

Нізяєв К.Г., Синегін Є.В., Стоянов О.М., Журавльова С.В., Журавльова І.В.,
Острянін Р.Є., Скрипник А.В.

Вдосконалення температурно-швидкісного режиму розливання зливків рейкової сталі

Niziaiev K.H., Synehin Ye.V., Stoianov O.M., Zhuravlova S.V., Zhuravlova I.V.,
Ostrianin R.Ye. Skripnik A.

Improvement of the temperature and speed regime of casting rail steel ingots

Мета. Дослідження температурно-швидкісного режиму розливання рейкової сталі з метою зниження дефектів злитків, таких як тріщини, неметалеві вclusions та усадка, і підвищення якості металопродукції.

Методика. Використано аналітичні та експериментальні підходи для визначення впливу температури розливання і швидкості наповнення виливниць на якість злитків спокійної сталі. Проведено аналіз дефектів і розроблено математичну модель для оптимізації параметрів розливання. Дослідження виконано на марках сталі K63, ПТ70сп і 70Г, які розливалися сифонним способом у зливки масою 7 т.

Результати. Встановлено оптимальні значення параметра температурно-швидкісного режиму для кожної досліджуваної марки сталі, що дозволило знизити кількість браку на 57,45%. Результати підтверджують, що дотримання оптимального співвідношення температури перегріву сталі над ліквідусом та швидкості розливання мінімізує утворення тріщин і плен. Розраховані значення швидкості розливу та часу наповнення злитків наведено у вигляді графічних залежностей.

Наукова новизна. Вперше проведено комплексний аналіз залежності якості злитків рейкової сталі від параметрів температурно-швидкісного режиму розливання з урахуванням марки сталі. Запропоновано параметр оптимізації та розроблено методику визначення оптимального температурно-швидкісного режиму розливання сталі в зливки сифонним способом, яка базується на апроксимації експериментальних даних.

Практична значущість. Результати дослідження дозволяють підвищити якість злитків рейкової сталі, знизивши кількість дефектів, що сприяє економії ресурсів і покращенню експлуатаційних властивостей металопродукції. Запропоновані рекомендації можуть бути використані на металургійних підприємствах для вдосконалення технології розливання сталі.

Ключові слова: розливання сталі, температурно-швидкісний режим, рейкова сталь, дефекти зливків, сифонне розливання, оптимізація.

Purpose. To study the temperature and speed regime of rail steel casting in order to reduce ingot defects, such as cracks, non-metallic inclusions and shrinkage, and to improve the quality of metal products.

Methodology. Analytical and experimental approaches were used to determine the effect of casting temperature and mould filling rate on the quality of killed steel ingots. Defects were analyzed and a mathematical model was developed to optimize casting parameters. The study was carried out on steel grades K63, PT70sp and 70G, which were cast by uphill casting into ingots weighing 7 tonnes.

Findings. The optimal values of the temperature-rate parameter were established for each steel grade under study, which allowed reducing the number of rejects by 57.45%. The results confirm that compliance with the optimal ratio of the temperature of steel overheating above liquidus and the casting speed minimizes the formation of cracks and films. The calculated values of the casting speed and ingot filling time are presented in the form of graphical dependencies.

Originality. For the first time, a comprehensive analysis of the dependence of rail steel ingot quality on the parameters of the temperature and speed regime of casting, taking into account the steel grade, was carried out. An optimisation parameter has been proposed and a methodology for determining the optimal temperature and speed regime of steel ingot casting by the uphill casting method based on the approximation of experimental data has been developed.

Practical value. The results of the study make it possible to improve the quality of rail steel ingots by reducing the number of defects, which contributes to resource savings and improved performance properties of metal products. The proposed recommendations can be used at metallurgical enterprises to improve steel casting technology.

Keywords: steel casting, temperature and speed conditions, rail steel, ingot defects, uphill casting, optimization.

Вступ

Розливання сталі зверху має низку вагомих недоліків, які впливають на якість сталі через наявність як поверхневих дефектів у зв'язку з розбрикуванням металу при наповненні виливниць, так і внутрішніх дефектів, які утворюються при контакті струменя металу з атмосферою окислювальної. На

багатьох заводах для отримання ковальських зливків, якість яких має велике значення, використовують розливання сифонним способом, що дозволяє ефективно застосовувати захисні шлакові суміші, що знижують забруднення металу включеннями та захищають його від насичення газами. При цьому одночасно можна відливати кілька злитків.

