

УДК 004.94:621.746.62

Люта А. В., Макшанцев В. Г., Афанасьєва М. А.

## РОЗРОБКА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЗАТВЕРДІННЯ СТАЛІ В КРИСТАЛІЗАТОРІ

Створення технології безперервного лиття металів і обладнання для реалізації цієї технології стало одним з найбільш великих досягнень в промисловості в ХХ столітті і зробило істотний вплив на розвиток металургії і машинобудування. З усіх технологій, застосовуваних у даний час у промисловості при виробництві сталі, спосіб безперервного розливання може бути названий перспективним.

Процес утворення скоринки злитка в кристалізаторі безпосередньо впливає на якість поверхні відливної заготовки і продуктивність машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Дефекти скоринки заготовки неможливо виправити подальшими умовами охолодження. На виході з кристалізатора скоринка злитка повинна бути рівномірної товщини і утримувати феростатичний тиск рідкої сталі, щоб запобігти прориви металу. Для цього потрібна організація інтенсивного і безперервного відводу тепла від рідкої сталі до охолоджувальної води в кристалізаторі [1]. Для того, щоб розробити заходи підвищення ефективності роботи МБЛЗ, слід дослідити процес утворення скоринки.

Метою роботи є створення тривимірної моделі процесу затвердіння, яка дозволяє розглянути злиток у поздовжньому і поперечному перерізі.

Раніше тема з регулюванням подачі води вже була розглянута, але не враховано головне: злиток – це не один перетин, а сума всіх перетинів. У наукових роботах минулих років були зроблені певні висновки про доцільність регулювання подачі охолоджуючої рідини в кристалізаторі і ЗВО. Але технології не стоять на місці і тривимірна модель допоможе нам більш заглибитися в дану тему, і подивитися на розподіл температур не в одному (окремому) перетині, а по всьому зливу [2].

Двовірна модель не враховує параметри кристалізації в злитку по вертикальній осі Z, тобто в масштабі часу, з цього випливає висновок, що вода витрачається нераціонально. Тому пропонується розробити тривимірну модель, яка буде виключати похибки минулих робіт, більш точно описуючи сам процес кристалізації.

Для побудови тривимірної моделі в режимі реального часу необхідно виконати наступні кроки:

1. Завдання початкових умов – параметрів охолодження, швидкості витягування зливка, теплофізичних параметрів сталі.
2. Розрахунок початкового теплового поля злитка і визначення вихідного положення кордону розділу фаз.
3. Перерахунок температур злитка у точках, які не лежать поруч з кордонами.
4. Перерахунок положення кордону розділу фаз.
5. Перерахунок температур злитка в граничних і суміжних з ними точках.
6. Формування візуальної тривимірної моделі злитка і вивід її на екран.
7. Повторювати кроки 3–6 до тих пір, поки температурне поле не стабілізується.

Блок-схема алгоритму представлена на рис. 1.

Так як в проєктованому програмному забезпеченні планується реалізація тривимірної моделі, виникає необхідність вибору графічної бібліотеки. При цьому вибір обмежений лише двома бібліотеками – OpenGL та Direct3D.

OpenGL (Open Graphics Library) – незалежний від мови програмування плат формонезалежний програмний інтерфейс для створення програмного забезпечення, що використовує

двовимірну і тривимірну комп'ютерну графіку. Включає більше 250 функцій для малювання складних тривимірних сцен з простих примітивів [3]. Використовується при створенні комп'ютерних ігор, систем автоматизованого проектування, віртуальної реальності, візуалізації в наукових дослідженнях. На платформі Windows конкурує із Direct3D.

