

PACS numbers: 64.70.dg, 65.40.gd, 81.05.Bx, 81.30.Fb, 81.40.Ef, 81.40.Pq, 89.20.Bb

Створення рівняння щодо визначення втрат потенційної резистивності безперервно литої заготовки впродовж циклу

О. М. Хорошилов

*Українська інженерно-педагогічна академія,
вул. Університетська, 16,
61003 Харків, Україна*

Робота стосується визначення складових частин упорядкованого та неупорядкованого процесів, що відбуваються під час циклічного руху заготовки та за їхньою допомогою дослідити як впливають технологічні параметри безперервного лиття на втрату потенційної резистивності заготовки. Розроблено методику, за якою було створено вектори дій упорядкованих і неупорядкованих процесів, що дало змогу створити рівняння щодо визначення втрати потенційної резистивності ΔR_{zt} заготовки впродовж циклу за допомогою підсумування скалярних величин проєкцій векторів на осі заготовки неупорядкованих $L_{рух}^B$ і упорядкованих процесів ξ_{Γ}^B для точки В, за допомогою співвідношення проєкцій скалярних величин головних векторів неупорядкованих $L_{рух}^B$ і упорядкованих $\xi_{\sigma_{ТВ}}^B$ процесів для точки В визначено коефіцієнт корисної дії упорядкованих процесів. Таким чином, в роботі визначено складові частки як упорядкованих, так і неупорядкованих процесів і вплив на них технологічних параметрів процесу безперервного лиття, що дало змогу: визначити, за яких умов та яким чином технологічні процеси впливають на показник втрати потенційної резистивності ΔR_{zt} , визначити за яких умов маємо змогу зменшити показник ΔR_{zt} або зробити його сталою величиною. В роботі також наведено, як впливають технологічні параметри процесу безперервного лиття на такі складові твердіння заготовки як швидкість кристалізації ξ за нормального перебігу часу, на коефіцієнт твердіння $k_{ТВ}$ і на втрату ΔR_{zt} .

Corresponding author: Oleh Mykolayovych Khoroshylov
E-mail: Olegkhoroshilov2020@gmail.com

*Ukrainian Engineering Pedagogics Academy,
16 Universytetska Str., UA-61003 Kharkiv, Ukraine*

Citation: O. M. Khoroshylov, Creation of an Equation for Determining the Loss of Potential Resistivity of a Continuously Cast Billet during the Cycle, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 6: 575–590 (2024) (in Ukrainian).
DOI: [10.15407/mfint.46.06.0575](https://doi.org/10.15407/mfint.46.06.0575)

Ключові слова: втрата резистивності заготовки, упорядковані та неупорядковані процеси, швидкість твердіння товщі шару отверділої заготовки, коефіцієнт твердіння заготовки.

The work is concerned with determining the constituent parts of the ordered and disordered processes, which occur during the cyclic movement of the billet, and with their use, investigating how the technological parameters of continuous casting affect the loss of the potential resistivity of the billet. A technique is developed, according to which action vectors of the ordered and disordered processes are created that made it possible to create the equation to determine the loss of potential resistivity ΔR_{zt} of the billet during the cycle by summing the scalar values $L_{\text{pyx}}^{\text{B}}$ of vector projections on the billet axis of the disordered and ordered processes ξ_{Γ}^{B} for point B; using the ratio of the projections of the scalar values $L_{\text{pyx}}^{\text{B}}$ of the main vectors of the disordered and ordered processes $\xi_{\text{TB}}^{\text{B}}$ for point B, the efficiency coefficient of ordered processes is determined. Thus, the work defines the constituent parts of both ordered and disordered processes and the influence on them of the technological parameters of the continuous casting process that made it possible to determine under which conditions and how technological processes affect the indicator of loss of potential resistivity ΔR_{zt} , to determine under which conditions we can reduce the ΔR_{zt} indicator or make its value constant. The paper also shows how the technological parameters of the continuous casting process affect such components of the billet hardening as the crystallization rate $\dot{\xi}$ during the normal course of time, the hardening coefficient k_{TB} and the loss of ΔR_{zt} .

Key words: loss of resistivity of the billet, ordered and disordered processes, rate of hardening of the thick of the hardened billet layer, coefficient of hardening of the billet.

(Отримано 5 грудня 2023 р.; остаточна версія — 11 березня 2024 р.)

1. ВСТУП

Для визначення ізотерми фронту кристалізації циклічного руху безперервно литої заготовки застосуємо відоме рівняння [1]:

$$\xi = k_{\text{TB}} \sqrt{t_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

де ξ — товщина шару твердої фази заготовки в момент часу $t_{\text{ц}}$ [м], k_{TB} — коефіцієнт твердіння (кристалізації) металів і сплавів [м/с^{1/2}], $t_{\text{ц}}$ — тривалість циклу [с].

В роботі [2] наведено рівняння щодо визначення швидкості кристалізації заготовки впродовж часу t :

$$\frac{\delta \xi}{\delta t} = \dot{\xi} = \frac{K}{2\sqrt{t}} \text{ або } \dot{\xi} = \frac{k_{\text{TB}}}{2\sqrt{t_{\text{ц}}}}, \quad (2)$$

де ξ та $\dot{\xi}$ — товщина шару, що затвердів (закристалізувався) впродовж циклу, та швидкість кристалізації заготовки, t — час кристалізації (для наших досліджень він дорівнюватиме тривалості циклу: $t = t_{\text{ц}}$), K — коефіцієнт, який згідно з рівнянням (1) приймемо за $k_{\text{ТВ}}$, тобто $K = k_{\text{ТВ}}$.

В роботі [3] було застосовано експериментальні дані стосовно визначення траєкторії твірних ліній твердіння заготовки з бронзи марки БрО5Ц5С5, яких було одержано методом виливання рідкої фази з лунки заготовки.

В роботі [4] було розроблено математичний модель для розрахунку положення вершини А параболи траєкторії твірних ліній у кристалізаторі горизонтальної машини безперервного лиття заготовок (ГМБЛЗ) (рис. 1). В роботі [4] було завдання визначити віддаль ΔX від вершини А параболи 7 до вихідного торця кристалізатора 6 і підтримувати деяку задану віддаль в залежності від технологічних параметрів процесу безперервного лиття.

