

К. т. н. С. К. Вильданов^{1,2,3} (✉), к. т. н. Л. В. Роголёва³,
д. т. н. А. Н. Пыриков^{2,3}

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² ООО «ОгнеупорТрейдГрупп», Москва, Россия

³ МАНЭБ, Санкт-Петербург, Россия

УДК 669.046.581.4:621.746.047

О НЕКОТОРЫХ КРИТЕРИЯХ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ И ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ

Рассчитана суммарная теплопроводность комплексной теплоизолирующей и шлакообразующей смеси с учетом конвективной составляющей теплопроводности, а также теплопроводности жидкого оксидного раствора, образованного при плавлении ингредиентов комплексной смеси. Показано, что теплопроводность комплексной смеси при температуре применения 1823 К сохраняется на достаточно низком уровне — порядка 18,8 Вт/(м·К). Сформулированы критерии эффективности комплексной смеси на различных этапах ее применения, включающих подачу смеси в сталеразливочный ковш, совместную подачу в сталеразливочный и промежуточный ковши и изложницы. Установлено, что использование комплексной смеси в сталеразливочном ковше снижает скорость охлаждения металла в 1,5 раза. Критерием эффективности применения комплексной смеси в промежуточном ковше как теплоизолятора является уровень отрицательного отклонения температуры от среднего значения ряда последовательных измерений 4 °С. Критериями эффективности комплексной смеси как шлакообразователя в промежуточном ковше являются повышение в оксидном растворе концентрации Al_2O_3 при увеличении количества плавов в серии и снижение концентрации FeO до равновесных значений порядка 0,5 мас. %. При достаточном количестве жидкого оксидного раствора, образованного компонентами комплексной смеси, науглероживания жидкого металла свободным углеродом, содержащимся в смеси, не происходит.

Ключевые слова: комплексная теплоизолирующая и шлакообразующая смесь, конвективная теплопроводность, теплопроводность жидкого оксидного раствора, сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, науглероживание.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение получают комплексные металлургические смеси, например такие, которые сочетают свойства эффективного теплоизолятора и интенсивного шлакообразователя. Такие смеси применяют в основном при разливке стали на МНЛЗ и в изложницы. Смеси подают непосредственно на поверхность жидкого расплава [1–8].

Комплексные теплоизолирующие и шлакообразующие смеси по химическому составу могут быть классифицированы по показателю основности A , выражаемому, например, как $A = (CaO + MgO + Na_2O + K_2O)/SiO_2$. При этом по аналогии, хотя и довольно условной, принятой

для характеристики шлаков, смеси можно классифицировать следующим образом: нейтральные с A , близким к 1; кислые с $A < 1$; основные с $A > 1$. В этой связи A смеси является не формальной величиной, а, скорее, важным энергетическим показателем, от величины которого значительно меняются такие физические свойства смесей, как теплопроводность, вязкость, плотность и некоторые другие, как в твердой, так и в жидкой фазе.

Синергетическим результатом эффективной работы комплексных смесей при их применении является обеспечение низких тепловых потерь с открытой поверхности расплава стали, формирование устойчивого жидкоподвижного слоя оксидного раствора, образованного при плавлении неорганической части смеси и препятствующего процессам окисления кислородом воздуха жидкого железа и легирующих ингредиентов стали. Кроме того, расплавленная часть комплексной смеси не должна оказывать



С. К. Вильданов
E-mail: svildanov@mail.ru

существенного агрессивного воздействия на футеровку, например промежуточного ковша. Жидкий оксидный раствор компонентов смесей должен обладать свойствами поглотителя неметаллических включений. При разливке низкоуглеродистых и легированных марок стали важным является вопрос о возможном растворении свободного углерода, содержащегося в смесях в жидкой стали. И, наконец, между жидкой фазой оксидного раствора, образованного компонентами смеси, и твердой фазой комплексной смеси должно устанавливаться оптимальное соотношение.

Сложности в разработке комплексных смесей состоят в рациональном сочетании взаимно противоположных свойств смесей, обусловленных их химическим составом. Смесей с $A < 1$ (кислые смеси) оказываются эффективными теплоизоляторами, а смеси с $A > 1$ (основные смеси) проявляют большее сродство к неметаллическим включениям в стали и дают более жидкоподвижный оксидный раствор; смеси с $A = 1$ (нейтральные смеси) занимают промежуточное положение.

