УДК 621.74.046

СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

© 2012 В.В. Аникеев

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 30.11.2012

Приведены результаты исследований физико-химических и теплофизических свойств теплоизолирующих шлакообразующих смесей. Показано их влияние на качество стальных слитков при полунепрерывном литье.

Ключевые слова: *теплоизолирующая смесь, свойство, сталь, полунепрерывное литьё, слитки, качество*

Перспективным способом получения крупных стальных слитков сечением 300-600 мм и массой 3-7 т для электрошлакового (ЭШП) и вакуумнодугового переплавов (ВДП) является полунепрерывное литьё с использованием теплоизолирующих шлакообразующих смесей. Эффективность ранее применяемых экзотермических смесей на основе силикокальция, натриевой селитры и марганцевой руды существенно снижается из-за их высокой стоимости, пожаровзрывоопасности, интенсивного пыле- и дымовыделения вредных газов и оксидов. Экзотермическая смесь, активно поглощающая влагу из атмосферы воздуха, гигроскопична: содержание влаги в ней после 3 суток хранения возрастает с 0,3 до 2,0%, что приводит к комкованию её частиц, увеличению времени расплавления при одной и той же температуре разливаемого металла и скорости вытягивания слитка; неравномерности образования шлака и попаданию его частиц в металл, особенно в момент присадки экзосмеси. В стали повышается содержание неметаллических и газовых включений, появляются свищи и нарушается сплошность макроструктуры. ЭШП и ВДП таких слитков сопровождается нарушением токового режима вплоть до самопроизвольного прекращения вакуумнодугового переплава из-за обильного шлаковыделения и сильной ионизации [1, 2]. Указанные недостатки устраняются применением теплоизолирующих шлакообразующих смесей, обладающих теплоизоляционными свойствами и способностью частично подплавляться за счёт тепла жидкого металла.

Состав теплоизолирующей смеси выбирали на основе оксидной системы CaO-SiO_2-Al_2O_3, охватывающей составы металлургических шлаков, портландцементов с добавками фторидов и оксидов щелочных и щелочноземельных металлов, с применением метода планирования эксперимента крутым восхождением по поверхности отклика для линейной модели с k независимыми переменными (метод Бокса-Уилсона). Метод состоит в следующем [3]: необходимо получить некоторое представление о функции отклика

$$F = \varphi(x_1, x_2 \ldots x_k) \qquad (1)$$

где F - параметр процесса, подлежащий оптимизации; x_1, x_2 …x_k - независимые переменные, которыми можно варьировать при постановке эксперимента.

Градиент функции отклика φ задаётся выражением:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1} i + \frac{\partial\varphi}{\partial x_2} j + \ldots + \frac{\partial\varphi}{\partial x_k} k \qquad (2)$$

где $i, j, \ldots, k$ – единичные векторы в направлении координатных осей.

Предполагается, что функция отклика φ непрерывна, однозначна и не имеет особых точек. Учитывая, что аналитическое выражение функции отклика неизвестно, то её можно представить в виде полинома:

$$F = \beta_0 + \sum^{k} \beta_i x_i + \sum_{i<j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \sum^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \ldots \qquad (3)$$

с коэффициентами регрессии β_0, β_i, β_{ij}, β_{ii}, … .
Разложение функции в степенной ряд эквивалентно представлению её рядом Тейлора:

$$\beta_1 = \frac{\partial\varphi}{\partial x_1}, \quad \beta_2 = \frac{\partial\varphi}{\partial x_2}, \quad \ldots \qquad (4)$$

$$\beta_{12} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_1 \partial x_2}, \quad \ldots \qquad (5)$$

$$\beta_{11} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial x_1^2}, \quad \beta_{22} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial x_2^2} \qquad (6)$$

Аникеев Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии». E-mail: tlp@samgtu.ru

Пользуясь результатами эксперимента можно определить выборочные коэффициенты регрессии b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, которые являются оценками теоретических коэффициентов регрессии β_0, β_i, β_{ij}, β_{ii} генеральной совокупности всех мыслимых опытов. Уравнение регрессии, полученное на основании опыта, запишется как:

$$\hat{y} = b_0 + \sum^{k} b_i x_i + \sum_{i<j}^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum^{k} b_{ii} x_i^2 + \ldots \qquad (7)$$

где $\hat{y}$ - значение выхода, предсказанное уравнением ($\hat{y}$ является выборочной оценкой для F). В качестве результирующей составляющей, полученной после реализации опытов, принимали температуру начала плавления и интервал плавления смеси, вязкость и поверхностное натяжение расплава смеси при температуре разливаемой стали 1550ºС и вязкость при температуре затвердевающей оболочки слитка 1250ºС. Проведенные исследования физико-химических свойств расплавов теплоизолирующих смесей позволили определить оптимальный состав смеси для полунепрерывного литья стальных слитков, %: 29-32 CaO, 28-31 SiO_2, 13-15 Al_2O_3, 8-10 CaF_2, 5-8 Na_2O, 2-5 MgO, 2-5 FeO, 3-5 Cr_2O_3, который был принят для дальнейших исследований.

