

УДК 669.187:669.018.2-14

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-28>

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНО-ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ РОЗЛИВАННЯ ЛЕГОВАНИХ ХРОМИСТИХ СТАЛЕЙ

Нізяєв Костянтин Георгійович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри металургії та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9260-0964

Стоянов Олександр Миколайович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-7136-7403

Малій Христина Василівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9046-4268

Синегін Євген Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-9983-3971

Рубан Володимир Олександрович,

доктор філософії,
старший викладач кафедри металургії чавуну і сталі
Українського державного університету науки і технологій
ORCID ID: 0000-0002-6617-296X

У статті розглянуто проблематику зниження кількості поверхневих дефектів зливок легованих хромистих сталей марок 15X і 20X під час їх розливання. Установлено, що одним із найбільш поширених дефектів є гарячі тріщини, які виникають переважно через нерівномірне охолодження металу та утворення ослаблених зон у зливку. Особливо уразливими є круглі зливки, що формуються за традиційних способів розливання та мають низький ступінь тепловідведення. Проаналізовано вплив хімічного складу сталі, забрудненості металу неметалевими включеннями, а також температури й швидкості розливання на утворення дефектів.

На основі математичного моделювання та відомих фізичних залежностей проведено розрахунки затвердіння кірки металу у виливниці. Установлено, що товщина затверділого шару залежить від часу розливання та теплових властивостей сталі, причому для марок 15X і 20X найбільш раціональний час розливання становить 8–10 хв. Сформульовано критерії для визначення температурно-швидкісного режиму, за якого кількість теплоти, що підводиться до 1 м² кірки, не перевищує меж, які сприяють утворенню тріщин або заворотів.

Результати розрахунків апробовано під час дослідно-промислових випробувань, у ході яких розроблені режими було впроваджено в процес розливання сталі. Експериментальні дані підтвердили ефективність розрахованих параметрів: зафіксовано суттєве зниження браку зливок за рахунок зменшення кількості тріщин, плівок та інших дефектів.

Запропонована методика може бути використана для оптимізації режимів розливання інших марок сталі з підвищеним вмістом хрому. Отримані результати мають практичну цінність для вдосконалення технології розливання сталі та підвищення виходу придатного металу.

Ключові слова: хромисті сталі, гарячі тріщини, температура розливання, швидкість розливання, кірка зливка, кристалізація, дефекти поверхні.

Niziaiev Kostiantyn, Stoianov Oleksandr, Malii Khrystyna, Synehin Yevhen, Ruban Volodymyr.
Determination of a rational temperature and speed regime for casting alloyed chromium steels

The article explores the issue of minimizing surface defects in ingots of 15X and 20X alloy chromium steels during the casting process. Research has identified the prevalence of hot cracks as a significant defect, primarily attributable to the uneven cooling of the metal and the subsequent formation of weakened zones within the ingot. It is particularly vulnerable to such issues in the case of round ingots that have been formed using traditional casting methods and which have a low degree of heat dissipation. The influence of steel chemical composition, metal contamination with non-metallic inclusions, as well as temperature and casting speed on defect formation is analysed.

Utilising mathematical modelling and established physical dependencies, the solidification of the metal crust within the mould was calculated. Research findings indicate that the thickness of the hardened layer is contingent on the casting time and thermal properties of steel. The most rational casting time for 15X and 20X grades was determined to be 8–10 minutes. The article sets out a series of criteria for determining the temperature-velocity regime at which the amount of heat supplied to 1 m² of crust does not exceed the limits that contribute to the formation of cracks or pitting.

The validity of the calculations was established during a series of pilot tests, in which the developed modes were integrated into the steel casting process. The experimental data confirmed the effectiveness of the calculated parameters, with a significant reduction in ingot rejects recorded due to a decrease in the number of cracks, films, and other defects.

The proposed methodology has the potential to be utilised in the optimisation of the casting modes of other steel grades that contain elevated levels of chromium. The results obtained are of practical value for improving steel casting technology and increasing the yield of usable metal.

Keywords: chromium steels, hot cracks, casting temperature, casting speed, ingot crust, crystallization, surface defects.