Учитывая изложенное, представляется актуальным детальное изучение действия комплексных смесей и формулирование критериев эффективности их применения в сталеразливочных и промежуточных ковшах, а также в изложницах.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КОМПЛЕКСНОЙ СМЕСИ

Расчеты теплопроводности неорганических многокомпонентных смесей проводились и ранее [9–11], но при сравнительно невысоких температурах — до 900 °C [12]. Расчет теплопроводности комплексной смеси выполнен для материала Изотерм-1600-В-3 следующего химического состава, мас. %: SiO₂ 75,0, Al₂O₃ 10,0, CaO 2,8, MgO 2,0, (Na₂O + K₂O) 4,9, C 5. Для этого материала $A = 0,13$.

Установлено [13], что теплопроводность насыпного слоя теплоизолирующего и шлакообразующего комплексного материала Изотерм-1600 в интервале 300–600 °C подчиняется экспоненциальному закону. Представляет интерес провести оценку теплопроводности комплексной смеси при температурах ее применения — порядка 1823 К. Для этого рассмотрим следующую модель. Примем, что теплопроводность при 1823 К λ_{1823} является суммой теплопроводности твердой составляющей смеси $\lambda_{\text{ТВ}}$ и части смеси, находящейся в расплавленном состоянии, $\lambda_{\text{Ж}}$, т. е.

$$\lambda_{1823} = \lambda_{\text{ТВ}} + \lambda_{\text{Ж}}. \quad (1)$$

Поскольку комплексная смесь является порошкообразным пористым материалом, а температура применения весьма значительна, то

составляющая суммы $\lambda_{\text{ТВ}}$, в свою очередь, есть сумма теплопроводности:

$$\lambda_{\text{ТВ}} = \lambda^* + \lambda_{\text{КОНВ}}, \quad (2)$$

где λ^* — теплопроводность комплексной смеси в отсутствие конвекции; $\lambda_{\text{КОНВ}}$ — конвективная составляющая теплопроводности смеси в горизонтальном слое.

Согласно [14] для многокомпонентных огнеупорных систем, в которых теплопроводность отдельных составляющих различается не более чем в 10 раз, λ^* можно представить в виде произведения

$$\lambda^* = \prod_{i=1}^k \lambda_i^{v_i}, \quad (3)$$

где λ_i — теплопроводность i -й компоненты смеси; v_i — объемная доля i -й компоненты смеси.

Для материала Изотерм-1600-В-3 примем, что весь Al₂O₃ в его составе смеси присутствует в виде муллита 3Al₂O₃·2SiO₂, весь CaO — в виде CaSiO₃, весь MgO — в виде MgSiO₃, весь Na₂O — в виде Na₂Si₂O₅, углерод — в виде отдельной фазы графита; воздуха; остальное — стеклофаза. Для материала Изотерм-1600-В-3 соотношение (3) выразится как

$$\lambda^* = \lambda_1^{v_1} \lambda_2^{v_2} \lambda_3^{v_3} \lambda_4^{v_4} \lambda_5^{v_5} \lambda_6^{v_6} \lambda_7^{v_7}, \quad (4)$$

где λ_i и v_i — теплопроводность и объемная доля SiO₂, 3Al₂O₃·2SiO₂, CaSiO₃, MgSiO₃, Na₂Si₂O₅, C, воздуха соответственно.

Из-за отсутствия надежных экспериментальных данных по теплопроводности этих фаз значения теплопроводности CaSiO₃, MgSiO₃, Na₂Si₂O₅ рассчитывали как аддитивные функции теплопроводности чистых компонентов CaO, SiO₂, MgO, Na₂O. Результаты расчета теплопроводности и объемной доли фазы для температуры 1823 К приведены ниже:

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
8,50	6,90	8,10	8,30	8,60	0,20	0,10	0,45	0,06	0,02	0,01	0,03	0,03	0,40

Расчет λ^* при 1823 К дает величину 1,3 Вт/(м·К).

Для оценки $\lambda_{\text{КОНВ}}$ комплексной смеси необходим анализ критериальных уравнений. Согласно [15] в слое пористого материала, к которому относится комплексная смесь, расположенного горизонтально к источнику тепла (жидкий металл — расплав), естественная конвекция может развиваться при значении критерия Релея $Ra > Ra_{\text{кр}} = 40$. Оценку этой величины для нашего случая дает соотношение

$$Ra^* = Gr \cdot Pr^* \cdot Da, \quad (5)$$

где Ra^* — модифицированный критерий Релея; Gr — критерий Грасгофа, $Gr = g\beta\Delta T\delta^3/\nu^2$; Pr^* — модифицированный критерий Прандтля, $Pr^* = \nu/a^*$; Da — критерий Дарси, $Da = K/\delta^2$; $g = 9,8$ м/с²; T — температура; $\beta = 1/T$; δ — толщина слоя комплексной смеси; ν — кинематическая вязкость воздуха; $a^* = \lambda^*/C_p\rho_{\text{каж}}$; C_p — теплоемкость; K — газопроницаемость;

$\rho_{\text{каж}}$ — кажущаяся плотность газа, $\rho_{\text{каж}} = MP/RT$; M — молекулярная масса газа; P — давление газа; R — универсальная газовая постоянная.