З іншого боку є проблема щодо пониження механічних властивостей безперервно литих заготовок з деяких матеріалів. Так, в робо-

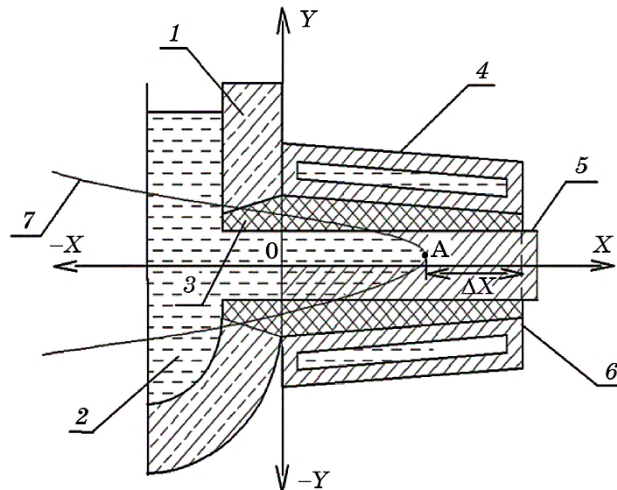


Рис. 1. Вузол твердіння (кристалізації) ГМБЛЗ із мідних стопів [3]: 1 — корпус металоприймача, 2 — рідкий розтоп, 3 — графітова втулка кристалізатора, 4 — кожух з водяним охолодженням для примусового відбору тепла від заготовки, 5 — заготовка, що затверділа, 6 — вихідний торець кристалізатора, 7 — траєкторія твірних ліній.

Fig. 1. Hardening (crystallization) unit of HCCM for copper alloys [3]: 1 is body of the metal receiver, 2 is liquid melt, 3 is graphite sleeve of the crystallizer, 4 is casing with water cooling for forced removal of heat from the hardening node, 5 is hardened billet, 6 is the outlet end of the crystallizer, 7 is the trajectory of the creative lines.

тах [5–8] показано дослідження різних варіантів резистивності заготовок. А в роботах [9–12] наведено різні методи вдосконалення процесу безперервного лиття щодо поліпшення якості заготовок.

Метою даної статті є розв'язання наступних задач. 1. Визначити, що являють собою упорядковані та неупорядковані процеси, які відбуваються під час формоутворення заготовки на ГМБЛЗ, і з яких складових частин складаються ці процеси. 2. Створити рівняння для розрахунку втрати потенційної резистивності заготовки ΔR_{zt} на основі порівняння результату дій упорядкованих і неупорядкованих процесів. 3. За допомогою рівняння визначити вплив окремих складових частин неупорядкованого процесу (НП) під час безперервного лиття мідних стопів на швидкість втрати потенційної резистивності заготовки ΔR_{zt} . 4. Визначити умови процесу безперервного лиття для перетворення коефіцієнта твердіння $k_{тв}$ зі сталої величини на змінну (тобто перетворення у швидкість твердіння заготовки в часі, що підкоряється закону квадратного кореня). 5. На основі співвідношення проєкцій скалярних величин векторів неупорядкованих та упорядкованих процесів створення рівняння щодо визначення коефіцієнта корисної дії твердіння заготовки впродовж циклу.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИКИ

Зазначимо припущення, зроблені в статті.

1. Результатом дії упорядкованого процесу формоутворення заготовки є кристалізація розтопу за рівнянням (1).

2. У результаті дії НП виникає ентропія за рахунок поширення тепла в заготовці, яке виникає через подолання сили тертя ковзання (СТК).

3. Показниками НП є швидкість $V_{рух}$, тривалість $t_{рух}$ і величина просування заготовки в циклі $L_{рух}$, які зв'язані рівнянням:

$$L_{рух} = V_{рух} t_{рух}, \quad (3)$$

де $L_{рух}$ — просування (за напрямом) заготовки в циклі [м], $V_{рух}$ [м/с] і $t_{рух}$ [с] — скалярні величини швидкості та тривалості руху заготовки в циклі (рис. 2).

4. Показниками упорядкованого процесу (УП) є величина отверділого шару заготовки $\xi_{тв}$ (1), коефіцієнт твердіння $k_{тв}$ і тривалість циклу $t_{ц}$, яка підкоряється закону квадратного кореня ($[с^{1/2}]$).

5. Вільна енергія, яка залишилася в заготовці після формоутворення в процесі безперервного лиття потенційно може бути витраченою на опір руйнуванню (резистивність) заготовки під час випробування на розтяг тощо. Тому вільну енергію в даному випадку можемо умовно назвати енергією потенційної резистивності. А втра-

ти цієї енергії впродовж циклу будемо ідентифікувати як втрату потенційної резистивності заготовки впродовж циклу та позначатимемо її як R_{zt} .

6. Звідси випливає, що ΔR_{zt} заготовки впродовж циклу може бути визначено у вигляді рівняння за результатом підсумовування скалярних величин проекцій різноспрямованих векторів упорядкованого та неупорядкованого процесів на горизонтальну вісь заготовки.

2.1. Наслідки, які відбуваються в результаті дій упорядкованих і неупорядкованих процесів під час формоутворення заготовки в кристалізаторі машини безперервного лиття

Вузол кристалізації (ВК) горизонтальної машини безперервного лиття заготовок (ГМБЛЗ) можемо назвати системою, в якій здійснюються як УП, так і НП. Загальну конструкцію ВК ГМБЛЗ наведено в роботі [3].

З таблиці 1 випливає наступне: УП визначається за експериментальними даними за наявності товщини отверділої корки заготовки (рис. 2); під час циклічного руху заготовки в кристалізаторі ГМБЛЗ за умов подолання СТК виникає НП ентропії — необоротне поширення тепла з ланок тертя по об’єму заготовки.

В даному випадку будемо досліджувати взаємопов’язані УП та НП, які можуть мати різноспрямовані вектори.

