

<https://doi.org/10.15407/plit2025.04.012>

УДК 669.14:620.17:669.28

А.Ю. Семенко, канд. техн. наук, старш. досл., стар. наук. співроб.;
e-mail: semenko.au@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

В.І. Вейс, докт. філос., наук. співроб.;
e-mail: valentyneis@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0001-8889-2303>

Р.Ф. Ліхаський, докт. філос., мол. наук. співроб.;
e-mail: richard.kpi@outlook.com; <http://orcid.org/0000-0001-8277-5122>

І.Ф. Ліхаський, аспірант; e-mail: LikhatskiyIF@nas.gov.ua;
ORCID 0000-0002-2069-5255

Ж.В. Пархомчук, канд. техн. наук, старш. досл., стар. наук. співроб.;
e-mail: zhanna_parkhomchuk@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-3026-8951>

А.М. Тимошенко, канд. техн. наук, старш. досл., заст. зав. відділу;
e-mail: Marschal@i.ua; <http://orcid.org/0000-0003-4038-1744>

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

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ РОЗПЛАВУ TWIP-СТАЛІ В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ

Актуальність розробки підходів для підвищення технологічності процесу одержання злитків та заготовок із TWIP-сталей обґрунтована їх низькою густиною і комплексом механічних властивостей. Оптимізація технологічних параметрів плавлення, лиття, деформації і термічної обробки TWIP-сталей залишаються досі не повністю вирішеними. Одержання злитків із них супроводжується утворенням великої кількості дефектів усадкового походження — усадкові раковини, тріщини, утяжини, недоливи, тощо. Це зумовлює складність процесу одержання даного типу матеріалів. Серед способів нівелювання описаних негативних явищ перевага надається вдосконаленню ливарних технологій одержання заготовок і злитків у поєднанні з мікролегуванням, модифікуванням та обробкою розплаву, що дає високу економічну доцільність, пов'язану зі зменшенням браку та підвищенням якості литого металу, та може забезпечити високий енергоресурсозберігаючий ефект. Представлено результати чисельного моделювання руху та кристалізації розплаву в ливарній формі для визначення оптимальних параметрів лиття з метою мінімізації ліквацийних явищ та дефектності злитків TWIP-сталі. Наведено геометричні параметри та граничні умови розробленої моделі для вивчення особливостей процесу заливки сталі з високим вмістом марганцю та алюмінію (густина 6,27 г/см³). Представлено чотири конфігурації ливарної форми, для кожної з яких було розраховано значення критерію від ліквідусу до солідусу і, відповідно, час, необхідний для переходу об'єму металу з рідкого стану в твердий, що показує зв'язок між виливом і

прибутком, який є останнім об'ємом ливарної форми, що застигає. Проаналізовано динаміку заповнення форми та кристалізації виливка, забезпечено його підживлення. Отримані дані дозволять збільшити якість та прогнозованість ливарного процесу.

Ключові слова: моделювання, TWIP-сталь, сталь низької густини, ливникова система, гідродинаміка заповнення, кристалізаційний контур.

Вступ

Процес заповнення ливарної форми відіграє важливу роль у виробництві якісних литих заготовок і виливків. Більшість причин утворення ливарних дефектів (газова пористість, усадка, ліквация, тріщини, недоливи та інш.) спричинені його перебігом. Контрольованість заповнення форми та прогнозованість руху потоку розплаву в ній нерозривно пов'язані з першим етапом формування виливка, вони є найскладнішими, оскільки їх вивчення охоплює багато компонентів, включаючи обчислювальну гідродинаміку (CFD), теплообмін, числові методи, комп'ютерну графіку, диференціальні рівняння з частинними похідними тощо [1].

У даній роботі представлено результати чисельного моделювання руху та кристалізації розплаву TWIP-сталі системи Fe–Mn–Al–C в ливарній формі. Тематика досліджень даного класу сталі у світі безперервно зростає, що пов'язано з їх низькою щільністю, яка майже на 20 % менша, ніж у звичайних промислових сталях [2–4]. Такий ефект є результатом високого вмісту алюмінію, оскільки кожен масовий відсоток Al знижує щільність приблизно на 1,3 % [5]. Тому ці сталі, як правило, містять від 5 до 12 мас. % Al і понад 20 мас. % Mn. Для виплавки TWIP-сталей із високим вмістом марганцю та алюмінію здебільшого застосовують вакуумну індукційну плавку та аргонодуговий перепплав [2–4], але з погляду енергоресурсозбереження більш цікавим та доступним способом виплавки можна вважати відкриту індукційну плавку.