Для изготовления смеси в качестве основного компонента выбран самораспадающийся шлак феррохромовый производства безуглеродистого феррохрома с фракцией < 0,06 мм. В качестве понижающих вязкость компонентов использовали CaF_2 в виде плавикового шпата и Na_2O в виде кальцинированной соды. Для обеспечения необходимой основности шлака $CaO+MgO/SiO_2$ = 0,95-1,10 и доведения содержания Al_2O_3 до заданных пределов (13-15%) в смесь вводили порошок шамота. Для обеспечения необходимой теплоизолирующей способности смеси использовали аморфный графит, количество которого определяли экспериментально при возрастании его концентрации от 1%, исследуя при этом науглероживание стали. При содержании графита ≤2% смесь, расплавляясь, не является теплоизолирующей. Смесь с содержанием графита ≥5% приводит к науглероживанию стали. Для дальнейших исследований принята теплоизолирующая смесь с содержанием графита 3-4%. Исходя из химического состава, компонентный состав теплоизолирующей смеси следующий, %: 48-53 шлака феррохромового, 7-12 плавикового шпата, 11-16 кальцинированной соды, 22-27 шамотного порошка и 3-4 аморфного графита. Компонентный состав ранее применяемой экзотермической смеси, %: 26 силикокальция, 38 плавикового шпата, 10 натриевой селитры, 20 марганцевой руды и 6 борного ангидрида.

Смесь готовили механическим смешиванием порошков плавленых шлаков: шлака феррохромового с плавленым шлаком остальных компонентов (плавикового шпата, кальцинированной соды и шамота). Гранулометрический состав, насыпной вес, плотность и гигроскопичность (сорбционную влажность) смеси определяли по общепринятым методикам. Текучесть (растекаемость) характеризовали диаметром основания конуса расплывающейся смеси в количестве 400 г по поверхности стекла из цилиндрической ёмкости с внутренним диаметром 40 мм при её подъёме. Температурный интервал плавления смеси определяли на высокотемпературной вакуумной микропечи в атмосфере высокоочищенного аргона с помощью платино-платинородиевой термопары. Вязкость расплавов смеси определяли с помощью электровибрационного вискозиметра конструкции С.В. Штенгельмейера в режиме охлаждения 3-4 град/мин; температуру замеряли вольфрамрениевой термопарой.

Для объяснения влияния структуры расплава смеси на свойства рассчитывали энергию активации вязкого течения, исходя из температурной зависимости вязкости простых неассоциированных жидкостей по формуле Я.И. Френкеля [4]:

$$\eta = Ae^{E_\eta / RT} \qquad (8)$$

или

$$E_\eta = 2{,}303R \cdot \lg \eta \cdot T - A_1 \qquad (9)$$

где η – коэффициент вязкости; A, R – постоянные; T – абсолютная температура; E_η – энергия активации вязкого течения.

Силикатные расплавы относятся к ассоциированным жидкостям, но при высоких температурах, когда процессы ассоциации значительно ослабевают, уравнение Френкеля может быть применено для силикатных расплавов. Степень полимеризации кремнекислородных и алюмокислородных комплексов определяли отношением общего числа атомов кислорода и фтора к сумме комплексообразующих атомов кремния и алюминия:

$$K = \frac{\sum n_0 + 0{,}5n_F}{n_{Si} + 0{,}75n_{Al}} \qquad (10)$$

Поверхностное натяжение расплавов смеси определяли методом лежащей капли массой 18-20 г в атмосфере высокоочищенного аргона в режиме нагрева от температуры начала плавления. Интенсивность шлакообразования на зеркале металла в кристаллизаторе характеризовали удельной массовой скоростью плавления смеси $V_{\text{пл}}$ (г/см^2·мин): количеством смеси в граммах, проплавляемой в минуту на 1 см^2 поверхности жидкого металла. Для большего постоянства условий опыта смеси брикетировали под прессом 50 кг/см^2 и расплавляли при 1550±5ºС. Минералогический состав расплавов смеси исследовали петрографическим и рентгеноструктурным анализами. Коэффициент теплопроводности рассчитывали исходя из распределения теплового потока по высоте теплоизолирующей смеси на зеркале металла при зондировании смеси блоком термопар; температуру фиксировали по безусилительной схеме на осциллографе Н-115 и потенциометрах КСП-4 и ЭПД-120. Тепловой поток с поверхности жидкого металла определяли специально изготовленным прибором – теплоприёмником; температуру фиксировали по

