
ТВЕРДІННЯ СПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2024.03.009>

УДК 669.35

О.М. Смірнов*, д-р техн. наук, проф., завідувач відділу;
e-mail: stalevoz@i.ua; ORCID 0000-0001-5247-3908

В.Є. Ухін**, канд. техн. наук, інженер;
e-mail: vladimir.ukhin@sheffield-refractories.de; ORCID 0000-0003-3560-4130

В.О. Туник*, мол. наук. співроб.;
e-mail: vladimir.tunik@gmail.com; ORCID 0009-0004-3777-5202

В.В. Довбенко***, канд. техн. наук, ген. директор;
e-mail: dovbenko@ukr.net;

А.Ю. Семенко*, канд. техн. наук, старш. досл., наук. співроб.;
e-mail: semenko.au@gmail.com; ORCID 0000-0002-0448-1636

Ю.П. Скоробагатько*, канд. техн. наук, старш. досл., наук. співроб.;
e-mail: yulka.ukr@gmail.com; ORCID 0000-0002-1724-9895

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

** ТОВ «ШЕФФІЛД РЕФРАКТОРІС УКРАЇНА» (Дніпро, Україна)

*** ТОВ «ВП «Укркабель» (Коцюбинське, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗЛИВАННЯ МІДІ НА РОТОРНИХ МБЛЗ НА ФОРМУВАННЯ ВНУТРІШНІХ ДЕФЕКТІВ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ ЗАГОТОВКИ

Для забезпечення гарантованої якості заготовки (у тому числі внутрішніх обсягів) у процесі розливання міді на колесо необхідно суворо дотримуватися сукупності таких нерозривно пов'язаних між собою технологічних параметрів лиття, як швидкість руху заготовки, профіль кристалізатора, температура міді, що розливається, які враховують особливості формування твердої скоринки в умовах певного колеса. Розроблено математичну модель, що дозволяє імітувати затвердіння мідної заготовки, яка відливається на колесо, залежно від швидкості його обертання, температури розливання і умов охолодження, а також прогнозувати якість внутрішньої структури металопродукції. За допомогою створеної математичної моделі встановлено, що значення швидкості 1800–1900 об/год і вище призводять до потрапляння межі зони твердіння за границю допустимих значень, що визначаються умовою відділення заготовки від колеса та її пластичною деформацією у процесі розправлення. Розливання міді в діапазоні швидкостей 1600–1800 об/год перебувають у зоні підвищеного ризику отримання внутрішніх дефектів заготовки, спричинені

ISSN 0235-5884. Процеси лиття. 2024. № 3 (157)

умовами утрудненого живлення її внутрішніх областей рідким металом. Це зумовлено тим, що заготовка починає рухатися вгору після досягнення нижньої критичної точки колеса. Найефективнішими (з точки зору продуктивності та якості заготовки) значеннями швидкості обертання колеса є діапазон 1450–1600 об/год. При цьому доцільно здійснювати контроль профілю робочої порожнини колеса та визначити допустимі відхилення в його зношенні. Відхилення від номінальних параметрів лиття може призвести до нерівномірного контакту скоринки, яка твердіє, зі стінкою колеса, що може стати причиною виникнення дефектів геометричної форми заготовки.

Ключові слова: мідь, безперервне розливання, роторна МБЛЗ, математична модель, затвердіння, прогнозування якості.

В умовах постійної зміни ситуації на світовому ринку металургійної продукції та зростаючого рівня конкуренції перед підприємствами-виробниками продукції з міді та її сплавів гостро постає завдання підвищення ефективності виробництва та забезпечення випуску конкурентоспроможних товарів затребуваної якості. Традиційно виробництво міді ґрунтується на видобутку та переробці руди, передусім сполук міді з киснем і сіркою, а високі фізико-технологічні та механічні властивості виробів із неї досягаються за рахунок мінімального вмісту в них домішок [1, 2].

