

УДК 621.77

Ю. Д. САВЕНКОВ*, **С. В. ГРИДИН****, (канд. техн. наук, доц.),
Е. В. ШТЕПАН**, (канд. техн. наук.), **В. Е. УХИН****,
А. В. КРАВЧЕНКО**, **А. П. ВЕРЗИЛОВ****

* - ОАО «Артемовский завод по обработке цветных металлов»,

** - ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЛИТКА ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ МЕДИ

С использованием методов математического и физического моделирования изучен процесс формирования прямоугольного слитка при полунепрерывной разливке меди огневого рафинирования. Показано влияние технологических факторов и гидродинамических процессов в жидкой ванне кристаллизатора на усадку прямоугольного слитка.

кристаллизатор, медь, слиток, теплопередача, усадка, корочка

В настоящее время конкурентоспособность предприятия-производителя медной продукции во многом зависит от качества выпускаемой им продукции. Важным элементом обеспечения качества медного проката является процесс перевода жидкого продукта в твердую заготовку. Применительно к условиям ОАО «Артемовский завод по производству цветных металлов» одним из способов разливки меди является полунепрерывное литье на МПНЛЗ.

Концептуальная модель процесса полунепрерывного литья меди может быть представлена следующим алгоритмом: «оптимизация скорости литья слитка» → «тепловой баланс на участке плавильная печь – переливное устройство – кристаллизатор» → «оптимизация работы кристаллизатора» → «динамическое управление зоной вторичного охлаждения» → «оптимизация технологической длины установки полунепрерывного литья» → «прогнозирование качества заготовки» → «поддержание эксплуатационных кондиций установки полунепрерывного литья».

В этой цепочке для обеспечения высокой производительности установки полунепрерывного литья и качества поверхности слитков огромное значение имеет оптимизация геометрической формы и тепловой работы кристаллизатора.

Особенности теплопередачи, механизмы и поведение затвердевания

в водоохлаждаемых медных кристаллизаторах относятся к наиболее важным процессам, происходящим в ходе литья плоских медных слитков и влияющим на качество получаемых слитков.

Механизм образования усадки в металлических заготовках широко освещен в научно-технической литературе [1-4]. Так, установлено, что усадка в зоне кристаллизатора приводит к отходу слитка от стенок кристаллизатора и образованию между ними газового зазора. При этом резко сокращается теплоотвод от проходящих турбулентных потоков внутри затвердевающего дендритного каркаса слитка, что приводит к развитию неравномерной кристаллизации в поперечном сечении затвердевающего слитка: зазор может достигать нескольких миллиметров, а толщина корочки практически не увеличивается, создавая дополнительные условия для образования трещин. Различная температура слоев корочки металла вызывает различную величину усадку и деформацию этих слоев.

Устранение (или сокращение до минимума) воздушного зазора, и соответственно, оптимизацию теплопередачи, можно осуществить путем максимального приближения контура кристаллизатора к поверхности твердой корочки непрерывного слитка. Другими словами в течение процесса разлива стенки кристаллизатора должны иметь такую конусность, которая обеспечит контакт стенок с затвердевающей оболочкой металла во время охлаждения и усадки заготовки.

Оптимальная конусность обеспечивает равномерный теплообмен между кристаллизатором и поверхностью заготовки без применения дополнительных контактных усилий к горячей и непрочной оболочке.

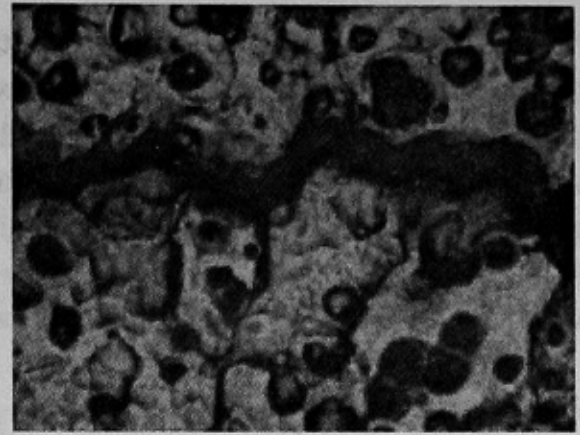
Недостаточная конусность ухудшает тепловой поток по линии раздела кристаллизатор/заготовка, приводя к образованию более тонкой, неравномерной и, следовательно, непрочной оболочки [5-7]. Недостаточная конусность может явиться причиной разрывов сплошности оболочки, при которых жидкий металл прорывает оболочку, что негативно сказывается на качестве заготовки, способствуя появлению «продольных» и «поперечных» поверхностных и подповерхностных трещин, а также наплывов (рис. 1) [7].