Високий вміст алюмінію у цих сплавах робить їх перспективними матеріалами для застосування при підвищених температурах, проте, з іншого боку, занадто велика частка алюмінію в сталі викликає зміни мікроструктури, механізм деформації, погіршення механічних властивостей, а ливарно-металургійний етап їх виробництва супроводжується багатьма труднощами, серед яких велика кількість усадкових дефектів. Відповідно, метою даної роботи було визначити вплив конфігурації ливарної форми на динаміку заповнення та кристалізації розплаву в ній за допомогою математичного моделювання для мінімізації ліквацийних явищ і дефектності злитків TWIP-сталі.

Основні рівняння, вхідні параметри та граничні умови

У згаданих дослідженнях було розглянуто нестационарну течію нестисливої в'язкої рідини з вільною поверхнею. Обчислення полягало у розв'язанні задачі зміни потоку, температури та вільної поверхні рідкого металу в процесі заповнення, які можна описати рівняннями безперервності (збереження маси), збереження імпульсу, енергії та функції об'єму рідини [6–7].

Рівняння збереження маси:

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

де D — розбіжність; u, v, w — складові вектора швидкості в напрямку x, y, z [м/с].

Рівняння збереження імпульсу:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \end{cases} \quad (2)$$

де p — тиск [Па]; μ — динамічна в'язкість [Па·с]; g — прискорення вільного падіння

[м/с²]; — оператор Лапласа; ρ — густина рідини [кг/м³]; t — час заповнення [с].

Рівняння збереження енергії :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (3)$$

де c — питома теплоємність [Дж·(кг·К)⁻¹]; S — тепло, яке виникає внаслідок поверхневого напруження рідини прикладна робота для рідини, [Дж]; T — температура рідини [°С]; k — теплопровідність рідини [Вт·(м·К)⁻¹].

Під час визначення обчислювальної області було визначено функцію об'єму моделюючої рідини (volume of fluid — VOF), яка використовується для моделювання вільної поверхні. Значення дорівнює 1 для комірки, повністю заповненої рідиною, 0 — для порожніх комірок, між 0 і 1 — для поверхневих комірок. Стан кожної комірки можна виразити значенням F [1]:

$$F = \frac{O_v}{A_v} \quad (4)$$

де O_v — об'єм рідини в одній комірці [м³]; A_v — об'єм однієї комірки, [м³].

Рівняння функції об'єму рідини має вид:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

де u, v, w — компоненти вектора швидкості в напрямку x, y, z точки комірки (x, y, z) [м/с].

За результатами попередніх розрахунків було визначено, що оптимальними характеристиками способу антигравітаційної заливки виливка є висока швидкість розрахунку, легка збіжність і хороша безперервність вільної поверхні при чисельному моделюванні. При цьому спосіб антигравітаційної заливки донної частини виливка має такі характеристики, як більш плавне перетікання рідкого металу, низька ймовірність появи вихрових контурів і, відповідно, зменшення шлакових включень у виливку.

Розрахунковою геометрією для чисельного моделювання процесу заповнення форми розплавом із використанням програмного забезпечення ANSYS 2025 R1 Academic Fluent є її внутрішній об'єм (fluid domain). На рис. 1 представлено чотири конфігурації ливарної форми, які відрізняються способом підводу розплаву до виливка та геометрією живильного каналу. Розрахункова сітка, що складається в середньому з 300000 багатограних елементів, була підготовлена за допомогою програмного забезпечення FLUENT MESH (рис. 2).

Для тиску було прийнято метод дискретизації PRESTO. Схема PISO була використана для вирішення зв'язку тиск-швидкість. Схеми другого порядку були застосовані до імпульсу, турбулентної кінетичної енергії та швидкості турбулентної дисипації. Geo-reconstruct використовувався для просторової дискретизації об'ємної частки (VOF). Крім того, курантове число VOF було зафіксовано на рівні 0,25. Крок моделювання за часом становив 0,01 с, розрахований час заповнення форми — 10 с, фактичний час повного заповнення форми розплавом — ~ 3,5 с. Вхідні параметри розрахунку наведено в табл. 1.