Наразі при виробництві мідної продукції в Україні найефективнішим методом є одержання міді вогневого рафінування з вторинної сировини, оскільки цей метод дозволяє забезпечити достатній рівень якості технічної міді при виробництві з місцевого брухту. Це дозволяє ефективно застосовувати таку мідь для виготовлення електротехнічної, будівельної та машинобудівної продукції [3, 4]. При цьому найактуальнішим завданням є розробка технологій та обладнання для виробництва металопродукції за принципом поєднаних технологій розливання й прокатки. Особливо ефективною така схема може бути при виробництві катанки для електротехнічної продукції, оскільки поєднання процесу розливання та прокатки дозволяє суттєво мінімізувати споживання енергії й знизити робочі витрати на виробництво продукції порівняно з традиційною схемою прокатки зі злитків (анодів) [5, 6, 7]. Особливістю роботи таких агрегатів є те, що вони являють собою добре гармонізовану та автоматизовану технологічну систему, у якій найважливіше значення має швидкість розливання (обертання колеса) і стабільна якість заготовки, що виходить із розливальної машини.

Концептуальна модель процесу безперервного лиття мідної заготовки на колесо та її твердіння може бути представлена таким алгоритмом: «оптимізація швидкості лиття заготовки» → «тепловий баланс на ділянці міксер — переливний пристрій — кристалізатор» → «оптимізація геометричної форми порожнини кристалізатора» → «динамічне керування зоною водяного охолодження» → «прогнозування якості заготовки» → «підтримка узгодженої роботи розливного колеса та ділянки прокатних клітей». У цьому ланцюжку великого значення набуває оптимізація інтенсивності теплопередачі (тепловідведення) на колесі та протяжності рідкої фази по довжині заготовки.

При цьому довжина зони рідкої фази в заготовці обмежується декількома технологічними міркуваннями, головними з яких є недопущення можливості появи внутрішніх тріщин при розгині заготовки, а також запобігання утворенню пористості в осьовій зоні заготовки в процесі її затвердіння.

Утворення внутрішньої пористості слід пов'язувати з утрудненими умовами живлення рідкої зони заготовки на кінцевій стадії твердіння, де в'язкість розплаву значно збільшується, а дендрити, що ростуть, перешкоджають просуванню рідини. У разі розливання на колесо додатковим фактором, що обмежує можливості живлення внутрішньої області заготовки рідким металом, є положення зони закінчення затвердіння. Дуже важливим фактором є те, що заготовка спочатку

рухається вниз по колу колеса, а потім, після досягнення нею нижньої точки вона починає підніматися вгору. На цій ділянці умови живлення осьової частини заготовки погіршуються через зниження металостатичного тиску в рідкій ванні, що може призводити до появи осьової усадкової пористості, яка негативно впливає на якість металопродукції.

Основною метою цих досліджень було моделювання умов твердіння безперервно литої мідної заготовки, яка розливається на колесо, що є важливим науковим завданням, вирішення якого дозволить із достатньою точністю визначати положення зони повного затвердіння заготовки залежно від її перерізу, швидкості обертання колеса, температури міді, що заливається, інтенсивності охолодження тощо.

Теплофізичні процеси в системі «колесо — заготовка — стрічка» включають перенесення (перерозподіл) теплової енергії між цими елементами та довкіллям у певний проміжок часу, а також виділення тепла безпосередньо при кристалізації міді (рис. 1).

Область твердіння заготовки умовно можна розбити на 4 зони:

1) зона зняття теплоти перегріву (тепловий потік у цій зоні не залежить від форми кристалізатора, протяжність зони для конкретних умов кристалізації заготовки становить 40–50 мм);

2) зона безпосереднього контакту затверділої скоринки зі стінкою колеса, протяжність якої безпосередньо залежить від геометрії стінки колеса (збільшення протяжності цієї зони сприяє підвищенню загального тепловідведення за інших рівних умов);

3) зона теплопередачі через повітряний зазор, який утворився; що менший зазор у цій зоні, то більший коефіцієнт теплопередачі; у зв'язку з цим необхідно прагнути до створення такого профілю колеса, який би забезпечив найменший зазор у цій зоні;

4) зона вторинного повітряного охолодження при виході заготовки з порожнини колеса та її розгинання (поз. 8 рис. 1).

За досліджувану зону було обрано поперечний переріз у площині, перпендикулярній колу колеса. Розрахункова область включає в себе точки, що належать колесу й заготовці.

Моделювання процесів формування заготовки виконано з урахуванням основних законів теплофізики багатофазних середовищ. Після розрахунку розподілів температурного поля й частки твердої фази в заданих перерізах заготовки (починаючи від меніска) визначаються геометричні розміри затверділої частини і кількість елементарних шарів, що припадає на неї, по товщині та по ширині заготовки.