Излишняя конусность также приводит к ряду технических проблем, в том числе повышенному износу кристаллизатора (таблица 1), а также к увеличенному трению, которое вызывает осевые растягивающие напряжения. Они, в свою очередь способствующего образованию поперечных трещин и даже короблению широкой грани и формированию ужимин [8].

В современных конструкциях кристаллизаторов используется, как правило, переменная по высоте конусность, обеспечивающая «огибание» внутренней поверхностью кристаллизатора поверхности затвердевающей заготовки. Для компенсации усадки твердой оболочки по широкой грани, в



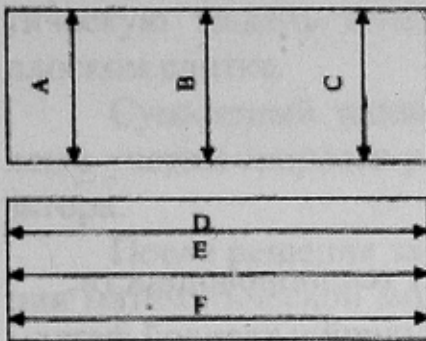
а



б

Рисунок 1 - Межкристаллитные продольная (а) и поперечная (б) трещины, вскрывшиеся в результате обработки шарошкой надрыва на поверхности слитка

Таблица 1 - Изменение размеров плоского кристаллизатора после эксплуатации



Место замера на кр - ро	Обозначение	Размер, мм
Верх	A	208,35
	B	208,95
	C	208,32
Середина	A	208,32
	B	209,95
	C	208,34
Низ	D	608,0
	E	607,81
	F	606,85
Низ	A	208,1
	B	208,85
	C	207,36

основном обусловленной температурной деформацией, которая регулируется теплопередачей в кристаллизаторе, необходима определенная конусность узких граней кристаллизатора. Конусность широких граней в результате усадки узких граней не является решающей, поскольку длинная непрочная оболочка склонна к выпучиванию (к деформации) вследствие металлостатического давления для контакта с широкой гранью. Исключения составляют лишь участки вблизи углов заготовки.

При определении рациональных геометрических размеров кристаллизатора все большее практическое значение приобретают методы физического и особенно математического моделирования процессов затвердевания. В конечном счете, такие математические модели обеспечивают суще-

ственное энерго- и ресурсосбережение за счет повышения выхода годной продукции и снижения затрат расходуемых материалов. В настоящей работе решение проблемы оптимизации тепловой работы кристаллизатора выполняется путем построения математической модели затвердевания и усадки заготовки. Задача позволяет выполнять оценку влияния скорости литья, геометрических параметров кристаллизатора и размеров плоского слитка на его термическую усадку и температуру на выходе из него.

Построение математической модели усадки в плоском слитке и исследование с ее помощью влияния параметров литья и кристаллизатора на термоусадку слитка осуществлялось по следующей схеме.

Тепловые процессы в слитке описываются с помощью уравнения теплопереноса:

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

где $c_{эф} = 1 - \frac{W}{c_{ж} T_0} \frac{\partial \xi}{\partial T}$ – эффективная теплоемкость;

$\theta = \frac{T}{T_0}$ – безразмерная температура;

$c_{ж}$ – теплоемкость в жидкой фазе расплава;

W – скрытая теплота кристаллизации;

$\lambda_{эф} = (1 - \xi)\lambda_{ж} + \xi\lambda_{т}$ – эффективный коэффициент теплопроводности;

$\lambda_{ж}$, $\lambda_{т}$ – коэффициенты теплопроводности в жидкой и твердой фазах.