Результати і обговорення

Аналіз руху розплаву в ливарній формі

При моделюванні було задано параметри багатофазного потоку (VOF), енергії, турбулентності та параметри затвердівання. За результатами моделювання процес заповнення форми розплавом (рис. 3–4) можна поділити на чотири етапи:

1. Рідкий метал повністю заповнив живильний канал та 0,5–0,75 % тіла виливка

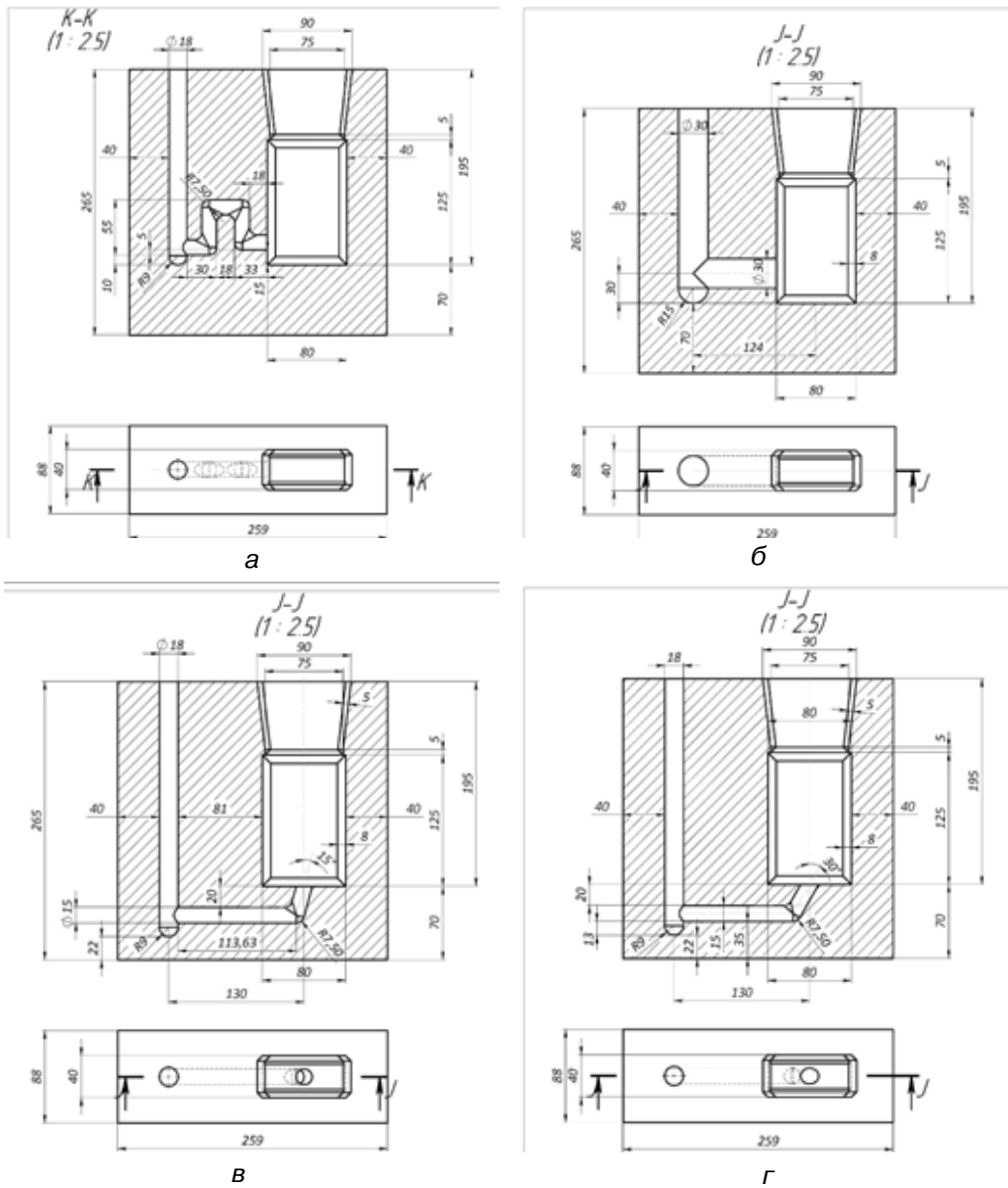


Рис. 1. Геометричні параметри ливарної форми [мм], де живильний канал: а — нерівномірний збоку; б — прямий збоку; в — знизу під кутом 15°; г — знизу під кутом 30°

за 0,75 с і поверхня рідини стабільно піднімається (рис. 3, а). Видно, що розплав починає плавно надходити в нижню частину порожнини форми від центру через 0,75 с і далі контактує зі стінкою.