Наиболее сложным как в теоретическом обосновании, так и в выводе полуэмпирических и эмпирических соотношений является описание теплопроводности жидкой составляющей (оксидного раствора) комплексной смеси, образованной в результате ее плавления на границе раздела фаз металлический расплав – оксидный раствор. Охарактеризуем химический состав оксидного раствора ионной долей соответствующих катионов, поскольку эта система является раствором с общим анионом. Под ионной долей x_i подразумеваем отношение числа ионов данного сорта n_i к общему числу ионов $\sum_{i=1}^k n_i$ того же знака. При таком выражении концентрации, очевидно, ионная доля анионов кислорода тождественно равна 1:

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}. \quad (6)$$

Рассматривая оксидный раствор как катионно-анионную смесь катионов кремния, алюминия, магния, кальция и натрия и т. д. и анионов кислорода, по аналогии с соотношением (3) можно записать

$$\lambda_{\text{ж}} = \prod_{i=1}^k \lambda_{\text{ж},i}^{x_i}, \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{ж},i}$ — теплопроводность i -го компонента оксидного раствора; x_i — ионная доля i -го катиона в оксидном растворе.

Для расчета теплопроводности по формуле (7) принимали значения теплопроводности чистых оксидов при температуре их плавления. Эти значения получены экстраполяцией известных данных при более низких температурах [16, 17]. Для дальнейшего расчета примем: $\lambda^* = 1,3$ Вт/(м·К); $K = 10^{-6}$ м²; $M = 0,029$ кг; $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К); $P = 10^5$ Па; $\nu = 11,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с при 1823 К; $\rho_{\text{каж}} = 0,191$ кг/м³ при 1823 К; $\delta = 0,1$ м; Nu^* при $40 < Ra^* < 400$ равен $0,4^{1/\sqrt{Ra^*}} - 1,5$; $\lambda_{\text{конв}} = \lambda^* Nu^*$ [18, 19].

Для расчета $\lambda_{\text{ж}}$ провели экстраполяцию известных данных по теплопроводности чистых оксидов, составляющих комплексную смесь, на температуру их плавления. Из расчета исключен свободный углерод, поскольку его концентрация в оксидном растворе равна нулю. Кроме того, приняты, что сумма концентраций ($Na_2O + K_2O$) есть концентрация Na_2O . Результаты расчета теплопроводности оксидов при температурах их плавления и ионных долей соответствующих катионов приведены ниже:

$\lambda_{\text{ж},1}$	$\lambda_{\text{ж},2}$	$\lambda_{\text{ж},3}$	$\lambda_{\text{ж},4}$	$\lambda_{\text{ж},5}$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
9,5	8,5	12,0	17,0	18,0	0,73	0,12	0,03	0,03	0,09

Теплопроводность оксидного раствора выразится следующим образом:

$$\lambda_{\text{ж}} = \lambda_{\text{ж},1}^{x_1} \lambda_{\text{ж},2}^{x_2} \lambda_{\text{ж},3}^{x_3} \lambda_{\text{ж},4}^{x_4} \lambda_{\text{ж},5}^{x_5}, \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{ж},i}$ и x_i — теплопроводность чистых оксидов смеси при температуре их плавления и ионные доли соответствующих катионов.

Результаты расчета параметров критериальных уравнений и составляющих теплопроводности приведены ниже:

Gr	Da	Pr*	Ra*	Nu*	$\lambda_{\text{конв}}$	$\lambda_{\text{ж}}$
$6,3 \cdot 10^7$	10^{-4}	$18,1 \cdot 10^{-3}$	114,3	2,8	6,9	10,6

Окончательно получаем теплопроводность комплексной смеси при 1823 К: $\lambda_{1823} = \lambda^* + \lambda_{\text{конв}} + \lambda_{\text{ж}} = 1,3 + 6,9 + 10,6 = 18,8$ Вт/(м·К). Полученное значение теплопроводности при температуре применения позволяет говорить о том, что комплексная смесь сохраняет довольно низкую суммарную теплопроводность, являясь эффективным теплоизолятором. Величину суммарной теплопроводности можно принять за критерий ее теплоизолирующей способности.