ТАБЛИЦЯ 1. Причинно-наслідкові зв’язки у процесах, які відбуваються в заготовці, що твердіє в кристалізаторі ГМБЛЗ.

TABLE 1. Cause-and-effect relations in processes, which are found in billet that solidifies in the crystallizer of HSCM.

Дії, які передують процесам	Процеси, на які витрачається енергія системи	Процеси, які відбуваються в заготовці	Наслідки дії вказаних процесів
Процесу твердіння передуює природній і примусовий відбір тепла від заготовки	Частина вільної енергії системи перетворюється в енергію твердіння (кристалізації) $E_{кр}$	Відбувається процес твердіння завдяки примусовому видаленню теплоти з заготовки за допомогою кристалізатора	Позитивні наслідки: наростає товща шару твердої фази заготовки ξ
Процесу ентропії передуює тертя в парі заготовка–кристалізатор під час подолання СТК	Частина вільної енергії системи перетворюється в теплоту та необоротно поширюється в заготовці	Відбувається неупорядкований процес (необоротного поширення тепла–ентропії E_{TS}) в заготовці	В наслідок додаткового потрапляння тепла у заготовку понижується швидкість ξ її твердіння

2.2. Створення енергетичного рівняння, що описує результат дії УП та НП під час циклічного руху заготовки в кристалізаторі машини безперервного лиття

Для процесу безперервного лиття будемо відстежувати зміну енергій системи ВК ГМБЛЗ в залежності від зміни технологічних параметрів процесу безперервного лиття. Уявімо, що вільна енергія системи витрачається на наступні процеси:

$$E^{**} = E_{кр} - TS, \quad (4)$$

де E^{**} — вільна енергія системи ВК, $E_{кр}$ — частка енергії системи, витрачена на кристалізацію заготовки УП, T — абсолютна температура [К], TS — «енергія ентропії», яка витрачається на НП, тобто створення та необоротне поширення тепла у заготовці.

Тепло в заготовці виникає в результаті тертя поверхонь заготовки та кристалізатора.

Вільну енергію системи E^{**} далі будемо ідентифікувати як потенційну енергію резистивності до повного руйнування заготовки, яка може витрачатися під час випробування зразків за розтягання:

$$E^{**} = E(R_{zt}), \quad (5)$$

де $E(R_{zt})$ — енергія резистивності.

Зробимо припущення, що решту вільної енергії системи E^{**} можна ідентифікувати як потенційну резистивність заготовки R_{zt} , що може бути витрачена на опір заготовки під час її випробування до руйнування.

В континуальній теорії пошкоджуваності наведено, що величина $(1 - \omega)$ є ефективним показником для визначення реологічного стану конструкційного матеріалу [10]. В нашому випадку безрозмірний показник $(1 - \omega)$ є безрозмірним параметром резистивності, тобто потенційною мірою опору під час руйнування заготовки R_{zt} :

$$1 - \omega = R_{zt}, \quad (6)$$

де ω — безрозмірний параметр пошкоджуваності, R_{zt} — параметр резистивності, який в нашому випадку визначимо складовим показником міри втрати потенційної резистивності заготовки під час її формоутворення.

Виходячи з рівнянь (3) та (4) визначимо часткову втрату потенційної енергії резистивності за один цикл в системі ВК:

$$\Delta E(R_{zt}) = E_{кр} - TS, \quad (7)$$

де $\Delta E(R_{zt})$ — часткова втрата потенційної енергії резистивності в

заготовці впродовж циклу.

В даній статті в енергетичній системі ВК визначимо три енергетичних складових, зміни яких будемо досліджувати: вільна енергія, яка виникає в заготовці від початку її формоутворення та витрачається на УП та НП, частина вільної енергії, яка витрачається на процес кристалізації (УП), частина вільної енергії, яка витрачається на тепло, що виникає через подолання СТК.

Крім того, на основі допущення було створено рівняння (5), яке свідчить про те, що решта вільної енергії є потенційною енергією опору руйнуванню (тобто потенційною енергією резистивності).

Далі R_{st} будемо визначати показником втрати потенційної резисти-

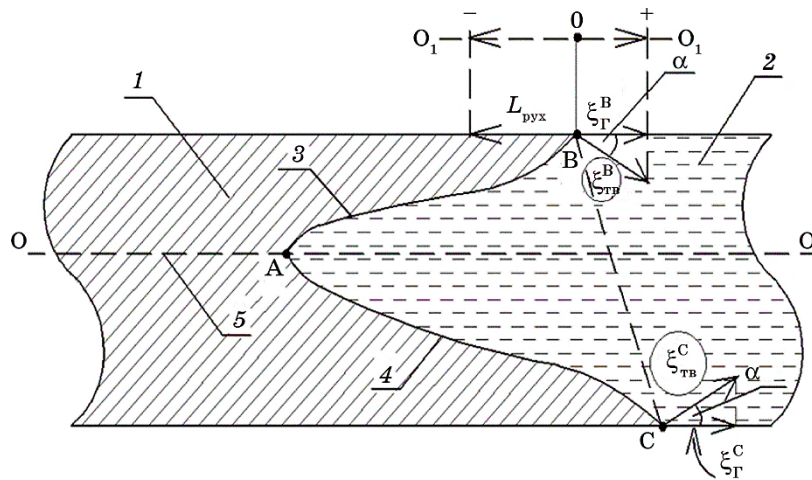


Рис. 2. Схема дії УП та НП в заготовці на ділянці кристалізації: 1 — тверда частина заготовки, 2 — рідкий стоп бронзи марки Бр05Ц5С5, 3 та 4 — верхня та нижня твірні лінії фронту кристалізації твердого металу, 5 — центральна вісь заготовки, яку спрямовано в горизонтальному напрямку, α — кут, розташований між векторами ξ_{tv}^B та проекцією скалярної величини ξ_{Γ}^B , В — точка контакту кристалізатора та заготовки (ділянка з якої вимірюємо величини ξ_{tv}^B і ξ_{Γ}^B в кінці циклічного руху заготовки), ξ_{tv}^B — вектор першого (із зовні) отверділого шару заготовки в точці В, О-О — теплова вісь заготовки, O_1-O_1 — вісь, паралельна тепловій осі заготовки.

