

DOI: 10.31319/2519-8106.2(53)2025.341965

UDK 669.18: 536.001.5

Voloshin Ruslan, Lecturer in Computer Science at the Separate Structural Subdivision, Technical and Economic Specialist College of Dniprovsky State Technical University, senior lecturer
Волошин Р.В., викладач інформатики відокремленого структурного підрозділу «Техніко-економічний фаховий коледж Дніпровського державного технічного університету», старший викладач
ORCID 0009-0002-0567-8630
e-mail: volosinruslan4276@gmail.com

Dniprovsky State Technical University, Kamianske
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE MELTING OF A CYLINDRICAL DEOXIDER BY RADIUS AND ANGLE ϕ МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПЛАВЛЕННЯ РОЗКИСЛЮВАЧА ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ ЗА РАДІУСОМ І КУТОМ ϕ

Metal treatment in a steel ladle remains a promising area, as it improves the quality and properties of the metal. Aluminium-based deoxidisers are most commonly used for such out-of-furnace (secondary) treatment. The deoxidiser is typically in the form of a cylindrical ingot and is introduced into the melt by being dropped into the steel ladle during tapping or purging operations.

The paper proposes a mathematical model for calculating the melting of a cylindrical deoxidiser using a curvilinear computational grid (by radius r and angle ϕ).

Keywords: cylindrical deoxidiser, mathematical model, out-of-furnace treatment, steel ladle.

Обробка металу у сталерозливному ковші залишається перспективним напрямком, оскільки дозволяє підвищити якість та експлуатаційні властивості металу. Для такої позапічної обробки найчастіше використовують розкислювач на основі алюмінію. Розкислювач має вигляд циліндричного злитка, його вводять у розплав шляхом вкидання в сталерозливний ківш під час процесів випуску або продувки.

Автором запропоновано математичну модель розрахунку плавлення розкислювача циліндричної форми з використанням криволінійної сітки (за радіусом r і кутом ϕ). Позапічна обробка металу є одним з найбільш перспективних напрямків підвищення якості та властивостей металопродукції масового призначення. Залежно від конкретних завдань позапічної обробки, необхідним є попереднє розкислення металу, як правило, алюмінієм при випуску або продуванні його в сталеливарному ковші.

Основною метою розкислення є зниження до мінімуму розчиненого в сталі кисню шляхом переведення його в оксиди з їх видаленням з металу. У металургії для розкислення металу найчастіше використовують алюміній, для мікролегування спокійної сталі у ковші при випуску плавки з агрегату зазвичай використовується вторинний і первинний алюміній в злитках масою 12—20 кг. Під час випуску плавки з конвертора в сталерозливний ківш вкидають алюмінієві злитки, при цьому через низьку густину ($2,7 \text{ г/см}^3$) алюміній не проникає вглиб розплаву.

Як правило, злитки розкислювачів знаходяться на поверхні, їх плавлення відбувається там, що призводить до значного випаровування алюмінію 80—95 %. Алюміній не проникає вглиб розплаву, а, плаваючи на його поверхні, окислюється киснем з атмосфери. Для підвищення ефективності використання розкислювачів необхідно збільшити їх густину. Це стало можливим з використанням фероалюмінію замість чистого алюмінію.

Аналіз попередніх досліджень автора показав, що при великому процентному вмісті алюмінію в розкислювачі його густина стає невисокою і злиток з фероалюмінію під час випуску металу з конвертора не розплавляється в обсязі металу. Спливаючи на межу розділу фаз

(шлак-метал), він реагує зі шлаком і атмосферним киснем. Для розрахунку прийнято, що процентний вміст алюмінію в розкислювачі циліндричної форми повинен бути не менше 42 %.

Метою роботи є розробка математичної моделі для розрахунку тривалості плавлення розкислювача циліндричної форми, розташованого на межі розділу шлак-метал, з урахуванням криволінійності розрахункової сітки.

Ключові слова: розкислювач циліндричної форми, математична модель, позапінчна обробка металу, сталерозливний ківш.

