

ДОСЛІДЖЕННЯ УСАДКОВИХ ЯВИЩ ПРИ ФОРМУВАННІ ПРЯМОКУТНИХ МІДНИХ ЗЛИВКІВ

Гридін С.В., Смирнов О.М.,

(ДонНТУ, м. Донецьк)

Спирідонов Д.В., Савенков Ю.Д.,

(ВАТ «АЗОЦМ», м. Артемівськ)

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

Однією з основних тенденцій, супроводжуючою розвиток методу напівбезперервного лиття важких кольорових металів і сплавів (особливо горячеломких сплавів з підвищеною схильністю до окислення - мідь МЗр, латунь Л63, сплави Е-Cu57 і ін.), є забезпечення вимог до високої якості зливків при збільшенні виходу гідної продукції. Найважливіші технічні вимоги до якості зливків (стан поверхні, мікро- і макроструктура, зональна ліквіація і густина) обумовлені необхідністю здійснення гарячої або холодної пластичної деформації литих заготовок з достатньо високими обжиманнями. Забезпечення високої якості в ході напівбезперервного лиття досягається за рахунок достатньо стабільного в часі і просторі положення фронту затвердіння при одночасному підведенні розплавленого металу і витяганні зливка, що сформувався.

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

Цей висновок обґрунтовує принципи модернізації прямокутного кристалізатора для розливання міді в умовах ВАТ «АЗОЦМ», необхідність якої підтверджена аналізом результатів періодичного контролю макроструктури. В ході модернізації при проектуванні кристалізатора особливо необхідно передбачити відповідну усадку конусність стінок кристалізатора [1, 3]. Це дозволить розв'язати проблему оптимізації теплового і напружено-деформованого стану зливка і, отже, ліквідувати умови для виникнення поверхневих тріщин.

Для вирішення даної задачі все більше практичне значення набувають методи математичного моделювання процесів затвердіння зливків, що забезпечують динамічне управління процесом лиття і охолодження. Кінець кінцем, такі математичні моделі забезпечують істотне енерго- і ресурсозберігання за рахунок підвищення виходу годної продукції і зниження витрат матеріалів, що витрачаються.

Виходячи з вищесказаного, 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.

Схема досліджуваної області надана на рис. 1.

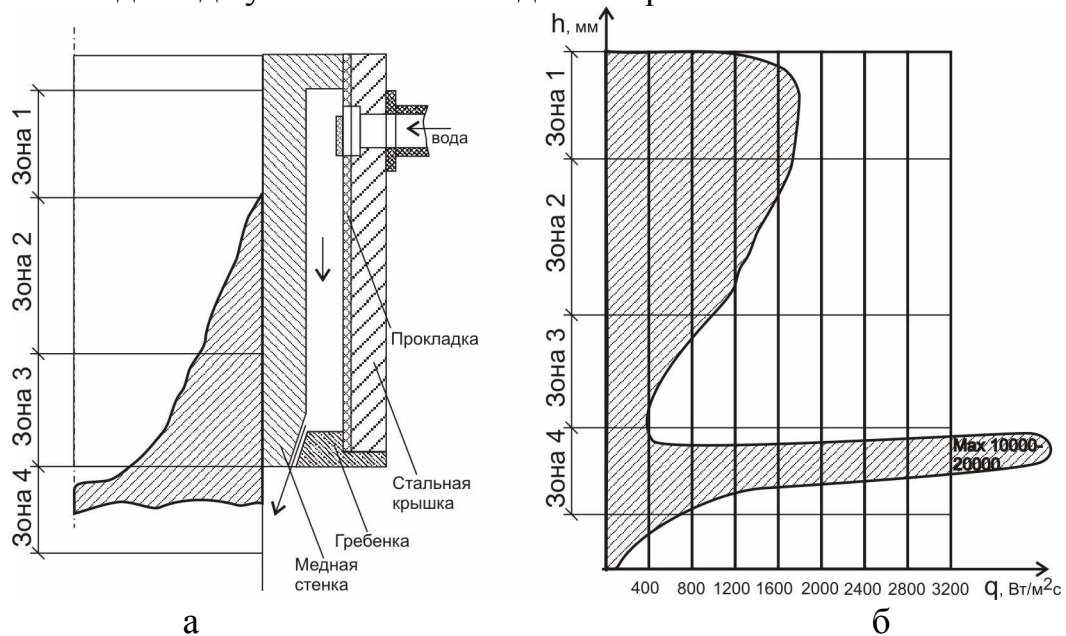


Рисунок 1. Схема досліджуваної області:

a – область кристалізації, *б* – зміна питомого коефіцієнта теплопередачі q по висоті стінки кристалізатора h .

Область кристалізації умовно можна розбити на 4 зони:

- зона 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 80-120мм;
- зона 2 – зона безпосереднього контакту затверділої скориночки із стінкою кристалізатора. Її протяжність залежить від геометрії стінки. Якщо геометрія стінки повторює профіль зливка з урахуванням його усадки, то можна збільшити висоту зони, якщо ні, то вона дуже коротка. На практиці можна говорити про висоту від 40 до 200мм. Відповідно збільшення висоти даної зони сприяє підвищенню загальної тепловіддачі, що підтверджується збільшенням температури води, що виходить, за інших рівних умов;
- зона 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 якнайменший зазор в цій зоні;
- зона 4 – зона вторинного охолодження шляхом виходу води з кристалізатора на зливку. Локальний коефіцієнт тепловіддачі в цій зоні може досягати 20000, що провокує утворення тріщин при високій температурі зливка (рис. 2), тому з погляду запобігання тріщин необхідно знизувати теплопередачу в цій зоні.



Рисунок 2. Фотографія гарячої тріщини, що утворилася унаслідок високої теплопередачі в зоні вторинного охолодження.

Таким чином, витікають наступні конструктивні задачі: розрахувати профіль стінок кристалізатора з максимально подовженою другою зоною і з максимально пониженим повітряним зазором в 3-й зоні. Це дозволить збільшити загальну тепловіддачу в зоні первинного охолодження, знизити температуру зливка в місці переходу його під вторинне охолодження, одночасно з цим підвищивши температуру води, що йде на вторинне охолодження. Збільшення другої зони знижує вірогідність підмивання лунки (вторинне розігрівання). Все вищезгадане практично виключає утворення тріщин при литті.

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 по наступній схемі [3].

Теплові процеси в зливку описуються за допомогою рівняння теплопереносу:

$$c_{\text{эф}} \frac{\partial \theta}{\partial F_o} + (1-\xi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial x} - (1-\xi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} = \lambda_{\text{эф}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

де $c_{\text{эф}} = 1 - \frac{W}{c_{\text{ж}} T_0} \frac{\partial \xi}{\partial T}$ – ефективна теплоємність; $\theta = \frac{T}{T_0}$ – безрозмірна температура;

тура; $c_{ж}$ – теплоємність в рідкій фазі розплаву; W – прихована теплота кристалізації ($W=208\text{КДж/кг}$); $\lambda_{эф} = (1-\xi)\lambda_{жс} + \xi\lambda_T$ – ефективний коефіцієнт теплопровідності; $\lambda_{жс}$, λ_T – коефіцієнти теплопровідності в рідкій і твердій фазах.

Частку твердої фази ξ розраховано згідно методу Никітенко М.І. [4]:

$$\xi = 1 - \left(1 + \frac{c_{жс}}{L}(T_L - T_s) \left[1 - \left(\frac{T_L - T}{T_L - T_s} \right)^{2/3} \right] + \frac{c_{жс}}{L}(T_L - T_s) \right) \quad (2)$$

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

Сумарний тепловий потік у кристалізаторі може бути визначений з урахуванням швидкості розливання, температури лиття і розмірів кристалізатора. Наприклад, для зливка $208 \times 610\text{мм}$, відливаного із швидкістю $0,127\text{м/мин}$ ($7,62\text{м/ч}$) з температурою 1180°З тепловою потік розраховується таким чином:

1) Кількість що кристалізується в одиницю часу металу:

$$M = 0,785 \times 0,208\text{м} \times 0,610\text{м} \times 8900\text{кг/м}^3 \times 7,62\text{м/ч} / 3600 = 1,88\text{кг/с}$$

2) Кількість теплоти, яка необхідна відібрати від металу в одиницю часу:

$$Q_1 = C_{міді} \times M \times \Delta t_1 = 545 \times 1,88 \times (1180^\circ\text{С} - 1083^\circ\text{С}) = 99386,2\text{Дж};$$

$$Q_2 = W \times M = 208000 \times 1,88 = 391040\text{Дж};$$

$$Q_3 = C_{міді} \times M \times \Delta t_2 = 545 \times 1,88 \times (1083^\circ\text{С} - 40^\circ\text{С}) = 1068657,8\text{Дж};$$

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1559084\text{Дж}.$$

З сумарної кількості теплоти, відбіраної в одиницю часу від зливка, кількість теплоти, відбірана в зоні первинного охолодження може бути визначений, знаючи кількість води, яка проходить через кристалізатор в одиницю часу і перепад температур вхід/вихід.

3) Сумарна кількість води, що проходить через кристалізатор (з бокових і торцевих стінок): $m = 9,8\text{м}^3/\text{ч} + 20,3\text{м}^3/\text{ч} = 30,1\text{м}^3/\text{ч}$ або $m = 8,36\text{кг/с}$

4) Таким чином, кількість теплоти, відбірана від зливка в зоні первинного охолодження в одиницю часу, буде: $Q_1 = C_{води} \times m \times \Delta t_1 = 4000\text{Дж/кг}^\circ\text{С} \times 8,36\text{кг/с} \times 9,4^\circ\text{С} = 314336\text{Вт}$ (де $\Delta t_1 = 9,4^\circ\text{С}$ - перепад температури вхід/вихід, за експериментальними даними).

5) Середній тепловий потік q в зоні первинного охолодження може бути визначений таким чином:

$$q = Q/S_1 = 314336\text{Вт} / 0,64622\text{м}^2 = 486422,6\text{Вт/м}^2.$$

де $S_1 = 2 \times 395\text{мм} \times (610\text{мм} + 208\text{мм}) = 646220\text{мм}^2 = 0,64622\text{м}^2$ – площа внутрішньої поверхні плоского кристалізатора.

Отримані результати добре узгоджуються з теоретичними значеннями ($1750\text{--}600\text{кВт/м}^2$, [1]).

6) Кількість теплоти, відбірана від зливка в одиницю часу в зоні вторинного охолодження, визначається як різниця:

$$Q_2/1\text{сек} = (Q_{\Sigma} - Q_1)/1\text{сек} = (1559084\text{Дж} - 314336\text{Дж})/1\text{сек} = 1244748\text{Вт}.$$

7) Середній тепловий потік в зоні первинного охолодження може бу-

ти визначений таким чином:

$$q = Q_2/S_2 = 1244748/0,64622\text{м}^2 = 1926198,5\text{Вт/м}^2.$$

де $S^2 = 2 \times (610\text{мм} + 208\text{мм}) \times 395\text{мм} = 0,64622\text{м}^2$ – сумарна площа зрошуваної поверхні для прямокутного кристалізатора.

Отримані результати добре узгоджуються з теоретичними значеннями ($10000\text{-}20000\text{кВт/м}^2$, [1]).

Таким чином, 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 по наступній схемі.

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

Розрахунок середніх значень $\alpha_{\text{ср}}$ проводився згідно наступної методики. Поперечний перетин зливка розмірами $x_0 \times y_0$ згідно методу кінцевих різниць представляється у вигляді сітки і розбивається на $n=70$ шарів по товщині і $k=350$ шарів по ширині (рис. 3).