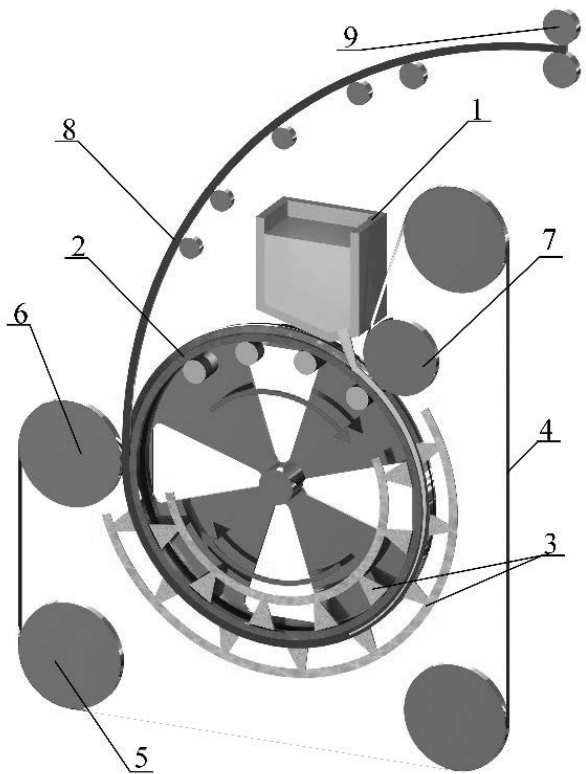


Рис. 1. Схема розливання міді на роторній МБЛЗ: 1 — проміжний ківш; 2 — розливне колесо; 3 — система водяного охолодження; 4 — сталева стрічка; 5 — натяжний ролик; 6 — спрямовуючий ролик; 7 — притискний ролик; 8 — одержувана заготовка; 9 — прокатна кліть

Теплопередачу в мідній заготовці описує таке рівняння:

$$\rho_3 C_{\text{зef}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

де T — температура в точці, що розглядається, $^{\circ}\text{C}$; x — координата по осі у напрямку товщини колеса, м; r — координата по осі у напрямку радіуса колеса, м; τ — час від моменту заливання розплаву в кристалізатор, с; ρ_3 — густина матеріалу бруска, кг/м^3 ; λ_3 — теплопровідність матеріалу бруска, $\text{Дж/(м}\cdot\text{К}\cdot\text{с)}$; $C_{\text{зef}}$ — ефективний коефіцієнт теплоємності, що визначається за формулою:

$$C_{\text{зef}} = C_3 + L_3 \frac{df_s}{dT},$$

де C_3 — питома теплоємність матеріалу заготовки, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; L_3 — питома теплота кристалізації матеріалу бруска, Дж/кг ; f_s — частка твердої фази.

Процес формування твердої скоринки всередині заготовки описується за допомогою лінійної моделі:

$$f_s = \frac{T_L - T}{T_L - T_s}. \quad (2)$$

де T_L — температура ліквідусу матеріалу бруска, $^{\circ}\text{C}$; T_s — температура солідусу матеріалу бруска, $^{\circ}\text{C}$.

Для опису теплоперенесення всередині колеса використовується рівняння теплообміну при відсутності фазового переходу:

$$\rho_k C_k \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_k \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3)$$

де ρ_k — густина матеріалу колеса, кг/м^3 ; λ_k — теплопровідність матеріалу колеса, $\text{Дж/(м}\cdot\text{К}\cdot\text{с)}$; C_k — теплопровідність матеріалу колеса, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

Математична модель доповнюється системою граничних умов, необхідних для розв'язання поставленої задачі. У початковий момент часу задаються постійні поля температури у всьому робочому перерізі [7, 8].

1. На бічних поверхнях колеса передбачається конвективний теплообмін із повітрям:

$$-\lambda_k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_0}^{x=x_n} = q = \alpha (T|_{x=x_0} - T_a), \quad (4)$$

де α — локальний коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт/(м}^2\text{К)}$; T_a — температура повітря на межі з колесом, $^{\circ}\text{C}$.

2. На «внутрішній» поверхні колеса передбачається охолодження водою, яка розбризкується, та описується таким рівнянням:

$$-\lambda_k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_0} = \alpha_w (T|_{r=r_0} - T_w), \quad (5)$$

де α_w — коефіцієнт тепловіддачі, що визначається витратою охолоджувальної води, $\text{Вт/(м}^2\text{К)}$; T_w — температура води для охолодження, $^{\circ}\text{C}$.

