

ON THE ISSUE OF USING FOREIGN STEEL BRANDS FOR DOMESTIC MAIN PIPELINES

In Ukraine, in 2019-2022, a modern imported line with a full technological cycle and specialized equipment for the production of large-diameter welded steel pipes was put into operation at the enterprise NPP UKRTRUBOIZOL. This line provides the possibility of production according to technical requirements in accordance with modern international standards and norms.

In the production of large-diameter welded straight-seam steel pipes according to foreign technical documentation, thick-sheet rolled products from low-carbon and low-alloy steel grades are used.

Now many consumers are faced with the problem of obtaining large-diameter welded pipes from rolled products made of steel according to domestic regulatory documentation. They have to order sheet from foreign manufacturers. Since pipeline transport systems are dangerous man-made objects, the choice of steel sheet is an extremely important task.

In the world, for the production of large-diameter welded pipes, thick-sheet rolled products from low-carbon and low-alloy steels and sheets from low-alloy steels after thermomechanical treatment (under controlled rolling) are used. When choosing the right sheet, a significant number of questions arise regarding the selection of indicators of the mechanical properties of steel. These questions must be resolved.

The article is aimed at highlighting issues regarding ways to solve problems with the use of foreign steel grades for foreign-made main pipelines

Keywords: *Large-diameter welded main pipes, low-carbon and low-alloy steels, low-carbon steels with thermomechanical treatment, tensile strength, yield strength, relative elongation, impact toughness.*

Стаття надійшла 09.09.2025р.

УДК 669.162.22

doi.org/10.31498/2522-9990302025347109

Черевко О.О., Лубкін Б.В.

ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЮ І МАСИ МЕТАЛУ ТА ШЛАКУ В ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МБЛЗ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті представлено математичну модель визначення рівня і маси металу та шлаку в проміжному ковші машини безперервного лиття заготовок. Розглянуті методи вимірювання рівня розплаву в ковші, включаючи тензометричні, індукційні, ультразвукові датчики. Проаналізовано важливість контролю і регулювання співвідношення рівнів металу і шлаку, та вплив цих параметрів на якість вихідної продукції.

Запропонована в статті модель базується на використанні індукційного датчика, вмонтованого у футеровку ковша, для безперервного вимірювання рівнів металу і шлаку шляхом аналізу електричних параметрів вимірювального контуру. Струм та індуктивність контуру електричного ланцюга датчика змінюються в залежності від рівня металу та шлаку, що дозволяє точно визначати їх співвідношення.

Для розрахунку маси металу та шлаку в моделі використовується залежність їх об'ємів від висоти заповнення ковша, з урахуванням температури розплаву і змін у щільності металу

та шлаку в залежності від температури, що дозволяє забезпечити високий рівень точності розрахунків.

Розроблена математична модель є ефективним інструментом для автоматичного керування процесом лиття на МБЛЗ. Її використання в автоматизованій системі управління розливкою сталі дозволить забезпечити більш точне розділення фаз металу та шлаку, що в свою чергу знизить ризик потрапляння шлаку в кристалізатор і покращить якість зливків і їх механічні властивості. Підтримка стабільного рівня металу в проміжному ковші забезпечує рівномірне заповнення кристалізатора, що важливо для рівномірного охолодження і кристалізації зливка. Крім того, модель дозволяє підвищити ефективність роботи МБЛЗ, запобігаючи втратам металу через передчасне завершення розливки.

Таким чином використання моделі дозволить оптимізувати технологічний процес, зменшити кількість дефектів в заготовках, підвищити якість продукції та знизити ризик аварійних ситуацій, пов'язаних з переливом металу.

Ключові слова: Машина безперервного лиття заготовок, проміжний ківш, рівень металу, рівень шлаку, вимірювання, індукційний датчик, комп'ютерне моделювання, система автоматичного регулювання.

