

Дослідження явищ усадки при формуванні мідних зливок

С.В. Гридін, кандидат технічних наук

Д.В. Спирідонов*, Ю.Д. Савенков*

О.М. Смірнов, доктор технічних наук, професор

Донецький національний технічний університет, Донецьк

* ВАТ „Артемівський завод обробки кольорових металів”, Артемівськ

Виконано чисельне дослідження впливу основних параметрів розливання на термоусадку оболонки, що формується в зоні кристалізатора мідного зливка прямокутного перетину. Дані досліджень використано для оптимізації співвідношення усадки граней зливка за висотою кристалізатора і конусності його робочих стінок.

Однією з основних тенденцій щодо розвитку методу напівбезперервного лиття кольорових металів і сплавів (особливо горячеломких сплавів з підвищеною схильністю до окислення - мідь МЗр, латунь Л63, сплави Е-Сu57 та ін.), є забезпечення вимог високої якості зливок. Забезпечення високої якості досягається за рахунок стабілізації в часі і просторі положення розташування фронту твердіння при одночасному підведенні розплавленого металу і витягування зливка.

Концептуальна модель процесу напівбезперервного лиття мідних зливок може бути представлена наступним алгоритмом: «оптимізація швидкості лиття зливка» > «тепловий баланс на ділянці піч – переливний пристрій – кристалізатор» > «оптимізація кристалізатора» > «динамічне управління зоною вторинного охолодження» > «прогнозування якості зливка» > «підтримка експлуатаційних кондицій установки напівбезперервного лиття». В цьому ланцюжку великого значення набуває оптимізація геометричної форми і інтенсивності теплопередачі в кристалізаторі [1, 2]. Тому відхід від класичних конструкцій кристалізатора на сьогодні представляється єдиною можливим вирішенням проблеми.

Цей висновок обґрунтовує принципи модернізації прямокутного кристалізатора для розливання міді в умовах ВАТ «АЗОЦМ». При проектуванні кристалізатора необхідно передбачити відповідну усадку конусність стінок кристалізатора [1, 3, 4]. Це дозволить розв'язати проблему оптимізації теплового і напружено-деформованого стану зливка і, отже, ліквідувати умови для виникнення поверхневих тріщин.

При вирішенні даної задачі все більшого практичного значення набувають методи математичного моделювання процесів твердіння зливок. Такі математичні моделі забезпечують суттєве енерго- і ресурсозбереження за рахунок підвищення виходу годної продукції і зниження витрат матеріалів.

В даній роботі рішення проблеми оптимізації кристалізатора виконується шляхом побудови математичної моделі усадки в мідному прямокутному зливку і дослідження з її допомогою впливу швидкості лиття, параметрів кристалізатора і розмірів зливка на його термоусадку (рис. 1).

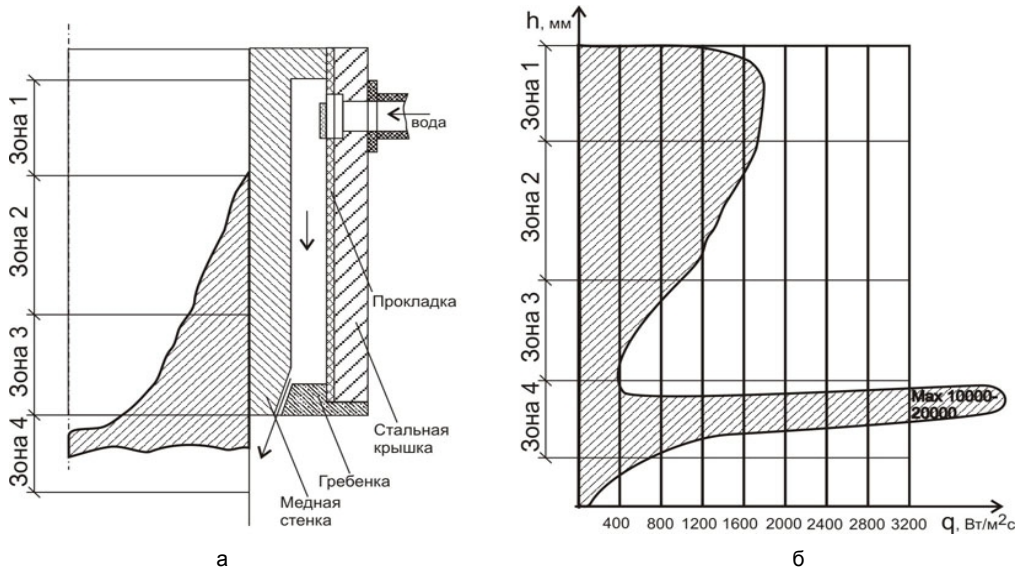


Рис. 1. Схема досліджуваної області. а – область кристалізації, б – зміна питомого коефіцієнта теплопередачі q за висотою стінки кристалізатора h .