© Нізяєв К.Г. – д.т.н., проф. УДУНТ
Синегін Є.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Стоянов О.М. – к.т.н., доц. УДУНТ
Журавльова С.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Журавльова І.В. – аспірант УДУНТ
Острянін Р.Є. – аспірант УДУНТ
Скрипник А.В. – аспірант УДУНТ

Niziaiev K. – d.t.s., profssor, USUST
Synehin Ye. – c.t.s., docent USUST
Stoianov O. – c.t.s., docent USUST
Zhuravlova S. – c.t.s., docent USUST
Zhuravlova I. – PhD student at USUST
Ostrianin R. – PhD student at USUST
Skripnik A – PhD student at USUST

Високі вимоги до якості металопродукції ставлять перед металургійними підприємствами завдання постійного вдосконалення технології виробництва сталі, за якої через ті чи інші причини застосовується розлив у виливниці. З другої половини ХХ ст. розливання стали сифонним способом у зливки, як правило, виробляють з використанням спеціальних сумішей.

Стан питання. Основними дефектами під час виробництва сталі є тріщини, розшарування, рванина, усадка і неметалеві включення.

У результаті літературного та статистичного аналізу було встановлено основні причини утворення цих дефектів. Оскільки один дефект може бути наслідком одразу кількох чинників, то для кращої наочності результати наведено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1 – Причини утворення різних видів дефектів

Причина розвитку дефекту	Види дефектів					
	тріщини	плена	неметалеві включення	усадочна раковина	рванина	розшарування
Низьке відношення Mn/S і високий вміст O і Cu в металі	•		•		•	
Висока температура випуску з конвертера	•	•	•	•		
Знос виливниць	•	•				
Низька якість вогнетривів сталювшу і сифонної провідки	•		•			•
Низька якість теплоізоляційної суміші	•	•		•		
Неправильний температурно-швидкісний режим розливання	•	•		•	•	
Переривання струменя металу під час розливання	•	•				
Недостатній час витримки сталі у виливницях	•			•		•

Далі детально розглянуто класифікацію [1] і причини виникнення цих дефектів.

Тріщини. Залежно від розташування та причин утворення розрізняють декілька видів тріщин: холодні (від температурних та фазових перетворень), гарячі, поздовжні, крайові, поперечні, сітка гарячих тріщин. Холодні тріщини виникають за низьких температур у металі зі значно вираженими пружними властивостями. У зливках вуглецевої сталі фазові перетворення відбуваються зазвичай за температури понад 700 °С, коли метал має значну пластичність і повзучість, що перешкоджає розвитку напружень. Тому в таких зливках за звичайних умов холодні тріщини утворюються лише від температурних напружень.

З поверхневих дефектів найскладнішими за своїм походженням і важкими щодо запобігання є гарячі тріщини, що виникають за температур, близьких до температур кристалізації. У прямокутних злитках такі тріщини можуть розташовуватися на їхніх гранях і ребрах (кутах). Кутіві тріщини в основному поздовжні, а тріщини на гранях можуть бути і поздовжніми, і поперечними.

Довжина гарячих тріщин різна (від 0,1 до 1 м і більше). Вони мають переривчасту і зигзагоподібну (іноді з окисленими крайками) поверхню. Метал поблизу тріщин зазвичай знеуглецьований. Ці ознаки є основними зовнішніми відмінностями гарячих тріщин від тріщин інших видів.

Значний вплив на утворення гарячих тріщин має температура металу, що заливається. Підвищення температури, як правило, призводить до зниження

швидкості зростання кірки зливка і збільшення ймовірності появи місцевих «підмивів», що спричиняє підвищення напружень. До того ж, подовжується перша стадія формування кірки (зниження температури на її поверхні), що збільшує час існування термічних напружень, що розтягують, на поверхні зливка. Ці фактори призводять до появи тріщин у період наповнення нижньої половини виливниці, тобто на етапі, коли температура металу в ній ще досить висока.

Значний вплив на тріщиноутворення чинить вміст сірки в металі вищий за 0,030-0,035%, що сильно знижує пластичність сталі за високих температур, надає їй властивість червоноломкості. Шкідливий вплив сірки може бути дещо знижений при підвищенні вмісту марганцю для дотримання величини співвідношення Mn/S понад 20-25.

