

- vidnovlennia zaliza z hematytu hazom CO i hazyfikatsii tverdoho vuhletsu za miramy khimichnoi sporidnenosti rechovyn do kysniu» [«Calculation of the temperatures of chemical reactions of the process of stepwise reduction of iron from hematite by CO gas and gasification of solid carbon based on measures of the chemical affinity of substances to oxygen»], *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, vol. 1(2), pp. 1-8, 2022. doi: 10.46299/j.isjea.20220102.1. (Ukr.).
20. A.T. Loburets, *Navchalnyi posibnik «Khimichna termodinamika» dlya studentiv pidgotovki bakalavra spetsialnosti 144 «Teploenergetika» vsikh form navchannya* [Textbook «Chemical Thermodynamics» for students of Bachelor's degree in specialty 144 "Heat Power Engineering" of all forms of study]. Poltava, Ukraine: PNTU im. Yu. Kondratyuka Publ., 2016. (Ukr.)
21. L.B. Tsvetkova, *Fizychna khimiia: teoriia i zadachi: navch. posibnyk* [Physical chemistry: theory and tasks: textbook]. Lviv, Ukraine: Mahnoliia Publ., 2008. (Ukr.)
22. L.M. Soldatkina, *Khimichna termodinamika v skhemakh, tablytsiakh, formulakh, rysunkakh* [Chemical thermodynamics in diagrams, tables, formulas, figures]. Odesa, Ukraine: Odeskyi natsionalnyi universytet Publ., 2012. (Ukr.)
23. V.I. Lebid, *Fizychna khimiia* [Physical chemistry]. Kharkiv, Ukraine: Folio Publ., 2005. (Ukr.)
24. Using Ellingham diagram, how to determine that in between C and CO which is better reducing agent? [Online]. Available: <https://socratic.org/questions/using-ellingham-diagram-how-to-determine-that-in-between-c-and-co-which-is-better>. Accessed on: October 03, 2024. (Eng.)
25. Ya.V. Stovba, V.V. Pereskoka, and L.V. Kamkina, «Ocenka vozmozhnosti ispolzovaniya zhelezo- i marganecsoderzhashih othodov dlya polucheniya uglerodistogo ferromarganca» [«Evaluation of the possibility of using iron- and manganese-containing waste to obtain carbonaceous ferromanganese»], in Proc. VI-th Int. Conf. «Cooperation to Solve the Waste Problem», Kharkov, Ukraine, 2009, pp. 72-73. (Rus.)

Стаття надійшла 02.11.2024

Стаття прийнята 23.11.2024

УДК 621.74.002: 669.001.2

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321259

© Дан Л.О.¹, Трофімова Л.О.², Павленко П.В.³

ЩОДО ОДНОГО З ШЛЯХІВ ЕКОНОМІЇ МЕТАЛУ ПРИ ВІДЛИВАННІ СТАЛЕВИХ ЗЛИВКІВ

Дана стаття присвячена аналізу шляхів зменшення витрат металу при відливанні сталевих зливок. Наведені чинники, що стосуються необхідності використання додаткового об'єму металу в верхній частині зливку та кількісні дані стосовно витрат металу на додатки. Проаналізовано тепловий баланс додатку, що твердне, та зроблено висновки щодо необхідності утримання додатку в рідкому стані як можна довше. На підставі літературних даних вказано на два шляхи можливого поліпшення теплової роботи додатків, за рахунок чого може бути зменшений їх об'єм. Перший – максимально ефективно використовувати тепло, що містить в собі рідкий метал додатку. Другий – збільшення тепловмісту розплаву в додатку за рахунок зовнішніх джерел. Розглянуті способи внесення тепла до металу додатку: електродуговий, індукційний, газокисневий, електрошлаковий та інші. Обґрунтовано проведення експериментів по відливанню сталевих зливок зі зменшеною додатковою частиною в

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0002-1954-4871, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, pasha107107@gmail.com

умовах її електродугового обігріву та описані умови проведення експериментів. На підставі експериментальних даних побудовано криві твердіння металу дослідних і контрольних зливок. Показано, що за умов електродугового обігріву навіть зменшений вдвічі додаток забезпечує більш тривалий час твердіння дослідного зливка в порівнянні з контрольним. Встановлено також, що електродуговий обігрів додатку забезпечує підвищення щільності металу головної частини і зменшення ліквідації сірки всередині зливку. Зроблено висновки про те, що електродуговий обігрів металу додаткової частини зливку дозволяє зменшити її об'єм вдвічі без погіршення щільності і однорідності металу зливка. Це має позитивні технічні, економічні та екологічні наслідки.

Ключові слова: зливки, додаток, усадкова раковина, електродуговий обігрів.