Постановка проблеми. Для отримання зливка з однорідною кристалічною структурою та запобігання утворенню дефектів у заготовках необхідно забезпечити високу точність підтримки оптимального рівня металу в кристалізаторі. У свою чергу, для підтримки сталої гідродинаміки при подачі металу в кристалізатор, слід забезпечити стабільність рівня металу в проміжному ковші [1].

У процесі розливання сталі на МБЛЗ згідно з технологічними вимогами розплавлений метал не повинен перебувати в контакті з атмосферою, оскільки це призводить до його окислення та збільшення вмісту розчинених газів. Крім того, наявність відкритого дзеркала металу призводить до швидкого охолодження. Тому в сталерозливний і проміжний ковші після заливки металу додають спеціальні шлакоутворювальні суміші. В результаті взаємодії металу та сумішей утворюється шлак, який спливає та покриває поверхню металу, захищаючи його від окислення. Випуск шлаку зі стального ковша вкрай небажаний, оскільки шлак, що потрапив у промковш, може в подальшому потрапити в кристалізатор, що призводить до дефекту в заготовках. Якщо ж припинити розливку занадто рано, значна кількість якісного металу разом зі шлаком піде у відвал. Тому підвищення точності оцінки рівнів металу в сталевому ковші та кристалізаторі є досить актуальним завданням [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ланцюзі технологічних переливів на МБЛЗ проміжний ківш є буферною ємністю, за допомогою якого узгоджується надходження металу зі сталерозливного ковша в кристалізатор. При цьому забезпечується усереднення залитої порції металу і запобігання потраплянню шлаку в кристалізатор [1].

Регулювання рівня сталі в проміжному ковші та кристалізаторі є однією з основних операцій, що визначають якість зливка та ефективність роботи МБЛЗ [3]. Збільшення рівня сталі в промковші спричиняє переповнення кристалізатора. Це порушує тепловий баланс, призводячи до надлишку тепла. Як наслідок, доводиться знижувати швидкість витягування зливка, що негативно впливає на продуктивність установки і є неприйнятним. І навпаки, раптове зменшення рівня металу в промковші призведе до зниження рівня сталі в кристалізаторі, зміщення теплового балансу зони кристалізації металу і погіршення роботи механізмів витягування, особливо в разі застосування радіальних МБЛЗ, а також до можливості прориву металу. Тому АСУ рівнем і масою металу в промковші завжди приділялася і приділяється велика увага.

У проміжному ковші рівень розплаву можна вимірювати безпосереднім або непрямим шляхом. Розроблено та випробувано різноманітні конструкції датчиків рівня металу:

тензометричні, індукційні, радіоізотопні, фотоелектричні, акустичні, ультразвукові тощо, а також способи регулювання зміною витрати металу зі сталь- і промковша, з обох одночасно, зміною швидкості витягування зливка, зміною витрати металу і швидкості витягування одночасно [4].

На цей час на більшості МБЛЗ оцінка рівня відбувається непрямим способом за допомогою вимірювання маси ковша з металом і перерахунку показань в рівень [5]. Підтримка постійного рівня в промковші при безперервному зниженні рівня в стальковші в процесі розливу досягається за рахунок управління шибером стальковша.

Метою роботи є розробка математичної моделі визначення рівню і маси металу та шлаку в проміжному ковші МБЛЗ для удосконалення відповідної автоматизованої системи керування і підвищення якості відлитих заготовок.

Виклад основного матеріалу. В якості датчика для визначення співвідношення рівнів металу та шлаку в ковші пропонується використовувати електричний контур зі струмом, закладений у футеровку проміжного ковша (рис. 1).