Problem's Formulation

Out-of-furnace treatment is one of the most promising areas for improving the quality and properties of mass-produced metal products. Depending on the specific objectives of out-of-furnace treatment, it is necessary to pre-deoxidise the metal, usually with aluminium, during tapping or purging in a steel ladle.

The main purpose of deoxidation is to minimise the amount of oxygen dissolved in steel by converting it into oxides and removing them from the metal.

In metallurgical practice, aluminium is most commonly used as the deoxidising agent. For microalloying of calm steel in the ladle during tapping from the furnace or converter, both primary and secondary aluminium ingots weighing between 12 and 20 kg are typically used. During the release of the melt from the converter into the steel-casting ladle, aluminium ingots are thrown in, but due to its low density (2.7 g/cm^3), aluminium do not sink into the melt but remain on the surface.

As a rule, deoxidiser ingots are located on the surface, where they melt, leading to significant evaporation of aluminium (80—95 %). Aluminium does not penetrate deep into the melt but floats on its surface, where it oxidises with oxygen from the atmosphere. To improve the efficiency of deoxidisers, their density must be increased. This can be achieved by replacing pure aluminium with ferroaluminium [1, 2].

The author presents a one-dimensional model for calculating the melting period of cylindrical ingots, taking into account the aluminium content.

Analysis of recent research and publications

An analysis of the author's previous studies has shown that when the percentage of aluminium in the deoxidiser is high, its density becomes low and the ferroaluminium fails to melt within the melt volume during converter tapping.

Instead, it floats to the slag-metal interface and reacts with slag and atmospheric oxygen. For effective melting, it has been determined that the percentage of aluminium in a cylindrical deoxidiser must be at least 42 %.

Formulation of the study purpose

The aim of this study is to develop a mathematical model for calculating the melting time of a cylindrical deoxidiser located at the slag-metal interface, taking into account the curvature of the computational grid.

To simplify the modelling process and reduce computational time, the problem is formulated as one-dimensional.

Presenting the main material

Let us consider half of the cross-section of the cylindrical deoxidiser as the computational domain, as shown in Fig. 1. To solve the problem, a curvilinear coordinate grid is constructed. Next, we will consider half of the cross-section, which we will divide into M semicircles with radii r_i , where $1 \leq i \leq M$, and rays j , where $1 \leq j \leq N$, into N sectors.

We obtain control volumes with coordinates i, j (Fig. 1) and set M_0 as the initial number of nodes along the radius of the represented cylinder. The value $M > M_0$ takes into account the maximum possible number of frozen layers of metal or slag [3].

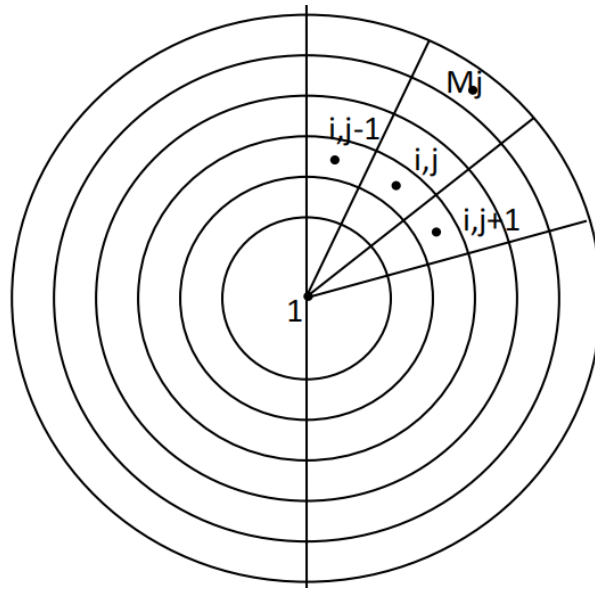


Fig. 1. Calculation area of the mathematical model of melting of a cylindrical deoxidiser at the phase boundary, slag-metal, using a curvilinear computational grid

Note that the calculation uses an explicit difference scheme to calculate temperature values $t_{i,j}^{n+1}$ grid nodes are divided into internal control volumes ($2 \leq i \leq M-1$, $2 \leq j \leq N-1$), central control volumes ($i = 1$, $1 \leq j \leq N$) and surface control volumes ($i = M$, $1 \leq j \leq N$).