L. Dan, L. Trofimova, P. Pavlenko. On the way to save metal during the steel ingot casting process. This article analyzes ways to reduce metal usage in steel ingot casting. Factors related to the need to use an additional metal volume in the upper part of the ingot and quantitative data on metal consumption for additives are presented. The heat balance of the solidifying additive is analyzed, and conclusions are drawn regarding the need to keep the additive in the liquid state as long as possible. Based on literature data, two ways of potential improvement of the thermal performance of additives are indicated, which can reduce their volume. The first is to maximize the use of heat contained in the liquid metal of the application. The second is to increase the heat content of the melt in the application using external sources. The methods of heat application to the metal of the application are considered: electric arc, induction, gas-oxygen, electro-slag, and others. Experiments on casting steel ingots with a reduced additional part under conditions of its electric arc heating are substantiated and the conditions of experiments are described. Based on the experimental data, the experimental and control ingot's metal solidification curves were plotted. It is shown that under the conditions of electric arc heating, even a halved additive provides a longer solidification time for the experimental ingot compared to the control one. It has also been established that electric arc heating of the additive provides an increase in the density of the metal of the head part and a decrease in the sulfur liquidation inside the ingot. It is concluded that electric arc heating of the metal of an additional part of the ingot can reduce its volume by half without degrading the density and homogeneity of the ingot metal. This has positive technical, economic, and environmental impacts.

Keywords: ingot, overflow, shrinkage sink, electric arc heating.

Постановка проблеми. Виробництво високоякісних товстих сталевих листів і плит, великогабаритних поковок відповідального призначення можливе тільки зі зливок, тому вимоги до якості внутрішньої будови таких зливок безперервно зростають разом зі зростанням вимог до надійності одержуваних з них виробів. Неоднорідність розмірів, форми і розподілу кристалів в об'ємі зливка, пористість і хімічна неоднорідність є основними проблемами під час отримання якісного зливка. Крім того, глибина усадкової раковини у великих зливках становить 10-20% їхньої довжини, внаслідок чого значна частина металу (до 10% за масою) йде у відходи. Це помітно збільшує собівартість кінцевої продукції [1-6].

Як відомо, для локалізації усадкової раковини за межами зливку і максимальне підживлення рідким металом тіла зливка використовують додатки. Також доведено, що об'єм і форма усадкової раковини в верхній частині зливка спокійної сталі залежить між іншим від конфігурації додатку, конструкції додаткової надставки, умов тепловідводу через футерування надставки, утеплення дзеркала металу та інших факторів. Докладний аналіз останнього твердження відкриває широкі можливості у керуванні процесом затвердіння сталевих зливок та підвищення ефективності роботи його додатку. За правильно обраних параметрів і конструкції додаткової надставки, а також за збільшення часу перебування металу в додатку в рідкому стані зменшується кількість відходів від зливка.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тривалість збереження металу в додатку в рідкому стані залежить від інтенсивності відведення тепла, що здійснюється через футеровку і

каркас прибуткової надставки, за рахунок випромінювання з поверхні дзеркала металу в додатку і за рахунок передачі тепла в тіло зливка. Тепловий баланс додатку включає низку статей видаткової (q_{Σ}) і прибуткової (Q_{Σ}) частин [1]:

$$q_{\Sigma} = Q_{\Sigma} \text{ чи:} \\ q_1 + q_2 + q_3 + q_{\text{ін}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{\text{вн}}, \quad (1)$$

де q_1 – втрати тепла через дзеркало металу;
 q_2 – кількість тепла, що йде на нагрівання футерування та каркасу надставки, й втрати тепла від поверхні каркасу в оточуючу середу;
 q_3 – тепло, передане в тіло зливка;
 $q_{\text{ін}}$ – інші втрати тепла;
 Q_1 – тепло перегріву рідкої сталі;
 Q_2 – тепло, що виділяється при затвердінні металу в додатку;
 Q_3 – тепло, що виділяється при охолодженні первинно затверділих об'ємів металу;
 $Q_{\text{вн}}$ – тепло, що внесене ззовні.

На підставі аналізу рівняння (1) виникає наступне. Частка теплових втрат, що припадають на кожну зі статей, може змінюватися залежно від умов футерування надставки, теплоізоляції дзеркала металу, конфігурації та розмірів надставки і кількості металу в додатку. Встановлено [1], що найбільше тепла втрачається через футерування надставки (75-85%). Теплові втрати через дзеркало металу становлять 15-25%. Таким чином, перший напрямок підвищення ефективності додатку – це зменшення теплових втрат.

Значного зниження теплових втрат додатку можна досягти вже простим його засипанням теплоізолюючою сумішшю (зола, шлак, відпрацьована формувальна суміш тощо). Якщо одночасно ізолювані бічна поверхня і дзеркало металу в додатку, то час її затвердіння значно збільшиться і для різних ливарних сплавів стане приблизно однаковим [2]. Для теплової ізоляції стінок додатків застосовують різні матеріали (шамот, деревне вугілля, мати з базальтового волокна тощо), які мають низьку теплоакумулюючу здатність.

Таким чином, вже при правильному застосуванні теплоізоляційних облицювань істотно зменшується розмір додатку за рахунок збереження акумульованого ним тепла.

Другий висновок, що можна зробити аналізуючи рівняння (1), – ефективним способом підвищення якості роботи додатку слід визнати збільшення тепловмісту рідкого металу в ньому, тобто за рахунок складової $Q_{\text{вн}}$ в рівнянні (1).

Існує декілька способів внесення тепла до рідкого металу додатку (рис. 1) [7-13].

Нижче охарактеризовано кілька з них, що є найбільш уживаними.