2. Зміна вільної поверхні показала, що на ранній стадії процесу заповнення рівень розплаву є непостійним (рис. 3, б), особливо після першого контакту зі стінкою форми. У цьому місці потік є однозначно турбулентним, що може призвести до утворення газоусадкових дефектів у тілі виливка.

3. Через 1,5 с потік рідини переходить у більш стабільний стан. Розплав починає рівномірніше заповнювати форму (рис. 4, а).

4. Рідкий метал досягає верхньої частини форми на 2,5 с. і на 3,5 с процес заповнення завершено.

З отриманих даних видно, що конфігурація ливарної форми з боковим прямим живильним каналом (рис. 1, б) показала більш рівномірне заповнення, про що

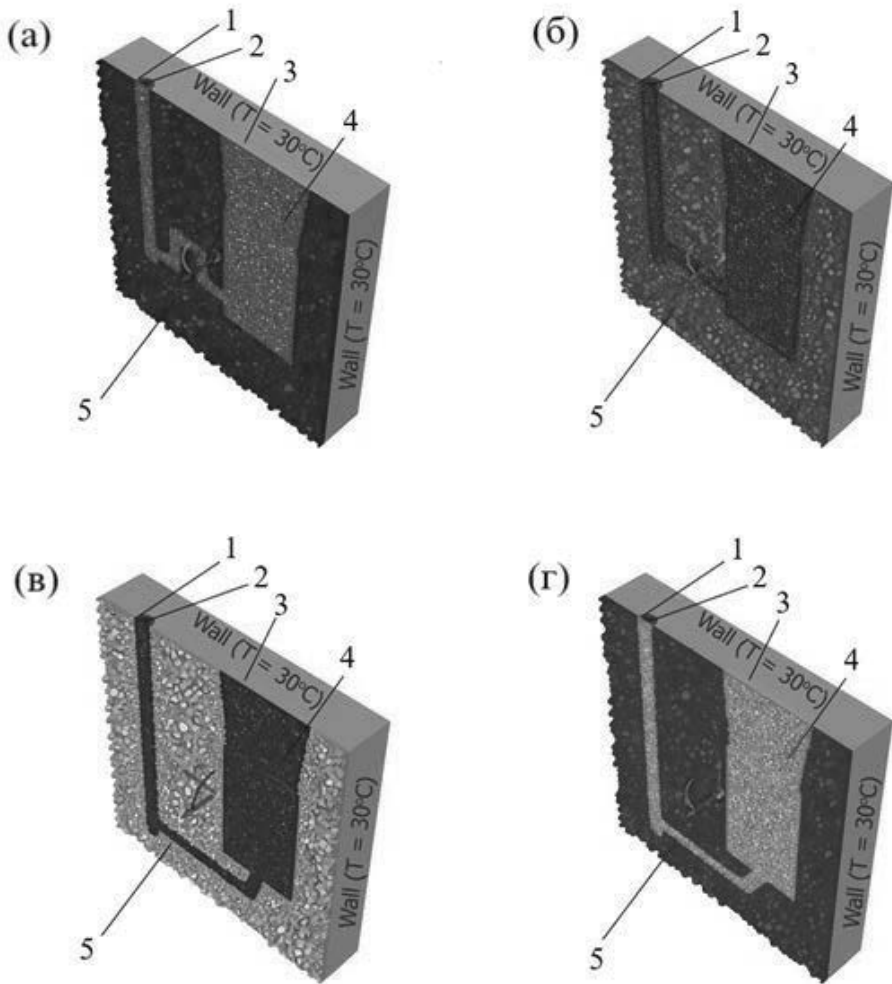


Рис. 2. Розрахункова сітка для конфігурацій (а–г) ливарної системи відповідно до геометрії, представленій на рис. 1, та граничні умови: 1, 3 — вихід тиску; 2 — вхід масового потоку. 4 — рідкий домен (розплав); 5 — твердий домен (форма). Температура стінки форми перед заливкою (Wall) — 30 °C

Таблиця 1
Вхідні параметри розрахунку

Густина повітря, кг/м ³	1,225
Густина рідкої сталі, г/см ³	6,27
Динамічна в'язкість повітря, Па·с	1,7894
Поверхневий натяг між розплавленою сталлю і повітрям, Н/м	1,6
Температура заливки, °C	1550
Температура солідус, °C	1300
Швидкість заливки, кг/с	1,2
Маса виливка, кг	2,5