Вступ. Під час виплавки та розливання хромистих марок сталей одним із завдань, що вирішуються технологами, є підвищення виходу придатного металу за рахунок зниження кількості поверхневих дефектів зливків на всіх етапах переділу – від виплавки даних марок у сталеплавильних агрегатах до отримання готового виробу. Це завдання вирішується шляхом постійного вдосконалення технологічних прийомів під час виробництва низьколегованого металу.

Попередній аналіз стану технології виплавки, розкислення та розливання сталі марок 15X, 20X на вітчизняних підприємствах показав, що технологія, що використовується, відрізняється нестабільністю результатів, яка призводить до великої кількості браку. Так, загальний брак зливків становив до 3 %, у тому числі за дефектом гарячі тріщини – понад 70 % від загальної кількості браку розлитого металу марок 15X, 20X [1].

Причини утворення тріщин різноманітні, але в усіх випадках вони утворюються за наявності напруги та ослаблених ділянок у зливку. Тріщини можуть утворюватися як під час кристалізації зливка, так і через більш-менш тривалий час після його повного затвердіння [2; 3].

Круглі зливки, особливо зливки легованої сталі, найбільш схильні до утворення поздовжніх тріщин. У круглому зливку площа охолоджуючої поверхні на одиницю маси металу мінімальна, а деякі леговані сталі мають знижену теплопровідність. Це перешкоджає швидкому утворенню досить міцної кірки, яка має витримати феростатичний тиск металу.

До інших причин утворення тріщин у зливку можна віднести підвищений уміст кисню і сірки в металі, забрудненість неметалевими

включеннями, скупчення лікватів, нерівномірну товщину кірки за неправильно центрованого струменю металу, наявність піску, рубців, перепопелень тощо, які сприяють виникненню тріщин.

Одним із дієвих способів боротьби з таким дефектом, як гарячі тріщини, є відповідність лінійної швидкості розливання температурі металу. Тому дослідження технології розкислення та температурно-швидкісного режиму розливання сталі 15X, 20X дадуть змогу скоротити кількість браку за гарячими тріщинами – основним видом браку, чому й присвячено дану роботу [4].

Необхідність визначення кінця затвердіння зливка у виливниці є критичним завданням, зумовленим специфічними параметрами технологічного процесу розливання сталі та організаційними вимогами виробництва для конкретних умов [5].

Кристалізація починається відразу після контакту рідкого металу зі стінками виливниці. Спочатку кристалізація йде швидко, оскільки холодна виливниця інтенсивно відбирає тепло рідкої сталі, а потім уповільнюється. Це пов'язано з розширенням виливниці, усадкою оболонки зливка та утворенням між ними газо-повітряного зазору [6–8].

Зважаючи на зростання вимог до якості конструкційних сталей і необхідність зниження витрат у металургійному виробництві, питання мінімізації дефектів розливання сталі, зокрема гарячих тріщин, набуває особливої актуальності.

Розрахунок температурно-швидкісного режиму розливання сталі. На підставі теоретичних розрахунків, що становлять спробу піддати процес затвердіння сталі у виливниці математичному аналізу, було встановлено, що товщина затверділого шару сталі поблизу

стінок виливниці на першому етапі затвердіння прямо пропорційна кореню квадратному з часу, що минув від моменту контакту рідкої сталі [9]:

$$\delta = K\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

де δ – товщина затверділого шару металу, мм;

τ – час від початку заливки, хв.;

K – константа швидкості, мм · хв^{-0.5}.

$$K = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Delta T}{\Delta H_{кр} \cdot \rho}}, \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м;

ΔT – різниця температур затвердіння сталі в кірці затверділого металу, °С;

$\Delta H_{кр}$ – теплота кристалізації сталі, Дж/кг;

ρ – густина сталі, кг/м³.

Значення коефіцієнта K у численних дослідках різного складу спокійної сталі коливається в широких межах (1,5–3,9 см/хв^{1/2}), що ускладнює правильний вибір його величини для розрахунку процесу затвердіння зливка. За даними деяких досліджень, затвердіння осьової частини зливка відхиляється від параболічної залежності, характер якої вбачається наведеною формулою, і там спостерігається прискорення затвердіння.