Heat balance equation for central control volumes ($i = 1$, $1 \leq j \leq N$) as follows:

$$V \rho_{1,j}^n C_{1,j}^n \frac{t_{1,j}^{n+1} - t_{1,j}^n}{\Delta \tau} = 0 - \frac{S_s \times (t_{1,j}^n - t_{2,j}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{1,j}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{2,j}^n} \right)} + \frac{S_{\theta} \times (t_{1,j-1}^n - t_{1,j}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{4\lambda_{1,j-1}^n} + \frac{\Delta r}{4\lambda_{1,j}^n} \right)} - \frac{S_{\theta} \times (t_{1,j}^n - t_{2,j}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{4\lambda_{1,j}^n} + \frac{\Delta r}{4\lambda_{2,j}^n} \right)}. \quad (1)$$

The values of the control volume V , upper surface S_s and side surfaces S_b are determined by the formula in the calculations and are taken to be equal to 1.

$$V = \frac{\Delta r}{2} \cdot \frac{\Delta r}{2} \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z, \quad S_s = S_b = \frac{\Delta r}{2} \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z, \quad (2)$$

where Δz — is the thickness of the control volume in calculations.

In the calculation, when $j = 1$, we exclude the second term on the right-hand side of equation (1); when $j = N$, we exclude the third term on the right-hand side of equation (1).

Heat balance equation for internal control volumes ($1 < i < M_j$, $1 \leq j \leq N$) as follows:

$$V \rho_{i,j}^n C_{i,j}^n \frac{t_{i,j}^{n+1} - t_{i,j}^n}{\Delta \tau} = \frac{S_s \cdot (t_{i+1,j}^n - t_{i,j}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{i,j}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{i+1,j}^n} \right)} - \frac{S_j \cdot (t_{i,j}^n - t_{i-1,j}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{i,j}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{i-1,j}^n} \right)} - \frac{S_b \cdot (t_{i,j}^n - t_{i,j+1}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{i,j}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{i,j+1}^n} \right)} + \frac{S_b \cdot (t_{i,j-1}^n - t_{i,j}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{i,j-1}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{i,j}^n} \right)}. \quad (3)$$

The control volumes V , upper plane S_s , lower plane S_j , and side planes S_b are determined by the equation:

$$V = r_i \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z = i \cdot \Delta r \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z; \quad S_s = \left(i + \frac{1}{2} \right) \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z;$$

$$S_j = \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z; \quad S_b = i \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z. \quad (4)$$

To calculate $j = 1$, we exclude the fourth term on the right side of equation (4); for $j = N$, we exclude the third term on the right side of equation (4). According to Dusimber method during freezing and melting processes, the temperature at the surface remains equal to the material's melting or freezing point [3—5].

We perform temperature field calculations with boundary conditions of the first kind, and calculate the freezing (melting) process in surface control volumes. Moreover, excess is determined in metal or slag t_{nad} , t_{nad} , heat balance equation (5).

$$V \rho_{M,j}^n C_{M,j}^n \frac{t_{nad} - t_{pl}}{\Delta \tau} = \frac{S_j \cdot (t_{M-1,j}^n - t_{pl})}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{M-1,j}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{M,j}^n}\right)} - S_s \cdot \alpha_j (t_{pl} - t_j^p) + \frac{S_b \cdot (t_{M,j-1}^n - t_{pl})}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{M,j-1}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{M,j}^n}\right)} - \frac{S_o \cdot (t_{pl} - t_{M,j+1}^n)}{\left(\frac{\Delta r}{2\lambda_{M,j}^n} + \frac{\Delta r}{2\lambda_{M,j+1}^n}\right)}. \quad (5)$$

The control volumes V , upper plane S_s , lower plane S_j , and side planes S_b are determined by the equation:

$$V = r_M \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z = M \cdot \Delta r \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z; \quad S_j = \left(M - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z; \\ S_s = \left(M + \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z; \quad S_b = M \cdot \Delta r \cdot \Delta \vartheta \cdot \Delta z. \quad (6)$$

It should be noted that the heat transfer coefficient α_j , melt temperature t_p , and melting (freezing) temperature t_{pl} have values that depend on whether the surface layer is in contact with molten metal or molten slag.