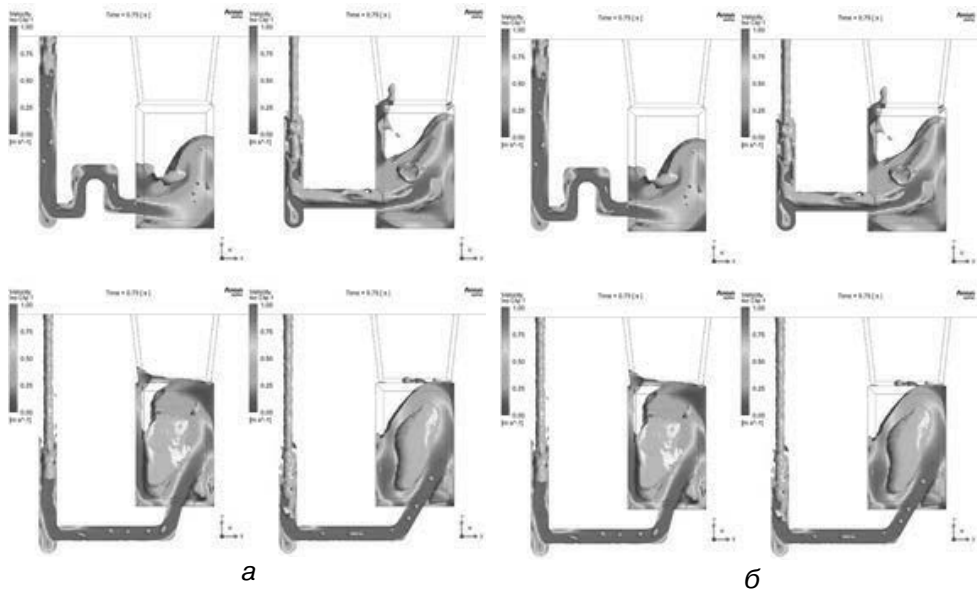


Рис. 3. Динаміка заповнення ливарної форми розплавом за 0,75 с (а) та 1,0 с (б)

свідчить те, що: на 0,75 с розплав уже досяг другої стінки тіла виливка, не маючи при цьому повітряних «кишень», зокрема донна частина виливка була повністю заповнена до цього; це єдиний із розрахованих варіантів, у якому розплав досяг рівня прибутку без утворення повітряних «кишень» (1,0 с) і який практично не мав коливань розплаву з 3,5 с заливки (рис. 4, б).

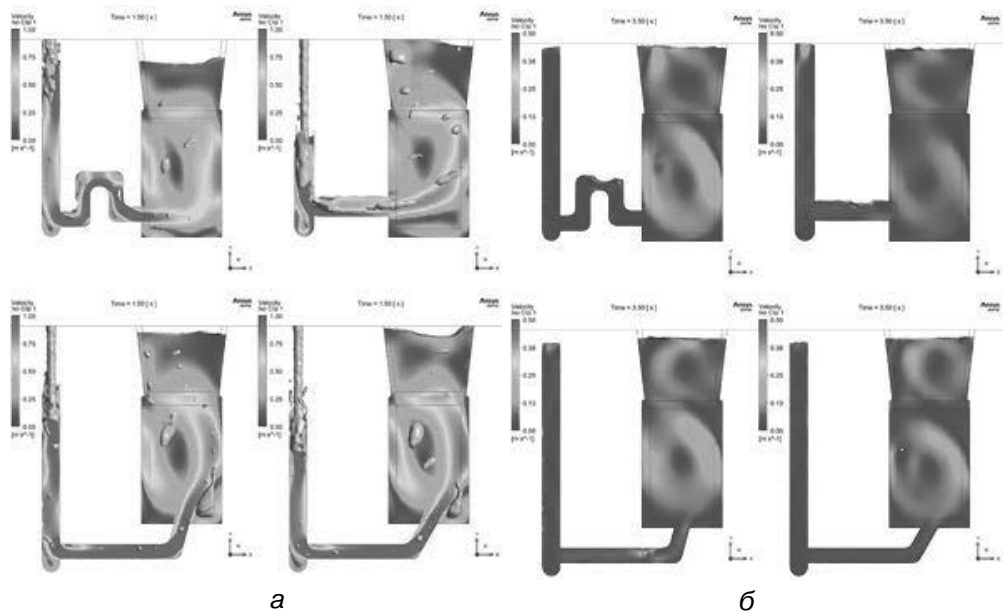


Рис. 4. Динаміка заповнення ливарної форми розплавом за 1,5 с (а) та 3,5 с (б)

Отже, за результатами аналізу процесу заливки розплаву попередньо визначено, що конфігурація ливарної форми з боковим прямим живильним каналом може мінімізувати ліквацийні явища та утворення газоусадкових дефектів при одержанні виливків зі сталі низької густини.

