



*The article is dedicated to solving of inverse problem of heat conduction. The simple procedure of searching of the heat transfer coefficients for cylindrical casting on the basis of solution of two-dimensional equation of heat transmission is offered.*

А. М. БРАНОВИЦКИЙ, Ю. Л. СТАНЮЛЕНИС, Ю. А. ЛЕБЕДИНСКИЙ,  
ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74.047.001.57

## УТОЧНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ ЛИТЬЯ

Численные модели затвердевания отливки требуют априорного знания многих теплофизических параметров материалов и кристаллизатора. Большинство параметров известно с приемлемой точностью, но коэффициенты теплопередачи на границе металл-графит  $\alpha_{мет-гр}$  и на границе с водой для охлаждения  $\alpha_{вод}$  могут существенно меняться как для разных кристаллизаторов, так и для различных зон внутри одного кристаллизатора. Коэффициент  $\alpha_{мет-гр}$  зависит от степени обработки поверхности графита, давления металла, степени затвердевания отливки и т.д., коэффициент  $\alpha_{вод}$  — от конструктивных и геометрических особенностей каналов системы охлаждения, скорости движения воды и других факторов, которые часто сложно учесть при численном моделировании с приемлемой точностью. Поэтому необходимо уточнение данных коэффициентов исходя из реальных температур кристаллизатора, полученных экспериментальным путем.

Измерение температур графитовой втулки кристаллизатора при непрерывном горизонтальном литье проводили при литье прутка из бронзы ОЦС 5-5-5 диаметром 34 мм. В установленном режиме поддер-

живали следующие технологические параметры: время движения слитка — 1,8 с; время паузы — 5 с; длина шага вытяжки — 90 мм; температура расплава в металлоприемнике — 1080–1110°C.

Конструкция и геометрические размеры кристаллизатора, а также положение в нем измерительных термопар показано на рис. 1. Термопары в керамической сололке прижимали ко дну глухого отверстия диаметром 2 мм и закрепляли сверху планкой.

Для лучшего термического контакта датчика с графитом в отверстия насыпали небольшое количество медной пыли. Расстояние до рабочей поверхности графитовой втулки кристаллизатора составляло 2 мм.

Сигнал с датчиков поступал на вход усилителей, а затем на вход платы АЦП LA2M5-14.

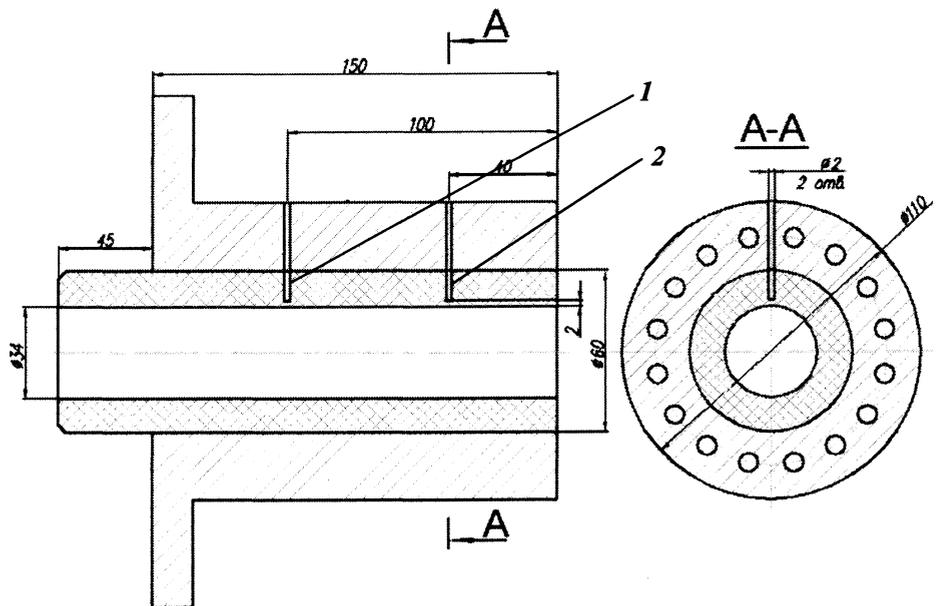


Рис. 1. Схема расположения термопар: 1 — первая термопара; 2 — вторая термопара

Показания термопар регистрировали и записывали на жесткий диск ЭВМ с помощью утилиты непрерывного сбора данных. Общий вид полученных кривых изменения температуры внутри графитовой втулки показан на рис. 2.