Расчет доли твердой фазы ξ производится по методу Никитенко Н.И. по следующей формуле[2]:

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

Граничные условия для температуры:

$$x = 0 \text{ или } x = L_x: \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = \begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0; & 0 < y < h_{TH} \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} = -Bi_{кр}(\theta - \theta_{кр}), & h_{TH} < y \leq h_K, \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} = -Bi_{пол}(\theta - \theta_{пол}), & h_K < y \leq h_{зоо}, \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} = -Bi_{воз}(\theta - \theta_{воз}), & h_{зоо} < y, \end{cases}$$

$$y = 0: \quad \theta = 1$$

$$y = L_y: \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\lambda_{втр}}{\lambda_r} \frac{\partial \theta}{\partial y}; \quad \theta_+ = \theta_-.$$

где $Bi_{кр}$, $Bi_{пол}$, $Bi_{воз}$ – числа Био для областей кристаллизатора, зоны вторичного охлаждения и на границе воздух–поверхность слитка [9];

h_{TH} , h_K , $h_{зоо}$ – высоты теплового насадка, активной зоны кристаллизатора и зоны вторичного охлаждения.

Приведенные уравнения представляют собой комплексную математическую модель теплообменных процессов в формирующемся литом плоском слитке.

Суммарный тепловой поток в кристаллизаторе может быть определен с учетом скорости разливки, температуры литья и размеров кристаллизатора.

После решения задачи теплообмена выполняется численная реализация математической модели усадки слитка и исследование с ее помощью влияния скорости литья, размеров слитка на его термоусадку по следующей схеме.

Для расчетов усадки применялись средние значения коэффициента линейного расширения α , т.к. известно, что в инженерной практике для подсчета напряжений, возникающих в металле при изменении его температуры, необходимо использовать истинные коэффициенты расширения α , а для подсчета изменения размеров тела вследствие термического расширения удобно использовать средние значения $\alpha_{ср}$ [1, 10].

Для исследования оптимальной конусности плоского кристаллизатора путем определения усадки затвердевающей медной оболочки применялась конечноэлементная упругая вязкопластичная модель термического напряжения «*Cukrist*». Модель позволяет вычислить конечноэлементную дискретизацию 2D уравнения теплопроводности переходного состояния в системе отсчета Лагранжа, которая движется по МПНЛЗ вместе с затвердевающей медной оболочкой.

В процессе выполненных исследований оценивалось влияние на ко-

нусность скорости вытяжки заготовки, интенсивности теплоотвода, а также длины кристаллизатора. Наряду с этим, была предпринята попытка учесть влияние гидродинамических процессов, происходящих при заливке металла в кристаллизатор. С этой целью в математическую модель были введены поправки, учитывающие влияние на динамику затвердевания вышеуказанных процессов. Исследования проводились с помощью физической модели, схема которой представлена на рис. 2.