Плена і напливи. Під час наповнення виливниць спокійною сталлю, особливо в процесі сифонного розливання, на поверхні металу, залежно від його температури, хімічного складу і швидкості надходження, утворюються окислені плени та скоринки, які поступово збільшуються і досягають значних розмірів у верхній частині виливниці. Неметалеві включення, що спливають, затримуються скоринкою і забруднюють її. Якщо біля стінок виливниці залишається шар рідкого металу (рант) достатньої ширини, то утворена скоринка потрапляє в прибуткову частину злитка і видаляється разом із нею. Якщо ж рант вузький, то скоринки приморожуються до коркової частини злитка, що твердне, і підвертаються. Метал, що знову надходить, заливає

такі скоринки, і вони або розмиваються (повністю або частково), або цілком залишаються в зливку. Найчастіше скоринки розташовуються у верхній половині злитка, тобто в місці стику виливниці з прибутковою надставкою. Форма, розміри і місце розташування кірочок за перетином злитків і заготовок можуть бути різноманітними.

Корочки, що потрапили в тіло злитка, дуже важко виявити. Навіть під час контролю якості металу за висотою злитка залита скоринка може не потрапити в перетин контрольованого темплету. Часто заворотами кірки можуть бути уражені окремі зливки. Окислені скоринки, супроводжувані великими неметалевими включеннями, до числа яких входять складні сполуки оксидів і вогнетривки, починаються на якості металу.

Щоб не допустити завороту утвореної скоринки, необхідно контролювати поверхню металу, що піднімається у виливниці. За гарного змащення виливниці і нормальної швидкості розливання метал весь час повинен «відходити» від стінок, утворюючи абсолютно чистий, вільний від плени рант. Це забезпечують, регулюючи швидкість розливання з урахуванням температури і рідини, що тече (слід брати до уваги, що підвищення швидкості і температури розливання для низки марок сталі може призвести до утворення гарячих тріщин на злитках).

Виходячи із зазначеного вище, обирають режим наповнення (залежно від марки сталі, форми і ваги злитків, температури розливання), за якого без утворення скоринки на поверхні металу заповнюється 1/4, 1/2, 2/3 (або навіть уся) виливниця за висотою. Вище цього рівня можна допустити утворення плен і кірочок при збереженні рідкого ранта біля стінок виливниці.

Розливання металу із застосуванням плаваючих сухих дерев'яних рамок запобігає утворенню заворотів кірочок. Для спостереження за режимом розливання за виглядом поверхні металу і регулювання її швидкості одну виливницю на кожному піддоні залишають без рамки.

Щоб не допустити утворення скоринки на поверхні металу у виливниці, розливання слід здійснювати під шлакоутворювальними і теплоізоляційними сумішами, рідкими шлаками, теплоізоляційними дисками тощо.

Усунення плени можливе шляхом шліфування і вогневої зачистки. Усунення ж напливів у більшості випадків неможливе.

Методика проведення

Розвиток дефектів у злитку готової сталі (усадкова раковина, пористість, стовпчаста кристалізація, сегрегація, тріщини та ін.) багато в чому визначається вибором співвідношення температури та швидкості розливання сталі [2]. При цьому єдина залежність отримання якісних злитків від зазначених параметрів відсутня у зв'язку з різницею у способах розливання та хімічного складу сталі.

Температура розливання сталі є одним з найбільш важливих параметрів, що впливають на якість злитків: розвиток усадкових порожнеч і пористості в злитку, протікання процесів кристалізації та сегрегації сталі, виділення розчинних і нерозчинних домішок, поява тріщин і заворотів на поверхні зливка.

При відомих міцнісних і особливо пластичних властивостях сталі при високих температурах схильність злитків до утворення тріщин і заворотів залежить від кількості тепла перегріву сталі $Q_{розл}$, яке підводиться до 1 м^2 бічної поверхні скоринки злитка при наповненні виливниці рідкої сталлю. Якщо цієї теплоти забагато, то швидкість кристалізації зменшується, скоринка виходить тонкою та здатною до утворення розривів. У разі невеликого підведення тепла швидкість твердіння збільшується, але цього тепла може не вистачити на компенсацію втрат тепла на випромінювання з відкритої поверхні металу, що піднімається в процесі розливу у виливниці. Тому найменша кількість поверхневих дефектів виходить за якихось оптимальних температур розливання сталі (рис. 1) [3], які можуть бути досягнуті із використанням доводки сталі на установці «ківш-піч» [4].

