Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIV, вып. 3, 1973 г.

К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕПЛООБМЕНА В КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЕ

Ю. Д. Декопов

Теплообмен в конвертерной ванне — сложный и до сих пор недостаточно изученный процесс.

Для изучения вопросов теплообмена в ванне конвертера можно использовать шаровой датчик [1]. Ниже предложена методика исследования процесса теплообмена между шаровым датчиком и расплавом конвертерной ванны с помощью аналоговой вычислительной машины (АВМ).

Математическая модель процесса получена преобразованием дифференциального уравнения теплопроводности Фурье в частных производных [2] к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и заменой значений дифференциалов конечными разностями [3]. Граничные условия третьего рода приведены к виду, удобному для решения на АВМ, введением на поверхности шара вспомогательного слоя и некоторым преобразованием в уравнении, описывающем процесс теплопроводности в этом слое. Неопределенность в центре шара (при $r=0$) устранена на основе известного приближения [4].

Условно разбив исследуемый шаровой датчик на n слоев и учтя сделанные преобразования и допущения, можно получить математическую модель

$$\frac{dT_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{\alpha\Delta r}{C\gamma}\left[\frac{T_{\text{р}}-2T_{\text{п}}+T_1}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{r}\cdot\frac{T_{\text{р}}-T_{\text{п}}}{\Delta r}\right], \qquad (1)$$

$$\frac{dT_1}{d\tau} = a\left[\frac{T_{\text{п}}-2T_1+T_2}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{r}\cdot\frac{T_{\text{п}}-T_1}{\Delta r}\right], \qquad (2)$$

$$\frac{dT_2}{d\tau} = a\left[\frac{T_1-2T_2+T_3}{(\Delta r)^2} + \frac{2}{r}\cdot\frac{T_1-T_2}{\Delta r}\right], \qquad (3)$$

$$\frac{d\,T_{n-1}}{d\,\tau}=a\left[\frac{T_{n-2}-2T_{n-1}+T_n}{(\Delta r)^2}+\frac{2}{r}\cdot\frac{T_{n-2}-T_{n-1}}{\Delta r}\right], \quad (4)$$

$$\frac{d\,T_n}{d\,\tau}=4a(T_{n-1}-T_n), \quad (5)$$

где $T_и$ и T_n — температура соответственно поверхности и центра шарового датчика, °С; T_1, T_2, ..., T_{n-1} — температура в первом (от поверхности), втором, ..., $(n-1)$ слоях шарового датчика, °С; $T_р$ — температура расплава, °С; τ — время прогрева шарового датчика, *ч*; r — координаты исследуемого слоя шарового датчика, *м*; α — коэффициент теплоотдачи от расплава к поверхности датчика, *ккал/м²ч·°С*; C и γ — удельная теплоемкость и удельный вес материала датчика, *ккал/кг°С* и *кг/м³*; a — коэффициент температуропроводности материала датчика, *м²/ч*.

Проверка модели показала, что погрешности в определении температуры в центре шарового датчика с помощью АВМ типа МН-7 в основном не превышают 10%. Бо́льшие погрешности наблюдались в начальный период прогрева датчика, составляющий примерно 15% от общего времени прогрева. Разработанная математическая модель удовлетворительно описывала процесс теплообмена, происходящий между расплавом и шаровым датчиком. Она была использована для выяснения влияния ряда факторов на тепловую работу датчика.

Исследование проводили применительно к агрегату непрерывного конвертирования медно-никелевых штейнов для датчиков ∅ 40—50 *мм*, выполненных из огнеупорных материалов ($a=1{,}8\cdot10^{-3}$—$3{,}3\cdot10^{-3}$ *м²/ч*). На основе проведенных ранее исследований коэффициент теплоотдачи между расплавом и датчиком в большинстве опытов был принят равным 600 *ккал/м²ч·град*, а разность температур между температурой расплава и начальной температурой датчика составляла 100°. Тепловую работу датчика оценивали по температурной кривой нагрева, снимаемой в центре датчика. Предложенная методика позволила решить ряд практических вопросов, связанных с процессом теплообмена шарового датчика с расплавом конвертерной ванны, не прибегая к трудоемким экспериментам на работающем агрегате.

1. **Влияние потерь тепла при переносе шарового датчика из печи предварительного нагрева в конвертер.** Чтобы при опускании в расплав на поверхности датчика не образовывалась корочка застывшего расплава, искажающая результаты

опытов, его предварительно равномерно прогревали до заданной температуры в нагревательной электропечи. При переносе датчика из печи предварительного нагрева в конвертер шар частично терял тепло. При этом в теле шара возникало неравномерное температурное поле. Большей неравномерности соответствовало большее время переноса датчика из одной печи в другую (3, 6, 9 и 12 *сек*). Зная распреде-

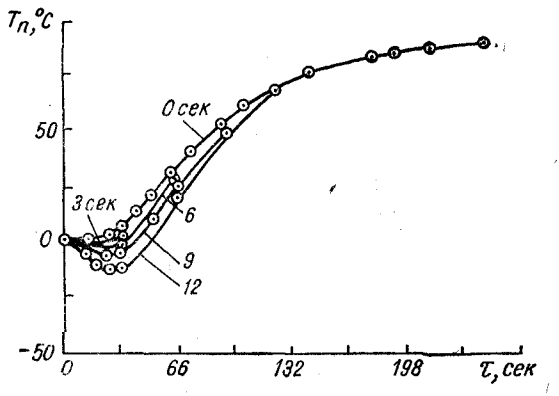


Рис. 1. Влияние потерь тепла при переносе датчика из печи предварительного нагрева в конвертер, если время переноса 0—12 *сек*

ление температур в шаре перед опусканием его в расплав, определяли температуру в центре шара в функции от времени.