Електродуговий обігрів. Ще в 1895 р. інженер Н. Г. Славянов з метою збільшення виходу придатного запропонував підтримувати головну частину зливка в процесі затвердіння в рідкому стані шляхом обігріву її електричною дугою. Пізніше цей метод набув поширення на низці заводів Німеччини, Англії, Америки, а також широко випробувався в країнах східної Європи.

При електродуговому обігріві додатку використовують як змінний, так і постійний струм. Сутність методу зводиться до такого: після наповнення зливка на поверхню металу опускають електрод і запалюють дугу, після чого під електрод дають шлакоутворювальну суміш; шлак захищає метал від окислювання киснем повітря, а також закриває дугу, запобігаючи тепловипромінюванню в навколишнє середовище та сліпучій дії на тих, хто працює.

Установка для електродугового обігріву складається з джерела електроенергії, пристрою для автоматичного регулювання потужності та механізму для автоматичного переміщення електрода. На установці заводу «Електросталь» здійснювали обігрів зливків масою 200, 300 і 500 кг. Для обігріву застосовували графітовані електроди діаметром 75 мм. Зміна потужності в часі здійснювалася програмними механізмами. Швидкість переміщення електродів у вертикальному напрямку становила 1 м/год [14].

Електродуговий обігрів додаткової частини можна проводити як із застосуванням додаткової надставки, так і без неї. Наприклад, на заводі «Електросталь» застосовували укорочені порівняно зі звичайними додаткові надставки [14].



Рис. 1 – Способи підведення тепла до додатку [7-13]

Вплив електродугового обігріву на зміну хімічного складу сталі не виявлено. Навуглецювання металу від електродів спостерігалось лише в окремих випадках у результаті неполадок у процесі обігріву.

Застосування електродугового обігріву на зливках швидкокорізальних, неіржавіючих та інших марок сталі без погіршення макроструктури зливка дає змогу збільшити вихід придатного під час переділу на заготівлю на 6-8% у результаті зменшення головного обрізу.

На заводі «Дніпроспецсталь» електрообігрів додатку зливка масою 2,8 т за суворого дотримання встановленого режиму дає можливість зменшити витрати металу на 5-7% [14].

Установка для електродугового обігріву великих зливків є на Дніпровському металургійному комбінаті. Дуговий обігрів великої кількості злитків неіржавіючої сталі масою 6 т показав, що головний обріз знижується з 17-18 до 10-12% без погіршення макроструктури піддодаткової частини зливка. При цьому витрати електроенергії становили в середньому 17 кВт·год/т, а зменшення обрізу верхньої частини зливка при прокаті – 6-7% [15-18].

Таким чином, застосування електродугового обігріву головної частини зливків показало, що цей спосіб дає можливість значно зменшити величину головного обрізу під час прокатки без погіршення будови зливка [19-21].

Індукційний обігрів. Індукційний спосіб обігріву додатку заснований на принципі використання струмів високої частоти для нагрівання металу. У додаткову надставку поміщається індуктор, по якому після наповнення додатку металом пропускають струм високої частоти, що збуджує в металі струми, які нагрівають його і підтримують у рідкому стані необхідний час. Установка для індукційного обігріву додатку працювала на Донецькому металургійному заводі. Джерелом живлення установки слугував електромашинний генератор високої частоти. Об'єм додатку становив лише 7-9% від загального об'єму зливка. У результаті тривалої промислової експлуатації установки для індукційного обігріву було отримано такі показники: витрата електроенергії на обігрів 14-18 кВт·год/т, зменшення головного обрізу з 16-18 до 5-9%.

До числа позитивних сторін цього способу належить можливість змінювати в широких межах тривалість та інтенсивність обігріву. Крім того, він не викликає забруднення сталі та підвищення хімічної неоднорідності зливка [21].

Газокисневий обігрів. Сутність газокисневого обігріву додатку полягає в тому, що після наповнення додаткової надставки метал у ній підтримується певний час у рідкому стані шляхом обігріву зверху полум'ям газокисневого пальника. Як пальне використовується природний або коксовий газ.

Досліди з газокисневого обігріву на території України було розпочато ще в 1951 р., їх проводили на заводах «Дніпроспецсталь», «Азовсталь» на 7-т зливках рейкової сталі, на 2,8- і 6-т зливках неіржавіючої сталі 1X18H9T. При цьому застосовували коксовий газ [20].

У результаті проведених дослідів було встановлено, що основною вимогою під час газокисневого нагріву є дотримання сталості співвідношення газ - кисень у газовій суміші. Щоб уникнути окислення легуючих елементів у верхній частині зливка, необхідно створити в додатковій надставці відновлювальну атмосферу, що досягається шляхом спалювання коксового газу за коефіцієнта надлишку повітря, що дорівнює 0,47. У зв'язку із зазначеними вимогами необхідно застосовувати тільки пальники з попереднім змішуванням газу і кисню [20].

