

Хімічна і фізична неоднорідності та гази у великому сталевому зливку

А. В. Нарівський, член-кореспондент НАН України, директор, opprs@ptima.kiev.ua

О. М. Смірнов, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
stalevoz@i.ua

М. І. Тарасевич, доктор технічних наук, заступник директора, nit@ptima.kiev.ua,

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу,
stkondrat@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Для створення високотехнологічного обладнання, яке використовують в енергетиці, важкому машинобудуванні, хімії і транспорті, потрібні унікальні великогабаритні сталеві вироби. Для цього використовують великі ковальські зливки масою до 600 тонн. Однак, збільшення маси зливків призводить до утворення хімічної і фізичної неоднорідності, укрупненню і несприятливому розподілу неметалевих включень, розвитку ліквідаційних дефектів, які знижують міцність і експлуатаційні характеристики металу. У зв'язку з цим якість поковок і готових деталей, виготовлених з таких зливків, не завжди задовольняє вимогам, що пред'являються, а втрати металу, у вигляді технологічних відходів та браку, досягають значних величин. Позацентрична зональна ліквідація і, особливо найбільш небезпечний її різновид - шнур, суттєво знижують якість і рівень властивостей виробів, виготовлених з великих сталевих зливків. У зв'язку з цим в роботі представлені результати досліджень структури, розподілу газів, фізичної і хімічної неоднорідностей по перетину і висоті зливка масою 140 тонн, який відлитий у вакуумі зі сталі 25ХНЗМФА.

Показано, що залежно від температурно-часових умов тверднення зливка, серед яких визначальним є інтервал кристалізації (зумовлений хімічним складом сталей), інтенсивність охолодження у різних макрооб'ємах по висоті і перетину зливка, температурний градієнт перед фронтом кристалізації, розчинність ліквідуючих елементів і вміст газів в розплаві тощо. Виходячи з цього при розробленні технології виготовлення великих зливків для забезпечення їх якості, оптимальної структури і властивостей слід враховувати не тільки їх габаритні розміри, але й сукупність впливу вказаних термодинамічних параметрів на процеси кристалізації, формування дендритної структури, прояви ліквідації в різних макрооб'ємах зливка.

Ключові слова: зливки, ліквідаційні смуги і включення, дендрити, структура, кисень, оксиди, сульфіди.

Дослідження проведено на ковальському зливку масою 140 т відлитому з вакуумованої хромопелітної сталі 25ХНЗМФА. Зливки тверднув у виливниці з співвідношенням Н/Д = 1 та конусністю 16 градусів. Середній діаметр його при висоті 2570 мм склав 2540 мм. По радіусу зливка

від поверхні до центру на різній його висоті вирізали зразки для досліджень. Макроструктуру зливка вивчали на сірчаних відбитках, одержаних за методом Баумана (рис. 1).

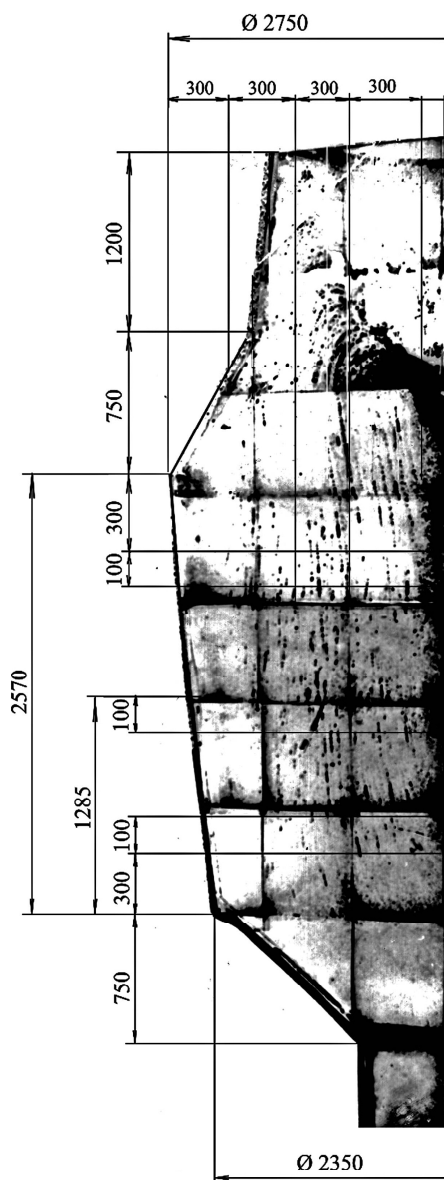


Рис. 1. Сірчаний відбиток зливка із сталі 25ХНЗМФА.

