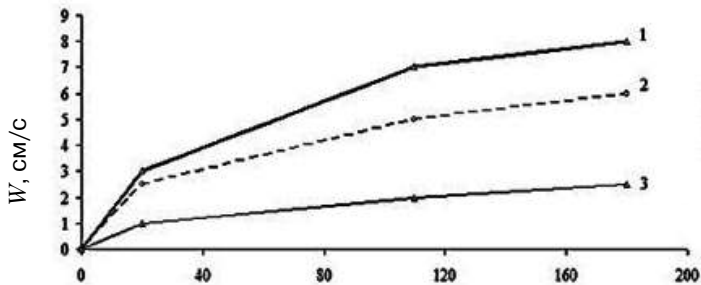
б

в

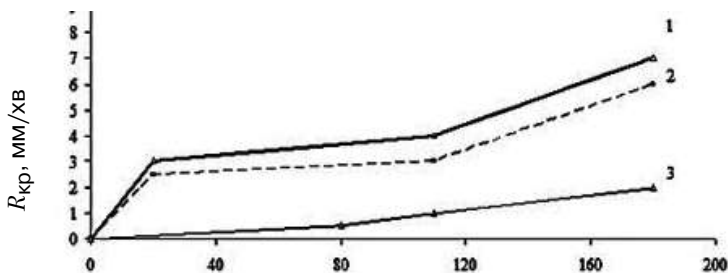
Рис. 2. Розподіл ізотерм температури «солідус» сплаву в злитку при різній інтенсивності його охолодження: а – висока; б – середня; в – низька; цифри біля кривих – час процесу твердіння злитка, хв

тепловіддачі сплаву, що сприяє більш інтенсивному відведенню тепла від перегрітого металу до фронту його твердіння (рис. 3, б).

Підвищення швидкості процесу кристалізації сплаву у верхній частині злитка обумовлено інтенсивним рухом конвективних потоків розплаву (рис. 3, а) і малим



а



б

Відстань від верхнього перерізу злитка, мм

Рис. 3. Швидкості конвективних потоків (а) і процесу кристалізації сплаву (б) по висоті злитка при різній інтенсивності його охолодження: 1 – висока; 2 – середня; 3 – низька

тепловим опором тонкого закристалізованого шару сплаву. У нижніх шарах злитка швидкість процесу твердіння сплаву підвищується за рахунок збільшення в ньому кількості охолоджених об'ємів металу (рис. 2, табл. 1).

Таблиця 1

**Залежність об'єму закристалізованого сплаву від часу
твердіння злитка**

Інтенсивність процесу тепловідведення від злитка	Температура нагріву моделі перед заливанням сплаву, °C	Об'ємна частка твердого сплаву за час його кристалізації, %				Час повного твердіння злитка, хв
		2 хв	4 хв	6 хв	8 хв	
Висока	4	24,6	44,6	67,4	88,7	9
Середня	22,5	14,6	35,8	59,0	84,2	10
Низька	42	3,4	18,6	38,3	60,7	11

Спостереження за процесами формування модельних злитків показали, що для одержання однорідної та дисперсної структури в них необхідно забезпечувати інтенсивну кристалізацію сплаву. В умовах інтенсивного тепловідведення на більшій відстані від бічної поверхні злитка сплав твердіє послідовно. При цьому в центрі злитків спостерігається змішана (послідовна і об'ємна) кристалізація сплаву (рис. 4, а). При більш повільному охолодженні у злитках зменшуються глибина послідовного твердіння сплаву та зона рівноосних кристалів (рис. 4, б, в).



Рис. 4. Структура злитків, одержаних при різній інтенсивності процесів тепловідведення від сплаву: а – висока; б – середня; в – низька

Кількість охолоджених об'ємів металу, що накопичуються в нижній частині злитків при їх твердінні, суттєво залежить від інтенсивності процесу конвекції в розплаві. Тому вивчили вплив температури нагріву донної частини моделі на процес кристалізації злитку. Встановили, що при нагріванні дна моделі до температури $\sim 50^{\circ}\text{C}$ в злитку утворюються висхідні потоки розплаву, які перемішують сплав під час його твердіння. В результаті перемішування температура розплаву рівномірно розподіляється в об'ємі злитка, що перешкоджає утворенню та росту кристалів в його центральній зоні. При цьому фронт кристалізації сплаву переміщується до центру злитка практично з однаковою швидкістю на всіх його горизонтах (рис. 5 і табл. 2). В нижній частині злитка зберігається рідкий метал (рис. 5, а), який твердіє після припинення нагрівання моделі.