Електрошлаковий обігрів. Способи електрошлакового обігріву і підживлення ґрунтуються на явищі виділення теплоти в розплаві шлаку при протіканні через останній електричного струму. Ефективність перетворення електричної енергії в теплоту під час електрошлакового процесу дуже висока, проте в сенсі передання теплоти металу він поступається індукційному нагріванню. Водночас способам електрошлакового обігріву і підживлення зливок властиві простота необхідного обладнання і технологічна гнучкість. Тут можна застосовувати як постійний, так і змінний (одно- і трифазний) струм. Під час обігріву використовують один або кілька графітованих електродів, а під час підживлення – придатні для цього сталеві вироби (штанги, листову обрізку, ливники та ін.). Теплотою шлакової ванни вироби оплавляються і краплі електродного металу, пройшовши через шлак, змішуються з металом, що твердне у виливниці. Перевага електрошлакового способу – рівномірний обігрів шлаковою ванною поверхні металу в додатку і можливість металургійного впливу (десульфуратія, асиміляція включень, ізоляція від атмосфери, а за умови підживлення – регулювання хімічного складу сталі в додатку) [22-24].

Електрошлаковий обігрів порівняно з електродуговим має низку переваг:

- більш високу стабільність електричних режимів;
- менше науглецювання металу головної частини;
- можливість рафінування металу;
- надійність захисту металу від вторинного окислення.

У процесі електрошлакового обігріву при інтенсивному надходженні тепла на дзеркало металеві ванни змінюється характер затвердіння головної частини зливка і динаміка утворення усадкової раковини [13, 25-30].

Мета статт – на підставі літературних та дослідних даних оцінити можливість зменшення витрат металу при відливанні сталевих зливок за рахунок підживлення їх головної частини.

Виклад основного матеріалу. Експерименти проводили на сталі 45. Середній вміст елементів у сталі був: 0,46% C; 0,28% Si; 0,73% Mn; 0,025% P; 0,027% S; 0,02% Cr; 0,03% Mo і < 0,15% Ni.

Метал виплавили в електродуговій печі з основним футеруванням. Зі сталі однієї плавки відлили 2 восьмигранні ковальські зливки масою 17,9 т: дослідний і контрольний.

Під час відливання дослідного зливка після заповнення виливниці поверхню металу засипали флюсом, що складався з вапна, плавицевого шпату і магнезиту. Кількість флюсу – 1% від маси зливка. Застосування флюсу забезпечувало скорочення теплових втрат протягом усього експерименту. Крім того, наявність флюсу забезпечувала стійке горіння електричної дуги, за допомогою якої здійснювали обігрів додаткової частини зливка.

У процесі нагрівання (за методом Келлога [31]) використовували 1 металевий водоохолоджуванний електрод. Електрод опускали по осі зливка через шар флюсу. Для полегшення запалювання електричної дуги на робочу частину електрода напесовували графітову втулку. Процес вели на постійному струмі напругою 40 В, силою 1000 А (потужність 40 кВт) протягом 6,5 годин.

Контрольний зливкок тверднув за звичайною технологією із застосуванням для обігріву додаткової частини люнкеритного порошку.

Слід зазначити, що висота додаткової частини дослідного зливка була в два рази меншою, ніж контрольного.

Для того, щоб оцінити хід затвердіння злитка, їх піддали зондуванню стрижнем діаметром 12 мм [32, 33] – рис. 2. У певний момент часу стрижень занурювали в зливкок доти, доки не наштовхувався на опір затверділої його частини. Глибина занурення відзначалася і вимірювалася на стрижні після вилучення його зі зливка. Зливки, що обігріваються (дослідні), дають криву затвердіння, яка відрізняється від кривої затвердіння злитків, що не обігріваються (контрольних).