Аналіз динаміки кристалізації виливка

Під час затвердіння та плавлення чистих металів масова зміна їх рідкої частки

відбувається при певній температурі плавлення. Однак для багатокомпонентного розплаву між температурою солідус та температурою ліквідусу існує кашоподібна зона замерзання / плавлення. Коли багатокомпонентний розплав твердне, розчинені речовини дифундують із твердої фази в рідку. Цей ефект кількісно визначається коефіцієнтом розподілу розчиненої речовини i , позначений як K_i і є відношенням масової частки твердої фази до масової частки рідкої на межі розділу [8, 9].

Температура солідус та ліквідус в багатокомпонентному сплаві за допомогою модуля Fluent розраховується як:

$$T_{\text{солідус}} = T_{\text{розп}} + \sum_{\text{розчинені}} m_i Y_i / K_i \quad (6)$$

$$T_{\text{солідус}} = T_{\text{розп}} + \sum_{\text{розчинені}} m_i Y_i \quad (7)$$

де K_i — коефіцієнт розподілу розчиненої речовини i , Y_i — масова частка розчиненої речовини i , а m_i — нахил поверхні ліквідусу відносно Y_i . Передбачається, що останньою речовиною суміші є розчинник, а іншими видами є розчинені речовини.

Масові частки рідкої $Y_{i, \text{лікв}}$ і твердої фази $Y_{i, \text{солід}}$ фази пов'язані між собою коефіцієнтом розподілу K_i :

$$Y_{i, \text{солід}} = K Y_{i, \text{лікв}} \quad (8)$$

На рис. 5–6 представлено результати розрахунку динаміки руху кристалізаційного контуру в ливарній системі протягом 10–40 с в діапазоні температури 1250–1300 °С.

На рис. 5 показана динаміка зміни температури металу в процесі перших 20 с затвердівання виливка. Видно, що напрямок передачі температури відповідає напрямку потоку рідкого металу і вони обидва розподілені від центра виливка до стінок форми в усіх чотирьох варіантах конфігурації ливарної форми (рис. 5, а). Показано, що швидкість передачі температури правої стінки більша, ніж лівої, при тому що бокові стінки форми мають однакову товщину. Динаміка затвердівання прибутку ливарної форми різна в усіх чотирьох випадках (рис. 5, б). Аналіз

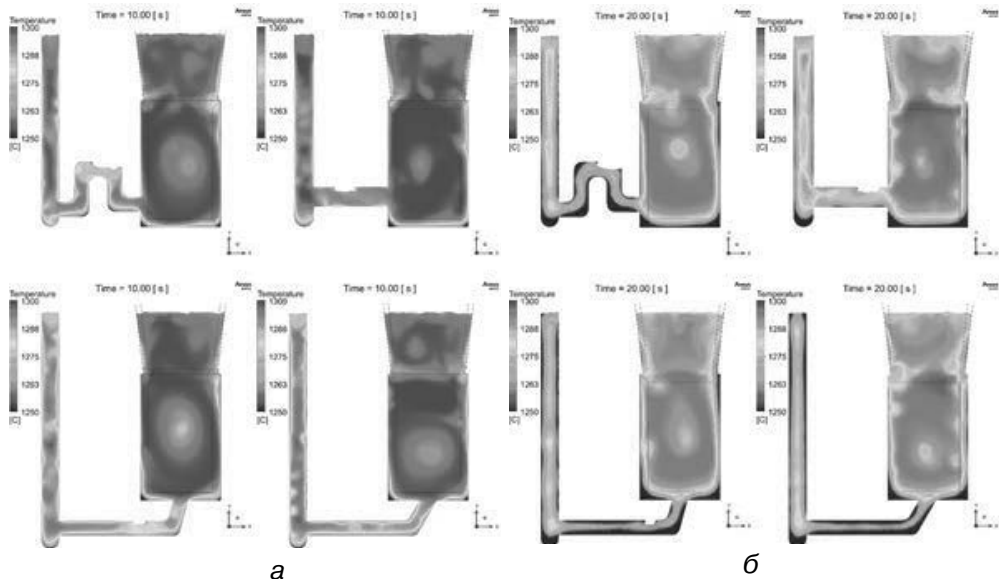


Рис. 5. Кристалізаційний контур у ливарній системі на 10 с (а) та 20 с (б)