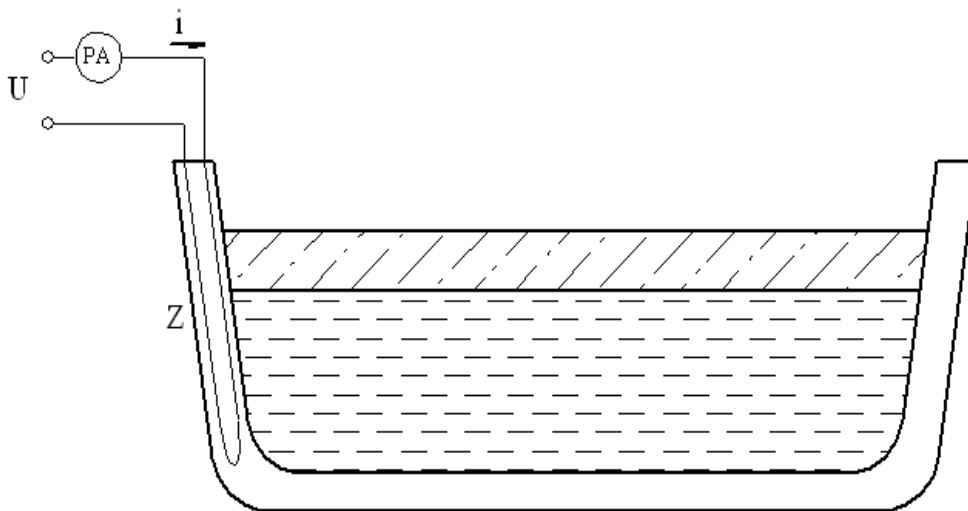


Рисунок 1 – Розташування контуру зі струмом у футеровці ковша

Датчик працює наступним чином. На розташований у футеровці промковша контур подають напругу U , величина якої є відомою і підтримується постійною. У ланцюг включений міліамперметр РА, який вимірює струм, що протікає по контуру. Цей струм можна розрахувати за законом Ома:

$$i = \frac{U}{Z}, \quad (1)$$

де Z – повний опір контуру, що складається з активного та реактивного опору:

$$Z = R_{\text{акт}} + j \cdot \omega L, \quad (2)$$

де $R_{\text{акт}}$ – активний опір проводів; L – індуктивність контуру.

Індуктивність контуру зі струмом залежить від площі розплаву, що активується контуром (рис. 2).

Металургія

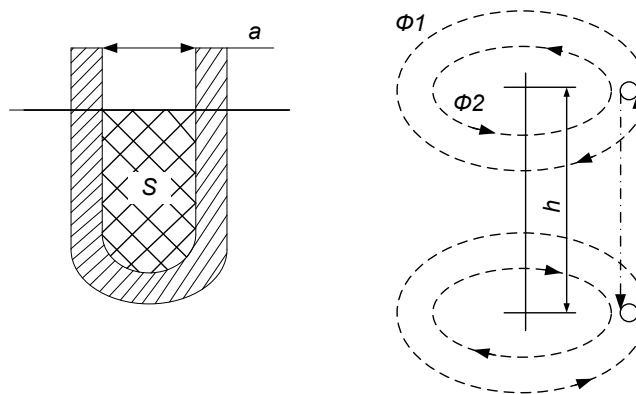


Рисунок 2 – Активований контур зі струмом у футеровці промковша

Зміна рівня металу призводить до зміни величини магнітного потоку Φ_2 , обумовленого вихровими струмами, що наводяться в металі змінним магнітним полем Φ_1 . Потіки Φ_1 та Φ_2 спрямовані зустрічно, що обумовлено законом взаємодії. Результируюча ЕРС, яка діє в контурі, дорівнює:

$$e = - \frac{d\Phi_1}{d\Phi_2}, \quad (3)$$

де

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi. \quad (4)$$

У загальному випадку рівняння (3) можна записати у вигляді:

$$\Phi = \oint_S \vec{B} d\vec{s}, \quad (5)$$

де B – індукція результируючого поля; S – площа активної взаємодії контуру з металом,
 $S = a \cdot h$. (6)

Потік $\Phi_1 \approx \text{const}$, оскільки футеровка та рідкий метал, нагрітий вище точки Кюрі, є діамagnetиками.