Сегрегація елементів у сталі починається на середині радіусу і спрямована до центру з утворенням переривчастих смуг (шнурів), які рівномірно розташовуються в об'ємі зливка (рис. 1). Найбільша кількість ліквідаційних включень спостерігається у верхній частині зливка під надливом.

Відомо, що незалежно від способу виплавки і розливання сталі, в зливках різної величини завжди утворюються дефекти хімічної і фізичної неоднорідностей. Розміри і характер розташування таких неоднорідностей досить різноманітні. Зі збільшенням маси зливка хімічна і фізична неоднорідності у вигляді осової V-подібної і позаосової Λ -подібної сегрегації елементів формуються в ньому інтенсивніше. При цьому збільшується відмінність в концентраціях ліквіруючих елементів (вуглець, сірка і фосфор) по перетину зливків. У великих зливках хімічний склад головної і донної частин іноді настільки відрізняється, що нібито вони відлиті з різних марок сталі. В результаті цього механічні властивості литого металу також суттєво розрізняються, що ускладнює виготовлення з нього якісних виробів. Для масивних поковок і виробів найбільш небезпечною є осова неоднорідність, яка характеризується наявністю пористості і дрібних тріщин. Формування цієї неоднорідності супроводжується також переміщенням ліквіруючих елементів до надливної частини зливка [1].

На сірчаному відбитку видно, що ліквідаційні дефекти в поверхневому шарі та в зоні стовчатих кристалів відсутні.

Утворення смуг хімічної неоднорідності можна пояснити тим, що при твердненні зливка двофазна зона кристалізації сталі складається з зростаючих дендритів, оточених розплавом з ліквуючими елементами. По мірі тверднення зливка вміст ліквуючих домішок в розплаві підвищується. В результаті збільшується концентраційне переохолодження сталі, яке залежить від величини температурного градієнта, вмісту ліквуючих домішок та їх розподілу в розплаві [2]. Таке переохолодження інтенсифікує процес зростання вершин дендритів. Ростуть дендритні вершини до моменту, поки їх радіус на порядок не перевищить розмір критичного зародка [3].

При подальшому твердінні зливка міждендритні об'єми розплаву збагачуються ліквуючими елементами, які за механізмом капілярного масопереносу переміщуються до фронту кристалізації сталі. Частина таких ліквуючих домішок спливає і переміщується потоками металу у верхню частину зливка. На межі фронту кристалізації металу утворюються очищені від лікватів окремі ділянки, через які інтенсивніше відводиться тепло від двофазної зони сталі. В результаті цього збільшується товщина осей другого порядку в дендритах і зароджуються нові центри кристалізації в розплаві. При подальшому зростанні дендритів з цих центрів утворюється новий ліквацийний шар, який гальмує або зупиняє фронт тверднення сталі. Така періодичність кристалізації зливка сприяє процесам формування у ньому шнурів та ліквацийних включень різного розміру.

В даний час встановлено вплив структури на характеристики міцності властивості литої та деформованої сталі, які залежать від відстані між осями дендритів. Відомо, що ріст осей в дендритах зупиняється при зустрічі з іншими, а їх товщина зростає за рахунок тверднення металу в міждендритних об'ємах.

Зона з ліквацийними включеннями та шнурами товщиною 3-5 мм, що починається від середини радіусу зливка, обмежується осьовою V-подібною неоднорідністю на відстані 1100 мм від бокової поверхні. V-подібна неоднорідність слабо розвинена і розташована, в основному, на ділянці зливка від раковини усадки до половини його висоти, а за шириною порівняна з зоною невпорядкованих рівноосних дендритів (рис. 2). Підвищена кількість дефектів ліквацийної неоднорідності в центрі зливка зумовлена тим, що ліквати захоплюються зростаючими дендритами і залишаються у литому металі після його кристалізації.

Центральна поруватість у зливку практично відсутня, в деяких випадках по його осі спостерігаються дрібні пори. Найбільш щільною і однорідною є нижня частина зливка, в якій зменшуються до мінімуму кут нахилу V-подібної неоднорідності та кількість ліквацийних дефектів.

Металографічними дослідженнями встановлено, що структура сталі у поверхневих бокових шарах зливка на половині його висоти складається з розорієнтованих дендритів з осями 1-го порядку розміром 10-15 мм (табл. 1).