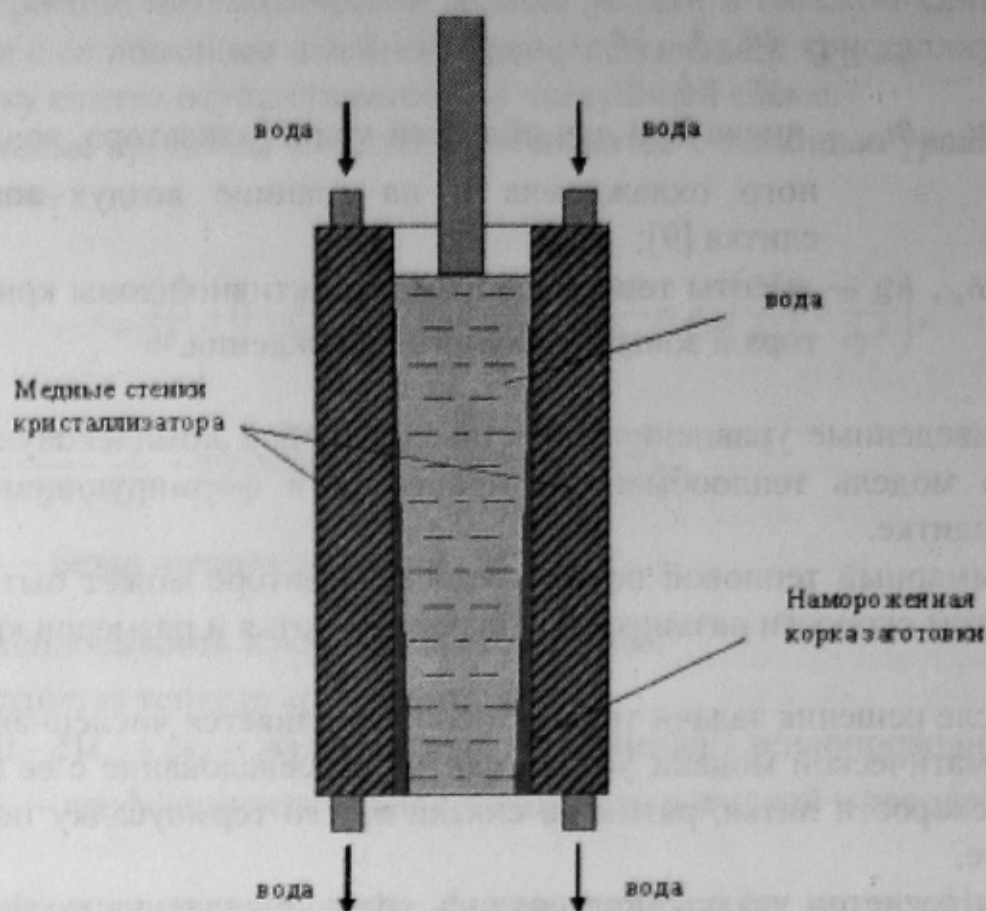


Рисунок 2 - Схема модели для изучения влияния потоков меди на корочку затвердевшей заготовки

Плоская модель представляла собой кристаллизатор, передняя и задняя стенка которого были изготовлены из органического стекла, обеспечивающего приемлемые условия наблюдения, а две другие стенки – из полового медного профиля, в полости которого циркулировала вода для охлаждения заготовки. На подготовительном этапе моделирования в водоохлаждаемый кристаллизатор заливался расплавленный тиосульфат натрия и на медных стенках намораживался слой твердой корочки, после чего жидкий остаток выливался. На втором этапе в полость модели кристаллизатора по-

давали воду, струя которой, имитируя струю жидкого металла, размывала твердую корочку тиосульфата натрия.

С целью наиболее точной оценки влияния потоков на корочку затвердевающей заготовки процесс моделирования снимали цифровой видеокамерой, что позволило выбирать наиболее характерные моменты разлива и определять скорости движения потоков в полости кристаллизатора.

В результате физического моделирования были получены данные о локальном износе затвердевшей корочки потоками расплава, которые, будучи внесенными в виде поправок в математическую модель формирования слитка, позволили учесть влияние потоков на динамику усадки.

Исследование с помощью вышеописанной математической модели динамики усадки плоских слитков выполнялось в несколько этапов, что дало возможность систематизировать степень влияния исследуемых параметров. Расчет велся с учетом следующих параметров кристаллизатора:

- расчетные размеры слитка – 208×610мм;
- длина гильзы 395мм (плоский слиток);
- толщина торцевой стенки кристаллизатора – 38 мм, боковой – 32 мм;
- толщина ребра на торцевой и боковой стенках кристаллизатора – 4 мм;
- число ребер на торцевой стенке – 12 шт., на боковой – 40 шт;
- вторичное охлаждение с выходом воды на слиток;
- расход воды составляет 9,8 м³/час (торцевая стенка), 20,3 м³/час (боковая стенка);

На первом этапе исследовалось влияние скорости литья на термоусадку слитка. В расчетах варьировалась скорость литья и расходы воды на стенки кристаллизатора.

Далее исследовалось влияние величины оребрения боковой и торцевой сторон кристаллизатора усадки на теплообмен и толщину слитка в зоне кристаллизатора. При этом было принято, что оребрение стенок кристаллизатора позволяет не просто повысить жесткость конструкции, а также обеспечит некоторое изменение интенсивности отвода тепла.

Из анализа результатов расчетов установлено следующее:

-увеличение скорости литья приводит к уменьшению усадки слитка (увеличение скорости от 0,127 м/мин до 0,132 м/мин снижало, например, усадку в зоне кристаллизатора в среднем на 0,4÷0,6 мм);

-увеличение расхода охлаждающей воды на торцевую стенку при неизменном расходе на широкую стенку приводит к увеличению усадки слитка на узкой стороне кристаллизатора в его верхней части в среднем на

1 мм, в нижней части в среднем на 0,5 мм;

-увеличение расхода охлаждающей воды на боковую стенку при неизменном расходе на узкую стенку не приводит к существенному увеличению усадки слитка как на широкой, так и на узкой сторонах кристаллизатора, что подтверждает тот факт, что величины расходов воды, используемые на исследуемых объектах являются близкими к рациональным для исследуемой области разливки;

-увеличение технологической длины кристаллизатора ухудшает условия формирования и охлаждения слитка, поскольку в этом случае происходит увеличение абсолютного размера величины усадки, что может приводить к локальному отхождению поверхности заготовки от стенки кристаллизатора и появлению зазора, препятствующего отводу тепла.