Вимірюваним параметром є струм I . Його значення можна знайти за формулою

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L_{\text{рез}}^2}}, \quad (7)$$

де E – дійсне значення ЕРС e ; $R \rightarrow R(t_{\text{сталиС}}) \rightarrow \text{Const}$, ω – частота напруги живлення;
 $L_{\text{рез}}$ – результируюча індуктивність системи «контур-футеровка-рідкий метал», Z – повний опір контуру

$$Z = R_{\text{акт}} + j \cdot \omega(L_{\text{рез}}); \quad (8)$$

$$|Z| = \sqrt{R_{\text{акт}}^2 + \omega^2 \cdot (L_{\text{рез}})^2}; \quad (9)$$

$$i = \frac{U}{\sqrt{R_{\text{акт}}^2 + \omega^2 \cdot (L_{\text{рез}})^2}}. \quad (10)$$

Для визначення конкретного виду залежності струму, що протікає через вимірювальний контур, від співвідношення рівнів металу і шлаку для конкретного ковша проводять градування датчика. Для цього при наповненні ковша через задані поділення по висоті

Металургія

роблять виміри струму через контур і одночасно визначають рівні металу та шлаку іншим методом, наприклад опусканням у промківш металевого штиря.

Зробивши вимірювання по всьому діапазону зміни рівня розплаву при різних співвідношеннях мас металу і шлаку в промковші, одержують систему рівнянь:

$$\begin{cases} i_1 \rightarrow L_{pez1} \\ i_2 \rightarrow L_{pez2} \\ \dots\dots\dots \\ i_k \rightarrow L_{pezk} \end{cases} \quad (11)$$

Надалі на підставі отриманої системи (11) по вимірюваному струму можна визначати рівні металу і шлаку в промковші.

Перевагами пропонованого методу є простота датчика та його низька вартість і досить висока точність вимірювання, причому точність підвищується при зменшенні електропровідності шлаку. До недоліків методу можна віднести необхідність встановлення датчика під час укладання футеровки промківша та зміну градувальної характеристики у разі прогорання футерування. Також слід зауважити, що для коректної роботи моделі електропровідність шлаку повинна залишатися постійною, у разі застосування шлаку іншого хімічного складу з іншою електропровідністю систему рівнянь (11) доведеться складати наново.

Запропонована математична модель для знаходження маси металу та шлаку в сталерозливному і проміжному ковшах.

Вихідними даними для розрахунків є:

- вага тари Q_T – вага порожнього ковша; зазвичай зважування порожнього ковша роблять щоразу перед заливкою металу;
- вага бруто Q_B – поточна вага ковша, включає вагу тари, металу і шлаку; в процесі розливання контролюється постійно;
- рівень металу та шлаку в ковші h ; в процесі розливання контролюється постійно;
- температура металу та шлаку в ковші t ; контролюється періодично за допомогою термopарі занурення;
- залежність об'єму рідкого металу або шлаку в ковші від висоти заповнення ковша $V(h)$; залежить від конструкції ковша;
- залежність щільності металу та шлаку від температури $\rho_M(t), \rho_{Ш}(t)$.

Загальна маса розплаву металу та шлаку в ковші M складатиме:

$$M = M_{Ш} + M_{MET}, \quad (12)$$

де M_{MET} – маса металу в ковші; $M_{Ш}$ – маса шлаку в ковші.