Комплексная смесь в сталеразливочном ковше

Применение смеси в сталеразливочном ковше обусловлено не только сохранением части физического тепла металла в ковше и, как следствие этого, снижением скорости охлаждения металла, но и уменьшением теплового воздействия расплава на крышку сталеразливочного ковша. Кроме того, применение смеси дает возможность сохранить жидкоподвижность шлака до конца разливки и кантовки, предотвратить замерзание остатков металла и шлака на элементах футеровки сталеразливочного ковша и продувочных устройств. В табл. 1 приведены сравнительные данные по средним перепадам температуры стали в промежуточном ковше с использованием комплексной смеси одновременно в сталеразливочном и промежуточном ковшах, а также только в промежуточном ковше без применения комплексной смеси в сталеразливочном ковше.

Как видно из табл. 1, применение комплексной смеси в сталеразливочном ковше является эффективным приемом сохранения физического тепла жидкой стали в процессе разливки металла. Так, среднее снижение температуры жидкой стали в промежуточном ковше во время разливки плавов с использованием комплексной смеси Изотерм-1600 в сталеразливочных ковшах составило 16,4 °С, без использования комплексной смеси в сталеразливочных ковшах 21,4 °С.

Прямым доказательством эффективности применения смесей в сталеразливочном ковше является сравнение экспериментальных данных по скорости охлаждения стали в ковше с

Таблица 1. Перепады температуры в промежуточном ковше $T_{\text{пр.к}}$ с применением комплексной смеси в сталеразливочном $T_{\text{АКОС}}$ и промежуточном ковше

Использование комплексной смеси в сталеразливочном и промежуточном ковшах					Использование комплексной смеси только в промежуточном ковше				
номер плавки в серии	$T_{\text{АКОС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пр.к}}, ^\circ\text{C}$ (max)	$T_{\text{пр.к}}, ^\circ\text{C}$ (min)	$\Delta T_{\text{пр.к}}, ^\circ\text{C}$	номер плавки в серии	$T_{\text{АКОС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пр.к}}, ^\circ\text{C}$ (max)	$T_{\text{пр.к}}, ^\circ\text{C}$ (min)	$\Delta T_{\text{пр.к}}, ^\circ\text{C}$
1	1600	1553	1535	18	1	1616	1561	1545	16
2	1600	1556	1536	20	2	1588	1555	1539	16
3	1592	1558	1538	20	3	1590	1556	1531	25
4	1590	1558	1534	24	4	1589	1553	1542	13
5	1590	1555	1545	10	5	1586	1549	1531	18
1	1596	1569	1556	13	6	1590	1544	1521	23
2	1585	1559	1551	8	1	1617	1561	1535	26
3	1588	1558	1550	8	2	1601	1556	1516	40
4	1590	1552	1541	11	3	1603	1558	1538	20
5	1590	1554	1534	20	4	1583	1558	1542	16
6	1590	1555	1543	12	5	1593	1557	1538	19
7	1590	1548	1526	22	6	1599	1546	1526	20
8	1583	1568	1540	28	1	1604	1562	1530	32
1	1597	1546	1533	23	2	1603	1559	1542	17
2	1590	1552	1538	14	3	1583	1554	1535	19
3	1588	1551	1534	17	4	1589	1555	1539	16
4	1598	1552	1536	16	5	1588	1554	1530	24
5	1589	1547	1542	5	6	1586	1559	1533	26
6	1590	1566	1537	29	7	1593	1559	1530	29
1	1601	1544	1526	18	8	1582	1558	1541	17
2	1590	1544	1530	14	9	1598	1564	1544	20
					10	1599	1556	1536	20

применением комплексной теплоизолирующей и шлакообразующей смеси и без ее применения. Эксперимент проводили на сталеразливочных ковшах малой вместимости (от 3 до 15 т) в условиях литейного производства машиностроительного завода. Испытания показали, что при разливке жидкой стали теплоизолирующая смесь (в виде и остаточной твердой фазы, и части жидкой фазы) остается в сталеразливочном ковше и после завершения разливки при кантовке полностью удаляется, не оставляя наплывов и борозд на его футеровке. Эффективность применения смеси на ковшах малой вместимости приведена в табл. 2 и показана на рис. 1. Как следует из табл. 2, условия испытания ковшей со смесью более жесткие, чем в контрольном эксперименте без применения смеси. Сталь в ковше со смесью характеризуется более высо-