The melting temperatures and excess are summed up in separate counters. For this purpose, the c_{dj} array is presented in the program during programming, and at the beginning of the calculation, its elements are equal to 0. When the value of c_{dj} becomes greater than the ratio of the melting heat of the material to its heat capacity, it can be assumed that the boundary cell with coordinates (M_j, j) has melted. In this case, the value $t[M_j, j]$ becomes equal to the melt temperature, and the number of nodes along the radius M_j decreases by 1.

If material freezes on this temporary layer, the value of c_{dj} is also compared with the ratio of the material's melting heat to its heat capacity. If c_{dj} is greater than or equal to this ratio, the number of nodes along the radius M_j increases by 1. After the frozen metal shell has melted, the process of calculating the melting of the cylinder is complete, since by this time the solid phase of the cylinder inside the metal shell has completely melted.

Conclusions

The paper considers a mathematical model for calculating the melting of a cylindrical deoxidiser using a curvilinear coordinate grid (by radius r and angle ϑ). The proposed approach enables the analysis of the melting kinetics of an alumina-containing cylindrical deoxidiser at the slag–metal interface.

The mathematical model allows for the investigation of the thermophysical processes of melting a cylindrical body during out-of-furnace treatment in a ladle. It provides a basis for further optimization of deoxidiser composition and geometry to improve melting efficiency and metallurgical performance.

References

- [1] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Kryvosheiev H.A. (2018) Obgruntuvannya vyboru chyselnoho metodu, dlia vyrishennia zavdannia plavlennia kombinovanoho aliumovmiskoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy, z obvazhniuvachem, v zakhysnii obolontsi [Justification of the choice of a numerical method for solving the problem of melting a combined aluminum-containing deoxidizer].

- er of cylindrical shape, with a weighting agent, in a protective shell] *Matematychnе modeliuвання*, (pp. 35-40) Kamianske: DDTU. (1(38)).
- [2] Babenko M.V., Voloshyn R.V., Voloshyna K.R. (31 January, 2023). Vyrishennia zadachi plavlennia kombinovanoho aliumomistkoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy v zakhysnii obolontsi [Solving the problem of melting a combined aluminum-containing deoxidizer of cylindrical shape in a protective shell] *UNIVERSYTET HRYHORIA SKOVORODY V PEREIASLAVI Rada molodykh uchenykh universytetu Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii*, in «*TENDENTSII TA PERSPEKTYVY ROZVYTKU, NAUKY I OSVITY V UMOVAKH HLOBALIZATSII*» (pp. 105-109). Vyp. 90 Zbirnyk naukovykh prats Pereiaslav.
 - [3] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Lyman N.M., Hromovoi A.A. (2022). Osoblyvosti realizatsii ekonomichnoi riznytsevoi skhemy zminnykh napriamkiv pry vyrishenni zadachi plavlennia obvazhnenoho kombinovanoho aliumovmistkoho rozkysliuvacha v zakhysnii obolontsi [Features of the implementation of an economic difference scheme of variable directions when solving the problem of melting a weighted combined aluminum-containing deoxidizer in a protective shell] *Matematychnе modeliuвання*. (pp. 57-62). Kamianske: DDTU. (2 (47)).
 - [4] Voloshyn R.V., Babenko M.V., Voloshyna K.R. (30 September, 2022) / Riznytsevi skhemy zminnykh napriamkiv pry vyrishenni zadachi plavlennia obvazhnenoho kombinovanoho aliumomistkoho rozkysliuvacha v zakhysnii obolontsi [Differential schemes of alternating directions when solving the problem of melting a weighted combined aluminum-containing deoxidizer in a protective shell] *UNIVERSYTET HRYHORIA SKOVORODY V PEREIASLAVI Rada molodykh uchenykh universytetu Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii* in «*TENDENTSII TA PERSPEKTYVY ROZVYTKU NAUKY I OSVITY V UMOVAKH HLOBALIZATSII*» (pp. 122-126). Vyp. 86 Zbirnyk naukovykh prats Pereiaslav.
 - [5] Voloshyn R.V., Voloshyna K.R., Tomina A.-M.V. (13 December 2021) Plavlennia aliuminiievoho rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy pry vypusku metalu v kovsh [Melting of a cylindrical aluminum deoxidizer during metal release into a ladle] *Materialy III vseukrainskoi konferentsii molodykh uchenykh, «Suchasne materialoznavstvo. Materialy ta tekhnologii, SMMT-2021»*. (pp. 48-49) Kyiv.
 - [6] Voloshyn R.V., Voloshyna K.R. (07-09 December, 2020) Matematychnе modeliuвання plavlennia rozkysliuvacha tsylindrychnoi formy u stalerozlyvnomu kovshi [Mathematical modeling of melting of a cylindrical deoxidizer in a steel ladle] *International scientific conference "Innovative technologies, models Cyber Security Management, ITCSM-2020 ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE ITCSM-2020 Part 2 Dnipro, Ukraine Book of Abstracts «Innovatsiini tekhnologii, modeli upravlinnia Kiberbezpekoiu itmk-2020» Mizhnarodna naukova konferentsiia* (pp. 26-27). Dnipro.