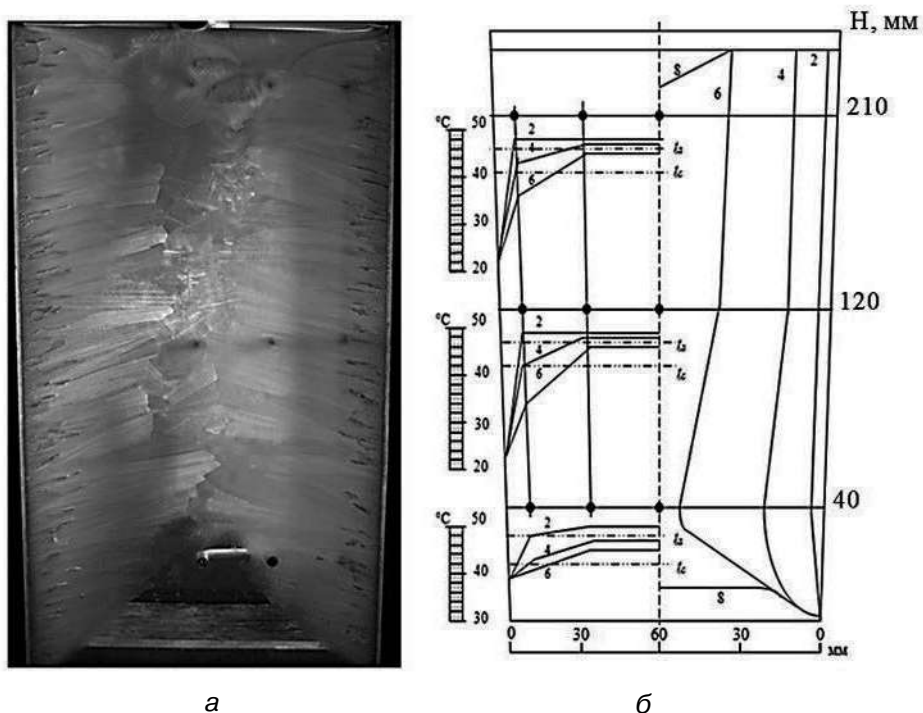


Рис. 5. Структура (а) і параметри процесу твердіння (б) дослідного сплаву на різній висоті злитка при нагріванні дна в моделі

Таблиця 2
Параметри процесу твердіння дослідного злитка в моделі з нагрітим дном через 4 хв кристалізації сплаву

Відстань від дна злитка, мм	Температура розплаву в центрі злитка, °C	Товщина закристалізованого шару (ξ), мм	Коефіцієнт (κ) твердіння сплаву мм/хв	Швидкість кристалізації (R), мм/хв
210	46	15	7,5	1,88
120	46	17	8,5	2,13
40	47	20	10,0	2,50

В моделі з нагрітим дном злиток повністю твердіє протягом не менш 8 хвилин (зустрічаються фронти кристалізації сплаву, які переміщуються від бічних стінок злитка до центру). При цьому в злитку утворюється щільна кристалічна структура, у якій відсутня (або мінімальна за шириною) зона з рівноосними кристалами (рис. 5, а).

Представлені дані свідчать про те, що структура злитків значно залежить від температурного градієнту в них, величина якого визначається інтенсивністю конвективного переміщення рідкого металу при його твердінні. Разом з цим, температурний градієнт суттєво впливає на процеси формування осової і позаосової хімічної неоднорідності (ліквіація вуглецю, сірки, фосфору, тощо), а також на розподіл неметалевих включень в закристалізованих злитках. Неметалеві включення в процесі твердіння злитка спливають з розплаву на його поверхню відповідно законам седиментації твердих часток в рідині [6]. Швидкість спливання сферичної частки в рідкометалевій ванні визначається відношенням її інерційних сил до величини в'язкого опору розплаву і залежить від величини критерію Рейнольдса (Re). При інтенсивному конвективному переміщенні розплаву ($Re > 1$) швидкість спливання включення у в'язкому середовищі можна визначити за рівнянням Стокса [7]:

$$v_{bc} = \frac{qd^2(\rho_m - \rho_b)}{18\eta K_\phi} + W_k \cos y, \quad (4)$$

де d – діаметр включення; ρ_m, ρ_b – густина металу та включення відповідно; η – коефіцієнт динамічної в'язкості; K_ϕ – коефіцієнт опору (залежить від форми включення); W_k – швидкість конвективного руху розплаву; y – кут відхилення конвективного потоку від вертикалі.

Видно, що чим більша в'язкість металу і менша швидкість конвективних потоків у ньому, тим повільніше будуть спливати неметалічні включення у злитку при твердінні. Неметалеві включення, що поступають (або утворюються) у зону з в'язким розплавом, практично не спливають і залишаються в ній. Нагрівання дна у виливниці (або його утеплення) сприяє більш інтенсивному видаленню неметалевих включень зі сплаву при його кристалізації. Розрахунки за формулою (4) і результати фізичного моделювання свідчать про те, що при нагріванні дна в моделі до 50 °С швидкість спливання включень у рідкому металі збільшується у 2,3 рази порівняно зі звичайними умовами твердіння злитка.