безусилительной схеме на осциллографе Н-115. Температуру в медной гильзе кристаллизатора определяли контактными термопарами; температуру фиксировали на осциллографе Н-115 и потенциометре КСП-4; температуру воды на входе и выходе кристаллизатора измеряли термометрами сопротивления. Температуру поверхности слитков при охлаждении регистрировали радиационным пирометром с телескопом ТЕРА-50 и потенциометром КСП-4. При исследовании усилий трения в кристаллизаторе измеряли и записывали на осциллограф Н-115 напряжение на якоре электродвигателя механизма вытягивания, силу тока и скорость вытягивания. Результаты исследований приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1.

Таблица 1. Физические свойства смеси

Гранулометрический состав, %		**Насыпной вес, кг/м^3**	**Плотность, г/см^3**	**Точка текучести, см**	**Сорбционная влажность, %**	
<0,063 мм	0,063-0,10 мм				начальная	10 суток хранения
70,0	30,0	1090	2,87	46,0	0,2	0,6

Мелкая фракция и достаточно высокая текучесть теплоизолирующей смеси способны предотвратить появление ранта оголённого металла при литье в кристаллизаторы больших сечений. Достаточно малые величины насыпного веса и плотности смеси предопределяют её высокую теплоизоляционную способность при разливке. Влажность смеси достаточно низкая и сохраняется практически на одном уровне в течение длительного времени, что позволяет организовать централизованное изготовление и хранение смеси для нужд нескольких предприятий.

Таблица 2. Физико-химические свойства расплава смеси

Температура, ºС		**Вязкость Па·с**		**Поверхностное натяжение, мДж/м^2**	**Интенсивность шлакообразования г/см^2·мин**
начало плавления	интервал плавления	1250ºС	1550ºС	1550ºС	1550ºС
1170-1190	15-30	0,35-0,80	0,10-0,20	340-350	10,4-10,6

Теплоизолирующая смесь имеет достаточно низкую температуру начала плавления (начало размягчения от 1140ºС) и полного расплавления (1200-1220ºС). Температура полного растекания смеси превышает температуру полного расплавления на 30-40º, что связано не только с температурой плавления смеси, но и с состоянием поверхности шлака на подложке.

Вязкость исследованных составов теплоизолирующих смесей изменяется в пределах 0,1-0,2 Па·с (температура 1550ºС) и 0,35-0,8 Па·с (1250ºС); при этом в координатах lgη-1/*T* отмечается перелом, совпадающий с температурой начала кристаллизации расплава смеси (рис. 1).

Такие переломы связаны с укрупнением кремнекислородных и алюмокислородных комплексов вследствие их ассоциации и соответствующим затруднением их перемещения при вязком течении. Для объяснения влияния структуры расплавов смеси на изменение вязкости рассчитывали степень полимеризации кремнекислородных и алюмокислородных комплексов и энергию активации вязкого течения. Степень полимеризации исследованных расплавов смесей изменяется в довольно узких пределах и имеет низкие значения от 1,83 до 1,94, что указывает на наличие в расплавах комплексных анионов одного размера. Расплавы с низким значением степени полимеризации и малым интервалом её изменения при высоких температурах обладают низкой вязкостью.