Таким чином для мінімізації дефектів злитків необхідне дотримання умови

$$q_{розл} = \frac{c \cdot \rho \cdot w \cdot \Delta T}{60 \cdot H} \cdot \frac{S}{\Pi} = \text{const}, \quad (1)$$

де $q_{розл}$ – щільність теплового потоку від сталі до стінки виливниці, Вт/м²;

c – питома теплоємність сталі за нормальної температури розливання, Дж/кг·°C;

w – швидкість розливання, м/хв.;

ΔT – перегрів сталі над температурою ліквідусу під час розливання, °C;

H , S , Π – висота злитка, площа і периметр поперечного перерізу злитка, м, м², м.

Або, простіше кажучи $w \cdot \Delta T = \text{const}$, оскільки $(c, \rho, H, S, \Pi) = \text{const}$.

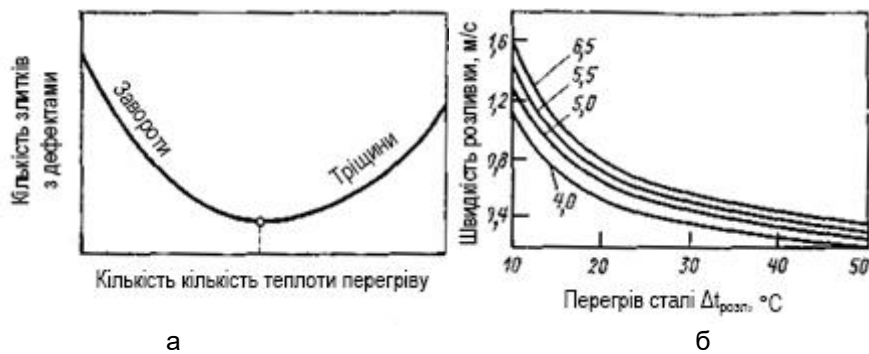


Рисунок 1 – Вплив тепла перегріву сталі на схильність злитків до утворення дефектів (а), і на допустиму швидкість її розливання (б) (цифри на кривих – значення P/S)

Для досліджень [5,6], що проводяться на сталях 20, Ст3, 14ХГС і 19Г, що розливаються в зливки масою 8,6; 9,6 та 12,8 т сифонним способом, було встановлено оптимальне $q_{розл} = 160 \div 181$ кВт/м².

Якщо розрахувати за цими значеннями температурно-швидкісний режим розливання спокійних сталей ПТ70сп і 70Г для зливок $H = 2200$ мм і $P/S = 6$ отримаємо наступні швидкості розливу в залежності від перегріву (рисунок 2).

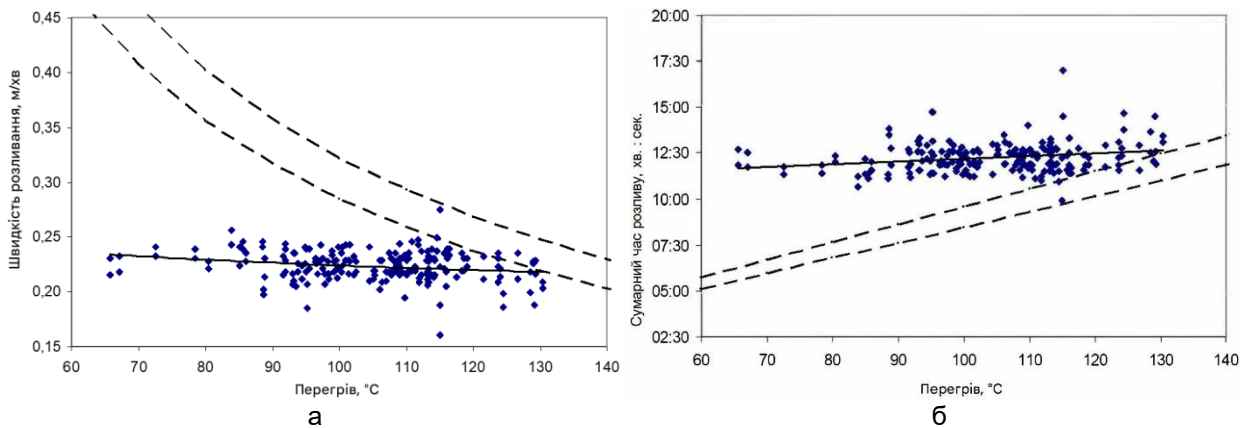


Рисунок 2 – Зміна швидкості (а) і часу (б) розливу злитків залежно від перегріву сталі над температурою ліквідус: — фактична крива - - - розрахунковий інтервал

