

Тепловые условия синтезирования шлаков на основе конечных сталеплавильных шлаков для внепечной обработки железоуглеродистых сплавов

Приведены результаты расчетов тепловых условий синтезирования рафинировочных шлаков с использованием конечных сталеплавильных шлаков.

Ключевые слова: синтезирование, теплосодержание, шлак, излучение, теплоотвод, конвекция, шлаковый реактор

Расчет тепловых условий синтезирования шлаков на основе конечных сталеплавильных шлаков выполнили для трех вариантов синтезирования, когда: *A* – вводили в шлак алюминий в стехиометрически необходимом количестве; *B* – использовали смесь из 80 % Al и 20 % C от их стехиометрически необходимого количества; *C* – дополнительно вводили в смесь алюминий с учетом его 50%-ного угара. В качестве шлакового реактора использовали футерованный шамотным кирпичом усеченный сталеразливочный ковш, предназначенный для слива в него 25 т шлака с температурой 1600 °С.

При определении теплового баланса процесса синтезирования рассчитывали тепло химических реакций (Q_x) между компонентами исходного шлака и присаживаемыми в него материалами, а также физическое тепло (Q_ϕ) самого шлака и вносимое этими материалами, величина которого определяется температурой сталеплавильного шлака (1600 °С) и вводимых добавок (20 °С), а также их количеством и теплофизическими свойствами. Величина Q_x включает тепло, выделяемое в результате экзотермических реакций оксидов шлака с алюминием и поглощаемое при эндотермических реакциях восстановления оксидов шлака углеродом, получаемое при образовании алюминатов и поглощаемое при нагреве и разложении карбонатов кальция. Результаты расчетов суммарного теплосодержания шлака Q представлены в табл. 1. Видно, что величина тепловыделений Q_x существенно зависит от варианта синтезирования шлака, то есть от количества вводимого алюминия.

Таблица 1

Теплосодержание шлака при различных вариантах его синтезирования

Вариант синтезирования	Теплосодержание шлака, ГДж		
	Q_ϕ	Q_x	Q
<i>A</i>	48,3	14,8	63,1
<i>B</i>	48,5	9,8	58,3
<i>C</i>	47,6	52,2	99,8

Тепловые потери в процессе синтезирования шлака в реакторе складываются из потерь тепла теплопроводностью на аккумуляцию шамотным слоем футеровки и обечайкой реактора, конвекцией в окружающую среду с днища и боковой поверхности реактора, конвекцией и излучением с открытой поверхности шлака, а также затрат на теплосодержание шлака и металлического осадка в нем.

Для теплофизического прогнозирования теплового состояния жидкого шлака в реакторе применили метод математического моделирования. Распределение температур в рассматриваемой многосвязной области описывали двухмерным дифференциальным уравнением Фурье-Кирхгофа в цилиндрических координатах с учетом того, что температура по угловой координате φ не меняется ($\partial T/\partial \varphi = 0$)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

с граничными условиями на внешних теплоотводящих поверхностях

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r_i} = \alpha(T - T_c) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_c^4),$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град); ε – степень черноты; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·град⁴); T – температура произвольной точки в объеме реактора в любой момент времени, °С; T_c – температура внешней охлаждающей среды, °С; n – нормаль к теплоотводящей поверхности; r_i – координата теплоотводящей поверхности; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град); c_p – коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·град); ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с; и начальными условиями, заданными одинаковой во всех точках обечайки и огнеупорной кладки реактора начальной температурой, равной в первом случае 20, во втором – 500 °С.

Двухмерную задачу нестационарной теплопроводности с учетом естественной конвекции жидкого шлака решали по явной конечно-разностной схеме. Исходные параметры и теплофизические характеристики исследуемых областей представлены в табл. 2 и 3.