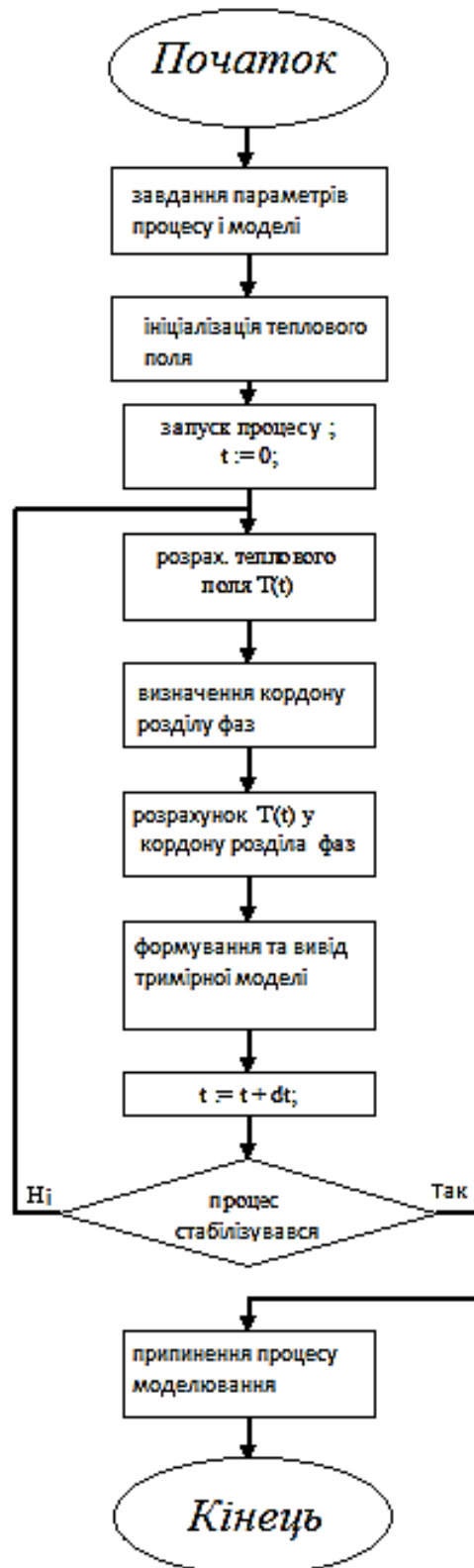


Рис. 1. Блок-схема алгоритму побудови тривимірної моделі в режимі реального часу

Direct3D – інтерфейс виведення тривимірних примітивів, котрі відносяться до пакунку DirectX. Спочатку був націлений на розробку відеоігор, однак популярний і в інших областях розробки програмного забезпечення. Наприклад, Direct3D отримав дуже широке поширення в інженерному та математичному ПО. Головним недоліком Direct3D є орієнтованість на сімейство операційних систем Microsoft Windows [3].

Для реалізації даної системи був зроблений вибір на користь графічної бібліотеки OpenGL, тому її використання, на відміну від DirectX, дозволяє перенести програмне забезпечення на різні платформи.

Експериментальні дослідження тривимірної моделі

При перерахунку температур всередині зливка використовується метод кінцевих різниць. Звичайно-різницева наближення для рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{T_{ijk}^{n+1} - T_{ijk}^n}{\Delta t} + v(t) \frac{T_{ijk}^n - T_{ijk-1}^n}{\Delta z} = \\ & = \frac{1}{c(T_{ijk}^n)\rho(T_{ijk}^n)} \left( \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{i+1jk}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{i-1jk}^n)(T_{ijk}^n - T_{i-1jk}^n)}{(\Delta x)^2} + \right. \\ & \quad + \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{ij+1k}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{ij-1k}^n)(T_{ijk}^n - T_{ij-1k}^n)}{(\Delta y)^2} + \\ & \quad \left. + \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{ijk+1}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{ijk-1}^n)(T_{ijk}^n - T_{ijk-1}^n)}{(\Delta z)^2} \right), \end{aligned}$$

де  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – задані розміри кроку уздовж відповідних осей координат;  
 $T_{ijk}^n$  – температура в  $(i, j, k)$  точці зливка в момент часу  $n$ .

Звичайно-різницева наближення для рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{T_{ijk}^{n+1} - T_{ijk}^n}{\Delta t} + v(t) \frac{T_{ijk}^n - T_{ijk-1}^n}{\Delta x} = \frac{1}{c(T_{ijk}^n)\rho(T_{ijk}^n)} * \\ & * \left( \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{i+1jk}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{i-1jk}^n)(T_{ijk}^n - T_{i-1jk}^n)}{(\Delta x)^2} + \right. \\ & \quad + \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{ij+1k}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{ij-1k}^n)(T_{ijk}^n - T_{ij-1k}^n)}{(\Delta y)^2} + \\ & \quad \left. + \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{ijk+1}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{ijk-1}^n)(T_{ijk}^n - T_{ijk-1}^n)}{(\Delta z)^2} \right). \end{aligned}$$