Область кристалізації умовно можна поділити на 4 зони:

- 1 – зона зняття теплоти перегріву. Тепловий потік в цій зоні не залежить від форми кристалізатора, протяжність зони для конкретних умов кристалізації плоского мідного зливка складає 80 – 120 мм;

- 2 – зона безпосереднього контакту затверділої кірки із стінкою кристалізатора. Її протяжність залежить від геометрії стінки. Якщо вона повторює профіль зливка з урахуванням його усадки, то можна збільшити висоту зони. На практиці можна говорити про висоту від 40 до 200 мм. Збільшення висоти даної зони сприяє підвищенню загальної тепловіддачі, що підтверджується підвищенням температури води на виході;

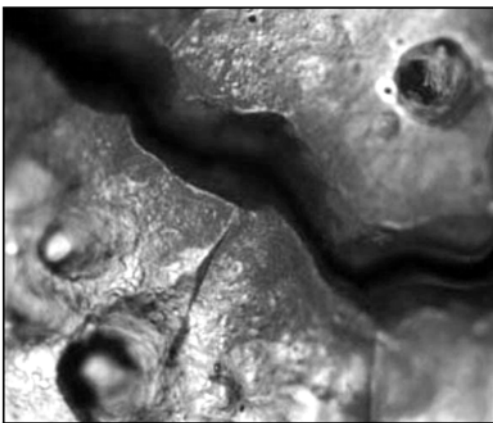


Рис. 2. Гаряча тріщина, що утворилась внаслідок високої теплопередачі в зоні вторинного охолодження. $\times 200$.

- 3 – зона теплопередачі через повітряний зазор, що утворився. Чим менше зазор в цій зоні, тим більше коефіцієнт теплопередачі. В зв'язку з цим необхідно прагнути створення такого профілю кристалізатора, який би забезпечив найменший зазор в цій зоні;

- 4 – зона вторинного охолодження шляхом виходу води з кристалізатора на зливки. Локальний коефіцієнт тепловіддачі в цій зоні може досягати $20000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{с}$, що провокує утворення тріщин при високій температурі зливка (рис. 2). Тому з погляду запобігання тріщин необхідно знижувати теплопередачу в цій зоні.

Таким чином, необхідно вирішити такі задачі: розрахувати профіль стінок кристалізатора з максимально подовженою

Плавлення і кристалізація

другою зоною і з мінімальним повітряним зазором в 3-й зоні. Це дозволить збільшити загальну тепловіддачу в зоні первинного охолодження, знизити температуру зливка в місці переходу його під вторинного охолодження, одночасно з цим підвищивши температуру води, що йде на вторинне охолодження.

Для вирішення сформульованих конструктивних задач була побудована математична модель усадки в прямокутному зливку. Дослідження з її допомогою впливу параметрів лиття і кристалізатора на термоусадку зливка здійснювалася за схемою [3, 4].

Теплові процеси в зливку описуються за допомогою рівняння теплопереносу:

$$c_{\text{эф}} \frac{\partial \Theta}{\partial F_0} + (1 - \xi) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \lambda_{\text{эф}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

де $c_{\text{эф}} = 1 - \frac{W}{c_{\text{ж}} T_0} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial T}$ – ефективна теплоємність, $\Theta = \frac{T}{T_0}$ – безрозмірна температура, $c_{\text{ж}}$ – теплоємність в рідкій фазі розплаву, W – прихована теплота кристалізації ($W = 208$ кДж/кг), $\lambda_{\text{эф}} = (1 - \xi)\lambda_{\text{ж}} + \xi\lambda_{\text{т}}$ – ефективний коефіцієнт теплопровідності; $\lambda_{\text{ж}}, \lambda_{\text{т}}$ – коефіцієнти теплопровідності в рідкій і твердій фазах.