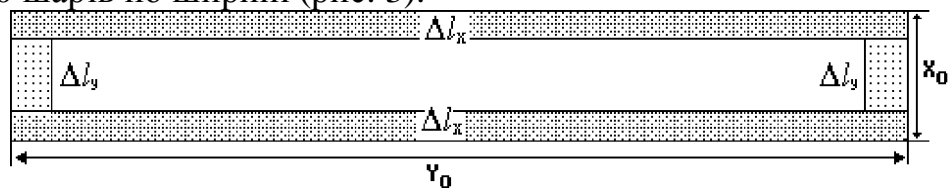


Рисунок 3. Розрахункова область перетину зливка

Після розрахунку розподілів температурного поля і частки твердої фази в заданих перетинах зливка (починаючи від меніска) визначаються геометричні розміри затверділої частини зливка і і що доводиться на неї кількість елементарних шарів по товщині і по ширині зливка.

Далі, для кожного шару спочатку по товщині зливка, а потім по її ширині 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 поточний (i) моменти часу [3]:

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

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

Далі визначалося для кожного шару значення усадки (мм)

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

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: $\Delta l_{\Sigma,j} = \Sigma \Delta l_j$, $j=0, \dots, m$, де m – сумарне число елементарних осередків сітки по всьому перетину, в яких метал знаходиться в твердому стані.

Товщина x_{0l} зливка після усадки обчислювалася як різниця між почат-

ковими параметрами товщини зливка x_0 і повною усадкою даного перетину $\Delta L_{\Sigma,j}$ (рис. 3): $x_{01} = x_0 - 2\Delta L_x$.

Запропонована методика була реалізована у декілька 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 досліджувався вплив величини оребрення бокової і торцевої сторін кристалізатора на теплообмін і усадку зливка в зоні кристалізатора (рис. 4).