Рекомендується приймати коефіцієнт рівним 3,5 для вуглецевої спокійної сталі, а для легованої сталі з пониженою теплопровідністю – 2–2,5. Проведені розрахунки підтверджують ці дані для марок сталі 15Х, 20Х і становлять 1,9–2,0.

Для дотримання умови збереження здорової кірки необхідно також визначити температурно-швидкісний режим розливання сталі.

Розвиток дефектів у зливку готової сталі (усадкова раковина, пористість, стовпчаста кристалізація, сегрегація та тріщини та ін.) багато в чому визначається вибором співвідношення температури і швидкості розливання сталі. При цьому єдина залежність отримання якісних зливків від зазначених параметрів відсутня у зв'язку з різницею у способах розливання та хімічного складу металу [10].

За сифонного розливання сталі показником задовільних співвідношень зазначених параметрів є умова підйому металу у виливниці, на дзеркалі якого є плівка оксидів і певної ширини чистий рант між нею та стінками виливниці.

Як загальна вказівка рекомендується за сифонного способу розливати перші порції металу з такою швидкістю, щоб уникнути переохолодження металу біля днища виливниць. Деякі сталі розливають із відкритим дзеркалом, а інші – з тонкою кіркою і чистим рантом завширшки 30–40 мм.

За відомих міцності й особливо пластичності сталі за високих температур схильність зливків до утворення тріщин і заворотів залежить від кількості тепла перегріву сталі $Q_{раз}$, яке підводиться до 1 м² бічної поверхні кірки, що твердне, зливка за наповнення виливниці рідкою сталлю. Якщо цієї кількості тепла багато, то швидкість кристалізації зменшується, кірка виходить тонкою і здатною до утворення розривів (тріщин). У разі невеликого підведення тепла швидкість затвердіння збільшується. Однак підведеного тепла може виявитися недостатньо для компенсації теплових утрат, зумовлених випромінюванням із відкритої поверхні металу, що піднімається під час розливання у виливниці та, своєю чергою, сприяє виникненню заворотів [11].

Загальна та питома кількість тепла перегріву ΔT , що надійшов у виливницю у процесі виливки зливка, можна розрахувати за формулою:

$$Q_{раз} = c \cdot \gamma \cdot S \cdot \omega \cdot \Delta T, \text{ ккал/хв.} \quad (3)$$

$$q_{раз} = \frac{Q_{раз}}{H \cdot \Pi}, \text{ ккал/(хв.} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (4)$$

Якщо даної маси зливка величини c , γ , S і τ (c – теплоємність; γ – теплопровідність; S – Площа поперечного перерізу; τ – час) прийняти постійними, то кількість тепла, що надходить, визначається добутком двох головних параметрів: температури і швидкості розливання сталі.

$$Q_{раз} = A \cdot \omega \cdot \Delta T = \text{const.} \quad (5)$$

Якщо за оптимального значення $Q_{раз}$, що не викликає дефектів, підвищити температуру, то співвідношення $Q_{раз} = \text{const}$ порушується й у зливках з'являються тріщини (за зниження завороту).

Зв'язок швидкості та температури розливу встановлюється шляхом визначення кількості тепла, що передається одному квадратному метру кірки зливка в одиницю $Q_{раз}$.

Указана кількість тепла, що припадає на 1 м² внутрішньої поверхні виливниці, розраховується за такою залежністю:

$$q_{раз} = \frac{c \cdot \gamma \cdot \omega \cdot \Delta T}{H} \cdot \frac{S}{\Pi}, \text{ ккал/(хв.} \cdot \text{м}^2\text{)}, \quad (6)$$

де S – площа поперечного перерізу, м²;

Π – периметр, м;

H – висота зливка, м.

Середній ступінь перегріву сталі під час надходження до виливниці визначали за залежністю:

$$\Delta T = t_{вип} - 1500 - \Delta t_k, \quad (7)$$

де $t_{вип}$ – температура випуску металу з печі, °С;

Δt_k – перегрів, що втрачається сталлю за час випуску та транспортування ковша, °C.