Частку твердої фази ξ розраховано за методом Никітенко М.І. [4]:

$$\xi = 1 - \left(1 + \frac{c_{\text{ж}}}{W} (T_L - T_S) \left[1 - \left(\frac{T_L - T}{T_L - T_S} \right) \right]^{2/3} + \frac{c_{\text{ж}}}{W} (T_L - T_S) \right). \quad (2)$$

Рівняння (1) – (2), доповнені відповідними граничними умовами, є математичною моделлю теплообмінних процесів в тверднучому мідному зливку.

Сумарний тепловий потік у кристалізаторі визначався з урахуванням таких параметрів: швидкості розливання (від 0,127 м/хв); температури лиття (≈ 1183 °С); сумарної витрати води, що проходить через кристалізатор з бокових (9,8 м³/год) і торцевих стінок (20,3 м³/год); розмірів зливка (208 x 610 мм) і висоти кристалізатора (395 мм).

Після рішення задачі теплообміну виконується чисельна реалізація математичної моделі усадки зливка і дослідження з її допомогою впливу швидкості лиття, розмірів зливка на хід процесу усадки.

Для розрахунків усадки застосовувалися середні значення коефіцієнта лінійного розширення α [5, 6], оскільки відомо, що в інженерній практиці для підрахунку напружень, що виникають в металі при зміні його температури, необхідно використовувати істинні коефіцієнти розширення α , а для підрахунку зміни розмірів тіла внаслідок термічного розширення зручно використовувати середні значення $\alpha_{\text{ср}}$ [5].

Розрахунок середніх значень $\alpha_{\text{ср}}$ проводили за наступною методикою. Поперечний перетин зливка розмірами $x_0 \cdot y_0$ згідно методу кінцевих різниць представляли у вигляді сітки і розбивали на $n=70$ шарів за товщиною і $k=350$ шарів за шириною (рис. 3).

Після розрахунку розподілів температурного поля і частки твердої фази починаючи від меніска

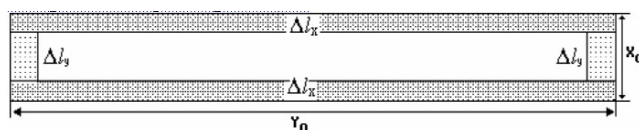


Рис. 3. Розрахункова область перетину зливка.

визначали геометричні розміри затверділої частини зливка і і що доводиться на неї кількість елементарних шарів за товщиною і шириною зливка.

Далі, для кожного шару спочатку за товщиною зливка, а потім її шириною обчислюються середні значення $\alpha_{\text{ср}i}$ шару і середні значення температур в шарі $T_{\text{ср},i-1}$ в попередній (i-1) і $T_{\text{ср},i}$ в поточній (i) моменти часу [3]:

$$\alpha_{\text{ср}i} = (\alpha_{1(\text{тн})} + \alpha_{2(\text{тн})})/2, \quad (3)$$

$$T_{\text{ср},i-1} = (T_{1,i-1} + T_{2,i-1})/2; \quad T_{\text{ср},i} = (T_{1,i} + T_{2,i})/2. \quad (4)$$

Далі визначалося для кожного шару значення усадки (мм)

$$\Delta l = \alpha_{\text{ср}i} (T_{\text{ср},i-1} - T_{\text{ср},i}) l_{i-1}, \quad (5)$$

де l_{i-1} – лінійний розмір (товщина) елементарного шару в попередній момент часу, мм. Повна усадка всього перетину зливка визначалася як сума усадок всіх елементарних твердих шарів вибраного перетину: $\Delta l_{\Sigma j} = \sum \Delta l_j$, $j=0, \dots, m$, де m – сумарне число елементарних осередків сітки за всім перетином, в яких метал знаходиться в твердому стані.

Товщину x_{0l} зливка після усадки обчислювали як різницю між початковими параметрами товщини зливка x_0 і повною усадкою даного перетину $\Delta l_{\Sigma j}$ (рис. 3): $x_{0l} = x_0 - 2 \Delta l_x$.

Запропонована методика була реалізована у кілька етапів з використанням розробленої авторами комп'ютерної інформаційної системи "Cukrist". Спочатку досліджувався вплив на термоусадку зливка швидкості лиття і величини витрати води на стінки кристалізатора. Далі досліджували вплив величини оребрення бокової і торцевої сторін кристалізатора на теплообмін і усадку зливка в зоні кристалізатора.