Таким чином, температура в точці  $(i, j, k)$  безперервного злитка в момент часу  $n + 1$  обчислюється за формулою:

$$\begin{aligned} T_{ijk}^{n+1} = & \frac{\Delta t}{c(T_{ijk}^n)\rho(T_{ijk}^n)} * \left( \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{i+1jk}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{i-1jk}^n)(T_{ijk}^n - T_{i-1jk}^n)}{(\Delta x)^2} + \right. \\ & \quad + \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{ij+1k}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{ij-1k}^n)(T_{ijk}^n - T_{ij-1k}^n)}{(\Delta y)^2} + \\ & \quad \left. + \frac{\lambda(T_{ijk}^n)(T_{ijk+1}^n - T_{ijk}^n) - \lambda(T_{ijk-1}^n)(T_{ijk}^n - T_{ijk-1}^n)}{(\Delta z)^2} \right) - \Delta t \cdot v(t) \frac{T_{ijk}^n - T_{ijk-1}^n}{\Delta z} + T_{ijk}^n. \end{aligned}$$

Після отримання температурного поля злитка в числовому вигляді виконується побудова тривимірної моделі. Вона повинна наочно відображати розподіл температур в зливку, кордон фазового переходу, а також надавати користувачеві можливість переглядати злиток в довільному перерізі.

Для цього було вирішено представити злиток безліччю полігонів, що покривають перетину злитка і його межі. Колір кожного полігону визначається температурою відповідної ділянки злитка. З метою візуального розділення рідкої і твердої частини злитка різних діапазонах температур були поставлені у відповідність різні кольорні градієнти. Наприклад, рідкій фазі (від температури кристалізації до температури плавлення) відповідає колірний перехід від червоного до жовтого. Твердій фазі – перехід від блакитного до темно-синього.

Графік розподілу температур по подовжньому перетину безперервнолитого злитка в кристалізаторі представлений на рис. 2.

Розподіл температур по подовжньому перетину злитка

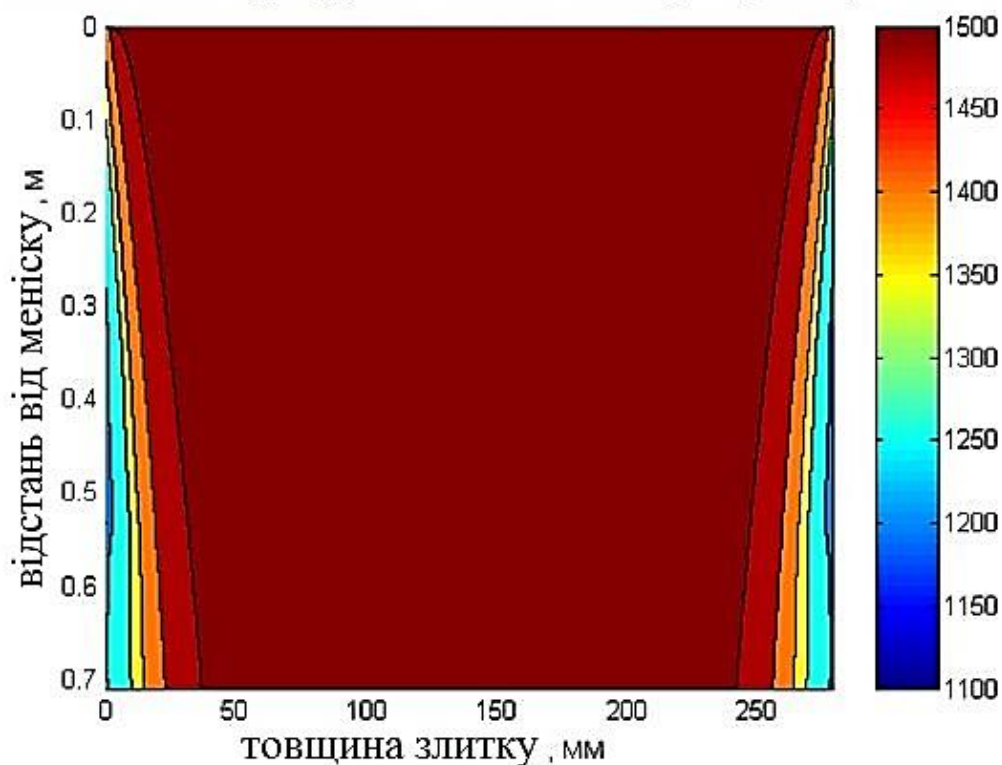


Рис. 2. Графік розподілу температур по подовжньому перетину безперервнолитого злитка в кристалізаторі

На рис. 2 добре видно, що температура поверхні безперервнолитого злитка в міру просування його по кристалізатору інтенсивно падає і лише в нижній частині кристалізатора (на відстані приблизно 0,5 м від меніска металу) відбувається розігрів сформованої скоринки, що обумовлено значним збільшенням газового зазору між злитком і кристалізатором.