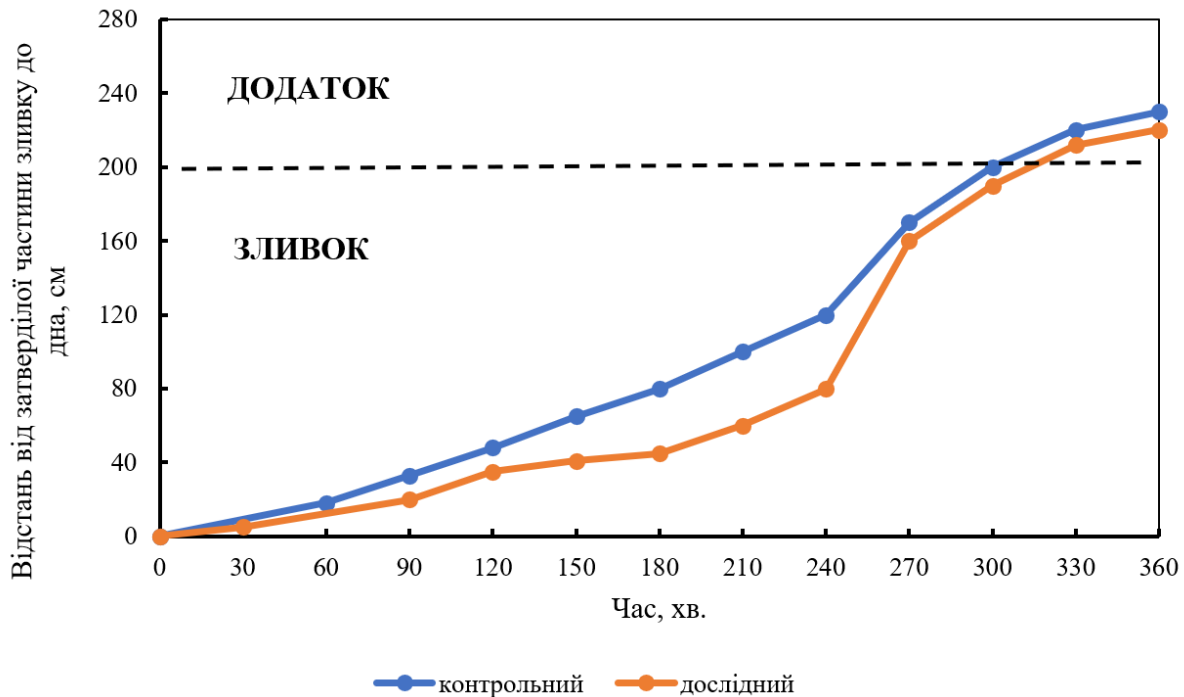


Рис. 2 – Результати зондування під час затвердіння контрольних і дослідних зливків (за даними [32, 33])

У початковий момент затвердіння в дослідних і контрольних зливках, що почалося знизу, протікає практично однаково. Через деякий час швидкість затвердіння збільшується, стає помітним бічне затвердіння, яке йде в напрямку від стінки виливниці. При переході до головної частини зливка крива затвердіння, внаслідок дії люнкеритного порошку або внаслідок обігріву, проходить полого.

Аналіз перебігу кривих затвердіння, побудованих по даних робіт [32, 33], для дослідних і контрольних злитків показує, що основний вплив обігріву додаткової зони чинить на метал середньої та головної частини і має незначний вплив на затвердіння нижчих зон. Криві рисунку 2 також свідчать про те, що за рахунок обігріву верхня частина дослідного зливка довше залишається рідкою, що має чинити позитивний вплив на формування усадкової раковини.

Для того, щоб з'ясувати вплив обігріву головної частини злитка на внутрішню будову зливка, були проведені дослідження пористості, форми усадкової раковини, ліквіації та первинної структури.

На рисунку 3 показано фотографії відбитків макроструктури головної частини контрольного і дослідного зливків.

З рисунку видно, що верхня частина дослідного зливка більш щільна ніж контрольного. Усадкова раковина в дослідному зливку практично відсутня, поверхня головної частини плавка. У сукупності зі зменшенням об'ємом металу в додатковій частині це спостереження вказує на перевагу дослідного зливка над контрольним.

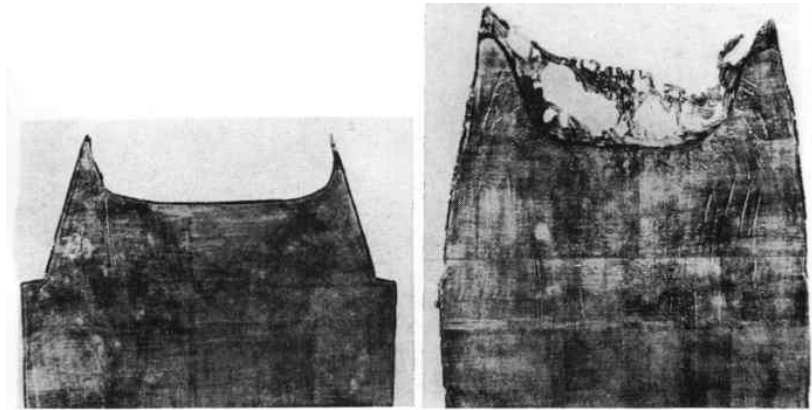


Рис. 3 – Відбитки макроструктури головної частини дослідного (зліва) та контрольного зливків (справа)

Фотографії сірчаних відбитків обох зливків наведені на рисунку 4.