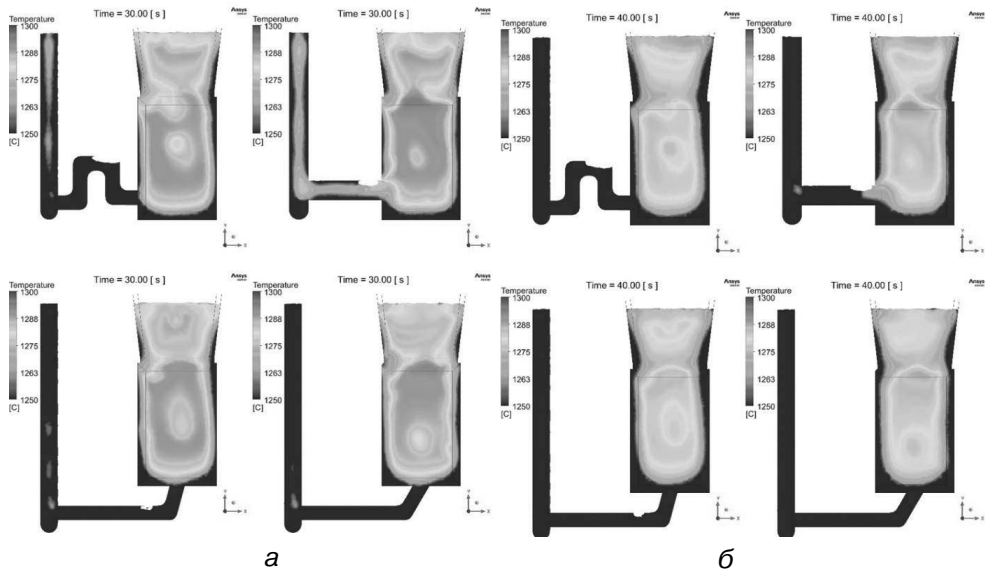


Рис. 6. Кристалізаційний контур у ливарній системі на 30 с (а) та 40 с (б)

результатів проведено за двома пов'язаними критеріями: критерій від ліквідусу до солідусу та критерій гарячої точки. Критерій від ліквідусу до солідусу показує час, необхідний для переходу об'єму матеріалу з рідкого стану в твердий. При комплексному спостереженні визначено, що температура інтенсивно змінюється протягом перших 20 с після завершення процесу заповнення форми, при цьому процес затвердіння поступово стає стабільним (рис. 6).

Висновки

За результатами роботи було визначено динаміку заповнення порожнини форми, темп кристалізації виливка, забезпечено підживлення виливка і, відповідно до одержаних даних, оптимальну конфігурацію ливарної форми. Показано, що у випадку конфігурації ливарної системи з прямим боковим живильником ділянка між виливком і прибутком є останнім об'ємом ливарної форми, який застигає, що може свідчити про забезпечення транспортування розплавленого металу (підживлення виливка розплавом) та запобігання усадкових дефектів. Враховуючи відсутність повітряних «кишень» при заповненні форми розплавом і динаміку кристалізації виливка ця конфігурація є оптимальною для заливки TWIP-сталі низької густини.

References

- 1 Yuwen, X., Chen, L., & Han, Y. (2012). Numerical Simulation of Casting Filling Process Based on FLUENT. *Energy Procedia*, 17, 1864–1871. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.324>
- 2 Raabe, D., Springer, H., Gutierrez-Urrutia, I., Roters, F., Bausch, M., Seol, J.-B. ., Koyama, M., Choi, P.-P. ., & Tsuzaki, K. (2014). Alloy Design, Combinatorial Synthesis, and Microstructure–Property Relations for Low-Density Fe-Mn-Al-C Austenitic Steels. *JOM*, 66(9), 1845–1856. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1032-x>
- 3 Zuazo, I., Hallstedt, B., Lindahl, B., Selleby, M., Soler, M., Etienne, A., Perlade, A., Hasenpouth, D., Massardier-Jourdan, V., Cazottes, S., & Kleber, X. (2014). Low-Density Steels: Complex Metallurgy for Automotive Applications. *JOM*, 66(9), 1747–1758. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1084-y>