Fig. 2. Scheme of action of OP and DP in the billet at the crystallization site: 1 is solid part of the billet, 2 is liquid bronze alloy of the Бр05Ц5С5 brand, 3 and 4 are upper and lower generating lines of the solid-metal crystallization front, 5 is the central axis of the billet, which is directed along the horizontal direction, α is the angle between the vectors ξ_{tv}^B and the projection of the scalar ξ_{Γ}^B value, В is the point of contact between the crystallizer and the billet (the area, from which we measure the values ξ_{tv}^B and ξ_{Γ}^B at the end of the cyclic movement of the billet), О-О is the thermal axis of the billet, O_1-O_1 is the axis parallel to the thermal axis of the billet.

вности заготовки впродовж одного циклу руху заготовки за рівнянням (7).

Таким чином, на основі визначення конкретних УП та НП було створено рівняння (4) щодо розподілу вільної енергії системи на дії цих процесів.

2.3. Методика розташування скалярних величин різноспрямованих векторів УП та НП на тепловій (або центральній) осі заготовки

Під час циклічного руху заготовки у кристалізаторі здійснюються наступні процеси: УП — це твердіння заготовки, яке утворюється за рахунок примусового відбору тепла від поверхні заготовки за законом твердіння, що відбувається за рівнянням (1); НП пов'язується з подоланням СТК, що приводить до виділення та необоротного поширення тепла в заготовці, що впливає на УП шляхом зменшення швидкості процесу кристалізації (табл. 1).

Робимо припущення, що для розрахунку втрати потенційної резистивності ΔR_{zt} заготовки необхідно: створити систему оцінки величин векторів УП та НП в однаковій розмірності та на одній осі координат (наприклад на горизонтальній осі заготовки) ГМБЛЗ, підсумувати скалярні величини векторів на горизонтальній осі; а результатом буде втрата показника ΔR_{zt} впродовж одного циклу руху заготовки.

Головний результат УП ξ буде вимірюватися лінійним розміром за рівнянням (1) або за рівнянням:

$$\xi = \dot{\xi} t_{\text{ц}}. \quad (8)$$

де $\dot{\xi}$ — швидкість зростання величини отверділого шару (складова частина УП) заготовки, наведена в роботах [2, 3], [м/с].

Головний результат дії НП ідентифікуємо просуванням заготовки в кристалізаторі ($L_{\text{рух}}$). Рівняння (3) носить дисипативний характер, який проявляється в наступному: під час руху заготовки в кристалізаторі виникає тертя в парі «заготовка–кристалізатор» і виділяється теплота, яка потім необоротно поширюється в заготовці, знижуючи водночас швидкість кристалізації.

Згідно з рисунком 2, вектор твердіння в точці В $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{В}}$ спрямований перпендикулярно до твірної лінії в точці В, а проекція вектора твердіння на горизонтальну вісь буде мати скалярну величину $\xi_{\text{Г}}^{\text{В}}$ на осі, яка паралельна тепловій осі заготовки О–О. Якщо використаємо кут α між векторами $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{В}}$ і $\xi_{\text{Г}}^{\text{В}}$, то скалярна величина твердіння заготовки в горизонтальному напрямку для точки В (рис. 2) буде визначатися так:

$$\xi_{\text{Г}}^{\text{В}} = \xi_{\text{ТВ}}^{\text{В}} \cos \alpha. \quad (9)$$

З рисунку 2 випливає, що за допомогою рівняння (3) можемо визначити величину просування заготовки $L_{\text{рух}}^{\text{B}}$ впродовж циклу для точки В.

За допомогою рівняння (1) визначимо величину товщини отверділого шару заготовки $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$ впродовж циклу ($t_{\text{ц}}$), а за допомогою рівняння (9) для точки В розрахуємо скалярну величину ξ_{Γ}^{B} вектора твердіння на тепловій осі заготовки. Тобто за значення кута α (рис. 2), яке в даному випадку дорівнює 30° , випливає, що внесок енергії системи в горизонтальну складову процесу твердіння дорівнює приблизно 50%.

2.4. Створення рівняння визначення втрати потенційної резистивності заготовки (ΔR_{zt}) в процесі безперервного лиття

Підсумуємо горизонтальні проекції на вісь О–О заготовки круглого поперечного перерізу для визначення втрати показника ΔR_{zt} впродовж циклу (рис. 2). Відносно точки В на осі О–О розташуємо скалярні величини проекції (показник НП $L_{\text{рух}}^{\text{B}}$) та проекцію УП $+\xi_{\Gamma}^{\text{B}}$.

За аналогією з рівнянням (6) проведемо підсумовування величин проекцій скалярних величин УП та НП й одержимо втрату потенційної резистивності впродовж циклу ΔR_{zt} за рівнянням

$$\Delta R_{zt} = K(\xi_{\Gamma}^{\text{B}} \cos \alpha - L_{\text{рух}}^{\text{B}}), \quad (10)$$

де K — коефіцієнт [1/м], $\xi_{\Gamma}^{\text{B}} = k_{\text{ТВ}} \sqrt{t_{\text{ц}}}$.

Таким чином, визначено, що результати дії УП та НП мають однакову розмірність (метри). В такому випадку показник ΔR_{zt} можна визначити як результат підсумовування скалярних величин проекцій різноспрямованих векторів УП ξ_{Γ}^{B} та НП $L_{\text{рух}}^{\text{B}}$ на горизонтальній осі заготовки (рис. 2).

2.5. Роль проекцій скалярних величин векторів на горизонтальну вісь заготовки у визначенні коефіцієнта корисної дії УП безперервного лиття

Якщо вектор руху заготовки $L_{\text{рух}}$ з точки В спрямований паралельно осі заготовки, то вектор твердіння заготовки $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$ спрямований з цієї ж точки під кутом 90° до траєкторій твірної лінії (3 на рис. 2). Тобто скалярна величина вектора $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$ на осі заготовки має горизонтальну складову ξ_{Γ}^{B} .