3. Граничні умови поверхні заготовки задаються залежно від часу. При $\tau > \tau_*$ (період знаходження заготовки в кристалізаторі) передбачається, що на поверхнях, які стикаються з колесом, здійснюється прямий кондуктивний теплообмін [9]:

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_K = \left. \frac{dT}{dr} \right|_3, \quad (6)$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_K = \left. \frac{dT}{dx} \right|_3. \quad (7)$$

Таким чином, все тепло, що підводиться від внутрішніх точок колеса, передається заготовці (бруску).

На поверхні заготовки, що відповідає зовнішньому радіусу колеса, здійснюється конвективне охолодження за рахунок води, яка подається. Цей процес можна описати таким рівнянням:

$$-\lambda_K \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=m} = \alpha_w (T|_{r=m} - T_w). \quad (8)$$

$$-\lambda_3 \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=m} = \alpha_w (T|_{r=m} - T_w). \quad (9)$$

4. Після виходу заготовки з кристалізатора ($\tau > \tau_1$) теплообмін здійснюється за рахунок конвективного теплообміну з повітрям та випромінювання, що дає таку граничну умову:

$$-\lambda_3 \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{30}} = \alpha_{3B} \left(T|_{r=r_{30}} - T_a \right) + \sigma \varepsilon \left(T^4|_{r=r_{30}} - T_a^4 \right), \quad (10)$$

$$-\lambda_3 \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_{30}} = \alpha_{3B} \left(T|_{x=x_{30}} - T_a \right) + \sigma \varepsilon \left(T^4|_{x=x_{30}} - T_a^4 \right), \quad (11)$$

де σ — константа Стефана-Больцмана; ε — випромінювальна здатність поверхні заготовки при радіаційному теплообміні.

Система рівнянь і граничних умов перетворюється з допомогою методу кінцевих елементів у форму, що зручна для комп'ютерних розрахунків [9]. Для налаштування програми та оцінки її працездатності були використані вихідні дані, представлені в табл. 1, які залишалися незмінними для всіх варіантів, що досліджувались.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку

Параметри колеса та заготовки	Значення
Радіус колеса, мм	1000
Товщина колеса, мм	113
Матеріал колеса	бронза
Початкова температура колеса (перед заливкою Cu), °C	190
Висота заготовки, мм	36
Ширина заготовки, мм	63
Матеріал заготовки	мідь
Густина мідної заготовки, кг/м ³	8950
Коефіцієнт теплопровідності міді, Вт/(м К)	380
Коефіцієнт теплоємності міді, Дж/(кг К)	886
Початкова температура розплаву, що заливається, °C	1185

Твердіння сплавів

Побудована на основі розробленої математичної моделі комп'ютерна програма дозволяє розглядати різні масиви вихідних даних, підбираючи оптимальні режими розливання, обертання колеса та охолодження заготовки, розрахувати поля температури й частку твердої фази в заготовці, яка досліджується, у будь-який момент твердіння, а також вивести результати у вигляді діаграм і графіків (рис. 2 і 3).

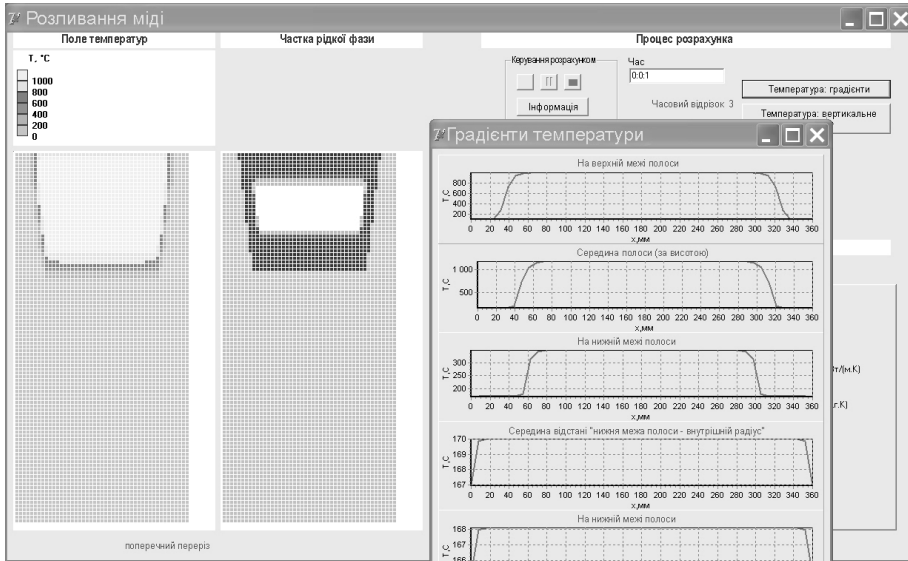


Рис. 2. Робоче вікно програми (моделі розрахунку)