Наличие информации о температурах позволяет приближенно оценить параметры  $\alpha_{\text{мет-гр}}$  и  $\alpha_{\text{вод}}$  в зонах нахождения термопар с помощью решения обратной задачи теплопроводности. Для решения прямой задачи использовали метод конечных разностей [1, 2].

В общем случае решение обратной задачи требует численной минимизации функционала, определяющего суммарную ошибку между экспериментальными и теоретическими значениями температур. Вид функционала может отличаться в зависимости от конкретной задачи [3]. Такие методы, как правило, громоздки, и в случае малого числа термопар их применение на практике в ряде случаев не является оправданным. В данном случае мы применили метод последовательного использования показаний термопар начиная от ближайшей к металлоприемнику термопары.

Пусть в цилиндрической системе координат  $\{r, \varphi, z\}$  ось  $z$  совпадает с осью кристаллизатора. В данном случае для расчетов использована двумерная численная модель уравнения теплопроводности, в которой считается, что как параметры теплообмена, так и температура в отливке и кристаллизаторе зависят только от  $r$  и  $z$ . Данное приближение физически может быть оправдано тем, что в начале кристаллизатора при сильном охлаждении жидкого металла коэффициент теплопередачи слабо зависит от угла  $\varphi$ , в дальнейшем же охлаждение в данной области кристаллизатора слабо зависит от коэффициента теплопередачи в других областях  $\varphi$ . Кроме того, использование трехмерной задачи приводит к длительным численным расчетам для поиска оптимизированных коэффициентов теплопередачи, что вряд ли можно считать оправданным для цилиндрической отливки.

Охлаждение упрощенно моделировалось путем задания одного коэффициента  $\alpha_{\text{вод}}$  на цилиндрической фиктивной границе графит-вода, учитывающего прохождение тепла через металлический кожух и границу металл-вода.

Для поиска коэффициентов  $\alpha$  использованы значения максимальной и минимальной температур в цикле вытяжки при установившемся процессе литья. При этом имеются следующие особенности поведения этих температур при измене-

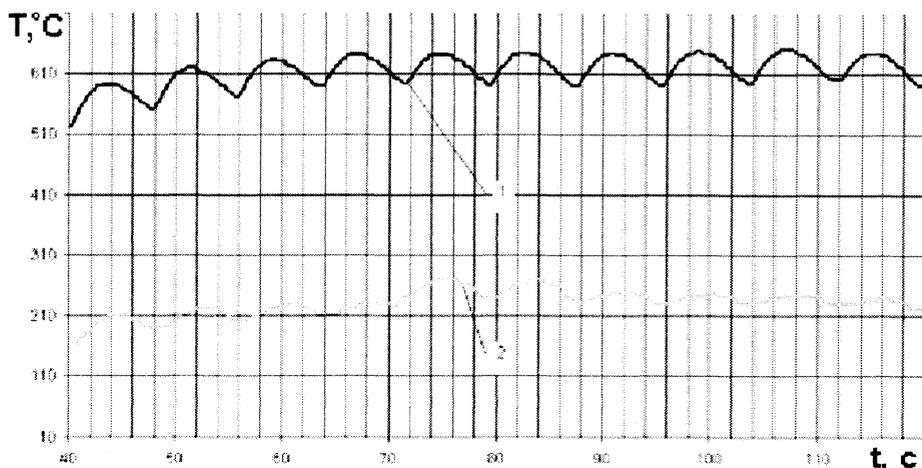


Рис. 2. Изменение температуры в точках измерения: 1 – показания первой термопары; 2 – показания второй термопары

нии коэффициентов  $\alpha$ : с ростом  $\alpha_{\text{мет-гр}}$  наблюдается рост обеих температур и разности между ними; с ростом  $\alpha_{\text{вод}}$  наблюдается рост обеих температур и уменьшение разности между ними.