З аналізу результатів розрахунків отримано наступне:

- збільшення швидкості лиття, як і прогнозувалося, спричинює зменшення усадки зливка (збільшення швидкості від 0,127м/хв до 0,132 м/хв знижувало усадку в зоні кристалізатора в середньому на 0,4 – 0,6 мм);

- збільшення витрати охолоджуючої води на торцеву стінку при незмінній витраті на широку стінку спричинює збільшення усадки зливка на вузькій стороні кристалізатора в його верхній частині в середньому на 1 мм, в нижній частині в середньому на 0,5 мм);

- збільшення витрати охолоджуючої води на бокову стінку при незмінній витраті на вузьку стінку не приводить до суттєвого збільшення усадки зливка як на широкій, так і на вузькій сторонах кристалізатора;

- внутрішня поверхня нового (проектного) кристалізатора повинна бути виконаний з урахуванням поправки на природну усадку литого зливка, тобто мати змінну по висоті конусність профілю кристалізатора. Для нижньої частини кристалізатора конусність повинна складати 0,24 % – 0,48 %, а у верхній (до 20 см від меніска) – 0,72 % – 0,96 % з урахуванням попередження заклинювання зливка при максимальній швидкості лиття.

Таким чином. Розроблено математичну модель та чисельно вирішено задачу формування напівбезперервнолитого плоского мідного зливка, яка суміщена з математичною моделлю, що дозволяє прогнозувати утворення внутрішніх напружень і дефектів.

Теплофізичні розрахунки дозволяють визначати змінну за висотою конусність профілю кристалізатора з урахуванням поправки на природну усадку зливка і швидкість витяжки заготовки. В зоні безпосереднього контакту зливка із стінкою

Плавлення і кристалізація

кристалізатора і в зоні теплопередачі через повітряний зазор рекомендована конусність при максимальній швидкості лиття 0,24 % – 0,48 % (2 – 3 мм), а у верхній зоні зняття теплоти перегріву – 0,72 % – 0,96 % (4 – 6 мм).

В результаті проведення порівняльних випробувань в промислових умовах кристалізаторів нової і стандартної конструкції якість поверхні зливків, отриманих на кристалізаторах з подвійною конусністю, була значно вищою. При цьому кількість повздовжніх і поперечних тріщин зменшилася в 3 – 4 рази.

Розроблене програмне забезпечення “Cukrist” може бути використано для конструкторсько-технологічного проектування кристалізаторів і технології лиття плоских мідних зливків з метою отримання раціональних теплофізичних режимів розливання.

Література

1. Тихонов Б.С. Тяжелые цветные металлы и сплавы. Справ. Т.1. – М.: ЦНИИЭИЦветМет, 1999. – 452 с.
2. Кац А.М., Шадек Е.Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1983. – 205 с.
3. Гридин С.В. Исследование усадочных явлений при формировании слябовой заготовки в зоне кристаллизатора // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 8. – С. 176 – 180.
4. Смирнов А.Н., Гридин С.В., Савенков Ю.Д. Разработка параметров затвердевания и конструкции кристаллизаторов для круглых непрерывнолитых слитков из меди // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – 6. – С. 72 – 75.
5. Соболев В.В., Трефилов П.М. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье. – М.: Металлургия, 1988. – 160 с.
6. Kytönen H., Louhenkilpi S., Laine J. Thermal shrinkage model and roller taper experiments for a continuously cast steel slab // CCS 2000 – Technology. Modeling. Defects of CCS ingots. – Linz / Austria, 2002. – P. 183 – 191.

Одержано 21.11.07

С.В. Гридин, Д.В. Спиридонов, Ю.Д. Савенков, А.Н. Смирнов

Исследование явлений усадки при формировании медных слитков

Резюме

Выполнено численное исследование влияния основных параметров разливки на термоусадку оболочки формирующегося в зоне кристаллизатора медного слитка прямоугольного сечения. Данные исследований использованы для оптимизации соотношения усадки граней слитка по высоте кристаллизатора и конусности его рабочих стенок.

S.V. Grydin, D.V. Spiridonov, Yu.D. Savenkov, O.M. Smirnov

Research of the shrinkage phenomena at formation of copper bars

Summary

Numerical investigation of influence of the basic parameters of pouring on the thermal shrinkage of shells of copper bars of rectangular section formed in mould is carried out. The data obtained are used for optimization of correlation between shrinkage of verges of ingot along the mould height and taper its working walls.