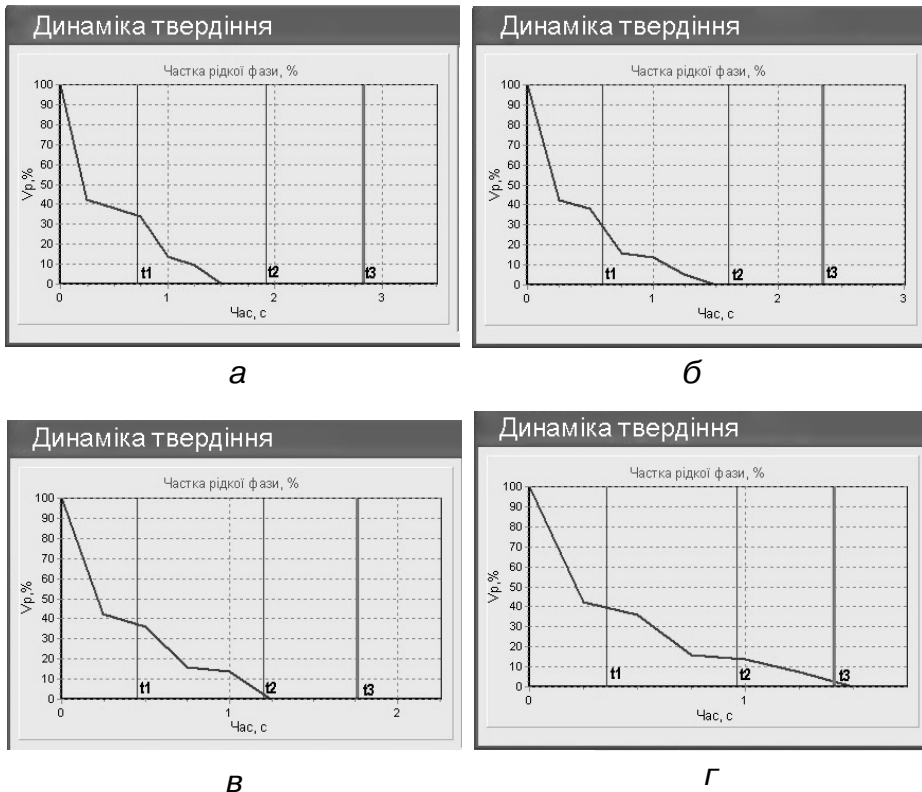


Рис. 3. Розрахункові графіки, що показують частку рідкої фази в загальному обсязі заготовки в кожний момент часу при різних швидкостях обертання колеса, об/год (а — 700, б — 1200, в — 1600, г — 2000)

Твердіння сплавів

Розрахунки виконані для можливого діапазону швидкостей обертання колеса. На розрахункових графіках (рис. 3) представлені криві, що показують частку рідкої фази в загальному обсязі заготовки в кожний момент часу. Лініями t_1 та t_2 позначені межі зони охолодження водою. Прямая t_3 є межею, через яку неприпустима наявність рідкої фази, оскільки в цій точці заготовка відділяється від колеса. Розрахунковий час затвердіння заготовки — 85 с.

Узагальнюючи виконані дослідження (рис. 4), слід зазначити, що глибина проникнення зони рідкої (або рідко-твердої) фази значною мірою залежить від швидкості обертання колеса.