Таблица 2. Динамика изменения температуры металла в сталеразливочном ковше с применением комплексной смеси и без ее применения

Без применения материала Изотерм-1600		С применением материала Изотерм-1600	
время, мин	температура, $^{\circ}\text{C}$	время, мин	температура, $^{\circ}\text{C}$
14–20	1621	13–45	1636
14–24	1596	13–52	1605
14–27	1580	14–00	1580
14–30	1563	14–06	1566
14–32	1550	14–10	1553

кой начальной температурой 1636°C (1621°C в контроле) — температурой после скачивания первичного шлака — и более длительным периодом пребывания жидкого металла в ковше 25 мин (12 мин в контроле).

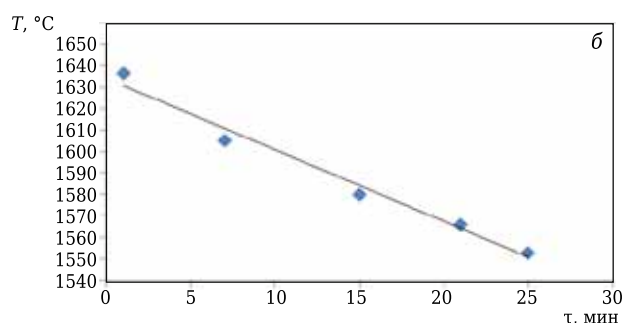
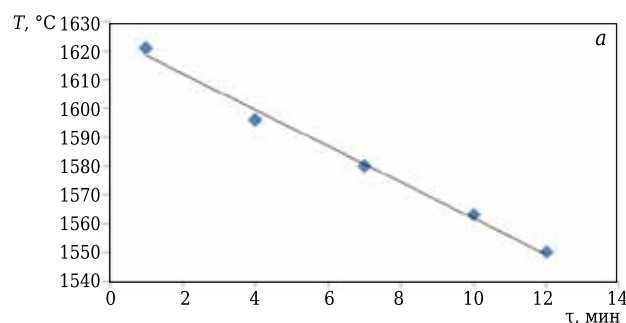


Рис. 1. Зависимость температуры T жидкого металла от длительности τ его пребывания в сталеразливочном ковше: а — без применения материала Изотерм-1600; б — с применением материала Изотерм-1600. Точки в поле рис. 1 — температура металла при измерении термопарой; линия — результат обработки экспериментальных данных в линейном приближении (метод наименьших квадратов); параметры регрессии для рис. 1, а: $T = -6,25\tau + 1531$, $R = -0,87$, для рис. 1, б: $T = -3,32\tau + 1633$, $R = -0,87$

Потери температуры в контрольной плавке (без применения материала Изотерм-1600) за 12 мин составили 71 °С; средняя скорость снижения температуры в ковше 5,9 °С/мин. Потери температуры в опытной плавке (с применением материала Изотерм-1600) за 25 мин составили 83 °С; средняя скорость снижения температуры в ковше 3,3 °С/мин. Таким образом, снижение средней скорости охлаждения металла в ковше с применением материала Изотерм-1600 составляет 56 %.

Комплексная смесь в промежуточном ковше

При применении комплексной смеси в промежуточном ковше помимо устранения тепловых потерь на излучение и конвекцию с открытой поверхности расплава смесь предохраняет металл от вторичного окисления кислородом воздуха и осуществляет ассимиляцию неметаллических включений. Типичные изменения температуры при последовательных измерениях в промежуточном ковше приведены в табл. 3. Как видно, применение комплексной смеси в промежуточном ковше обеспечивает среднее снижение температуры $(T_{cp} - T_{min})/7$ на 4 °С. Такие значения

Таблица 3. Изменение температуры при последовательных измерениях в промежуточном ковше

Номер плавки	$T_{ст.к.}$, °С	$T_{пр.к.}$, °С (по замерам)	$T_{ср.пр.к.}$, °С	$(T_{cp} - T_{min})$, °С
1	1567	1538, 1543, 1536, 1543, 1543, 1539	1540	2
2	1570	1542, 1545, 1542, 1537, 1532	1540	8
3	1570	1537, 1544, 1546, 1543, 1538	1542	5
4	1570	1557, 1556, 1555, 1554, 1550	1554	4
5	1568	1554, 1555, 1554, 1552	1554	2
6	1567	1556, 1552, 1551, 1545	1551	6
7	1564	1533, 1537, 1536, 1531	1534	3