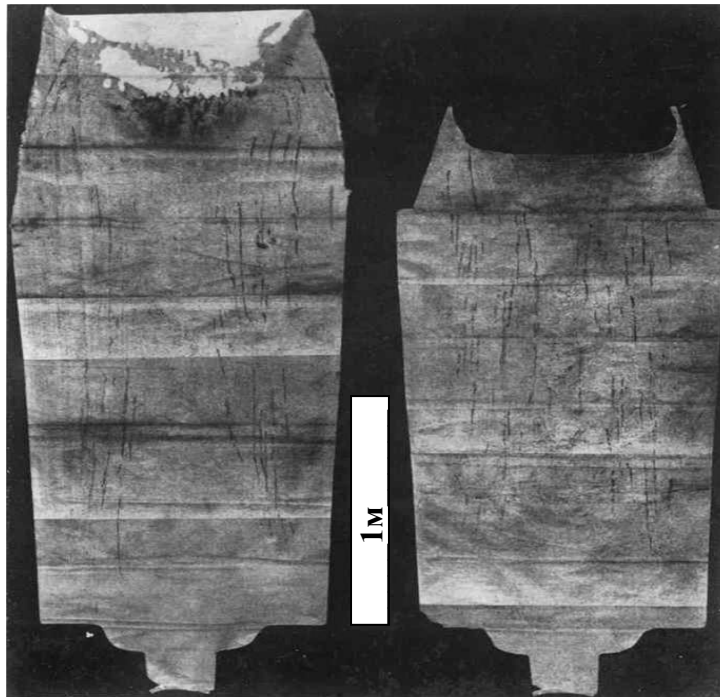


Рис. 4 – Сірчані відбитки контрольного (ліворуч) і дослідного (праворуч) зливків

На фотографіях ясно видно положення смуг ліквациї. Смуги ліквациї знаходяться в області рівноосних дендритів або в перехідній зоні від рівноосних дендритів до конуса осадження. Смуги ліквациї можуть перебувати також тільки в ділянці конуса осадження. Так, у злитка, що обігрівается (див. рис. 4), зліва, внизу можна виявити таку смугу. У донній частині злитків ліквацийні смуги розташовані в конусі осадження, причому у злитка, що обігрівается, ліквацийні смуги біля основи злитка зсунуті назовні, оскільки конус ширший. Однак із просуванням вгору вони різко зсуваються всередину. Крім того, ліквацийні смуги біля основи злитка, що обігрівается, не так різко виражені, як біля основи злитка, що не обігрівается. У середній і верхній частині злитка, що обігрівается, ліквацийні смуги більше зрушені всередину злитка і на протилежному злитку, що обігрівается, розподілені рівномірно. Кількість і яскравість ліквацийних смуг при цьому в обох злитках практично однакові. Очевидно, що більш сприятливий розподіл ліквацийних смуг у дослідному зливку є наслідком обігріву головної частини зливку.

Висновки

1. Аналіз літературних даних показав, що одним із перспективних напрямів економії металу при відливанні сталевих зливоків є застосування електрообігріву головної частини зливка, що дає змогу зменшити величину головного обрізу під час прокатки на 5-10% без погіршення будови злитка. Це дає можливість збільшити вихід придатного на 5-7% і поліпшити якість металу в головній частині злитка.

2. У результаті аналізу даних, отриманих під час порівняння контрольного і дослідного злитків ст. 45 масою 17,9 т, було встановлено, що електродуговий обігрів дає змогу зменшити об'єм додаткової частини зливка в 2 рази без погіршення якості металу.

Перелік використаних джерел:

1. Смирнов А. Н., Сафонов В. М., Цупрун А. Ю. Крупный слиток: монография. Донецьк : Донецьк, 2009. 278 с.
2. Скребцов О. М. Затвердіння та властивості ливарних сплавів. Маріуполь : ПДТУ, 2003. 202 с.
3. Борисов В. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. Київ : Наукова думка, 1987. 223 с.
4. Любков Б. Я. Теория кристаллизации в больших объемах. Київ : Наукова думка, 1975. 256 с.
5. Еланский Г. Н. Строение и свойства металлических расплавов. Київ : Вид. КПИ, 1991. 160 с.
6. Изготовление кузнечных слитков без осевых усадочных дефектов. Часть II / В. В. Назартин и др. // *Металл и литье Украины*. 2012. № 2. С. 44-48.
7. Багмутов В. П., Жульев С. И., Захаров И. Н. Математическое моделирование и экспериментальное исследование физической неоднородности и напряженного состояния крупных стальных слитков. *Металл и литье Украины*. 2006. № 4. С. 14-19.
8. Ameling D., Lungen H. B., Wieland H.-J. The steel industry in Germany within the framework of the European Union. *MPT International*. 2006. № 3. Pp. 24-35.
9. High-performance steelmaking shop at Tokyo Steel, Japan. *Da News*. 2007. № 150. Pp. 1-2.
10. Карабасов Ю. С. Сталь на рубеже столетий. Днепропетровськ : Вид. ДНТУ, 2001. 664 с.
11. Баум Б. А., Хасин Г. А., Тягунов Г. В. Жидкая сталь. Донецьк : Вид. ДПИ, 1984. 208 с.
12. Mori T., Narita K. A study of the solidification of heavy carbon steel ingot. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1972. Vol. 12. № 2. Pp. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.12.83>.
13. Common J., Delorme J., Bastien P. Heterogeneity des gros lingots de forge etude de influence des impuretes et des elements d'alliage sur la segregation. *Revue de Metallurgie*. 1973. Vol. 70. № 4. Pp. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal/197370040251>.
14. Смирнов О. М., Сафонов В. М. Виробництво зливоків сталі та промислових сплавів: навчальний посібник. Донецьк : Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення), 2013. 405 с.
15. Flemings M.C. Solidification processing. *Metallurgical transactions*. 1974. Vol. 5. № 10. Pp. 2121-2134. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02643923>.
16. Оно А. Затвердевание металлов. Київ : Вид. ІПЛ АН УРСР, 1980. 152 с.
17. Марченко И. К., Бровман М. Я. Производство крупных стальных слитков. Київ : Наукова думка, 1980. 240 с.
18. Френкель Я. И. Введение в теорию металлов. Київ : Наукова думка, 1972. 424 с.
19. Применение эффективных экзотермических смесей при разливке спокойной стали на крупные листовые слитки / А. А. Подгородецкий и др. *Металл и литье Украины*. 1989. № 3. С. 59-60.
20. Некоторые итоги исследований, связанных с освоением производства крупных и сверхкрупных слитков / В. Е. Ключарев и др. *Процессы разливки стали и качество слитка*. Київ : ИПЛ АН УССР, 1989. С. 12-16.
21. Исследование структуры кузнечного слитка массой 142 т / Баранова В. Н., Скок Ю. А., Ефимов В. А., Лубенец Г. А. *Процессы литья*. 1995. № 2. С. 28-38.
22. Качество слитка спокойной стали / М. И. Колосов и др. Київ : Наукова думка, 1973. 408 с.
23. Уббелоде А. Р. Расплавленное состояние вещества. Харків : Вид. ХПИ, 1982. 376 с.
24. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Периодическая кристаллизация стали. *Процессы литья*.