Список використаної літератури

1. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Кривошеєв Г.А. Обґрунтування вибору чисельного методу, для вирішення завдання плавлення комбінованого алюмовміського розкислювача циліндричної форми, з обважнювачем, в захисній оболонці // *Математичне моделювання*, Кам'янське, ДДТУ, 2018. № 1(38). С. 35–40.
2. Бабенко М.В., Волошин Р.В., Волошина К.Р. Вирішення задачі плавлення комбінованого алюмоміського розкислювача циліндричної форми в захисній оболонці // *УНІВЕРСИТЕТ ГРИГОРІЯ СКОВОРОДИ В ПЕРЕЯСЛАВІ Рада молодих учених університету Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, «ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ, НАУКИ І ОСВІТИ В УМОВАХ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ» 31 січня 2023 року Вип. 90 Збірник наукових праць Переяслав, 2023. С. 105–109.*
3. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Лимар Н.М., Громовой А.А., Особливості реалізації економічної різницевої схеми змінних напрямків при вирішенні задачі плавлення обважненого комбінованого алюмовміського розкислювача в захисній оболонці // *Математичне моделювання*, Кам'янське, ДДТУ, 2022 р. № 2 (47). С. 57–62.

4. Волошин Р.В., Бабенко М.В., Волошина К.Р. Різницеви схеми змінних напрямків при вирішенні задачі плавлення обваженого комбінованого алюмомісткого розкислювача в захисній оболонці // УНІВЕРСИТЕТ ГРИГОРІЯ СКОВОРОДИ В ПЕРЕЯСЛАВІ Рада молодих учених університету Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАУКИ І ОСВІТИ В УМОВАХ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ» 30 вересня 2022 року Вип. 86 Збірник наукових праць Переяслав, 2022 С. 122–126.
5. Волошин Р.В., Волошина К.Р., Томіна А.-М.В. Плавлення алюмінієвого розкислювача циліндричної форми при випуску металу в ковш // Матеріали III всеукраїнської конференції молодих учених, «Сучасне матеріалознавство. Матеріали та технології, СММТ-2021», Київ. 2021р., С. 48–49.
6. Волошин Р.В., Волошина К.Р. Математичне моделювання плавлення розкислювача циліндричної форми у сталерозливному ковші // International scientific conference "Innovative technologies, models Cyber Security Management, ITCSM-2020 ANNUAL SCIENTIFIC CONFERENCE ITCSM-2020 Part 2 December 07-09, 2020 Dnipro, Ukraine Book of Abstracts «Інноваційні технології, моделі управління Кібербезпекою ІТМК-2020» Міжнародна наукова конференція, м Дніпро 2020, С. 26–27.

Надійшла до редколегії 30.09.2025

Прийнята після рецензування 10.10.2025

Опублікована 23.10.2025