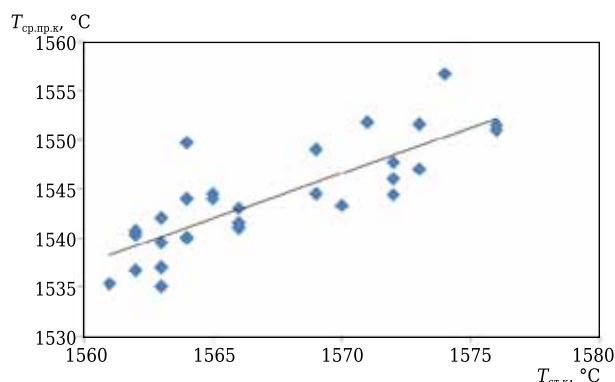


Рис. 2. Зависимость средней температуры металла в промежуточном ковше от температуры металла в сталеразливочном ковше после внепечной обработки

перепадов температур полностью обеспечивают стабильность разливки стали.

Очевидно, что температура в сталеразливочном ковше после окончания внепечной обработки связана с температурой, измеряемой в промежуточном ковше в течение разливки. Но характер такой зависимости неочевиден. На рис. 2 показаны результаты обработки 30 плавов, на которых фиксировали температуру стали в сталеразливочном ковше $T_{ст.к.}$ и средние значения измерений температуры (4–6 замеров) в промежуточном ковше $T_{ср.пр.к.}$ по ходу разливки. Видно, что эта зависимость носит явно выраженный линейный характер. Уравнение регрессии имеет вид: $T_{ср.пр.к.} = 0,93 \cdot T_{ст.к.} + 89,09$. Параметры регрессии: коэффициент корреляции $R = 0,81$, сумма квадратов отклонений по параметру $T_{ст.к.}$ 633, сумма квадратов отклонений по параметру $T_{ср.пр.к.}$ 830.

Как отмечено выше, комплексное действие смеси связано с присутствием двух фаз: твердой фазы, расположенной на границе раздела комплексная смесь – воздух, и жидкой оксидной фазы, расположенной на границе раздела металлический расплав – комплексная смесь. Соотношение между этими фазами имеет важное практическое значение, поскольку именно эти фазы определяют эффективность смеси как теплоизолятора и как шлакообразователя.

На рис. 3 показано изменение соотношения фаз при применении смеси на первой плавке в серии. Как видно, комплексная смесь образует достаточно большое количество жидкой оксидной фазы, но вместе с тем обладает достаточной устойчивостью, т. е. способностью сохранять твердое состояние на границе раздела комплексная смесь – воздух.

Критериями эффективности функционирования комплексной смеси в промежуточном ковше как материала, предотвращающего окисление металла кислородом воздуха, и как ассимилятора неметаллических включений (преимущественно оксида алюминия и алюминатов) служат концентрации FeO и Al_2O_3 в оксидном растворе, образованном ингредиентами комплексной смеси на поверхности металлического расплава. На рис. 4 показана динамика изменения концентраций FeO и Al_2O_3 в оксидном растворе комплексной смеси. Видно, что с увеличением количества плавов концентрация Al_2O_3 в жидком оксидном растворе повышается, что связано в основном с интенсивным переходом в оксидную фазу неметаллических включений в стали на основе оксида алюминия. Максимальная концентрация FeO наблюдается на первой плавке в серии, поскольку подача комплексной смеси осуществляется на открытую поверхность металлического расплава приблизительно после наполнения жидким металлом трети объема промежуточного ковша, т. е. на

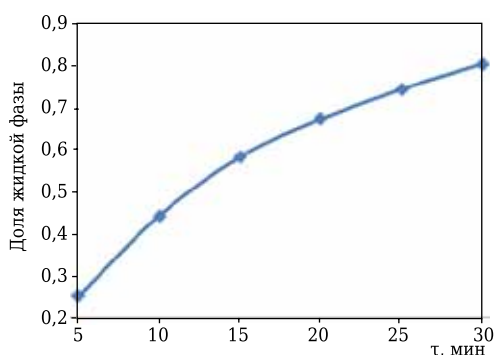


Рис. 3. Изменение доли жидкой фазы, образованной комплексной смесью

незащищенную поверхность расплава, которая подвержена окислению. В дальнейшем по мере расплавления части комплексной смеси ее оксидный раствор надежно изолирует поверхность металлического расплава от воздействия окислительной атмосферы воздуха. И, как следствие этого, концентрация FeO непрерывно снижается вплоть до равновесных значений порядка 0,5 %.