З іншого боку, загальну масу металу та шлаку можна знайти як різницю між поточною масою бруто ковша та масою порожнього ковша:

$$M = Q_B - Q_T. \quad (13)$$

Масу металу в ковші можна обчислити за формулою (рис. 3):

$$M_{MET} = V(h_{MET}) \cdot \rho_M(t). \quad (14)$$

Загальний обсяг металу та шлаку в ковші:

$$V(h) = V(h_{MET}) + V_{Ш}. \quad (15)$$

Маса шлаку в ковші:

$$M_{Ш} = V_{Ш} \cdot \rho_{Ш}(t). \quad (16)$$

Металургія

$$M_{ш} = (V(h) - V(h_{мет})) \cdot \rho_{ш}(t). \quad (17)$$

Об'єми металу та шлаку можна знайти з системи, складеної з рівнянь (12) та (15):

$$\begin{aligned} V &= V_{ш} + V_M \\ Q &= \rho_{ш} \cdot V_{ш} + \rho_M \cdot V_M \end{aligned} \quad (18)$$

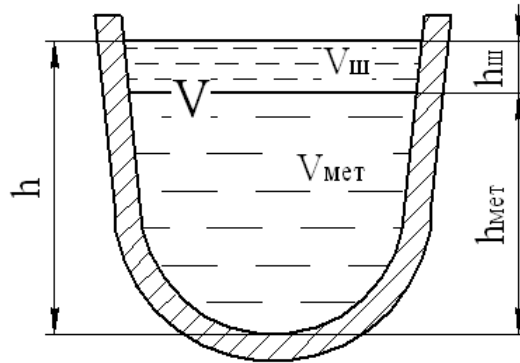


Рисунок 3 – Визначення маси металу та шлаку в ковші

Підставивши у (12) вирази (13), (14) та (17), отримаємо:

$$Q_B - Q_T = V(h_{мет}) \cdot \rho_M(t) + (V(h) - V(h_{мет})) \cdot \rho_{ш}(t). \quad (19)$$

У цьому рівнянні невідомою змінною є об'єм металу:

$$V(h_{мет}) = \frac{Q_B - Q_T - V(h) \cdot \rho_{ш}(t)}{\rho_M(t) - \rho_{ш}(t)}. \quad (20)$$

Після визначення об'єму металу в ковші можна знайти його масу:

$$M_{мет} = \frac{Q_B - Q_T - V(h) \cdot \rho_{ш}(t)}{\rho_M(t) - \rho_{ш}(t)} \cdot \rho_M(t). \quad (21)$$

Далі можна визначити масу шлаку в ковші:

$$M_{ш} = Q_B - Q_T - M_{мет}. \quad (22)$$

Знаючи для конкретного ковша залежність $V(h)$, можна після визначення об'єму металу за рівнянням (19) знайти рівень металу та товщину шару шлаку в ковші:

$$h_{ш} = h - h_{мет}. \quad (23)$$

Залежність щільності металу та шлаку від температури можна визначити, виразивши залежність лінійного розміру об'єму металу від температури через коефіцієнт лінійного розширення металу α_M :

$$L_M(t) = L_{T_0} \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0)), \quad (24)$$

де t – температура металу; L_{T_0} – лінійний розмір металу за $t = 20^\circ\text{C}$.

При цьому об'єм металу:

$$\begin{aligned} V_M(t) &= L_M(t)^3 = (L_{T_0} \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0)))^3 = L_{T_0}^3 \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3 = \\ &= V_0 \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3 \end{aligned} \quad (25)$$

Для металу заданої маси залежність щільності від температури:

Металургія

$$\rho_M(t) = \frac{m}{V_M(t)} = \frac{m}{V_0 \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} = \rho_{M0} \cdot \frac{1}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3}, \quad (26)$$

де ρ_{M0} – щільність металу при $t = 0$ °C.