- 4 eis, V., Semenko, A., Voron, M., Tymoshenko, A., Likhatskyi, R., Likhatskyi, I., & Parkhomchuk, Z. (2025). Lightweight Fe–Mn–Al–C Steels: Current State, Manufacturing, and Implementation Prospects. *Steel Research International*. <https://doi.org/10.1002/srin.202400904>
- 5 Frommeyer, G., & Brück, U. (2006). Microstructures and Mechanical Properties of High-Strength Fe–Mn–Al–C Light-Weight TRIPLEX Steels. *Steel Research International*, 77(9–10), 627–633. <https://doi.org/10.1002/srin.200606440>
- 6 Nimbalkar, S. L., & Dalu, R. S. (2016). Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate. *Perspectives in Science*, 8, 39–42. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.03.001>
- 7 Hodbe, G. A., & Shinde, B. R. (2018). Design And Simulation Of LM 25 Sand Casting For Defect Minimization. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4489–4497. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.018>
- 8 Butler, W. A., Giulio Timelli, Battaglia, E., & Franco Bonollo. (2016). *Die Casting (Permanent Mold)*. Elsevier EBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.03555-4>
- 9 Campbell, J. (2011). *Casting alloys* (pp. 255–390). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-809-9.10006-4>

Received 01.10.2025

A.Yu. Semenko, PhD (Engin.), Senior Research Scientists, Senior Researcher;
e-mail: semenko.au@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

V.I. Veis, PhD (Engin.), Researcher; e-mail: valentyneis@gmail.com;
<http://orcid.org/0000-0001-8889-2303>

R.F. Likhatskyi, PhD (Engin.), Junior Researcher; e-mail: richard.kpi@outlook.com;
<http://orcid.org/0000-0001-8277-5122>

I.F. Likhatskyi, PhD Student; e-mail: LikhatskiyIF@nas.gov.ua;
<http://orcid.org/0000-0002-2069-5255>

Zh.V. Parkhomchuk, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher
e-mail: zhanna_parkhomchuk@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-3026-8951>

A.M. Tymoshenko, PhD (Engin.), Senior Research Scientists, Deputy of Head of the
Department; e-mail: Marschal@i.ua; <http://orcid.org/0000-0003-4038-1744>

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

MODELING OF HYDRODYNAMIC BEHAVIOR AND CRYSTALLIZATION OF TWIP-STEEL MELT IN A CASTIN MOLD

The relevance of developing approaches to improving the process of producing ingots and billets from TWIP-steels is justified by their low density and complex of mechanical properties. Optimization of technological parameters of melting, casting, deformation and heat treatment of TWIP-steels remains incompletely solved. The production of ingots from them is accompanied by the formation of a large number of defects of shrinkage origin – shrinkage cavities, cracks, heaviness, under-casting, etc. This makes the process of obtaining this type of material more complex. Among the methods of leveling the described negative phenomena, preference is given to improving casting technologies for producing billets and ingots in combination with microalloying, modification and treatment of the melt, which gives high economic feasibility associated with reducing scrap and improving the quality of cast metal and can provide a high energy-saving effect. The paper presents the results of numerical modeling of the movement and crystallization of the melt in the casting mold to determine the optimal casting parameters to minimize liquidation phenomena and defects in TWIP-steel ingots. The geometric parameters and boundary conditions of the developed model

for studying the features of the casting process of steel with a high content of manganese and aluminum (density 6.27 g/cm³) are presented. Four configurations of the mold are presented, for each of which the value of the criterion from liquidus to solidus was calculated and, accordingly, the time required for the transition of the metal volume from the liquid state to the solid state., which shows the relationship between the casting and the profit, which is the last solidifying volume of the casting mold. An analysis of the dynamics of mold filling and crystallization of the casting was carried out, and its feeding was provided. The data obtained will allow us to increase the quality and predictability of the casting process.

Keywords: modeling, TWIP steel, low-density steel, sprue system, melt filling hydrodynamics, crystallization circuit.

Шановні читачі

Науково-технічний журнал «Процеси лиття»

зареєстрований у категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук

До уваги читачів та передплатників!

Журнал виходить 4 рази на рік.

Для регулярного одержання журналу потрібно оформити підписку через редакцію, надіславши лист-запит на адресу редакції для оформлення **рахунку-фактури**.

Вартість одного журналу — 300 грн., передплата на рік — 1200грн.
Доступні також архівні номери журналу.

Адреса: бульвар Вернадського, 34/1
03142, Київ-142
proclit@ptima.kiev.ua