Для повышения эффективности работы кристаллизатора предлагается внутреннюю поверхность нового кристаллизатора выполнить с учетом поправки на естественную усадку литого слитка, т.е. с переменной по высоте конусностью параболического профиля по торцевой стороне кристаллизатора.

Для нижней части кристаллизатора конусность должна составлять $0,24\% \pm 0,48\%$ ($2 \div 3$ мм), а в верхней (до 20 см от мениска) – принята равной $0,72\% \pm 0,96\%$ ($4 \div 6$ мм) с учетом предупреждения возможного заклинивания слитка (или повреждения внутренней поверхности кристаллизатора) при максимальной скорости литья (рис.2.9, расчеты произведены для варианта конусности в нижней части кристаллизатора – 2 мм, в верхней части – 4 мм, высота верхней части – 240 мм от верха кристаллизатора).

Список литературы

1. 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.
2. Соболев В.В., Трефилов П.М. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье. - М.: Металлургия, 1988. -160 с.
3. Иванцов Г.П. Теплотехника слитка и изложницы. М.: Металлургия, 1956.
4. Шатагин О.А.и др. Горизонтальное непрерывное литьё цветных металлов и сплавов. М., Металлургия, 1974.
5. Thomas B., Ojeda C. Ideal Taper Prediction for Dlab Casting // Proc. ISSTech Steelmaking Conference, Indianapolis, IN, USA, April 27-30, 2003. – Warrendale, PA: ISS-AIME, 2003. – P.295-308.
6. Wolf M. Mold Length in Slab Casting – a Review// Iron and Steelmaker. 1996. Vol.23. – P.41-51.
7. Prevention of Shell Thinning Breakouts Associated with Widening Width Changes / G.D.Lawson, S.C.Sander, W.H.Emling e.a. // Proc. Steelmaking Conf. Chicago, IL. - Warrendale, PA: ISS, 1994. – P.329-336.

8. Thomas B., Moitra A., Storkman W.R. Optimization Taper in Continuous Casting Mold Using Mathematicak Models // Proc. 6th International Iron and Steel Congress. – Tokyo (Japan): ISIJ, 1990. – P.348-355.
9. 9.Прямая оптимизация теплофизических процессов / А.П.Огурцов, Ф.В.Недопекин, В.К.Толстых, Н.А.Володин. - Донецк: Юго-Восток, 1997. - 150 с.
10. Гридин С.В. Исследование усадочных явлений при формировании слябовой заготовки в зоне кристаллизатора // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2004. № 8 (228). - С.176-180.

Надійшла до редколегії 05.10.2009.

Ю. Д. САВЕНКОВ*, **С. В. ГРИДІН,**
Є. В. ШТЕПАН**, **В. Є. УХІН****,
А. В. КРАВЧЕНКО**, **О. П. ВЕРЗИЛОВ**.**

* - ВАТ «АЗОКМ»,

** - ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Дослідження процесу формування прямокутного зливка при напівбезперервному розливанні міді. С використанням методів фізичного і математичного моделювання вивчено процес формування прямокутного зливку. Показано вплив технологічних факторів і гідродинамічних процесів на усадку прямокутного зливка. кристалізатор, мідь, зливки, теплопердача, усадка, коринка

YU. D. SAVENKOV*, **S. V. GRIDIN****,
YE. V. SHTEPAN**, **V. YE. UKHIN****,
A. V. KRAVCHENKO**,
A. P. VERZILOV**

* - AZOZM,

** - SHSI «Donetsk National Technical University»

Research of the Continuously-Casting Copper Slab Forming Process. With physical and mathematical simulation copper slab forming process has been investigated. The influence of the technological and hydrodynamics factors on the slab shrinkage has been studied.

mould, copper, ingot, heat transfer, shrinkage, shell

© Ю. Д. Савенков, С. В. Гридин, Е. В. Штепан,
В. Е. Ухин, А. В. Кравченко, А. П. Верзилов, 2009