З рисунку 2 випливає, що точка В на твірній лінії (3 на рис. 2) являє собою співвідношення УП та НП під час твердіння заготовки для конкретної тривалості твердіння (одного циклічного руху заготовки).

Звідси випливає, що відношення скалярних величин УП та НП для точки В можливо перетворити в коефіцієнт корисної дії за допомогою співвідношення

$$\eta_B = \frac{\xi_{ТВ}^B}{L_{пyx}^B} - 100\%, \quad (11)$$

де η_B — коефіцієнт корисної дії УП (твердіння заготовки в точці В) в порівнянні з НП (ентропії) за умов, що на ці процеси виділялося однакову та достатню кількість енергії з вільної енергії системи, $\xi_{ТВ}^B$ — результат дії УП (просування фронту твердіння заготовки) впродовж циклу [м], $L_{пyx}^B$ — результат дії НП (просування заготовки впродовж циклу) за виділення та поширення тепла в заготовці [м].

2.6. Роль горизонтальних проєкцій скалярних величин векторів у визначенні втрати потенційної резистивності заготовки впродовж циклу

В рівняння (10) замість ξ_{Γ}^B підставимо його значення для точки В з (1) $\xi_{\Gamma}^B = k_{ТВ} \sqrt{t_{ц}}$ й одержимо

$$\Delta R_{zt} = K(k_{ТВ} \sqrt{t_{ц}} \cos \alpha - L_{пyx}). \quad (12)$$

Із застосуванням рівняння (8) одержимо

$$\Delta R_{zt} = K(2\xi_{ц}^{\dot{}} \cos \alpha - L_{пyx}). \quad (13)$$

Таким чином, в методичному розділі: було ідентифіковано УП і НП (та їхні складові) за характером їхньої дії під час формоутворення заготовки на ГМБЛЗ; крім того, на основі рівняння (5) створено рівняння для визначення втрати потенційної резистивності заготовки (R_{zt}) за умов, що

$$E^{**} = R_{zt}; \quad (14)$$

створено два рівняння на основі скалярних величин проєкцій векторів неупорядкованих та упорядкованих процесів: за допомогою підсумування скалярних величин проєкцій головних векторів неупорядкованих $L_{пyx}^B$ та упорядкованих ξ_{Γ}^B процесів для точки В створено рівняння (11)–(13) щодо ідентифікації втрати потенційної резистивності ΔR_{zt} заготовки; за допомогою співвідношення проєкцій скалярних величин головних векторів неупорядкованих та упорядкованих процесів для довільного часу процесу твердіння заготовки створено рівняння (10) для визначення коефіцієнта корисної дії твердіння заготовки впродовж циклу.

3. ОБГОВОРЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН УП ТА НП НА ВТРАТУ ПОТЕНЦІЙНОЇ РЕЗИСТИВНОСТІ ЗАГОТОВКИ

Визначення показників процесів, що проходять в кристалізаторі машини безперервного лиття під час циклічного руху заготовок, будемо оцінювати окремо для кожного випадку за умов $V_{\text{рух}} = \text{const}$, $L_{\text{рух}} = \text{const}$ і $t_{\text{рух}} = \text{const}$.

3.1. Визначення залежностей складових частин УП та НП від тривалості циклічного руху заготовки $t_{\text{ц}}$ за умов $V_{\text{рух}} = \text{const}$

Визначимо як змінюються показники $\xi \cdot 10^{-3}$ м, $k_{\text{ТВ}}, 10^{-3} \cdot \text{м/с}^{1/2}$, $\dot{\xi} \cdot 10^{-3}$, м/с, $L_{\text{рух}}$ та $\Delta R_{zt} \cdot 10^{-3}$ залежно від тривалості циклу $t_{\text{ц}}$ заготовки.

Визначимо вплив технологічного параметра $t_{\text{ц}}$ на показники $k_{\text{ТВ}}$, $\dot{\xi}$ та ΔR_{zt} в процесі безперервного лиття за умов $V_{\text{рух}} = \text{const}$.

Визначено, що під час формування заготовки в ГМБЛЗ здійснюються наступні УП та НП: 1) УП характеризується тим, що за видалення тепла від заготовки формуються твірні лінії (2 та 3 на рис. 2), які переміщуються за вектором $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$ зі швидкістю $\dot{\xi}$ (8) або $k_{\text{ТВ}}$ (1); 2) за умов процесу безперервного лиття НП виникає в наслідок тертя двох поверхонь через подолання СТК, що приводить до наступних дій: по-перше, енергія, забрана з вільної системи, перетворюється в тепло, яке необоротно розсіюється в об'ємі заготовки, по-друге, додавання теплоти в систему «заготовка–кристалізатор» понижує швидкість кристалізації стопу, по-третє, на рис. 3 (4) збільшення $L_{\text{рух}}$ в 3,0 рази приводить до зменшення показника $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$ тільки в 1,73 рази (тобто він зменшується в $3^{1/2} \cong 1,73$ рази, що становить 57,7%), з чого випливає, що зі 100% вільної енергії, витраченої з системи, тільки 57,7% витрачається на твердіння заготовки $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$, а решта 42,3% енергії витрачається на дисипативний процес необоротного поширення тепла в заготовці.

З рисунку 3 простежується зв'язок показників НП та УП. Так, показано, що для $V_{\text{рух}} = \text{const}$ (НП) коефіцієнт $k_{\text{ТВ}}$ (УП) є сталою величиною. Крім того, з рисунку 3 випливає, що одночасне зростання показників НП ($L_{\text{рух}}$) і $t_{\text{рух}}$ приводить, з одного боку, до пониження показників УП, таких як швидкість твердіння заготовки ($\dot{\xi}$, 3 на рис. 3), а з іншого боку, приводить до збільшення товщини корки заготовки $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$ із одночасним збільшенням показників технологічного (НП) процесу: $t_{\text{ц}}$ та $L_{\text{рух}}$ (4).

Також необхідно додати, що показник R_{zt} в даних умовах має більшу інтенсивність своєї втрати (в 4,27 рази), ніж інтенсивність зміни показника $L_{\text{рух}}$ (в 3,0 рази).