Для ковшів ємністю 100–120 т середній рівень перегріву становить 65–75 °C.

На підставі наведеного вище можна зробити висновок, що для отримання здорових зливків необхідно вибирати таку температуру і швидкість розливання, за яких виконувалися б такі співвідношення:

$$\frac{c \cdot \gamma \cdot \omega \cdot \Delta T}{H \cdot \Pi} = 2300; \quad (8)$$

$$\omega = 2300 \cdot \frac{H}{c \cdot \gamma \cdot \Delta T} \cdot \frac{\Pi}{S}; \quad (9)$$

$$\Delta T = 1.6 \cdot \frac{H}{\omega} \cdot \frac{\Pi}{S}; \quad (10)$$

$$\omega = 1.6 \cdot \frac{H}{\Delta T} \cdot \frac{\Pi}{S}, \text{ м/хв.} \quad (11)$$

Оптимальне значення $q_{\text{разів}}$ величини залежить від безлічі параметрів розливання, насамперед від швидкості циркуляції металу вздовж кірки зливка, форми розливного стакану і пов'язаної з нею турбулентності струменя, форми та розмірів поперечного перерізу зливка, теплопровідності й швидкості кристалізації шару.

Результати. На основі проведених розрахунків отримано залежності, які представлені у вигляді графічних побудов, що дає змогу візуалізувати оптимальні умови розливання сталі з урахуванням геометричних параметрів виливниць. Здійснено порівняння розрахункових та практичних результатів, а також проаналізовано ефективність упроваджених режимів у промислових умовах.

За формулою (1) визначено товщину кірки затверділого шару металу. Результати розрахунку представлено рис. 1.

Як свідчать дані, представлені на рис. 1, оптимальна товщина кірки формується за тривалості

розливання в межах 8–10 хв. Це свідчить про досягнення необхідних термодинамічних умов у процесі, що сприяє утворенню якісного зливка.

Розливання сталі з температурою нижче оптимальної сприяє утворенню грубої поверхні зливків із шаруватістю, а іноді із заворотами і пленою. А за розливання занадто гарячої сталі у зливку утворюються поздовжні тріщини та бульбашки. Збільшення швидкості розливання рівносильне підвищенню температури розливання. Початкова температура розливання залежить від температури ліквідусу вуглецевої сталі. При цьому починати розливку для більшості марок сталі рекомендується з температурою 80–100 °C, що перевищує температуру ліквідусу.

Швидкість розливання сталі визначено за рівнянням (11). Залежність швидкості розливання сталі від температури металу для 9- та 12-дюймових виливниць наведено на рис. 2 та 3.

В обох випадках спостерігається тенденція до зростання швидкості розливання зі збільшенням температури металу, що пояснюється зменшенням в'язкості розплаву. Водночас для більших виливниць характеризується нижчими швидкостями за тих самих температур, що зумовлено більшим перерізом та об'ємом зливка. Це свідчить про необхідність адаптації температурно-швидкісного режиму залежно від типорозміру виливниці.

На рис. 4 та 5 подано залежність тривалості розливання сталі від температури на випуску, для 9- та 12-дюймових виливниць відповідно. В обох випадках спостерігається тенденція до збільшення тривалості розливання зі зростанням температури металу, що пов'язано з необхідністю дотримання умов формування здорової кірки за підвищеної теплової енергії у розплаві.