Аналогічно для шлаку з коефіцієнтом розширення $\alpha_{ш}$:

$$L_{III}(t) = L_{T0} \cdot (1 + \alpha_{III} \cdot (t - T_0)); \quad (27)$$

$$\begin{aligned} V_{III}(t) &= L_{III}(t)^3 = (L_{T_0} \cdot (1 + \alpha_{III} \cdot (t - T_0)))^3 = L_{T_0}^3 \cdot (1 + \alpha_{III} \cdot (t - T_0))^3 = \\ &= V_0 \cdot (1 + \alpha_{III} \cdot (t - T_0))^3 \end{aligned} \quad ; \quad (28)$$

$$\rho_{III}(t) = \frac{m}{V_{III}(t)} = \frac{m}{V_0 \cdot (1 + \alpha_{III} \cdot (t - T_0))^3} = \rho_{III0} \cdot \frac{1}{(1 + \alpha_{III} \cdot (t - T_0))^3}, \quad (29)$$

де $\rho_{ш0}$ – щільність шлаку при $t = 0$ °С.

Об'єми металу та шлаку в ковші залежно від висоти можна визначити з рівнянь (відповідно до рис. 4):

$$V_2 = V_{21} + V_{22}; \quad (30)$$

$$V_{22} = R \cdot l \cdot L_2 + L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot 2 = const ; \quad (31)$$

$$V_{21} = b_1 \cdot L_1 \cdot L_2 - V_1; \quad (32)$$

$$b_1 = H - h - r. \quad (33)$$

$$V = b_1 \cdot L_1 \cdot L_2 + V_{22} = V_1 + V_{21} + V_{22}$$

$$Q = \rho_w(t) \cdot V_1 + \rho_m(t) \cdot (V_{21} + V_{22}) \quad (34)$$

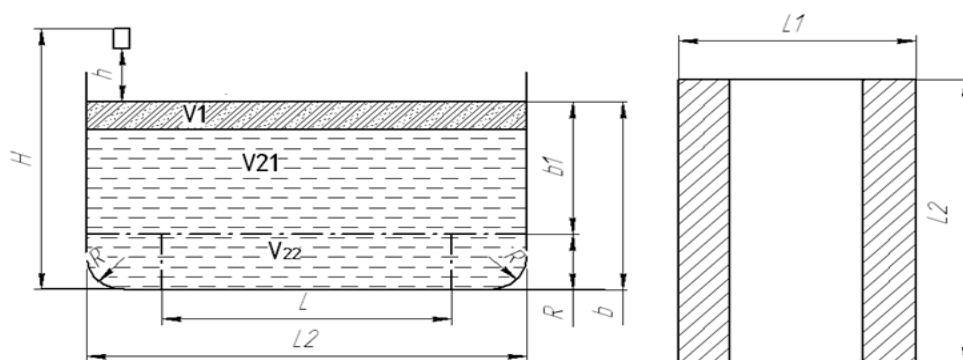


Рисунок 4 – Визначення маси металу та шлаку в ковші

Похибку обчислення маси металу можна визначити, знаючи відносні похибки параметрів, що входять до розрахункових формул:

- температура металу в промковші t , похибка 1 %;
- маса розплаву M , похибка 2 %;
- рівень металу в промковші b , похибка 1 %;
- довжина промковша $L_2 = 3$ м, задана точно;
- ширина промковша $L_1 = 1,68$ м, задана точно;

Металургія

- коефіцієнт лінійного розширення металу $\alpha_M = 11,9 \cdot 10^{-6}$;
- коефіцієнт лінійного розширення шлаку $\alpha_M = 8 \cdot 10^{-6}$;
- щільність шлаку при $t = 0$ °C $\rho_{ш0} = 3$ т/м³, задана точно;
- щільність шлаку при $t = 0$ °C $\rho_{м0} = 7,9$ т/м³, задана точно;
- вага тари $Q_T = 12$ т, задана точно;
- вага бруто $Q_B = 45$ т, задана точно;
- мала довжина промківша $L = 2,4$ м, задана точно;
- радіус $R = 0,3$ м, задана точно.