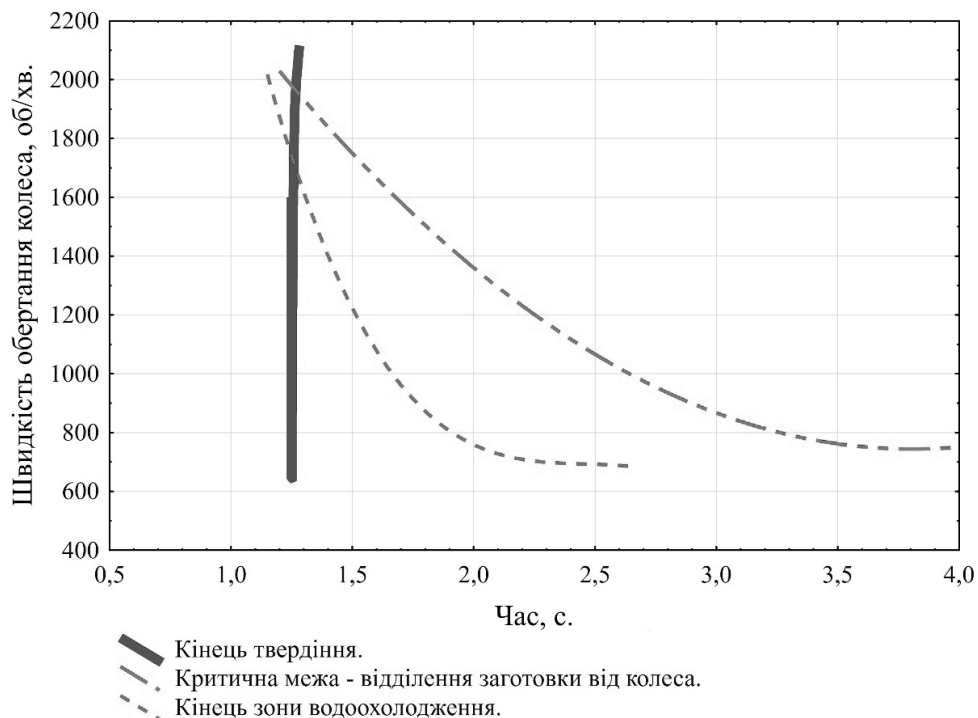


Рис. 4. Вплив швидкості обертання колеса на формування твердої фази заготовки

Значення швидкості 1800–1900 об/год і вище призводять до потрапляння межі зони твердіння за границю допустимих значень, що визначаються умовою відділення заготовки від колеса та її пластичною деформацією в процесі розправлення. Це зумовлено тим, що тверда фаза матеріалу в області температури твердіння, як правило, має вкрай низькі пластичні властивості і розтріскується при накладанні напружень, що розтягують [10].

Значення швидкості в діапазоні 1600–1800 об/год перебувають у зоні підвищеного ризику отримання внутрішніх дефектів заготовки, що спричинені умовами утрудненого живлення її внутрішніх областей рідким металом. Це зумовлено тим, що заготовка починає рухатися вгору після досягнення нижньої критичної точки колеса. Відповідно, металостатичний тиск у зумпфовій (кінцевій) зоні на заготовку стає менше. Для цього критичного діапазону дуже важливим фактором є температура перегріву міді при розливанні, оскільки при її збільшенні збільшується довжина зумпфової зони.

Найефективнішими (з точки зору продуктивності та якості заготовки) значеннями швидкості обертання колеса є діапазон 1450–1600 об/год. У цьому випадку твердіння заготовки завершується в нижній області колеса в зоні інтенсивного охолодження водою, що дозволяє виключити отримання внутрішніх дефектів заготовки (рис. 5).

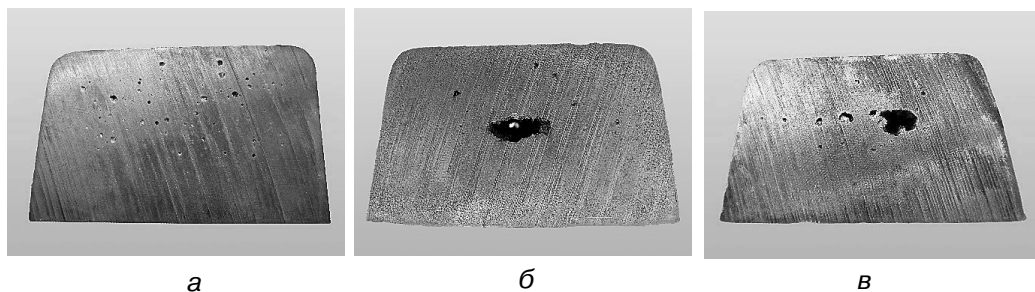


Рис. 5. Внутрішні дефекти мідної заготовки, розлитої зі швидкістю 1550 об/год (а), 1750 об/год (б) та 1850 об/год (в)