Комплексная смесь в изложнице

При подаче смеси в изложницы материал применяют и как шлакообразующий, и как утепляющий. При этом практически отсутствует усадочная раковина на слитке. Форма поверхности прибыльной части близка к горизонтальной. Сведено к минимуму вторичное окисление металла кислородом воздуха. За счет образования оксидно-газовой пленки между поверхностью раздела расплав – стенки изложницы уменьшаются поверхностные дефекты слитка. Комплексная смесь может подаваться на дно изложницы при сифонной разливке и в прибыльную надставку. Верхний слой смеси остается в твердом сыпучем состоянии вплоть до извлечения слитка из изложницы [20].

В ингредиентном составе комплексной смеси, например такой, как Изотерм-1600, содержится углеродсодержащий компонент. Его концентрация варьируется до 20 мас. % в зависимости от условий применения в конкретном случае. В этой связи важным технологическим аспектом является возможный процесс перехода свободного углерода из смеси в металл — критерий науглероживания. Важность этого аспекта возрастает, когда речь идет о разливке специальных низкоуглеродистых сложных марок стали. Для определения возможности

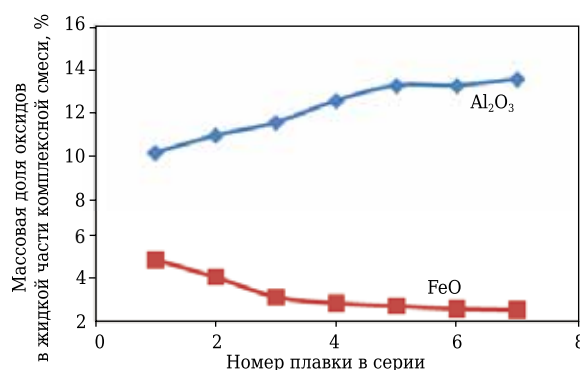


Рис. 4. Изменение концентраций FeO и Al₂O₃ в оксидном растворе комплексной смеси

науглероживания металла в процессе разливки с применением материала Изотерм-1600 были отобраны и проанализированы серии проб, взятых из изложницы до подачи материала на поверхность расплава (проба 1) и по окончании разливки (проба 2). Период разливки составил 70 мин (табл. 4). Видно, что науглероживание металла при указанных начальной концентрации углерода в стали и длительности контакта смеси и расплава практически не наблюдается. Науглероживанию эффективно препятствует формирующаяся жидкая оксидная фаза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы свойства и варианты использования комплексного теплоизолирующего и шлакообразующего материала на примере смеси серии Изотерм-1600. При расчете суммарной теплопроводности комплексной смеси учтена составляющая теплопроводности материала, обусловленная образованием жидкого оксидного раствора в результате плавления ингредиентов смеси. Вычислена конвекционная составляющая теплопроводности смеси как пористого материала. Установлено, что несмотря на высокую температуру применения смесь сохраняет низкую суммарную теплопроводность. Величину суммарной теплопроводности комплексной смеси можно рассматривать как критерий ее теплоизолирующей способности. В варианте применения комплексной смеси в сталеразливочном ковше путем прямых измерений показана эффективность ее действия как теплоизолятора. Наибольший теплоизолирующий эффект от применения комплексной смеси наблюдается при одновременной подаче смеси и в сталеразливочный ковш, и в промежуточный. Применение комплексной смеси в промежуточном ковше сни-

Таблица 4. Химический состав проб металла, %

Марка стали 30X13	C	Si	Mn	S	P	W	Cr	Ni	V	Mo	Fe
Проба 1	0,30	0,43	0,34	0,005	0,019	0,03	13,29	0,23	0,12	0,11	Основа »
Проба 2	0,29	0,44	0,33	0,005	0,020	0,03	13,30	0,23	0,12	0,11	

жает скорость охлаждения металла и наряду с возможностью увеличения скорости разлива обеспечивает минимальный перепад температуры. Критериями эффективности комплексной смеси как шлакообразующего материала могут

рассматриваться концентрации Al_2O_3 и FeO в оксидном расплаве. Жидкий оксидный раствор, образованный ингредиентами комплексной смеси, препятствует переходу свободного углерода из смеси в металлический расплав.