На рисунку 2 ясно видно, що фактична швидкість розливання і час наповнення піддону, хоч і лежать у межах встановлених ТІ для даного підприємства, практично не залежать від температури перегріву сталі, і її зміна має випадковий характер. Відмінність у розрахунковій та практичній швидкості розливу пояснюється відмінністю умов, в яких були отримані $q_{раз} = 160 \div 181$ кВт/м², від умов заводу. Однак у будь-якому разі час наповнення піддону необхідно варіювати в залежності від температури сталі на розливанні.

наповнення тіла злитка), а його оптимальне значення відповідатиме одночасній мінімізації тріщин і плен, як це показано на рисунку 1а.

Оптимізація температурно-швидкісного режиму розливання

Для оптимізації параметра $\Delta T/\tau$ було використано паспорти плавок сталі спокійних марок К63, ПТ70сп, 70Г, 09Г2С.

На рисунку 3 наведено залежність ураженості злитків спокійної сталі тріщинами та пленами від параметра $\Delta T/\tau$. Як видно на графіку, суттєве зменшення розвитку дефектів спостерігається при значенні параметра, що оптимізується, 14,44. Для знаходження цього значення необхідно вирішити систему (2) квадратних рівнянь, одержаних при апроксимації точок.

Як вже неодноразово підкреслювалося вище, характерними дефектами, причиною яких є недотримання температурно-швидкісного режиму розливання, є тріщини та плени. Тому для розробки режиму розливання спокійної сталі різних марок необхідно застосувати техніку оптимізації. Оптимізованим параметром є дріб $\Delta T/\tau \sim \Delta T \times w$ (τ – час

$$\begin{cases} 0,0119x^2 - 0,4191x + 3,7921 - y = 0; \\ 0,0051x^2 - 0,0909x + 0,4711 - y = 0. \end{cases} \quad (2)$$

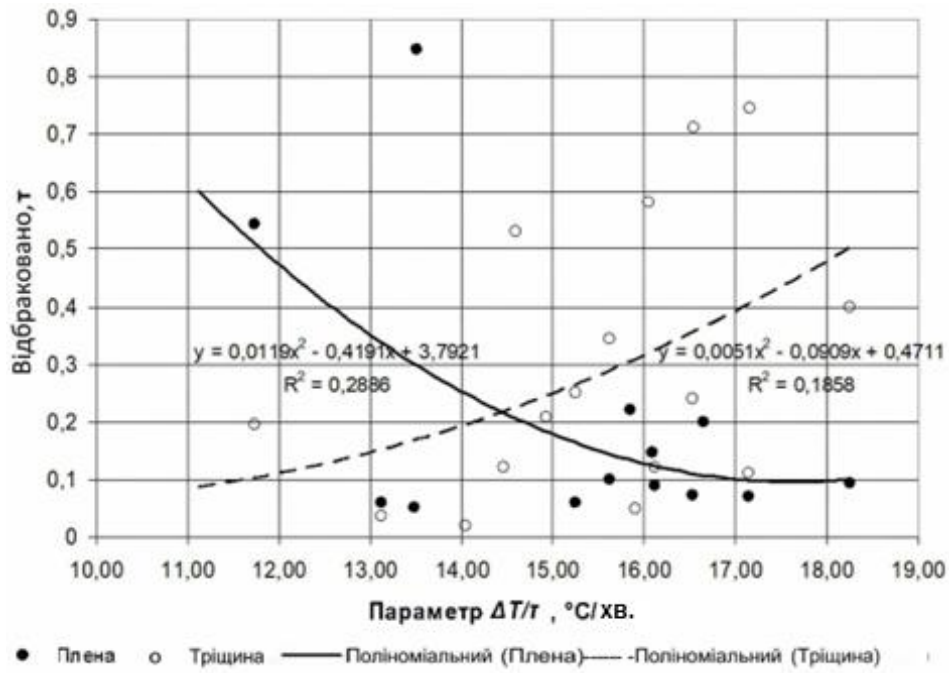


Рисунок 3 – Залежність ураження злитків стали К63 тріщинами та пленами від параметра $\Delta T/\tau$

Аналогічно знаходимо оптимальне значення для інших марок сталі. Графіки залежності, отримані в ході аналізу, представлені на рисунок 3-5.