1995. № 1. С. 52-61.
25. Латаш Ю. В., Матях В. Н. Современные способы производства слитков особо высокого качества. Київ : Наукова думка, 1987. 336 с.
 26. Влияние технологических факторов разливки на дефектность осевых объемов крупных кузнечных слитков / Жульев С. И., Кряковский Ю. В., Основин В. А., Сперанская Г. Н. Усовершенствование процессов разливки стали. Труды 8 научно-техн. конф. Київ : ИПЛ АН УССР, 1981. С. 67-70.
 27. Еланский Г.Н. Разливка и кристаллизация стали: учеб. пособие. Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. 192 с.
 28. Слиток и свойства стали: труды 5 конференции по физико-химическим основам производства стали / под. ред. А. М. Самарина. Київ : Видавництво АН УРСР, 1961. 180 с.
 29. Flemings M. C. Principles of Controls of Soundness and Homogeneity of Large Ingots. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1976. № 5. Pp. 1-15.
 30. Kohn A., Morillon G. L'étude mathématique de la solidification des lingot de poids de 12 tons en las et moyenne teneur du carbon. *Revue de Metallurgie*. 1965. Vol. 62. № 4. Pp. 321-338.
 31. Снижение отходов стального слитка / С. П. Бакуменко и др. Київ : Наукова думка, 1967. 219 с.
 32. Werner M., Ergard T. Wirkung von elektrischer heizung leiter der schmiedeblocke auf seine innere struktur. *Stahl und Eisen*. 1955. № 26. Pp. 1765-1774.
 33. Setting of the steel ingot with the warm his head part by screens / Kitaev E. V., Skvortcov A. A., Sivkov V. L., Severyhin N. V. *Metals in USSR*. London, 1987. Vol. 2. Pp. 48-50.

References:

1. A.N. Smyrnov, V.M. Safonov, and A.Yu. Tsuprun, *Krupnii slytok: monografyia* [Large Ingot: Monograph]. Donetsk, Ukraine: Donetsk Publ., 2009. (Rus.)
2. O.M. Skrebtsov, *Zatverdinnia ta vlastyvoli lyvarnykh splaviv* [Hardening and power of liquid alloys]. Mariupol, Ukraine: PDTU Publ., 2003. (Ukr.)
3. V.T. Borysov, *Teoriya dvukhfaznoi zoni metallichesko slytka* [Theory of the two-phase zone of a metal ingot]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1987. (Rus.)
4. B.Ya. Liubov, *Teoriya krystallyzatsyy v bolshykh ob'emakh* [Theory of crystallization in large volumes]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1975. (Rus.)
5. H.N. Elanskyi, *Stroenie y svoystva metallicheskykh rasplavov* [Structure and properties of metal melts]. Kyiv, Ukraine: KPI Publ., 1991. (Rus.)
6. V.V. Nazartyn et al., «Yzghotovlenye kuznechnikh slytkov bez osevykh usadochnikh defektov. Chast II» [«Production of forging ingots without axial shrinkage defects. Part II»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 2, pp. 44-48, 2012. (Rus.)
7. V.P. Bahmutov, S.Y. Zhulev, and Y.N. Zakharov, «Matematicheskoe modelirovaniye y eksperimentalnoye issledovaniye fizycheskoi neodnorodnosti y napryazhennoho sostoiyaniya krupnykh stalnykh slytkov» [«Mathematical modeling and experimental study of physical heterogeneity and stress state of large steel ingots»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 4, pp. 14-19, 2006.
8. D. Ameling, H.B. Lungen, and H.-J. Wieland, «The steel industry in Germany within the framework of the European Union», *MPT International*, № 3, pp. 24-35, 2006.
9. «High-performance steelmaking shop at Tokyo Steel, Japan», *Da News*, Nb 150, pp. 1-2, 2007.
10. Yu.S. Karabasov, *Stal na rubezhe stoletiy* [Steel at the turn of the century]. Dnipropetrovsk, Ukraine: DNTU Publ., 2001. (Rus.)
11. B.A. Baum, H.A. Khasyn, and H.V. Tiahunov, *Zhydkaya stal* [Liquid steel]. Donetsk, Ukraine: DPI Publ., 1984. (Rus.)
12. T. Mori, and K. Narita, «A study of the solidification of heavy carbon steel ingot», *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 12, № 2, pp. 83-91, 1972. doi: 10.2355/isijinternational1966.12.83.
13. J. Common, J. Delorme, and P. Bastien, «Heterogeneite des gros lingots de forge etude de influence des impuretes et des elements d'alliage sur la segregation», *Revue de Metallurgie*, vol. 70, № 4, pp. 37-44, 1973. doi: 10.1051/metal/197370040251. (Fr.)
14. O.M. Smirnov, and V. M. Safonov, *Vyrobnytstvo zlyvkiv stali ta promyslovykh splaviv: navchalnyi*