Библиографический список

1. **Капитанов, В. А.** Исследование теплоизоляционных свойств шлаковых смесей для промежуточного ковша / В. А. Капитанов, А. В. Куклев, Е. Г. Полозов // *Сталь*. — 2009. — № 1. — С. 28–31.
2. **Шабловский, В. А.** Специализированные смеси для сифонной разлива стали / В. А. Шабловский, Ю. В. Климов, Н. Ф. Онищенко // *Сталь*. — 2009. — № 6. — С. 21–24.
3. **Топтыгин, А. М.** Совершенствование защитных шлакообразующих смесей для промежуточных ковшей МНЛЗ / А. М. Топтыгин, Е. Г. Полозов, Ю. М. Айзин // *Сталь*. — 2007. — № 3. — С. 20–24.
4. **Фукс, Э.** Применение теплоизоляционных и экзотермических материалов фирмы «FoscoSteel» в ОАО «МЗ Камасталь» / Э. Фукс, И. Савицки, А. М. Генералов // *Сталь*. — 2006. — № 11. — С. 46–51.
5. **Пат. 2334587 Российская Федерация.** Теплоизолирующая и защитная смесь для зеркала металла в промежуточном ковше МНЛЗ / Вильданов С. К., Лиходиевский А. В.; заявитель и патентообладатель ООО «ОгнеупорТрейдГрупп»; заявл. 07.02.07; опубл. 27.09.08, Бюл. № 27.
6. **Vil'danov, S. K.** Development and introduction of energy saving materials for steel pouring / S. K. Vil'danov, A. V. Likhodievskii, A. N. Pyrikov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2011. — Vol. 52, № 4. — P. 237–239.
7. **Пат. 2464122 Российская Федерация.** Теплоизолирующая терморасширяющаяся смесь / Вильданов С. К., Лиходиевский А. В., Пыриков А. Н.; заявитель и патентообладатель ООО «ОгнеупорТрейдГрупп»; заявл. 10.06.11; опубл. 20.10.12, Бюл. № 29.
8. **Вильданов, С. К.** Разработка и внедрение энергосберегающих материалов серии «Изотерм-1600» для металлургических агрегатов / С. К. Вильданов, А. Н. Пыриков, М. С. Вильданова // *Экология и развитие общества*. — 2019. — № 6. — С. 149–153.
9. **Дульнев, Г. Н.** Теплопроводность многокомпонентных смесей / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк // *Инженерно-физический журнал*. — 1967. — Т. XII, № 4. — С. 419–425.
10. **Дульнев, Г. Н.** Теплопроводность зернистых и слабоспеченных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк, Б. Л. Муратова // *Инженерно-физический журнал*. — 1969. — Т. XVI, № 6. — С. 1019–1028.
11. **Дульнев, Г. Н.** Теплопроводность смесей с взаимопроницающими компонентами / Г. Н. Дульнев // *Инженерно-физический журнал*. — 1970. — Т. XIX, № 3. — С. 562–577.
12. **Забродский, С. С.** Об эффективной теплопроводности дисперсного слоя при повышенных температурах / С. С. Забродский, Н. В. Антонишин, В. С. Никитин // *Инженерно-физический журнал*. — 1968. — Т. XIV, № 5. — С. 877–881.
13. **Вильданов, С. К.** Разработка и внедрение теплоизолирующих и шлакообразующих материалов серии «Изотерм-1600» / С. К. Вильданов // *Сталь*. — 2018. — № 9. — С. 17–22.
14. **Литовский, Е. Я.** / Е. Я. Литовский, Я. А. Ланда // *Науч. тр. ВИО*. — 1968. — № 40. — С. 109–115.
15. **Дульнев, Г. Н.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов : справ. изд. / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. — Л. : Энергия, 1974. — 264 с.
16. *Физико-химические свойства окислов : справочник* ; под ред. Г. В. Самсонова. — М. : Металлургия, 1969. — 455 с.
17. *Физические величины : справочник* ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 1231 с.
18. **Литовский, Е. Я.** Теплофизические свойства огнеупоров : монография / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкевич. — М. : Металлургия, 1982. — 149 с.
19. **Репринцева, С. М.** Лучистый теплообмен в дисперсных средах : монография / С. М. Репринцева, Н. В. Федорович. — Минск : Наука и техника, 1968. — 140 с.
20. **Пат. 2410190 Российская Федерация.** Способ теплоизоляции металла и шлака при разливе стали в изложницы / Вильданов С. К., Лиходиевский А. В.; заявитель и патентообладатель ООО «ОгнеупорТрейдГрупп»; заявл. 02.06.08; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3. ■

Получено 20.02.20

© С. К. Вильданов, Л. В. Роголёва,
А. Н. Пыриков, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**ICSOBA 2020 — 38-я Международная конференция и выставка
Международного комитета по изучению бокситов, глинозема и алюминия**

12–16 октября 2020 г.

г. Цзинань, Китай

<https://icsoba.org/>