Порівняння графіків також показує, що для більших (12-дюймових) виливниць час



Рис. 1. Залежність товщини кірки сталі залежно від часу розливання

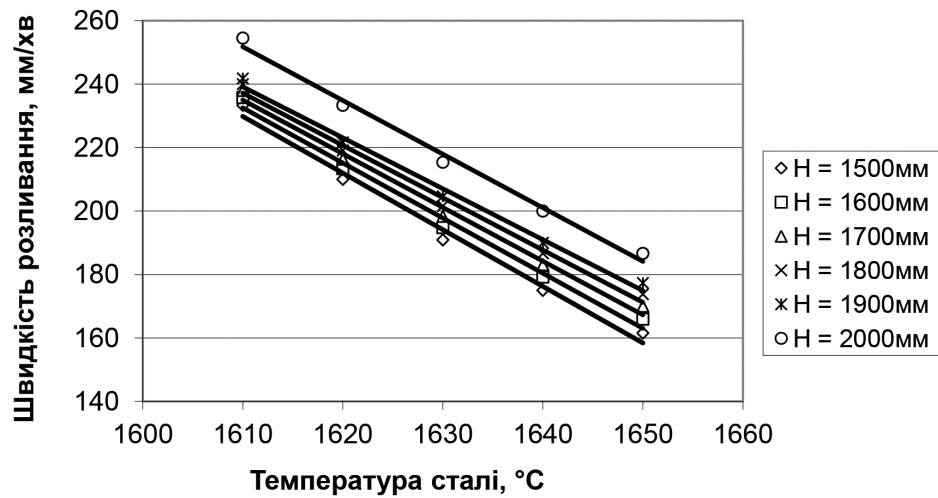


Рис. 2. Залежність швидкості розливання сталі від температури металу для 9-дюймових виливниць (позначення ліній висоти наливу виливниці)

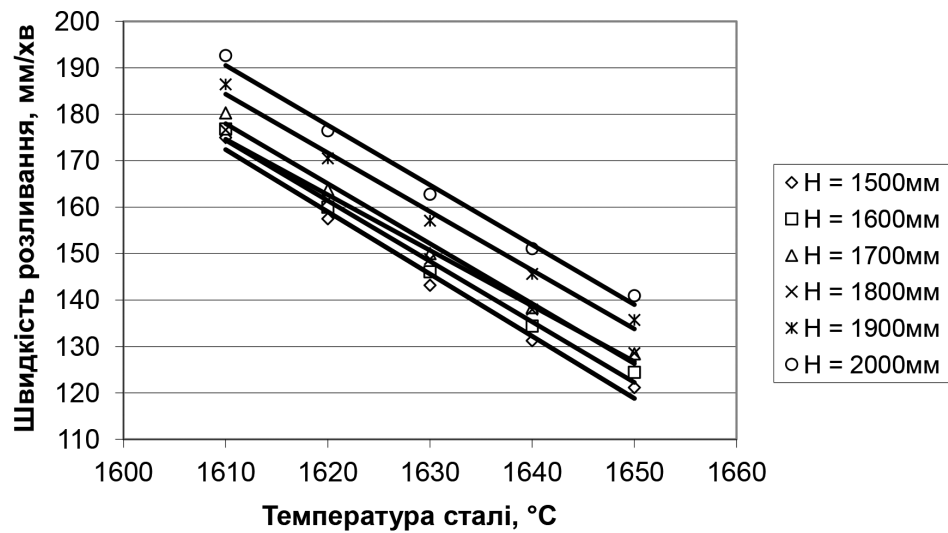


Рис. 3. Залежність швидкості розливання сталі від температури металу для 12-дюймових виливниць

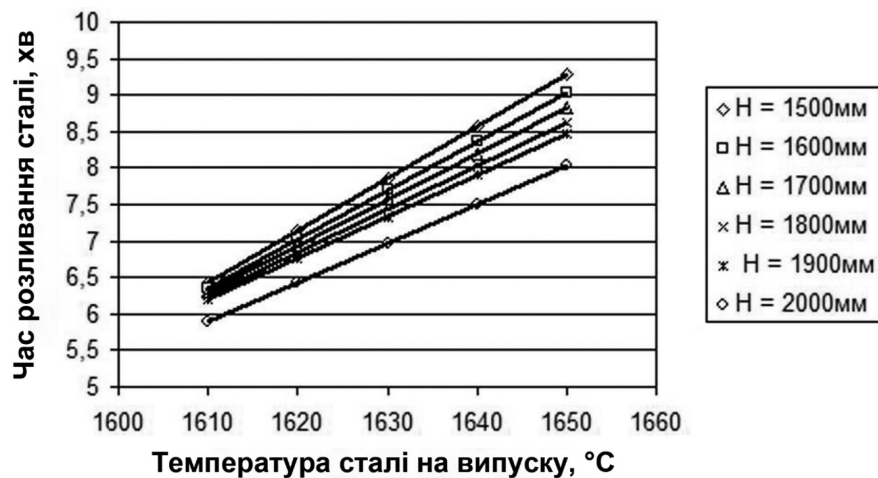


Рис. 4. Залежність часу розливання від температури металу на випуску для 9-дюймових виливниць