- posibnyk [Virogenesis of high-grade steels and industrial alloys: a basic guide]. Donetsk, Ukraine: Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013. (Ukr.)
15. M.C. Flemigs, «Solidification processing», *Metallurgical transactions*, vol. 5, № 10, pp. 2121-2134, 1974. doi: 10.1007/BF02643923.
 16. A. Ono, *Zatverdevanye metallov* [Hardening of metals]. Kyiv, Ukraine: IPL AN URSS Publ., 1980. (Rus.)
 17. Y.K. Marchenko, and M.Ya. Brovman, *Proydzvodstvo krupnikh stalnikh slytkov* [Production of large steel ingots]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1980. (Rus.)
 18. Ya.Y. Frenkel, *Vvedeniye v teoriyu metallov* [Introduction to the Theory of Metals]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1972. (Rus.)
 19. A.A. Podhorodetskiy, V.A. Aksenenko, and O.A. Sydorenko, «Prymeneniye efektyvnykh ekzotermicheskikh smesey pry razlyvke spokoinoi staly na krupnie lystovie slytky» [«Application of effective exothermic mixtures in casting of calm steel into large sheet ingots»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 3, pp. 59-60, 1989. (Rus.)
 20. V.E. Kliucharev, V.S. Dub, and Yu.V. Sobolev, «Nekotorye ytohy yssledovaniy, svyazannikh s osvoeniem proydzvodstva krupnikh y sverkhkrupnikh slytkov» [«Some results of research related to the development of production of large and super-large ingots»], *Protsessi razlyvky staly y kachestvo slytka – Steel casting processes and ingot quality*, pp. 12-16, 1989. (Rus.)
 21. V.N. Baranova, Yu.A. Skok, V.A. Efymov, and H.A. Lubenets, «Yssledovaniye strukturi kuznechnoho slytka massoi 142 t» [«Study of the structure of a forging ingot weighing 142 tons»], *Protsessi lytia – Casting processes*, № 2, pp. 28-38, 1995. (Rus.)
 22. M.Y. Kolosov, A.Y. Strohanov, and Yu.D. Smyrnov, *Kachestvo slytka spokoinoi staly* [Quality of the ingot of calm steel]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1973. (Rus.)
 23. A.R. Ubbelode, *Rasplavlennoe sostoyaniye veshchestva* [Molten state of matter]. Kharkiv, Ukraine: KhPI Publ., 1982. (Rus.)
 24. V.A. Efymov, and A.S. Eldarkhanov, «Peryodycheskaia krystallyzatsiya staly» [«Periodic crystallization of steel»], *Protsessi lytia – Casting processes*, № 1, pp. 52-61, 1995. (Rus.)
 25. Yu.V. Latash, and V.N. Matiakh, *Sovremennye sposobi proydzvodstva slytkov osobo vysokoho kachestva* [Modern methods of producing ingots of particularly high quality]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1987. (Rus.)
 26. S.Y. Zhulev, Yu.V. Kriakovskiy, V.A. Osnovyn, and H.N. Speranskaia, «Vliyaniye tekhnologicheskikh faktorov razlyvky na defektnost osevikh obiemov krupnikh kuznechnikh slytkov» [«The influence of technological factors of casting on the defectiveness of axial volumes of large forging ingots»], in Proc. 8 Sci.-Techn. Conf. «Improving steel casting processes», pp. 67-70. (Rus.)
 27. H.N. Elanskiy, *Razlyvka y krystallyzatsiya staly: ucheb. posoby* [Pouring and crystallization of steel: a tutorial]. Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. 192 с. (Rus.)
 28. A.M. Samaryn, Ed. *Slytok y svoystva staly: trudi 5 konferentsyy po fizyko-khymicheskym osnovam proydzvodstva staly* [Ingot and properties of steel: Proceedings of the 5th conference on physical and chemical principles of steel production]. Kyiv, Ukraine: AN URSS Publ., 1961. (Rus.)
 29. M.C. Flemings, «Principles of Controls of Soundness and Homogeneity of Large Ingots», *Scandinavian Journal of Metallurgy*, № 5, pp. 1-15, 1976.
 30. A. Kohn, G. Morillon, «L'étude mathématique de la solidification des lingots de poids de 12 tons en las et moyenne teneur du carbon», *Revue de Metallurgie*, vol. 62, № 4, pp. 321-338, 1965. (Fr.)
 31. S.P. Bakumenko et al., *Snyzheniye otkhodov stalnoho slytka* [Reducing steel ingot waste]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 1967. (Rus.)
 32. M. Werner, and T. Ergard, «Wirkung von elektrischer heizung leiter der schmiedeblocke auf seine innere struktur», *Stahl und Eisen*, № 26, pp. 1765-1774, 1955. (Ger.)
 33. E.V. Kitaev, A.A. Skvortsov, V.L. Sivkov, and N.V. Severyhin, «Setting of the steel ingot with the warm his head part by screens», *Metals in USSR*, vol. 2, pp. 48-50, 1987.

Стаття надійшла 20.10.2024

Стаття прийнята 15.11.2024