Відносна похибка визначення маси розплаву:

$$\gamma_v = \sqrt{1^2 + 2^2 + 1^2} = 2\% . \quad (35)$$

Розрахуємо похибку обчислення маси металу за формулою повного диференціала:

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial V}{\partial Q_6} \Delta Q_6 + \frac{\partial V}{\partial b} \Delta b . \quad (36)$$

Розрахуємо приватні похідні, які входять до рівняння (36), з урахуванням $t = 1600^\circ\text{C}$,
 $M = 45\text{т}$, $b = 1,1\text{м}$:

$$V = \frac{Q_6 - Q_T - \frac{\rho_{м0}}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} \cdot ((b \cdot L_1 \cdot L_2 + R \cdot L \cdot L_2 + L_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot 2))}{\frac{\rho_{ш0}}{(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3} - \frac{\rho_{м0}}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3}} ; \quad (37)$$

$$\frac{\partial V}{\partial Q_6} = \frac{((1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 \cdot ((1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3)}{\rho_{ш0}(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 - \rho_{м0}(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} ; \quad (38)$$

$$\frac{\partial V}{\partial b} = \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot \rho_{ш0}(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3}{\rho_{ш0}(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 - \rho_{м0}(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} ; \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & Q_6 - Q_T - \frac{\rho_{ш0}}{(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3} \cdot (b \cdot L_1 \cdot L_2 + R \cdot L \cdot L_2 + L_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot 2) \cdot \\ & \cdot (\rho_{ш0} \cdot \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^2 - \rho_{м0} \cdot 3 \cdot \alpha_M \cdot (t - T_0))^2) - (\rho_{ш0} \cdot \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 - \\ & \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{-(\rho_{м0} \cdot \alpha_M \cdot (t - T_0))^3 \cdot \rho_{м0} \cdot (b \cdot L_1 \cdot L_2 + R \cdot L \cdot L_2 + L_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot 2) \cdot \alpha_M \cdot 3}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^4} . \end{aligned} \quad (40)$$

$$\frac{\partial V}{\partial Q_6} = 0,172 \quad \frac{\partial V}{\partial b} = 1,12 \quad \frac{\partial V}{\partial t} = 0,45$$

Підставивши розраховані значення приватних похідних у рівняння (36), із урахуванням похибок $\Delta t = 16$ °C , $\Delta Q_6 = 0,9\text{т}$, $\Delta b = 0,015\text{м}$, отримуємо абсолютну похибку обчислення маси металу:

Металургія

$$\Delta V = 0,45 \cdot \Delta t + 0,172 \cdot \Delta Q_6 + 1,12 \cdot \Delta b$$

$$\Delta V = 0,45 \cdot 16 + 0,172 \cdot 0,9 + 1,12 \cdot 0,015 = 0,76. \quad (41)$$

Далі знайдемо масу, розраховану за моделлю, при тих же вхідних параметрах:

$$V_{\max} = L_2 \cdot L \cdot R + \frac{\pi \cdot R^2}{2} + b \cdot L_1 \cdot L_2 = 31,4 \text{ т} \quad (42)$$

отже, відносна похибка розрахунку становитиме:

$$\gamma_v = \frac{\Delta V}{V} \cdot 100\% = \frac{0,76}{31,4} \cdot 100\% = 2,42\% \quad (43)$$

Порівнюючи відносні похибки, отримані за формулами (35) і (43) – 2 % і 2,42 %, можна дійти висновку, що запропонована модель є досить точною для використання її в АСУ керування масою металу в промковші.

ВИСНОВКИ

Використання розробленої моделі в АСУ керування розливкою металу на МБЛЗ дозволить підвищити точність оцінки рівню і маси металу в проміжному ковші, межу між металом і шлаком, забезпечуючи оптимальне розділення фаз і запобігаючи потраплянню шлаку в кристалізатор. У свою чергу, це дозволить значно знизити кількість неметалевих включень у заготовці, що покращує її механічні властивості.