Залежності 3 та 5 (рис. 3) за умов $V_{\text{рух}} = \text{const}$ мають прямо пропорційну залежність — $\Delta R_{zt} = f(L_{\text{рух}})$.

Крім того, дослідження показали, що $L_{\text{рух}}$ і $t_{\text{ц}}$ є не тільки техноло-

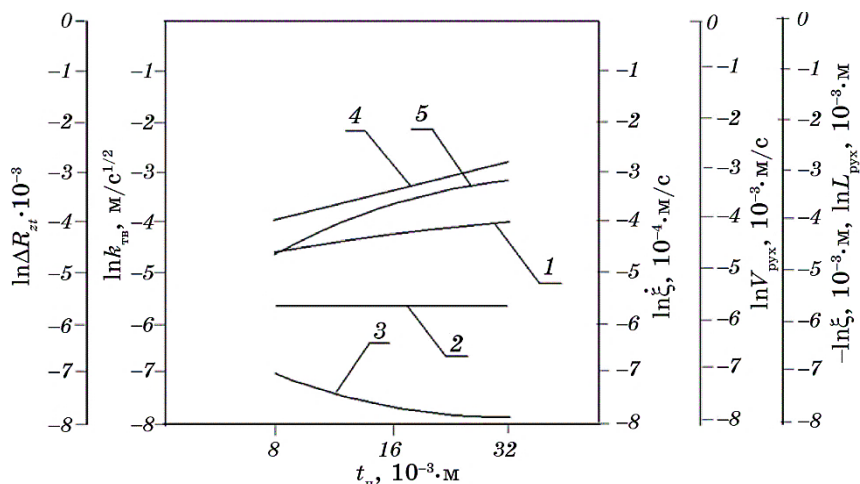


Рис. 3. Вплив тривалості руху заготовки $t_{\text{рух}}$ на складові частини УП та НП і на часткову втрату потенційної резистивності ΔR_{zt} за умов, що швидкість циклічного руху $V_{\text{рух}} = \text{const}$: 1 — товщина отверділої корки заготовки продовж циклу $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$, 2 — коефіцієнт твердіння заготовки $k_{\text{ТВ}} \cdot 10^{-3}$, 3 — швидкість кристалізації заготовки $\xi \cdot 10^{-3}$, 4 — величина просування заготовки упродовж циклу $L_{\text{рух}} \cdot 10^{-3}$, 5 — втрати потенційної резистивності заготовки $\Delta R_{zt} \cdot 10^{-3}$.

Fig. 3. The influence of the duration of the movement of the billet $t_{\text{рух}}$ on the components of OP and DP and on the partial loss of potential resistivity ΔR_{zt} under the conditions that the speed of cyclic movement $V_{\text{рух}} = \text{const}$: 1 is the thickness of the hardened crust of the billet during the cycle $\xi_{\text{ТВ}}^{\text{B}}$, 2 is hardening coefficient of the billet $k_{\text{ТВ}} \cdot 10^{-3}$, 3 is velocity of crystallization of the billet $\xi \cdot 10^{-3}$, 4 is the size of the advance of the billet during the cycle $L_{\text{рух}} \cdot 10^{-3}$, 5 is partial loss of the potential resistivity of the billet $\Delta R_{zt} \cdot 10^{-3}$.

гічними параметрами процесу безперервного лиття, але й показниками НП в системі «кристалізатор–заготовка».

3.2. Визначення залежностей складових частин УП та НП від тривалості циклічного руху заготовки $t_{\text{ц}}$ за умов $L_{\text{рух}} = \text{const}$

Визначимо вплив технологічного параметра $V_{\text{рух}}$ за умов $L_{\text{рух}} = \text{const}$ на показники $k_{\text{ТВ}}$ і ξ в процесі безперервного лиття.

З рисунку 4 за умови, що $L_{\text{рух}} = \text{const}$ та зі збільшенням $V_{\text{рух}}$ в 3,0 рази і одночасним зменшенням тривалості циклу $t_{\text{ц}}$ в 3,0 рази, одержали наступні результати.

1. Коефіцієнт $k_{\text{ТВ}}$ перейшов зі сталого стану ($k_{\text{ТВ}} = \text{const}$) у змінний ($k_{\text{ТВ}} = \text{var}$), зі зміною тривалості циклу $t_{\text{ц}}$ в 3,0 рази збільшився в 1,73 рази і показує залежність $k_{\text{ТВ}}$ за законом квадратного кореня.

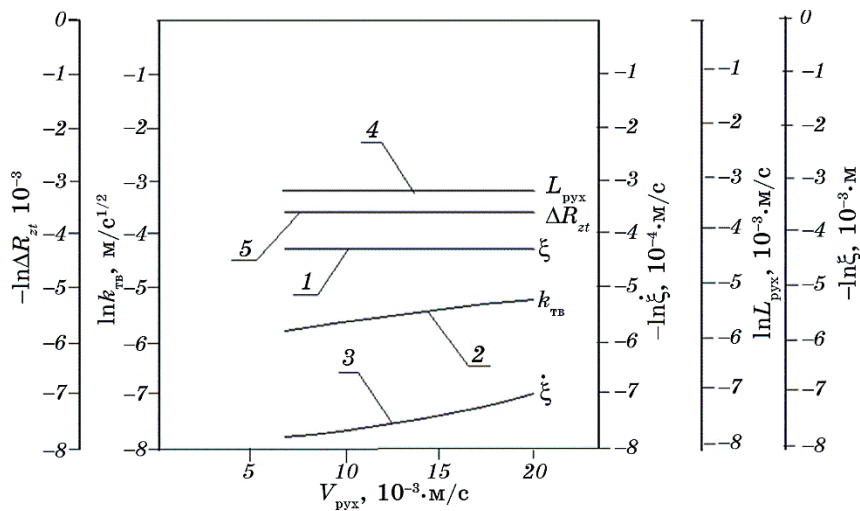


Рис. 4. Вплив швидкості руху заготовки V_{pyx} на складові частини УП та НП і на часткову втрату потенційної резистивності ΔR_{zt} за умов, що тривалість циклічного руху $L_{pyx} = \text{const}$: 1 — товщина отверділої корки заготовки продовж циклу ξ , 2 — коефіцієнт твердіння заготовки $k_{ТВ} \cdot 10^{-3}$, 3 — швидкість кристалізації $\dot{\xi} \cdot 10^{-3}$, 4 — величина просування заготовки упродовж циклу $L_{pyx} \cdot 10^{-3}$, 5 — втрати потенційної резистивності $\Delta R_{zt} \cdot 10^{-3}$.