Как следует из рис. 1, заданный неравномерный начальный прогрев шара оказывает влияние на температуру в центре шара только в начальный период нагрева. Быстрый перенос шара из одной печи в другую (3—6 *сек*) практически не сказывается на изменении температуры в центре шара. Более длительное время (9—12 *сек*) переноса датчика приводит уже к нежелательным отклонениям температуры.

2. **Влияние свойств расплава на тепловую работу датчика.** Огнеупорный материал, из которого изготавливается шаровой датчик, за время опыта частично может пропитываться расплавом, а при определенных условиях на его поверхности может образоваться корочка застывшего расплава. Влияние этого фактора выявлено с помощью математической модели, при условии, что пропитка или образование корочки

расплава произошли только в первом слое датчика (рис. 2). Установлено, что наибольшее влияние на тепловую работу датчика оказывает корочка шлака (кривая 2), которая может образовываться на поверхности датчика, если его начальная температура меньше температуры плавления шлака. Поэтому при определении коэффициентов теплоотдачи (например, в штейне, файнштейне, меди и т. д.) необходимо

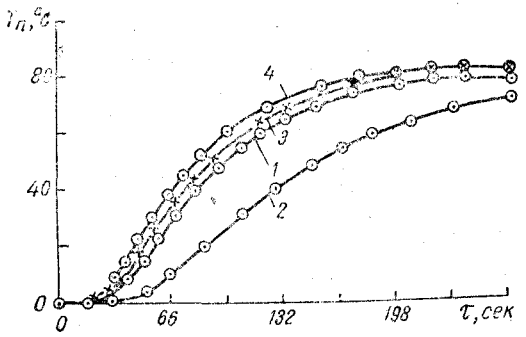


Рис. 2. Влияние материала расплава на температуру в центре датчика:
1 — однородного; *2* — со слоем шлака на поверхности (λ=1 *ккал/м · ч · град*); *3* — с поверхностным слоем, пропитанным штейном (λ=5 *ккал/м · ч · град*); *4* — с поверхностным слоем, пропитанным файнштейном (λ=20 *ккал/м · ч · град*)

принять меры, устраняющие возможность образования шлаковой корочки на поверхности шара. Для этого можно увеличить начальную температуру датчика, или предварительно слить шлак, или в момент опускания датчика отдуть шлак воздухом. Пропитка шара теплопроводными расплавами — штейном и файнштейном — значительно меньше сказывается на изменении температуры в центре датчика, чем при образовании корочки шлака на поверхности шара (кривые *3* и *4*). Это позволяет использовать полученные в таких условиях экспериментальные температурные кривые прогрева датчика для определения коэффициентов теплоотдачи, не вводя поправок на пропитку шара.

3. **Влияние свойств материала, используемого для заделки термопар.** Установленная в теле датчика термопара, предназначенная для измерения температуры, обычно заделывается каким-либо материалом. На практике не всегда удается

заделать термопару материалом, свойства которого близки к свойствам датчика.

Для заделки термопар обычно используют порошкообразный огнеупорный материал и жаростойкую сталь, что значительно искажает температуру в центре датчика (рис. 3).

Такие материалы нельзя рекомендовать для заделки термопар в шаровом датчике, изготовленном из огне-

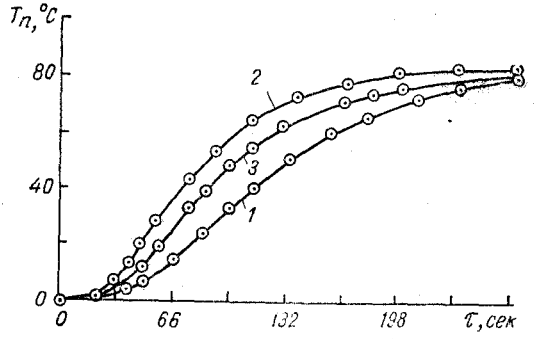


Рис. 3. Влияние свойств материала, используемого для заделки термопар:
1 — порошкообразным материалом, ($\lambda=0{,}5$ *ккал/м · ч · град*); *2* — металлическим — жаростойкой сталью ($\lambda=30$ *ккал/м · ч · град*); *3* — материалом датчика ($\lambda=3$ *ккал/м · ч · град*)

упорного материала. Для уменьшения погрешности необходимо подбирать материал для заделки термопар, близкий по теплофизическим свойствам к материалу датчика, например, порошкообразные материалы на связке.

Рассмотренные задачи являются частью исследований, проведенных по разработанной методике. Были также решены задачи, связанные с изменением тепловых свойств датчика при его нагреве в конвертерной ванне и с условиями установки термопары в центре датчика. Предложенная методика позволяет решать и так называемую обратную задачу теплопроводности, когда по известной температурной кривой нагрева датчика определяют коэффициент теплоотдачи. Применение разработанной математической модели и использование АВМ для решения указанных задач сокращает объем вычислительной работы и позволяет значительно расширить круг решаемых вопросов, связанных с теплообменом в расплавах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Декопов Ю. Д., Гальнбек А. А. Определение коэффициента теплоотдачи от расплава к поверхности твердого тела. В сб.: Новые исследования в металлургии, химии и обогащении. Вып. 2, изд. ЛГИ, 1971.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Высшая школа, 1967.
3. Урмаев А. С. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах. Изд. МИСиС, М., 1971.
4. Юшков П. П. О численном интегрировании уравнения теплопроводности в полярных сетках. Тр. Ленинградского технологического ин-та холодильной промышленности. 1956, т. 14.