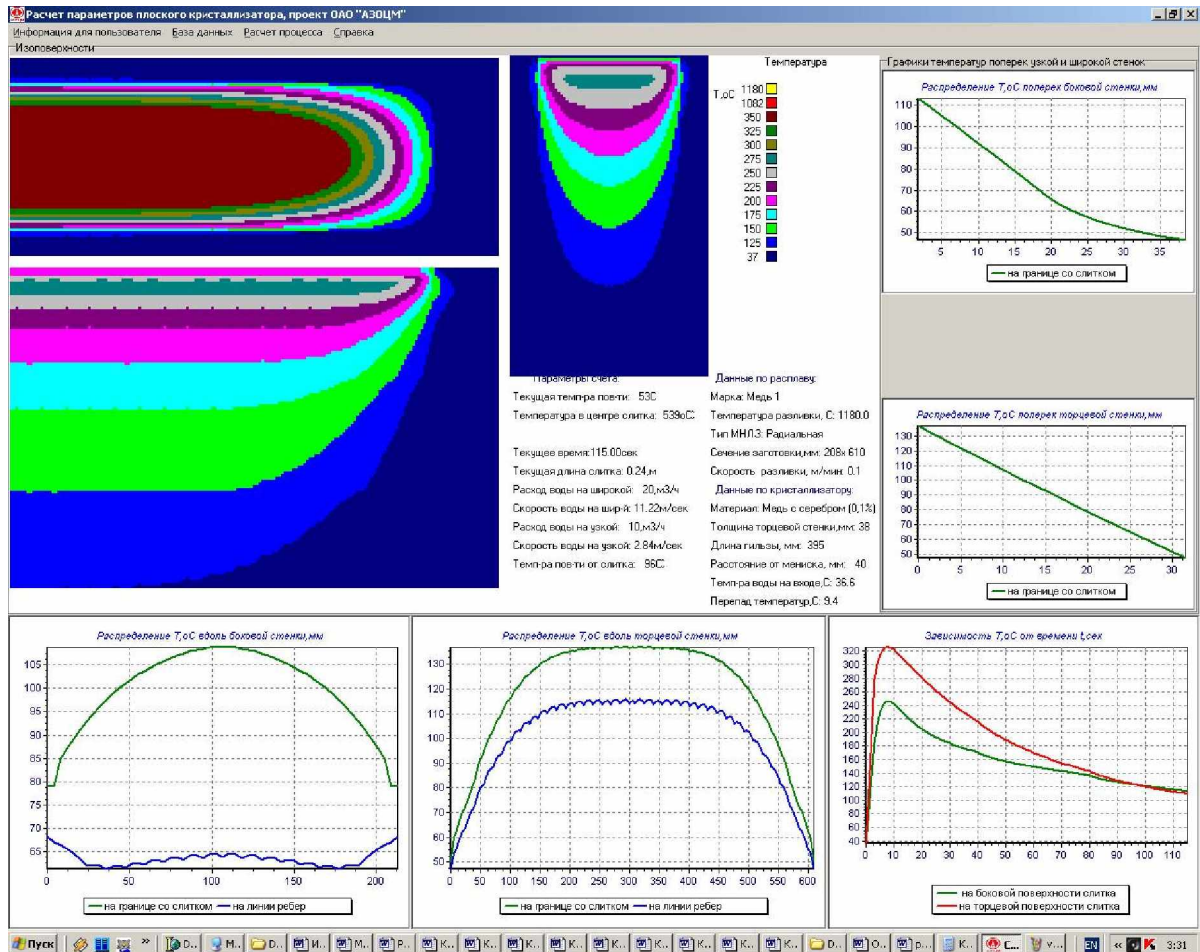


Рисунок 4. Формат рабочего экрана программы «Cukrist» (результаты розрахунків полів температур по різних перетинах зливка).

З аналізу результатів розрахунків отримане наступне:

- збільшення швидкості лиття, як і прогнозувалося, спричинює зменшення усадки зливка (збільшення швидкості від 0,127 м/мін до 0,132 м/мін знижувало усадку в зоні кристалізатора в середньому на 0,4÷0,6 мм, мал. 4);
- 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 $0,24\% \div 0,48\%$, а у верхній (до 20 см від меніска) – прийнята рівній $0,72\% \div 0,96\%$ з урахуванням попередження заклинювання зливка при максимальній швидкості лиття. Підтвердити цей висновок може одночасна експлуатація кристалізаторов нової і колишньої конструкцій.

Таким чином, в результаті виконаних досліджень:

- Розроблена математична модель теплообмінних процесів в напівбезперервному мідному зливку, що формується.
- Чисельно вирішена задача затвердіння напівбезперервнолитого плоского зливка, в результаті отримані: поле температур в тверднучому зливку і в стінках кристалізатора; тепловий потік з поверхні зливка у будь-який момент часу; товщина твердої кірки по заданих перетинах зливка; ширина і глибина рідкої лунки.
- Сформульована і вирішена задача визначення оптимальної конусності кристалізатора з метою мінімізації градієнтів температур в твердій фазі зливка з урахуванням обмеження на глибину рідкої лунки.
- Розроблене програмне забезпечення може бути використано для конструкторсько-технологічного проектування установок безперервного лиття плоских мідних зливків з метою отримання раціональних теплофізичних режимів розливання зливків.

Перелік посилань:

1. Тихонов Б.С. Тяжелые цветные металлы и сплавы. Справочник. Т.1. – М.: ЦНИИЭИЦветМет, 1999. – 452с.
2. Кац А.М., Шадек Е.Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1983. - 205с.
3. Гридин С.В. Исследование усадочных явлений при формировании слябовой заготовки в зоне кристаллизатора // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. 2004. № 8 (228). С. 176-180.
4. Соболев В.В., Трефилов П.М. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье. - М.: Металлургия, 1988. -160 с.
5. Thermal shrinkage model and roller taper experiments for a continuously cast steel slab / H. Kytönen, S. Louhenkilpi, J. Laine // *CCS 2000 – Technology. Modeling. Defects of CCS ingots*. - Linz / Austria, 2002, p. 183-191.
6. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник. М.-Л.: Изд-во «Энергия», 1967. – 240 с.