Fig. 4. The influence of the speed of movement of the billet V_{pyx} on the components of OP and DP and on the partial loss of potential resistivity ΔR_{zt} under the conditions that the duration of the cyclic movement $L_{pyx} = \text{const}$: 1 is the thickness of the hardened crust of the billet during the cycle ξ , 2 is hardening coefficient of the billet $k_{ТВ} \cdot 10^{-3}$, 3 is speed of crystallization $\dot{\xi} \cdot 10^{-3}$, 4 is the size of the advance of the billet during the cycle $L_{pyx} \cdot 10^{-3}$, 5 is partial loss of potential resistivity $\Delta R_{zt} \cdot 10^{-3}$.

2. Показник $\dot{\xi}$ також залежить від тривалості циклу (8), показуючи, що швидкість кристалізації, яку розраховують за рівнянням (2), змінюється із нормальним перебігом часу.

3. За умови $L_{pyx} = \text{const}$ чітко висвітлився зв'язок показника ΔR_{zt} з показником L_{pyx} , оскільки $\Delta R_{zt} = \text{const}$. Крім того, маємо, що L_{pyx} є головним чинником НП в системі «заготовка-кристалізатор», який впливає на показник ΔR_{zt} . Це має наступне пояснення: за сталого показника L_{pyx} в заготовку потрапляє стабільна кількість тепла, що й обумовлює стабільне значення показника ΔR_{zt} .

3.3. Визначення залежностей складових частин УП та НП від швидкості руху заготовки V_{pyx} за умов $t_{pyx} = \text{const}$

Визначимо вплив технологічного параметра V_{pyx} за умови $t_{ц} = \text{const}$

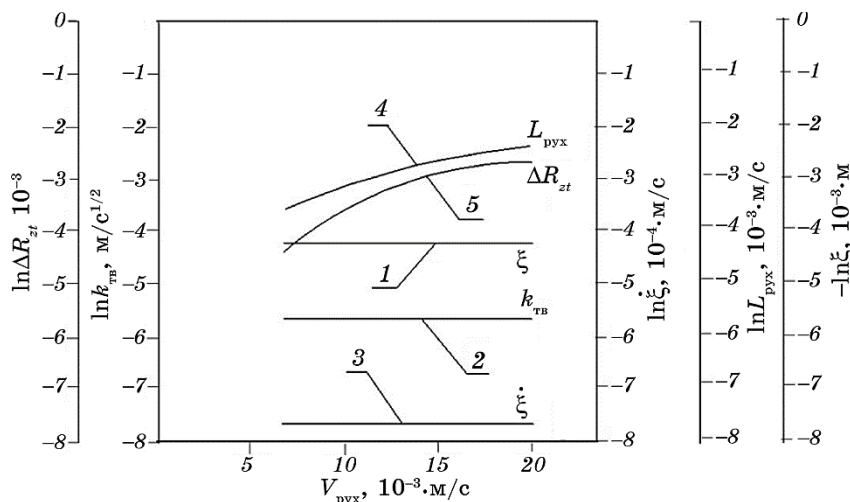


Рис. 5. Вплив швидкості руху заготовки $V_{\text{рух}}$ на складові частини УП та НП і на часткову втрату потенційної резистивності ΔR_{zt} за умов, що тривалість циклічного руху $t_{\text{ц}} = \text{const}$: 1 — товщина отверділої корки заготовки упродовж циклу ξ , 2 — коефіцієнт твердіння заготовки $k_{\text{тв}} \cdot 10^{-3}$, 3 — швидкість кристалізації $\xi \cdot 10^{-3}$, 4 — величина просування заготовки упродовж циклу $L_{\text{рух}} \cdot 10^{-3}$, 5 — втрати потенційної резистивності $\Delta R_{zt} \cdot 10^{-3}$.

Fig. 5. The influence of the speed of movement of the billet $V_{\text{рух}}$ on the components of OP and DP and on the partial loss of potential resistivity ΔR_{zt} under the conditions that the duration of cyclic movement $t_{\text{ц}} = \text{const}$: 1 is the thickness of the hardened crust of the billet during the cycle ξ , 2 is hardening coefficient of the billet $k_{\text{тв}} \cdot 10^{-3}$, 3 is speed of crystallization $\xi \cdot 10^{-3}$, 4 is the size of the advance of the billet during the cycle $L_{\text{рух}} \cdot 10^{-3}$, 5 is partial loss of potential resistivity $\Delta R_{zt} \cdot 10^{-3}$.

на показники $L_{\text{рух}}$ і ΔR_{zt} в процесі безперервного лиття.

На рисунку 5 також показано зв'язок показників НП та УП. За сталого показника НП ($t_{\text{рух}} = \text{const}$) показник УП $k_{\text{тв}}$ також є сталою величиною.

4. ВИСНОВКИ

1. В статті визначено, що являють собою УП та НП, які здійснюються під час формоутворення заготовок на ГМБЛЗ, в тому числі заготовок з мідних стопів: до УП відноситься процес кристалізації, який визначається за рівнянням (1) і має складові частини — коефіцієнт твердіння $k_{\text{тв}}$ і тривалість процесу твердіння, який підкоряється закону квадратного кореня; до НП відноситься процес тертя під час циклічного руху заготовки в парі «кристалізатор—заготовка», що приводить до виділення та необоротного поширен-

ня теплоти в об'ємі заготовки, що приводить до зменшення швидкості ξ твердіння (кристалізації). В роботі ідентифіковано технологічні параметри процесу безперервного лиття стосовно чинників НП, які мають наступну ієрархію: головним чинником процесу безперервного лиття є величина просування заготовки $L_{\text{рух}}$ та її складові за рівнянням (3) $V_{\text{рух}}$ і $t_{\text{рух}}$; до головного чинника УП відноситься величина отверділого шару заготовки ξ за рівнянням (1), а до другорядних чинників УП відносяться $k_{\text{ТВ}}$ і $t_{\text{ц}}$.