Таким чином, розроблена математична модель дозволяє імітувати твердіння мідної заготовки на колесі залежно від швидкості обертання колеса, температури розливання, умов охолодження тощо. Фактично ця інформація дозволяє внести обмеження щодо швидкості розливання та оптимізувати якість заготовки. Для забезпечення гарантованої якості заготовки (у тому числі внутрішніх обсягів) у процесі розливання міді на колесо необхідно суворо дотримуватися сукупності таких нерозривно пов'язаних між собою технологічних параметрів лиття, як швидкість руху заготовки, профіль кристалізатора, температура міді, що розливається, які враховують особливості формування твердої скоринки в умовах певного колеса. При цьому доцільно здійснювати контроль профілю робочої порожнини колеса та визначити допустимі відхилення в його зношенні. Відхилення від номінальних параметрів лиття може призвести до нерівномірного контакту скоринки, яка твердіє, зі стінкою колеса, що може стати причиною виникнення дефектів геометричної форми заготовки.

Список літератури

- 1 Nemani, V. A., Ghaffari, M., Bokati, K. S., Valizade, N., Afshari, E., Nasiri, A. (2024). Advancements in additive manufacturing for copper-based alloys and composites: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (2: 54). doi: 10.3390/jmmp8020054.
- 2 Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., Davenport, W. G. (2011). Extractive metallurgy of copper: Electrolytic refining (Eds. M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, W. G. Davenport). Elsevier. P. 251–280. doi: 10.1016/B978-0-08-096789-9.10
- 3 Savenkov, Yu. D., Dubodelov, V. I., Shpakovskiy, V. A., Kozhanov, V. A., Shtepan, E. V. (2008). Refined Ukrainian copper. Donetsk: DonNTU publishing. 176 p. [i]
- 4 Davi, J. R. (2001). Copper and copper alloys. ASM International. P. 153–157.
- 5 Smirnov, A., Ukhin, V., Verzilov, A., Naseri, A. (2020). Investigation of internal defects formation reasons in copper billet obtained at rotary continuous casting machine (CCM). *Metal and Casting of Ukraine*, 1(28), 48–54. doi: 10.15407/steelcast2020.01.048. [in Russian].
- 6 Smirnov, A., Ukhin, V., Semiriagin, S., Semenko, A., Skorobagatko, Yu. (2024). Simulation of the fluid flow in continuous casting copper slab mold for different SEN design. *Metallurgical Research and Technology*. 121, 106. doi: 10.1051/metal/2023088.
- 7 Wang, Xingjuan, Guo, Yinxing, Xiao, Pengcheng, Liu, Zengxun and Zhu, Liguang. «Numerical simulation of shrinkage porosity defect in billet continuous casting» *High Temperature Materials and Processes*, vol. 42, no. 1, 2023, pp. 20220246. <https://doi.org/10.1515/http-2022-0246>

- 8 Chakravarti, S., Sen, S. An investigation on the solidification and porosity prediction in aluminium casting process. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 21 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00190-z>
- 9 Jones, T., Strachan, R., Mackie, D., Cooper, M., Frame, B., Vorstius, J. (2021). Computational fluid dynamic simulations of solidification for improve speed of continuous cast copper. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24 (1), 24–92. doi: 10.1016/j.jestch.2020.12.009.
- 10 Li G. Transient Thermal Model of the Continuous Single-Wheel Thin-Strip Casting Process / G. Li, B.G. Thomas // *Metallurgical and Materials Transactions B.* – 1996. – Vol. 27B. № 3. – P.509-525.