Таким образом, оптимизация параметров по полученным экспериментальным данным может быть сведена к простой процедуре. Сначала используются данные первой термопары в зоне сильного охлаждения. При некотором значении  $\alpha_{\text{вод}}$  подбирается значение  $\alpha_{\text{мет-гр}}$  с тем, чтобы расчетная максимальная температура совпала с экспериментальной. Ввиду монотонной зависимости температуры от  $\alpha$  эта процедура просто сводится к решению трансцендентного уравнения методом деления отрезка пополам. После этого, если, например, минимальная расчетная температура больше экспериментальной, уменьшаем  $\alpha_{\text{вод}}$  и опять изменяем  $\alpha_{\text{мет-гр}}$  в соответствии с максимальной температурой и т.д. Таким образом, получаем оба значения  $\alpha$  в данной зоне кристаллизатора.

Далее рассмотрим показания второй термопары. Учитывая малость температуры в данной области, а также незначительную разность между ее максимумом и минимумом, можно считать, что основное термическое сопротивление в этой области приходится на границу металл-графит. Поэтому оправданным является расчетное предположение о том, что величину  $\alpha_{\text{вод}}$  можно считать независимой от координаты  $z$  при расчетах. Зависимость  $\alpha_{\text{мет-гр}}$  от  $z$  моделировалась при расчетах кусочно-непрерывной линейной функцией.

Таким образом, для цилиндрической отливки предложена простая процедура поиска коэффициентов теплопередачи на основе решения двумерного уравнения теплопереноса. Аналогичная процедура для поиска данных коэффициентов в других областях (например, в нижней части кристаллизатора)

требуется при получении значений в других зонах. Только после этого численное решение трехмерной задачи затвердевания отливки будет достаточно корректным для полного описания процесса во всем пространстве отливка—кристаллизатор.

Получены следующие значения коэффициентов теплопередачи:  $\alpha_{\text{мет-гр}}$  равен приблизительно 9000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) в зоне первой термопары и около 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) в зоне второй термопары. Значение  $\alpha_{\text{вод}}$  приближенно равно 3600 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Таким образом, в зоне сильного охлаждения основное термическое сопротивление образуется на границе с водой. В зоне расположения второй термопары основное сопротивление образуется за счет зазора между металлом и графитом. Данные выводы согласуются с [4]. Приведенный метод применим только для случая, когда значение коэффициента  $\alpha$  в зоне установки последующей термопары не влияет на значение температуры в

зоне установки предыдущей, т.е. для случая достаточно «разреженного» размещения термопар. В этом случае использование данного алгоритма физически обоснованно и результаты расчетов устойчивы относительно малых изменений экспериментальных данных.

### Литература

1. Marukovich E.I., Branovitsky A.M. Three-dimensional thermal model of solidification of continuous casted rectangular billets // The 4-rd International Conference Simulation, Designing and Control of Foundry Processes 25–26 November 1999, Krakow, Poland.
2. Марукович Е. И., Брановицкий А.М., Харьков В. А Двухмерная математическая модель для расчета затвердевания цилиндрической непрерывной отливки // Литье и металлургия. 2002. №1. С. 27–30.
3. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989.
4. Кац А.М., Шадек Е.Г. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.



РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА  
— один из крупнейших информационных центров Беларуси  
предлагает ознакомиться с новыми патентами по литью.

#### ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ 6036 РБ, МПК7 С 21С 5/52, 7/00. СПОСОБ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ОСНОВНОЙ ДУГОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ.