2. Створено рівняння (11)–(13) для визначення втрати потенційної резистивності під час руху заготовки впродовж одного циклу як результат дії двох різноспрямованих векторів.

3. Розрахунки за формулами (12) або (13) показали наступні показники втрати потенційної резистивності заготовки ΔR_{zt} в залежності від змін технологічних параметрів безперервного лиття: за умов $V_{\text{рух}} = \text{const}$ (рис. 3) із збільшенням показників $t_{\text{рух}}$ і $L_{\text{рух}}$ в 3,0 рази одержали збільшення втрати показника ΔR_{zt} в 4,27 рази; однак за умов $L_{\text{рух}} = \text{const}$ (рис. 4) результатом стало $\Delta R_{zt} = \text{const}$, тобто одержали, що показник ΔR_{zt} прямо пропорційно залежить від показника $L_{\text{рух}}$; за умов збільшення величин показників $V_{\text{рух}}$ і $L_{\text{рух}}$ в 3,0 рази одержали збільшення втрати показника ΔR_{zt} в 5,23 рази (рис. 5); взагалі відмітимо, що впродовж одного циклу величина показника ΔR_{zt} знаходиться в пропорційній залежності від $L_{\text{рух}}$, але варіабельна пара « $V_{\text{рух}}$ і $L_{\text{рух}}$ » схильна до більших втрат ΔR_{zt} , аніж пара « $t_{\text{рух}}$ і $L_{\text{рух}}$ ».

4. Визначено умови для перетворення коефіцієнта твердіння заготовки $k_{\text{ТВ}}$ зі сталої величини $k_{\text{ТВ}}$ в змінну величину; за умов $V_{\text{рух}} = \text{const}$ і $t_{\text{рух}} = \text{const}$ коефіцієнт $k_{\text{ТВ}}$ є сталою величиною; коефіцієнт $k_{\text{ТВ}}$ за умов $L_{\text{рух}} = \text{const}$ і збільшення $V_{\text{рух}}$ в 3,0 рази став змінною величиною та збільшився в 1,73 рази, тобто $k_{\text{ТВ}}$ перетворився в швидкість твердіння заготовки в часі, що підкоряється закону квадратного кореня.

5. Таким чином, в роботі визначено складові частки УП і НП та вплив на них технологічних параметрів процесу безперервного лиття, що дало змогу: визначити, за яких умов та яким чином технологічні процеси впливають на показник втрати потенційної резистивності ΔR_{zt} ; визначили, за яких умов маємо змогу зменшити показник ΔR_{zt} або зробити цей показник сталою величиною.

6. На основі співвідношення проєкцій скалярних величин векторів НП та УП було створено рівняння (10) щодо визначення коефіцієнта корисної дії твердіння заготовки впродовж циклу.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. П. Горущкіна, *Теорія ливарних процесів* (Київ: НМК ВО: 1993).
2. J. Savage, *J. Iron and Steel Institute*, **200**: 41 (1962).

3. О. М. Хорошилов, О. С. Подоляк, О. І. Пономаренко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **44**, № 2: 175 (2022).
4. О. Н. Хорошилов, *Процессы литья*, № 1: 22 (2001).
5. Ю. Я. Мешков, С. О. Котречко, К. Ф. Сорока, *Металлофиз. новейшие технол.*, **44**, № 10: 1377 (2022).
6. P. Steblyanko, K. Domichev, and A. Petrov, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 1: 107 (2021).
7. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 10: 1377 (2021).
8. Yu. Ya. Meshkov, G. P. Zimina, and N. M. Stetsenko, *Progress in Physics of Metals*, **23**, No. 4: 744 (2022).
9. В. В. Наумик, *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 1: 99 (2010).
10. O. Khoroshylov, V. Kuryliak, and O. Podoliak, *History Sci. Technol.*, **10**, Iss. 2: 217 (2020).
11. J. Yamaguchi, T. Sawai, and T. Nakashima, *Change and Development of Continuous Casting Technology* (Metallurgy: 2013).
12. Р. В. Тельович, Ю. А. Гарасим, Г. В. Кречковська, Н. О. Бондаревська, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 11: 1489 (2018).

REFERENCES

1. L. P. Horushkina, *Teoriya Lyvarnykh Protseviv* [Theory of Casting Processes] (Kyiv: NMK VO: 1993) (in Ukrainian).
2. J. Savage, *J. Iron and Steel Institute*, **200**: 41 (1962).
3. О. М. Khoroshylov, О. С. Podolyak, and О. І. Ponomarenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 2: 175 (2022) (in Ukrainian).
4. О. Н. Khoroshilov, *Protseivy Lit'ya*, No. 1: 22 (2001) (in Russian).
5. Yu. Ya. Meshkov, S. O. Kotrechko, and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 10: 1377 (2022) (in Ukrainian).
6. P. Steblyanko, K. Domichev, and A. Petrov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 1: 107 (2021) (in Ukrainian).
7. Yu. Ya. Meshkov and H. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 10: 1377 (2021) (in Ukrainian).
8. Yu. Ya. Meshkov, G. P. Zimina, and N. M. Stetsenko, *Progress in Physics of Metals*, **23**, No. 4: 744 (2022).
9. V. V. Naumyk, *Novi Materialy i Tekhnolohiyi v Metalurhiyi ta Mashynobuduvanni*, No. 1: 99 (2010) (in Ukrainian).
10. O. Khoroshylov, V. Kuryliak, and O. Podoliak, *History Sci. Technol.*, **10**, Iss. 2: 217 (2020).
11. J. Yamaguchi, T. Sawai, and T. Nakashima, *Change and Development of Continuous Casting Technology* (Metallurgy: 2013).
12. R. V. Teliovich, J. A. Garasym, H. V. Krechkovska, and N. O. Bondarevska, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 11: 1489 (2018) (in Ukrainian).