При наближенні до центру по радіусу зливка довжина таких осей у дендритах зменшується до 5-7 мм. На відстані 900 мм від поверхні зливка

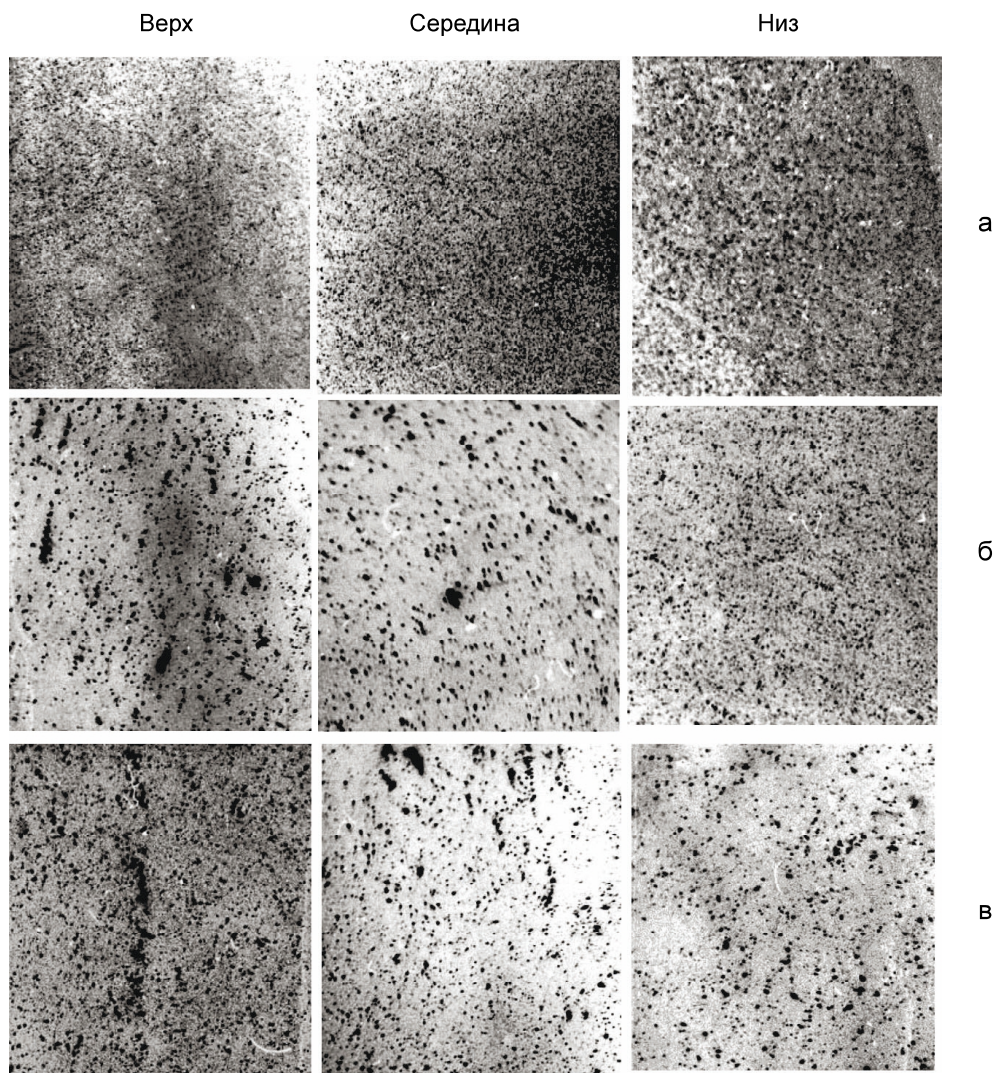


Рис. 2. Сірчані відбитки зразків сталі по висоті зливка на різній відстані від бокової поверхні: а – 300 мм; б – 600 мм; в – 900 мм

довжина цих осей знову зростає до ~ 12 мм, а на відстані 1200 мм – зменшується до ~ 9 мм.

В центральній зоні на відстані ~ 900 мм від бокової поверхні зливка спостерігаються окремо виділені, можливо ще у рідкому металі, розорієнтовані дендрити з довжиною осей 1-го порядку до 40 мм (рис. 3). Найбільший розмір дендритів спостерігається у центрі верхньої частини зливка. Можливо, це обумовлено вільним їх ростом при малому градієнті температур у зливку, який твердне.