Рис. 5. Залежність часу розливання від температури металу на випуску для 12-дюймових виливниць

розливання за аналогічних температур є вищим, що зумовлено збільшеною масою зливка та повільнішим відведенням тепла.

Аналіз виконаних розрахунків дав змогу отримати значення часу наповнення виливниць залежно від висоти зливка та температури металу за дотримання умов утворення здорової кірки (рис. 4 та 5).

Розрахункові значення надалі використано під час проведення дослідної та дослідно-промислової кампанії виробництва сталі марок 15X, 20X. Установлено, що значна кількість браку (до 60 %) належить до зливків, отриманих з останніх піддонів. На деяких плавках відбраковували 1–2 зливки, що пов'язано насамперед зі зношеністю парку виливниць (у деяких піддонах використовували виливниці з поздовжніми тріщинами до 30 % від висоти виливниці).

На рис. 6 наведено діаграму співвідношення всіх видів браку до проведення дослідно-промислової кампанії виробництва сталі марок 15X, 20X та після.

Із рис. 6 видно, що розливання металу за уточненим температурно-швидкісним режимом призвело до зменшення браку за гарячими тріщинами, пленами та іншими видами. Загальна кількість браку під час виробництва сталі марок 15X, 20X знизилася на 49,9 %.

Висновки. У результаті проведених теоретичних і дослідно-промислових випробувань уточнено температурно-швидкісні режими розливання сталі марок 15X, 20X. Установлено, що для цих марок сталі оптимальний час розливання становить 8–10 хв., що забезпечує формування здорової кірки та мінімізує утворення дефектів.

Практичне впровадження розроблених рекомендацій під час дослідно-промислових

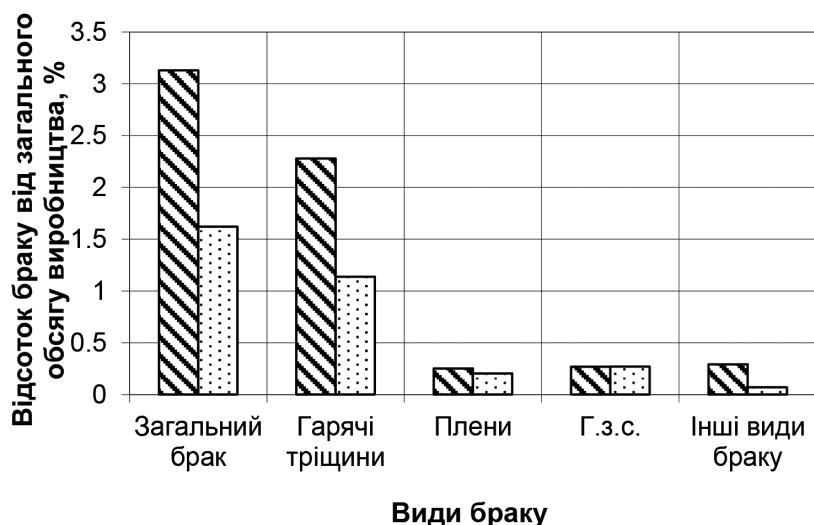


Рис. 6. Співвідношення видів браку під час виробництва сталі марок 15X, 20X

випробувань підтвердило їх високу ефективність. Зафіксовано суттєве зниження загального браку зливків на 49,9 %, зокрема за рахунків різкого зменшення кількості гарячих тріщин, плівок та інших поверхневих дефектів. Це свідчить про значний економічний ефект та підвищення виходу придатного металу.