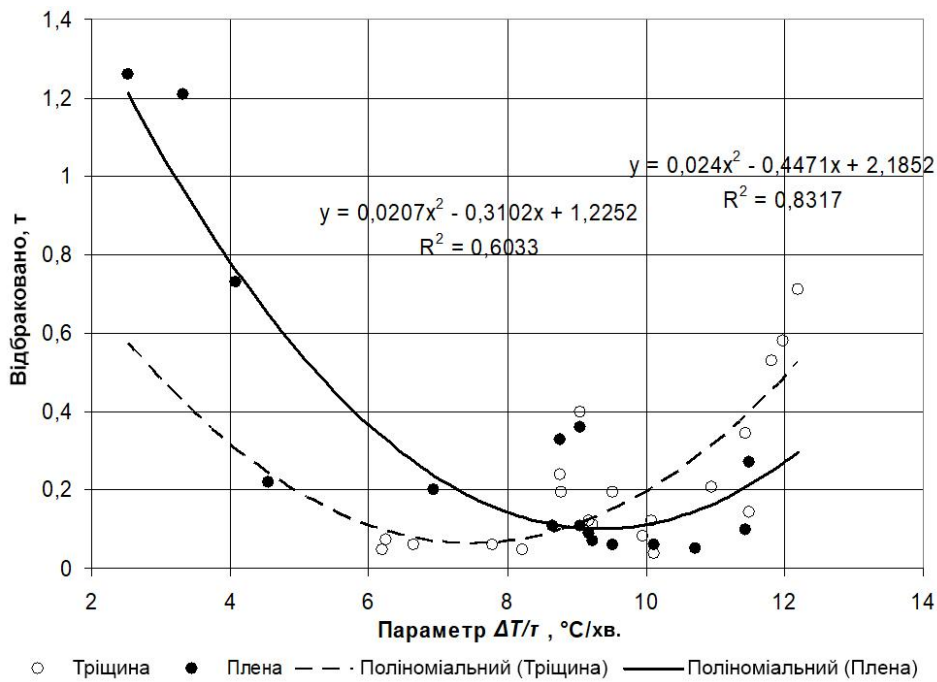


Рисунок 4 – Залежність ураження злитків стали ПТ70сп тріщинами та пленами від параметра $\Delta T/\tau$

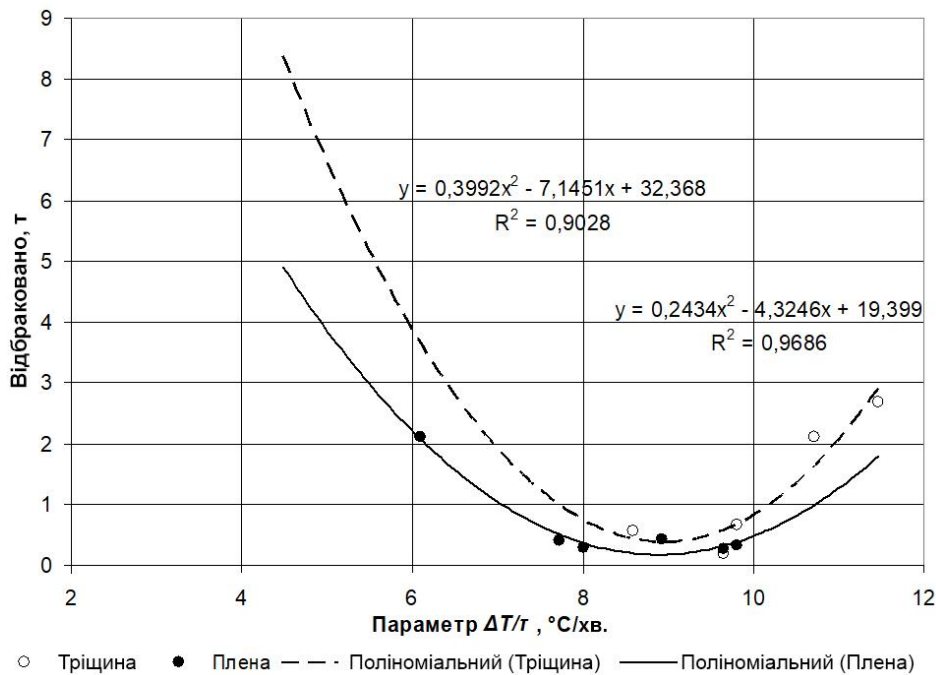


Рисунок 5 – Залежність ураження злитків сталі 70Г тріщинами та плодами від параметра $\Delta T/\tau$