Інтенсивність процесу утворення хімічної неоднорідності у зливках залежить від розчинності ліквуючих елементів у розплаві. Чим менше розчинність елементів, тим більше виділяється ліквуючих фаз в структурі литої сталі. Хімічний аналіз зразків сталі, відібраних по перерізу в

Плавлення і кристалізація

Таблиця 1

Довжина осей 1-го порядку в дендритах сталі у середній
за висотою частині зливка

Відстань від бокової поверхні зливка, мм	Напрямок осей в дендритах	Середня довжина осей, мм	Довжина осей в деяких дендритах, мм
300	розорієнтовані	10 - 15	
600	дрібні розорієнтовані	5 - 7	
900	рівноосні розорієнтовані	~ 12	34
1200	рівноосні розорієнтовані	~ 9	37

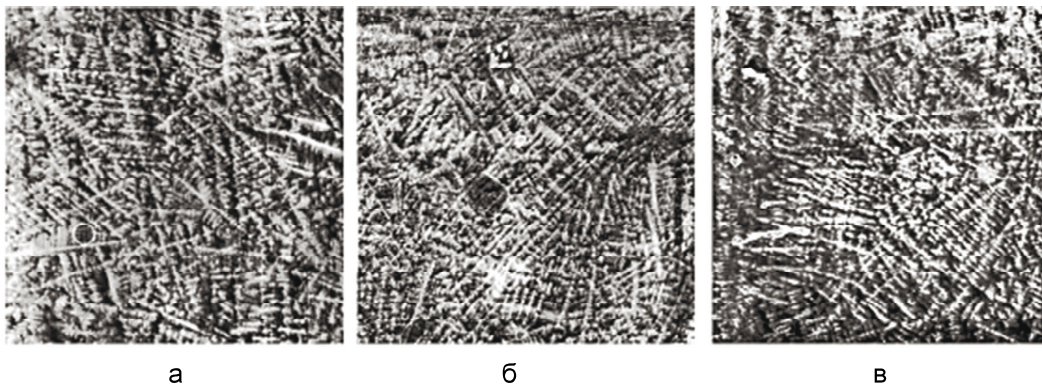


Рис. 3. Дендритна структура сталі в центральній зоні (~ 900 мм від поверхні) на різній висоті зливка. а – низ, б – середина, в – верх. $\times 100$.

середньому горизонті зливка на різній відстані від поверхні наведено в таблиці 2. Видно, що масова частка нікелю в цьому перерізі знаходиться на рівні 3,5 %. Концентрації міді та ванадію залишаються постійними, вміст решти елементів змінюється на 5-16 %.

З підвищенням вмісту газів в сталі кількість дефектів хімічної і фізичної неоднорідності в зливку збільшується. За результатами газового

Таблиця 2

Масова частка елементів в сталі 25ХНЗМФА на різній відстані від бокової поверхні зливка, %

Відстань, мм	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Si	V	Cu
300	0,2	0,44	0,005	0,001	1,65	3,51	0,4	0,27	0,11	0,14
600	0,21	0,43	0,006	0,001	1,63	3,5	0,39	0,27	0,11	0,14
900	0,24	0,45	0,008	0,002	1,59	3,5	0,41	0,29	0,11	0,14

аналізу (рис. 4) вміст кисню у верхній частині зливка у напрямку від поверхні до центру підвищується від 0,003 до 0,0037 %. Концентрація кисню на середньому і нижньому рівнях зливка змінюється від 0,0022 до 0,003 %. У перетинах на всіх горизонтах зливка вміст кисню в сталі збільшується від середини радіуса (~ 600 мм від поверхні). Як показано вище, на такій відстані починає формуватися позаосьова неоднорідність зливка.