Надійшла 20.07.2024

References

- 1 Nemani, V. A., Ghaffari, M., Bokati, K. S., Valizade, N., Afshari, E., Nasiri, A. (2024). Advancements in additive manufacturing for copper-based alloys and composites: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (2: 54). doi: 10.3390/jmmp8020054.
- 2 Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., Davenport, W. G. (2011). Extractive metallurgy of copper: Electrolytic refining (Eds. M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, W. G. Davenport). Elsevier. P. 251–280. doi: 10.1016/B978-0-08-096789-9.10014-9.
- 3 Savenkov, Yu. D., Dubodelov, V. I., Shpakovskiy, V. A., Kozhanov, V. A., Shtepan, E. V. (2008). Refined Ukrainian copper. Donetsk: DonNTU publishing. 176 p. [in Russian].
- 4 Davi, J. R. (2001). Copper and copper alloys. ASM International. P. 153–157.
- 5 Smirnov, A., Ukhin, V., Verzilov, A., Naseri, A. (2020). Investigation of internal defects formation reasons in copper billet obtained at rotary continuous casting machine (CCM). *Metal and Casting of Ukraine*, 1(28), 48–54. doi: 10.15407/steelcast2020.01.048. [in Russian].
- 6 Smirnov, A., Ukhin, V., Semiriagin, S., Semenko, A., Skorobagatko, Yu. (2024). Simulation of the fluid flow in continuous casting copper slab mold for different SEN design. *Metallurgical Research and Technology*. 121, 106. doi: 10.1051/metal/2023088.
- 7 Wang, Xingjuan, Guo, Yinxing, Xiao, Pengcheng, Liu, Zengxun and Zhu, Liguang. «Numerical simulation of shrinkage porosity defect in billet continuous casting» *High Temperature Materials and Processes*, vol. 42, no. 1, 2023, pp. 20220246. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0246>
- 8 Chakravarti, S., Sen, S. An investigation on the solidification and porosity prediction in aluminium casting process. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 21 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00190-z>
- 9 Jones, T., Strachan, R., Mackie, D., Cooper, M., Frame, B., Vorstius, J. (2021). Computational fluid dynamic simulations of solidification for improve speed of continuous cast copper. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24 (1), 24–92. doi: 10.1016/j.jestch.2020.12.009.
- 10 Li G. Transient Thermal Model of the Continuous Single-Wheel Thin-Strip Casting Process / G. Li, B.G. Thomas // *Metallurgical and Materials Transactions B.* – 1996. – Vol. 27B. № 3. – P.509-525.

Received 20.07.2024

O.M. Smirnov, * Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department;

e-mail: stalevoz@i.ua; ORCID 0000-0001-5247-3908

V.Ye. Ukhin, ** PhD (Engin.), engineer; e-mail: vladimir.ukhin@sheffield-refractories.de;

ORCID 0000-0003-3560-4130

V.O. Tunyk, * Junior Researcher; e-mail: vladimir.tunik@gmail.com;

ORCID 0009-0004-3777-5202

V.V. Dovbenko, *** PhD (Engin.), General Director; e-mail: dovbenko@ukr.net

A.Yu. Semenko, * PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: semenko.au@gmail.com;

ORCID 0000-0002-0448-1636

Yu.P. Skorobagatko, * PhD (Engin.), Senior Researcher;

e-mail: yulka.ukr@gmail.com; ORCID 0000-0002-1724-9895

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

** Sheffield Refractories Ukraine LLC, (Dnipro, Ukraine)

*** Produccion Enterprise Ukrcabel LLC (Kotsiubynske, Ukraine)

A STUDY OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE FORMATION OF INTERNAL DEFECTS IN THE BILLET DURING WHEEL AND BELT CASTING PROCESS

To ensure the guaranteed quality of the billet (including internal volumes) in the process of bell and wheel, it is necessary to strictly adhere to a set of such inextricably linked technological parameters of casting as: the speed of the billet movement, the profile of the mold, the temperature liquid copper, which take into account the formation features of the solid shell under the conditions of a certain wheel. A mathematical model has been developed that allows to simulate the solidification of a copper billet cast on the wheel depending on its rotation speed, pouring temperature and cooling conditions, as well as to predict the quality of the internal structure of metal products. With the help of the created mathematical model, it was established that speed values of 1800–1900 rph and higher lead to the boundary of the solidification zone falling outside the permissible values that determined by the condition of the separation of the billet from the wheel and its plastic deformation during the straightening process. Copper castings in the speed range of 1600–1800 rph are in the zone of increased risk of obtaining internal defects in the billet, which are caused by the conditions of difficult feeding of its internal areas with liquid metal. This is due to the fact that the billet begins to move up after reaching the lower critical point of the wheel. The most effective (from the point of view of productivity and quality of the billet) wheel rotating speed values are in the range of 1450–1600 rph. At the same time, it is advisable to control the profile of the working cavity of the wheel and determine the permissible deviations in its wear. Deviation from the nominal casting parameters can lead to uneven contact of the solidified shell with the wheel wall, which can cause defects in the geometric shape of the billet.

Keywords: copper, continuous casting, wheel and belt caster, mathematical model, solidification, quality prediction.