У розглянутий період спостерігалось відсутність тріщин і плен на злитках сталі 09Г2С, що свідчить про правильність температурно-швидкісного

режиму її розливання. Оптимальні значення параметра $\Delta T/\tau$ інших марок сталі наведені у таблиці 1.

Таблиця 7.1 – Оптимальні значення параметра $\Delta T/\tau$ для марок, що вивчаються

Марка сталі	К63	ПТ70сп	70Г
Значення параметра $\Delta T/\tau$	14,44	8,94	8,92

За знайденими оптимальними значеннями параметра $\Delta T/\tau$ можна розрахувати швидкість розливання (час наповнення тіла злитка) при певних значеннях температури сталі в ковші та часі його витримки.

Згідно з діючою на підприємстві ТІ втрата температури в ковші становить 1 °С за хв. За результатами розрахунку за методикою [7] отримано зниження температури на 1,3-2,5°С/хв. залежно від стійкості ковша. Зважаючи на те, що зниження температури в ковші становить в середньому 1°С/хв., час і швидкість наповнення тіла зливка розраховують за формулами:

$$\tau_T = \frac{t_k - t_l - \tau_{\text{вирт}}}{\Delta T/\tau}, \text{ хв.}, \quad (3)$$

$$w_T = 2.2 \cdot \frac{\Delta T/\tau}{t_k - t_l - \tau_{\text{вирт}}}, \text{ м/хв.}, \quad (4)$$

де $\tau_{\text{вирт}}$ – час витримки сталі в ковші, хв.

За цими формулами розраховується масив значень часу розливки при витримці металу в ковші від 5 до 20 хв. і температурі сталі в ковші. Температура сталі в ковші для досліджуваних марок сталі варіюється в таких межах: 1525÷1570°С для 70Г; 1540÷1570°С для сталі ПТ70сп; 1540÷1576°С для К63. Графіки з розрахованою швидкістю розливу наведено на рисунках 6-8.

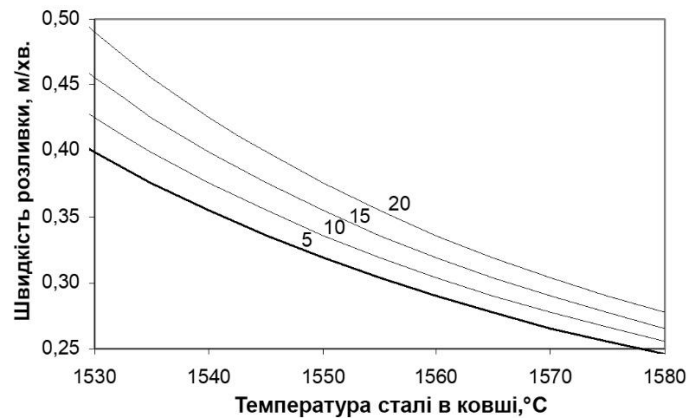


Рисунок 6 – Розрахункова швидкість розливання тіла злитка сталі К63 (цифри на кривих – час витримки ковша перед розливом у хвиликах)

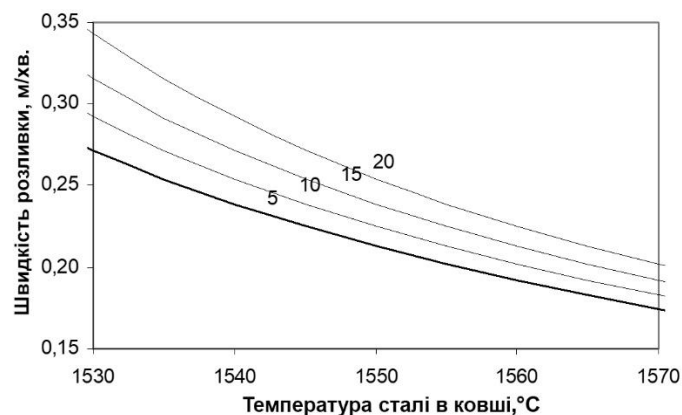


Рисунок 7 – Розрахункова швидкість розливу тіла злитка сталі ПТ70сп (цифри на кривих – час витримки ковша перед розливом у хвиликах)