Отримані результати є важливими для подальшого вдосконалення технології розливання сталі та оптимізації процесів для інших марок сталей із підвищеним вмістом хрому з перспективою вивчення додаткових чинників та розвитку складніших математичних моделей.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Honeycombe R., Bhadeshia H. *Steels: Microstructure and Properties*. Elsevier Science & Technology Books, 2024.
2. Choudhary S. K., Mazumdar D. Mathematical Modelling of Transport Phenomena in Continuous Casting of Steel. *ISIJ International*. 1994. Vol. 34, no. 7. P. 584–592.
3. Жаромічні сталі: причини виникнення тріщин. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/zharoprochnye-stali-prichiny-vozniknoveniya-treshchin/> (дата звернення: 23.05.2025).
4. Modeling the formation of longitudinal facial cracks during continuous casting of hypoperitectic steel / J. Konishi et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2002. Vol. 33, no. 3. P. 413–423.
5. Węgrzyn-Skrzypczak E., Skrzypczak T. Numerical modeling of the solidification process with consideration of shrinkage cavities formation and the influence of solid phase content on the feeding of the casting. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*. 2023. Vol. 22, no. 2. P. 75–86. DOI: <https://doi.org/10.17512/jamcm.2023.2.07>
6. John C. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design*. Elsevier Science & Technology Books, 2011. 1220 p.
7. Кристалізація металів. Будова злитка. *Stud.com.ua*. URL: https://stud.com.ua/73674/tehnika/kristalizatsiya_metaliv_budova_zlitka (дата звернення: 22.05.2025).
8. Прокопович І. *Металознавство : навчальний посібник*. Київ : Академія, 2019. 312 с.
9. A. Field. *Trans. Of American Soc Steel Treat*. 1927. № 11.
10. Analysis of Internal Defects Appeared in the Continuous Casting / E. V. Stoian et al. *Scientific Bulletin of Valahia University – Materials and Mechanics*. 2018. Vol. 16, no. 14. P. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.1515/bsmm-2018-0005>
11. Meng Y., Thomas B. G. Heat-transfer and solidification model of continuous slab casting: CON1D. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2003. Vol. 34, no. 5. P. 685–705.

REFERENCES:

1. Honeycombe, R. W. K., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2024). *Steels: Microstructure and Properties*. Elsevier Science & Technology Books.
2. Choudhary, S.K., & Mazumdar, D. (1994). Mathematical modelling of transport phenomena in continuous casting of steel. *ISIJ International*, 34(7), 584–592.
3. Zharomitsni stali: prychny vynyknennya trishchyn. (n.d.). Retrieved May 23, 2025, from <https://metinvest-smc.com/ua/articles/zharoprochnye-stali-prichiny-vozniknoveniya-treshchin/>
4. Konishi, J., et al. (2002). Modeling the formation of longitudinal facial cracks during continuous casting of hypoperitectic steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33(3), 413–423.
5. Węgrzyn-Skrzypczak, E., & Skrzypczak, T. (2023). Numerical modeling of the solidification process with consideration of shrinkage cavities formation and the influence of solid phase content on the feeding of the casting. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, 22(2), 75–86. <https://doi.org/10.17512/jamcm.2023.2.07>
6. John, C. (2011). *Complete casting handbook: Metal casting processes, techniques and design*. Elsevier Science & Technology Books.
7. Krystalizatsiya metaliv. Budova zlytka. (n.d.). Retrieved May 22, 2025, from https://stud.com.ua/73674/tehnika/kristalizatsiya_metaliv_budova_zlytka
8. Prokopovych, I. (2019). *Metaloznnavstvo: navchal'nyy posibnyk*. Akademiya.
9. Field, A. (1927). *Trans. of American Soc. Steel Treat*. (Issue 11).
10. Stoian, E. V., et al. (2018). Analysis of internal defects appeared in the continuous casting. *Scientific Bulletin of Valahia University – Materials and Mechanics*, 16(14), 23–27.
11. Meng, Y., & Thomas, B.G. (2003). Heat-transfer and solidification model of continuous slab casting: CON1D. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 34(5), 685–705.