Цей факт багаторазово описувався в літературі [3–5] і підтверджує адекватність моделі, за допомогою якої проводиться дослідження.

Графік розподілу температур за поперечним перерізом безперервнолитого злитка в кристалізаторі має такий же вигляд і дає гарне візуальне уявлення про температурний стан всього поперечного перерізу заготовки.

Графік фазового стану металу формованого злитка в кристалізаторі представлений на рис. 3.

На графіку, наведеному на рис. 3, можна спостерігати ізотерми температури ліквідусу і температури солідусу. Значення вище температури ліквідусу характеризують ліквідність металу. Значення, що знаходяться в інтервалі температур ліквідусу і солідусу відносяться до двофазної зони. А значення нижче температури солідусу належать до твердої фази.

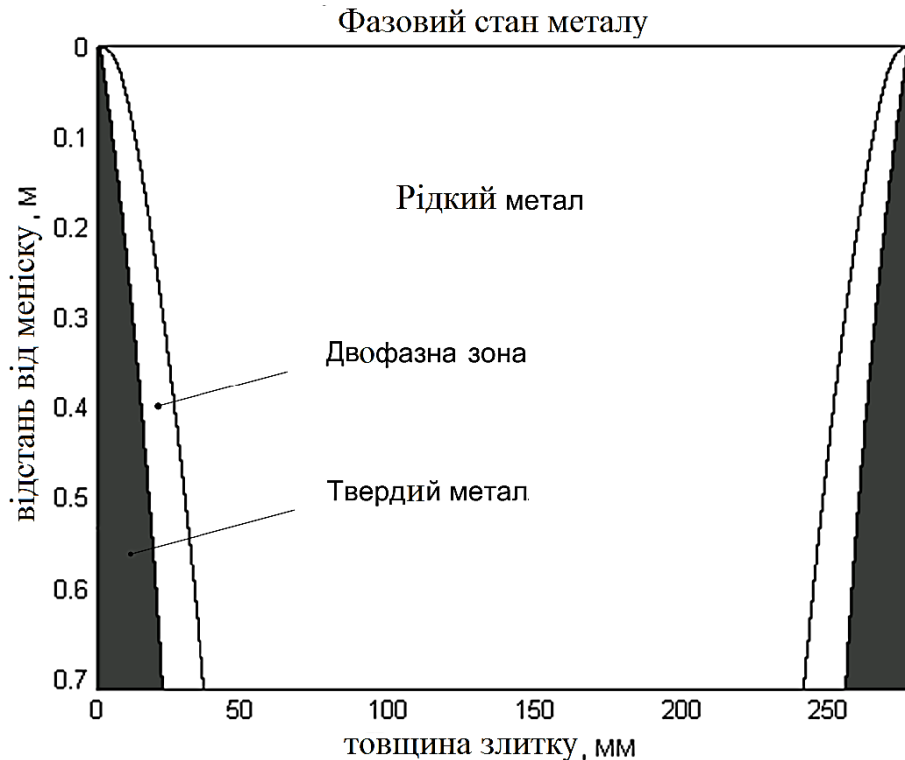


Рис. 3. Графік фазового стану металу злитка, що формується в кристалізаторі

### ВИСНОВКИ

В результаті розробки та дослідження тривимірної моделі процесу затвердіння сталі, було отримано графіки, що дають гарне візуальне уявлення про фазовий стан металу і динаміку його перетворення (рідкий метал, двофазна зона, твердий метал) в усьому поперечному перетині заготовки.

Розроблена у статті тривимірна модель процесу затвердіння сталі може бути використана у дослідженні процесу утворення скоринки злитка в кристалізаторі різних МБЛЗ.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Евтеева Д. П. *Теплотехнические основы технологии конструирования машин непрерывного литья заготовок* : учеб. пособ. / Д. П. Евтеева, Ю. А. Самойлович. – Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 2010. – 135 с.
2. Емельянов В. А. *Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок* : учеб. пособ. для вузов / В. А. Емельянов. – М. : Металлургия, 2011. – 149 с.
3. Смирнов А. Н. *Безперервне розливання сталі* [Електронний ресурс] / А. Н. Смирнов. – Режим доступу: <http://uas.su/books/mnlz/mnlz.php>.
4. Огурцов А. П. *Безперервне лиття сталі* / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Дніпропетровськ : Системні технології. – 2002. – 675 с.
5. Мاستрюков Б. С. *Теплофизика металлургических процессов* / Б. С. Мاستрюков. – М. : МІСІС, 1996. – 268 с.