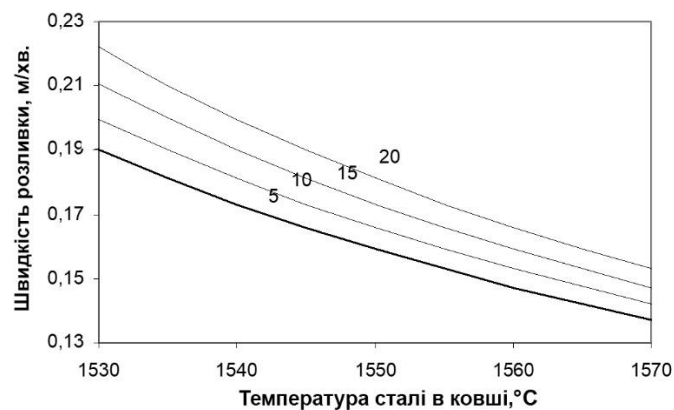


Рисунок 8 – Розрахункова швидкість розливу тіла злитка сталі 70Г (цифри на кривих – час витримки ковша перед розливом у хвиликах)

Висновки

Проведено детальну класифікацію найбільш характерних для умов заводу дефектів, що утворюються при виробництві сталі спокійних марок, із зазначенням причин їх виникнення та заходів світового досвіду щодо їх запобігання та усунення. 8.

Розроблено та випробувано температурно-швидкісний режим розливання сталі з урахуванням марки сталі та часу витримки металу в сталерозливному ковші. За результатами дослідних плавок одержано зниження кількості браку, при виробництві спокійних марок сталі, на 57,45% від існуючого.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Атлас дефектів. Перекл. з нім. Є.Я. Капуткіна / За ред. М.Л. Бернштейна, 1979. – 188 с.
2. Явойський В.І., Левін С.Л., Баптизмаський В.І., Умріхін П.В., Меджибозький М.Я., Поголоцький Д.Я., Ойкс Г.М., Черненко М.А., Абросімов В., 1973, 816 с.
3. Розливання та кристалізація сталі. Єфімов В.А., 1976. 552 с.

4. Ruban, V. Investigating cavity formation in an electric arc zone during out-of-furnace processing of steel / V. Ruban, O. Stoianov, K. Niziaiev, Y. Synehin, S. Zhuravlova, K. Malii // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 4/1. – С. 134–142. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284884>
5. Проблеми сталевго зливка, 1969, №3, 423 с.
6. Єфімов В.А. Сталевий зливоч. Металургіздат, 1961. 356 с.
7. Позапічна обробка сталі: Навч. Посібник / В.І. Баптізмаський, А.Г. Величко, Є.І. Ісаєв. – К.: УМК ВО, 1988. – 52 с.

REFERENCES

1. Atlas of defects. Translated from the German by E.Y. Kaputkin / Edited by M.L. Bernstein, 1979. 188 p.
2. Yavoysky V.I., Levin S.L., Baptizmansky V.I., Umrikhin P.V., Medzhibozky M.Y., Povolotsky D.Y., Oakes G.M., Chernenko M.A., Abrosimov V., 1973, 816 pp.
3. Steel casting and crystallisation. Efimov V.A., 1976. 552 с.
4. Ruban, V. Investigating cavity formation in an electric arc zone during out-of-furnace processing of steel / V. Ruban, O. Stoianov, K. Niziaiev, Y. Synehin, S. Zhuravlova, K. Malii // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – № 4/1. – С. 134–142. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.284884>
5. Problems of steel ingot, 1969, No. 3, 423 pp.
6. Efimov V.A. Steel ingot. Metallurgizdat, 1961. 356 с.
7. Out-of-furnace treatment of steel: Study guide / V.I. Baptizmansky, A.G. Velichko, E.I. Isaev - K.: UMK VO, 1988. - 52 p.

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.10.2024
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.10.2024