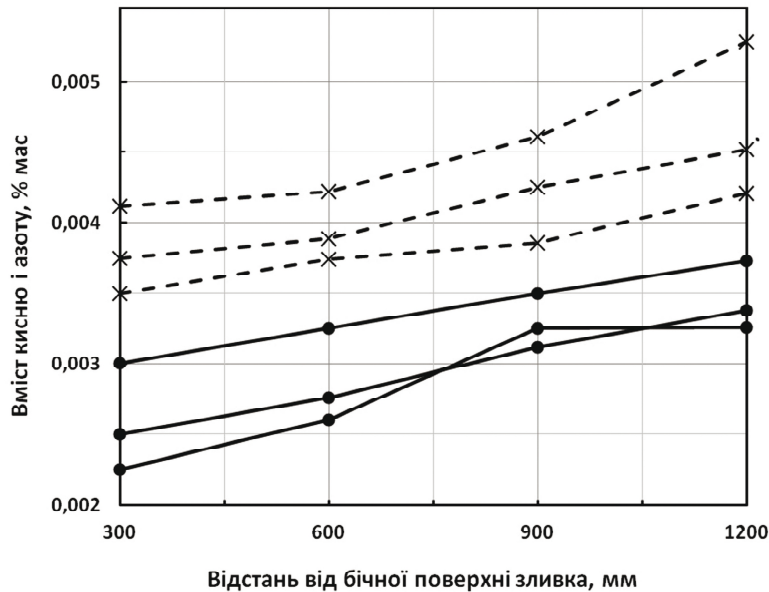


Рис. 4. Розподіл кисню (—•—) та азоту (—x—) в сталі по радіусу зливка у верхній (1), середній (2), і нижній (3) частинах.

Вміст азоту в сталі на всіх рівнях зливка складає 0,0035-0,0054 % по масі. Помітне збільшення концентрації азоту в металі починається у всіх перетинах на відстані ~ 900 мм від поверхні і збігається з початком формування осьової неоднорідності в зливку (рис. 2).

Представлені дані свідчать про те, що ступінь розвитку хімічної і фізичної неоднорідностей в зливках залежить від багатьох факторів. Найбільш важливими з яких є: склад сталі і температурний інтервал її кристалізації; вміст у ній газів і ліквуючих елементів; умови охолодження зливка; температурний градієнт перед фронтом тверднення сталі та ін. Тому при розробці технології виготовлення зливків необхідно вибирати оптимальні габарити та параметри процесів їх формування, з урахуванням впливу зазначених факторів на структуру і властивості литого металу.

Література

1. Смирнов А. Н., Макуров С. Л., Сафонов В. М. Производство слитков стали и промышленных сплавов: учебное пособие. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 436 с.
2. Овсиенко Д. Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. – Киев: Наукова думка, 1994, – 234 с.

3. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 316 с.

References

1. Smirnov A. N., Makurov S. L., Safonov V. M. *Proizvodstvo slitkov stali i promishlenih splavov: uchebnoe posobie* (Production of ingots of steel and industrial alloys: a tutorial), Donetsk, Noulidzh, 2013, 436 p. [in Russian].
2. Ovsienko D. E. *Zarojdenie i rost kristalov iz rasplava* (The nucleation and growth of crystals from the melt), Kyiv, Naukova dumka, 1994, 234 p. [in Russian].
3. Taran Yu. N., Mazur V. I. *Struktura eftekticheskikh splavov* (Structure of eutectic alloys), Moscow, Metallurgiya, 1978, 316 p. [in Russian].

Одержано 15.07.20

A. V. Narivskiy, A. N. Smirnov, N. I. Tarasevich, S. Ye. Kondratyuk

Chemical and physical heterogeneities and gases in large steel ingot

Summary

For creation of the high-tech equipment that is used in energy, heavy engineering, chemistry and transport, the unique large-sized steel products are required. In the manufacture of such products, large forging ingots in the mass to 600 tons are used. However, an increase in the mass of the ingots leads to the formation of chemical and physical heterogeneity, enlargement and unfavorable distribution of non-metallic inclusions, of the development of segregation defects in them, which reduce the strength and exploitation characteristics of the metal. In this connection, the quality forgings and finished parts are not always meet the producing demands and the loss of metal, in the form of technological waste and rejects are reaching significant values. It is known that eccentric zonal segregation, especially it's the most dangerous variety - cords, significantly reduce the quality and properties of products from large steel ingots. In connection with the continuous expansion of the production of large ingots, the problem of creating optimal technologies for their formation, which reduce or exclude the possibility of the formation of chemical heterogeneity and cords in steel during crystallization, it is currently important and relevant. In this paper it are presented the results of studies of the structure, gas distribution, physical and chemical heterogeneities in the cross section and height of an ingot in the mass of 140 tons, which was casted in vacuum from steel 25KHN3MFA.

It is shown that depending on the temperature and time conditions of ingot hardening, among which the crystallization interval (due to the chemical composition of steels), cooling intensity in different volumes in height and cross section of ingot, temperature gradient before the crystallization front, solubility of alloying elements and gas content in the melt, etc. Based on this, when developing technology for large ingots to ensure their quality, optimal structure and properties should take into account not only their dimensions, but also the combination of these thermokinetic parameters on the crystallization process, dendritic structure formation, manifestations of liquation in different ingot volumes.

Keywords: ingot, segregation strip and inclusions, dendrites, structure, oxygen, oxides, sulfides.