Исходные параметры

Параметр	Значение параметра
Масса жидкого шлака в реакторе, т	25
Температура перед сливом из печи, °С:	
– шлака	1600
– внутренней поверхности реактора	20; 500
– окружающей среды	20
Температура шлака спустя 1 ч после присадки добавок по вариантам А, В, С соответственно	1680; 1640; 2200
Средний внутренний диаметр футерованного реактора, мм	3300
Высота наполнения реактора шлаковым расплавом, мм	1000
Толщина, мм:	
– обечайки реактора	25
– стенки реактора из шамотного кирпича	265
– днища реактора из шамотного кирпича	600
Продолжительность выдержки шлака в реакторе, ч	1; 2; 3; 4

При анализе результатов вычислительного эксперимента рассматривали изменение температурного поля в поперечных сечениях обечайки, футеровки реактора, а также пристеночной и центральной областей жидкого шлака. В заполненном шлаковым расплавом реакторе можно выделить три характерные тепловые зоны: донную, центральную и верхнюю. В донной зоне температурное поле формируется в результате теплоотвода по радиусу через стенку реактора, а также через горизонтальную поверхность его днища. В верхней зоне потери тепла обусловлены теплоотводом в стенку реактора и излучением в окружающую среду. Температурное поле в центральной зоне определяется только теплоотводом через стенку реактора. Там же имеется ядро, в котором температура шлака остается неизменной в течение времени выдержки его в реакторе. Максимальные потери тепла жидким шлаком происходят в донной и верхней зонах реактора.

На рис. 1 и 2 представлены расчетные кривые изменения температуры по поперечному сечению стенки и днища реактора по истечении 1 ч после начала синтезирования шлака (по варианту А) в холодном реакторе и с предварительным его подогревом. Характер изменения температуры в стальном кожухе и футеровке реактора обусловлен преобладающим влиянием температуры окружающей сре-

ды и высокими теплоизолирующими свойствами футеровки, когда даже через 1 ч после начала синтезирования шлака тепловая волна от шлакового расплава не доходит до обечайки реактора. В течение времени выдержки шлака в реакторе достаточно интенсивно нагревается слой футеровки, который контактирует с жидким шлаком. Скорость нагрева этого слоя достигает 4 °С/мин. При этом средняя температура огнеупорной кладки в донной зоне повышается до 840 °С, в центральной зоне – до 930, а в верхней зоне составляет 900.

Для оценки тепловых потерь шлаковым расплавом после его синтезирования в реакторе проведены расчеты теплового состояния непосредственно ванны жидкого шлака, которые показывают, что температура шлака в пристеночной области за один час его выдержки снижается до 1680 °С. Причем на свободной поверхности шлака образуется корка, которая уменьшает потери тепла в процессе дальнейшей его выдержки в реакторе.

При исходном теплосодержании шлакового расплава 63,16 ГДж расчетные потери тепла на аккумуляцию футеровкой реактора за один час составляют 4,38 ГДж. Потерь тепла конвекцией в данный период времени нет, так как температура наружной поверхности реактора остается неизменной. Только по истечении 3 ч от начала синтезирования шлака, когда тепловая волна достигает обечайки реактора, конвективные потери тепла возрастают до 0,04 ГДж. Потери тепла излучением и конвекцией с открытой поверхности шлака за рассматриваемый период времени достигают 2,46 ГДж. К концу часовой выдержки в реакторе расчетное теплосодержание синтезированного шлака и восстановленного металлического осадка составляют 50,55 и 5,12 ГДж соответственно, расхождение при расчете – 1 %, что свидетельствует о правильности принятых допущений при проведении вычислительного эксперимента.

Аналогичными расчетами для синтезирования шлака по вариантам В и С в холодном (20 °С) и подогретом до 500 °С реакторе установлено, что тепловое состояние жидкого шлака инвариантно

Таблица 3

Теплофизические характеристики материалов [1]

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м · °С)	Теплоемкость, кДж/(кг · °С)
Шамот	1800	$(0,72 + 5 \cdot 10^{-4} t) \cdot 1,16$	$(0,193 + 7,5 \cdot 10^{-5} t) \cdot 4,18$
Металл (осадок)	7000	26	0,879
Шлак печной	3000	0,93	$(0,175 + 7 \cdot 10^{-5} t) \cdot 4,18$
Воздух	0,27	0,0763	1,180