Результати досліджень свідчать про значний вплив на структуру в злитках температурного градієнту в сплаві, величина якого залежить від інтенсивності процесу конвекції у рідкому металі. Від величини цього градієнту суттєво залежать процеси формування у злитках осьової і позаосьової хімічної неоднорідності (ліквація вуглецю, сірки, фосфору, тощо) та розподіл неметалевих включень у закристалізованому сплаві. Тому уповільнення або усунення конвективного переміщення розплаву при твердінні сплаву є ефективним способом підвищення властивостей злитків.

Список літератури

1. Narivskij A., Nuradinov A., Nuradinov I. (2021). Devising manufacturing techniques to control the process of zonal segregation in large steel ingots. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*, 3 (1(111)), 6-13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232496>
2. Флемингс М.С. Процессы затвердевания. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
3. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
4. Тиллер В., Джексон К., Чалмерс Б. и др. Физическое металловедение, том 2. – М.: Мир, 1967. – 490 с.
5. Себиси Т., Бредшоу П. Конвективный теплообмен. – М.: Мир, 1987. – 590 с.
6. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика сплошных сред. – М.: Гостехиздат, 1954. – 796 с.
7. Itoh Y., Okajama T., Tashiko K. On Refining of Solidification of Ferritic Stainless Steel by Vibration Method // *Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan*. – 1981. – V. 21. – №6. – P. 397-404.

Надійшла 18.11.2021

References

1. Narivskij A., Nuradinov A., Nuradinov I. (2021). Devising manufacturing techniques to control the process of zonal segregation in large steel ingots. *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*, 3 (1(111)), 6-13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232496>
2. Flemings, M.S. (1977). *Processy zatverdevaniya* [Curing processes]. Moscow: Mir, 1977. 423 p. [in Russian].
3. Efimov, V.A., Eldarhanov, A.S. (2004) *Tehnologii sovremennoj metallurgii* [Technologies of modern metallurgy]. Moscow: Novye tehnologii,. 784 p. [in Russian].

4. Tiller, V., Dzheksan, K., Chalmers, B. et al. (1967) Fizicheskoe metallovedenie [Physical Metallurgy], Vol. 2. Moscow: Mir. 490 p. [in Russian].
5. Sebisi, T., Bredshou, P. (1987). Konvektivnyj teploobmen. [Convective heat transfer.]. Moscow: Mir. 590 p. [in Russian].
6. Landau, L.D., Livshic, E.M. (1954). Mehanika sploshnyh sred [Mechanics of continuous environment]. Moscow: Gostehizdat. 796 p. [in Russian].
7. Itoh Y., Okajama T., Tashiko K. (1981). On Refining of Solidification of Ferritic Stainless Steel by Vibration Method // Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan. Vol. 21. №6. pp. 397-404. [in Japan].

Received 18.11.2021

A. S. Nuradinov, Dr. Sci. (Engin.), Leading Researcher; e-mail: nla_73@ukr.net

A. V. Narivskij, Dr. Sci. (Engin.), Corresponding Member of the NAS of Ukraine

I. A. Nuradinov, inuradinov@gmail.com

V. I. Kurpas, PhD (Engin.), Senior Researcher;

O. O. Yasynska, PhD (Engin.), Research Scientist;

e-mail: yasinskaalena@gmail.com

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

THE PROCESSES OF THE STRUCTURE FORMATION IN THE STEEL INGOTS BY THERMAL FORCING OPERATE ON METALL

By creating of modern machinery and equipment it is using the unique massive steel ingots (up to 600 tons), which it is making from the large bellows ingots. The processes crystallization of large ingots are accompanying by the processes of forming of chemical and physical heterogeneity in them, irregular distribution of non-metallic inclusions, impurities and other defects. The lowering of the quality of large ingots on the stage of crystallization it is stipulated by simultaneous course of many physicochemical, hydrodynamic and thermophysical processes by passage steel from liquid in solid state. In this period of solidification in ingot it are forming many defects, which impossible to eliminate during further technological operations of products from it. Processes of making the massive steel ingots are complex and insufficiently are studied, which it is connection with complexity of fulfillment such research and the limited number of publications on their results. The study of the processes of structure formation and crystallization of large ingots and the development of the ways of control them is actual problem of modern steelmaking.

Keywords: steel ingot, physical modeling, heat-power effect, intensity of heat removal, crystallization, structure formation, segregation.