Патентообладатель: Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод».

Способ выплавки стали в основной дуговой электропечи, включающий в себя завалку шихты, плавление, наводку шлака и продувку кислородом, отличающийся тем, что при плавлении шихты основность шлака поддерживают 1,8–2,8 присадкой кварцевого песка, при этом массу присаживаемого на плавку песка определяют по формуле:

$$M_{\text{песка}} = K (0,85M_{\text{изв}} - 0,092M_{\text{губ}} \text{ Fe}) - 0,014M_{\text{чуг}} - 0,0042M_{\text{мет. завалки}}$$

где  $M_{\text{песка}}$  — масса присаживаемого на плавку песка, кг;  $K$  — коэффициент, составляющий 0,357–0,555 и определяемый как величина, обратная требуемой основности шлака;  $M_{\text{изв}}$  — масса извести на плавку, кг;  $M_{\text{губ}} \text{ Fe}$  — масса губчатого железа прямого восстановления на плавку, кг;  $M_{\text{чуг}}$  — масса передельного чугуна на плавку, кг;  $M_{\text{мет. завалки}}$  — масса металлозавалки без губчатого железа прямого восстановления на плавку, кг. Изобретение относится к области черной металлургии, в частности к выплавке качественной стали в дуговых электропечах с основной футеровкой и может быть использовано для выплавки стали для металлокорда и бортовой проволоки. Задача, решаемая изобретением, состоит в получении состава стали, обеспечивающего при последующем переделе повышение качества металлокорда и бортовой проволоки. Технический результат, получаемый при использовании изобретения, состоит в обеспечении требуемой основности шлака, увеличении его окислительной способности и снижении содержания азота в выплавленной стали.

#### ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ 6064 РБ, МПК7 С 21С 7/04. СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА АВТОМАТНОЙ СТАЛИ.

Патентообладатель: Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод».

Способ производства автоматной стали, включающий в себя внепечную обработку раскисленной алюминием и десульфурованной жидкой стали сначала кальцийсодержащей, а затем серосодержащей порошковыми проволоками, отличающийся тем, что сталь десульфуруют до содержания серы менее 0,015 мас. % и при ее обработке серосодержащую проволоку вводят в ковш с интенсивностью 0,15–0,32 кгS/т мин. Изобретение относится к черной металлургии, в частности к производству автоматных сталей с внепечной обработкой жидкого расплава в ковше порошковыми реагентами. Задача, решаемая изобретением, состоит в усовершенствовании способа производства автоматной стали путем установления при внепечной обработке регламентированной подачи серосодержащей порошковой проволоки в единицу времени в ковш с жидким металлом и регламентации верхней границы содержания серы в стали перед вводом кальцийсодержащей проволоки. Технический результат, получаемый при использовании изобретения, состоит в полном модифицировании и глобуляризации всех неметаллических включений, в увеличении степени усвоения серы и стабильном легировании серой жидкого металла, снижении расхода проволоки, улучшении обрабатываемости стали и уменьшении технологической обрезки.

#### ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ 6037 РБ, МПК7 В 22D 11/10, 27/20. СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ.

Патентообладатель: Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод».

Способ непрерывной разливки стали, включающий в себя подачу металла из сталеразливочного ковша в промежуточный ковш, а затем в кристаллизатор и ввод проволоки в сталь, отличающийся тем, что проволоку диаметром 1,0–2,4 мм с содержанием углерода, равным его содержанию в разливаемой стали, вводят в сталь через центральное отверстие стопора промежуточного ковша, далее через стакан-дозатор и погрузной стакан в кристаллизатор под уровень металла. Изобретение относится к области черной металлургии, в частности к непрерывной разливке качественной высокоуглеродистой стали.

Документы не продаются!

Ознакомиться с рефератами и описаниями отечественных и зарубежных заявок и патентов можно по адресу: г. Минск, проспект Машерова, 7, РНТБ, читальный зал патентных документов (503 к.). Тел.: 226 – 65 – 05.