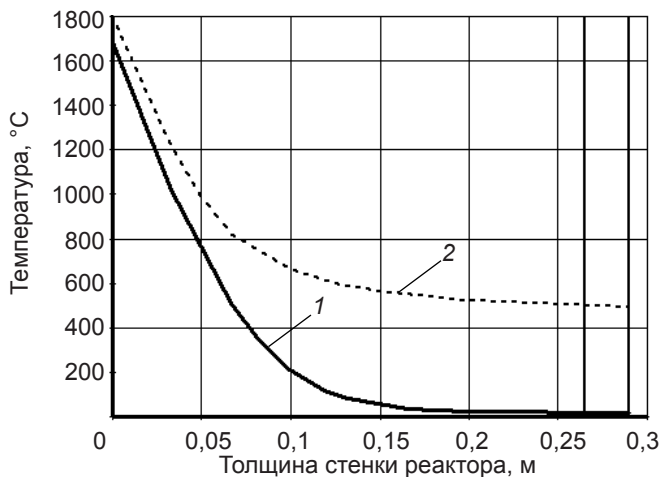


Рис. 1. Распределение температур в футеровке стенки реактора после 1 ч выдержки в нем синтезированного шлака; начальная температура футеровки, °С: 1 – 20; 2 – 500

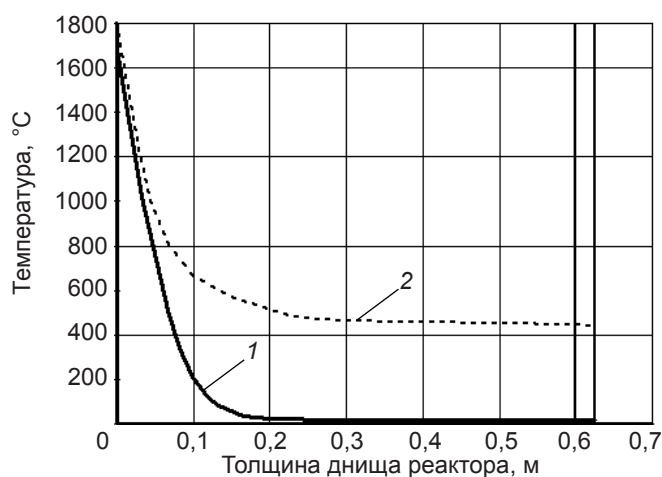


Рис. 2. Распределение температур в футеровке дна реактора после 1 ч выдержки в нем синтезированного шлака; начальная температура футеровки, °С: 1 – 20; 2 – 500

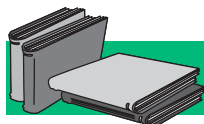
температуре окружающей среды. Изменение температурного поля происходит только в слоях огнеупорной футеровки реактора. Предварительный ее нагрев до 500 °С слабо влияет на результирующую температуру шлака. После часовой выдержки она лишь на 20 °С превышает температуру шлака, которая устанавливается при сливе его в холодный реактор.

При увеличении продолжительности выдержки шлака в реакторе его температура снижается со скоростью примерно 50 °С /ч. При синтезировании шлака по варианту С тепловыделение в 3,5 раза больше, чем при реализации варианта А. В этом случае расчетная температура шлака через 1 ч

после начала его синтезирования в реакторе составляет 2200 °С. По-видимому, реализация на практике такого варианта синтезирования шлака не целесообразна. Гораздо эффективнее часть дорогостоящего алюминия заменять более дешевыми восстановителями, например, коксом, взаимодействующим со шлаком с поглощением тепла.

Выводы

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что синтезированные в реакторе шлаки достаточно долго (в течение 2-4 ч) сохраняют жидкоподвижное состояние, которое позволяет эффективно использовать их для внепечной обработки металла.



ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов В. А., Миткалинный В. И., Старк С. Б. *Металлургическая теплотехника.* – М.: Metallurgy, 1974. – Т. 1. – 672 с.

Анотація

Kurpas V. I., Naydek V. L.

Теплові умови синтезування шлаків на основі кінцевих сталеплавильних шлаків для позапічної обробки залізовуглецевих сплавів

Наведено результати розрахунків теплових умов синтезування рафінуючих шлаків з використанням кінцевих сталеплавильних шлаків.

Ключові слова

синтезування, тепловміст, шлак, випромінювання, тепловідвід, конвекція, шлаковий реактор

Summary

Kurpas V., Naydek V.

Heat conditions of slags synthesis on the basis final steel-smelting slags for out-of-furnace treatment of the iron-carbon alloys

The results of the calculations of the heat conditions of refining slags synthesis using final steel-smelting slags are given.

Keywords

synthesis, enthalpy, slag, emission, heat sink, convection, slag reactor

Поступила 10.12.10