Список використаних джерел:

1. Огурцов, А. П. Безперервне лиття сталі / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Дніпро: Системні технології, 2002. – 675 с.
2. Смирнов, А. Н. Сучасні сортові МБЛЗ: перспективи розвитку технології та обладнання / А. Н. Смирнов, А. Л. Подкоритов // Технології. – 2009. – № 12. – С. 18-25.
3. Смирнов, А. Н. Оптимізація потоків сталі в промковші при розливці довгими серіями на багатострумкових сортових МБЛЗ / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. Л. Подкоритов // Збірник наукових праць конференції «50 років безперервній розливці сталі в Україні». – 2010. – С. 324-330.
4. Терехов, Д. А. Конструкції та аналіз роботи обладнання для подачі сталі у проміжний ківш 6-ти струмкового МБЛЗ / Д. А. Терехов, О. М. Стоянов, М. В. Галушкін та ін. // Теорія і практика металургії. – 2004. – № 1. – С. 28-33.
5. Чорний, А. А. Ефективне математичне моделювання у ливарному виробництві: Навчальний посібник / А. А. Чорний. – Донецьк: ПГУ, 2010. – 251 с.

Cherevko O., Lubkin B.

DETERMINATION OF THE LEVEL AND MASS OF METAL AND SLAG IN THE INTERMEDIATE BAILER OF THE CONTINUOUS CASTING MACHINE BY MATHEMATICAL MODELING

The article presents a mathematical model for determining the level and mass of metal and slag in the intermediate bailer of a continuous casting machine. Methods for measuring the level of the melt in the bailer are considered, including strain gauge, induction, and ultrasonic sensors. The

importance of controlling and regulating the ratio of metal and slag levels and the influence of these parameters on the quality of the output product are analyzed.

The model proposed in the article is based on the use of an induction sensor mounted in the bailer lining for continuous measurement of metal and slag levels by analyzing the electrical parameters of the measuring circuit. The current and inductance of the sensor circuit vary depending on the level of metal and slag, which allows for accurate determination of their ratio.

To calculate the mass of metal and slag, the model uses the dependence of their volumes on the height of the bailer filling, taking into account the temperature of the melt and changes in the density of metal and slag depending on the temperature, which allows for a high level of calculation accuracy.

The developed mathematical model is an effective tool for automatic control of the casting process at the continuous casting machine. Its use in the automated steel casting control system will allow for more accurate separation of the metal and slag phases, which in turn will reduce the risk of slag entering the mold and improve the quality of ingots and their mechanical properties. Maintaining a stable metal level in the intermediate bailer ensures a stable melt supply and guarantees uniform filling of the mold, which is important for uniform cooling and crystallization of the ingot. In addition, the model allows for increasing the efficiency of the continuous casting machine operation, preventing metal losses due to premature completion of casting. Thus, the use of the model will allow optimizing the technological process, reducing the number of defects in the blanks, improving product quality and reducing the risk of emergency situations associated with metal overflow.

Keywords: *Continuous casting machine, intermediate bailer, metal level, slag level, measurement, induction sensor, computer simulation, automatic control system.*

Стаття надійшла 10.10.2025р.

УДК 621.771

doi.org/10.31498/2522-9990302025347110

Григоренко В.У., Заболотний О.М.

РОЗВИНЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ГНУТИХ ПРОФІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ З ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Технологія виробництва металічних профілів має два напрямки: гаряча прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки на сортових станах; холодне пластичне згинання смуги на безперервних станах або листа на пресах.

Низьковуглецеві сталі, що застосовують при виробництві гарячекатаних профілів зазвичай не мають високої міцності. Питання з підвищенням показників міцності метала профілів мають високу актуальність.

Гнуті профілі виготовляють з низьковуглецевих сталей з границями міцності 370-410 Н/мм² регламентованим за ДСТУ 2834-94.

У виробництві гнутих профілів виконують холодне пластичне деформування в місцях, наприклад для швелера, між полкою та стійками.

Холодногнуті профілі поступаються жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними. Для гнутих профілів використовують сталі, які можливо зварювати.