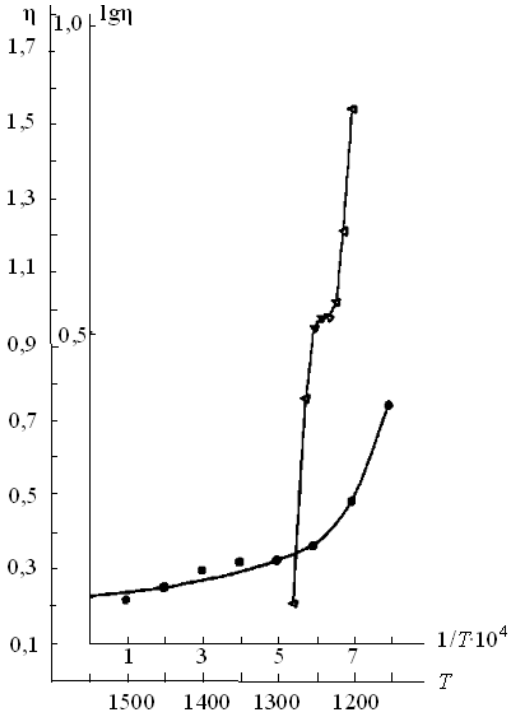

Рис. 1. Вязкость расплава теплоизолирующей смеси

Сопоставление величин энергии активации вязкого течения (4-7 кДж/моль и 22-27 кДж/моль при 1550ºС и 1250ºС) с вязкостью расплавов смеси и степенью полимеризации показывает, что в присутствии Al_2O_3 величина энергии активации при низких температурах изменяется от концентрации CaF_2 в смеси; с повышением температуры значения вязкости и энергии активации вязкого течения выравниваются. Повышение концентрации Na_2O при высоких температурах приводит к уменьшению энергии активации; при снижении температуры до 1250ºС – эта зависимость не соблюдается из-за различий температуры начала кристаллизации расплавов.

При интенсивности шлакообразования 10,4-10,6 г/см^2·мин расход смеси составляет 0,52-0,54 кг/мин. Гомогенное плавление смеси и образование расплава на зеркале металла в кристаллизаторе подтверждается петрографическим и рентгеноструктурным анализами. Основной цементирующей массой расплавов является стекло различного состава:

- геленитовое: $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ с N=1,638;
- окерманитовое $Ca_2MgSi_2O_7$ с N=1,641;
- волокнистое стекло $Ca_2Al_2 \cdot SiO_2$ с N=1,638;

довольно много анизотропной фазы:

- монтичеллит $CaO \cdot 2Al_2O_3$ с N_q=1,652 и N_p=1,617;
- железистый кордиерит $2(MgFe)O \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ с N_q=1,554 и N_p=1,574;
- волокнистые зерна жадеита $Na_2O\ Al_2O_3\ 4SiO_2$ с N_q=1,667 и N_p=1,655. [5]

Исследованием распределения теплового потока по высоте теплоизолирующей смеси зондированием блоком термопар установлено, что при разливке в смеси образуется три основных слоя: расплав смеси, контактирующий с поверхностью жидкого металла, слой порошка смеси на границе с атмосферой воздуха, не претерпевший изменений, и твёрдая шлаковая корка между ними. Определена толщина слоёв и коэффициент теплопроводности смеси – 0,20 Вт/(м·К); наибольший перепад температур в смеси наблюдается в твёрдой шлаковой корке. На высокую теплоизоляционную способность теплоизолирующей смеси указывает незначительный тепловой поток с зеркала металла; при разливке под шлаком экзосмеси тепловые потери достигают 0,415 МВт/м^2. Тепловой поток в медной гильзе кристаллизатора в зоне зеркала металла при разливке под экзосмесью составляет 1,99 МВт/м^2; при разливке под теплоизолирующей смесью он понижается на 22,5% до 1,54 МВт/м^2, что благоприятно сказывается на снижении напряжений сжатия по высоте внутренней поверхности гильзы кристаллизатора. Тепловой поток по периметру кристаллизатора при разливке под экзосмесью неоднороден (степень неоднородности 22%); при переходе к разливке под теплоизолирующей смесью неоднородность теплового потока снижается вдвое. Коэффициенты трения в кристаллизаторе при разливке под экзосмесью и теплоизолирующей составляют соответственно 0,135 и 0,175; при разливке под экзосмесью в момент её присадки коэффициент трения возрастает до 0,3. Характер изменения температуры поверхности слитков во время охлаждения независимо от типа шлакообразующей смеси одинаков: средняя скорость охлаждения составляет 8-10ºС/мин. Слитки при разливке под теплоизолирующей смесью после выхода из кристаллизатора имеют температуру поверхности на 20 и 50º выше (диаметр 300 и 520 мм), чем при разливке под экзосмесью, что приводит к снижению градиента температур и напряжений в затвердевшей оболочке слитков, отлитых под теплоизолирующей смесью.

Исследовали влияние теплоизолирующей шлакообразующей смеси на качество полунепрерывнолитых слитков диаметром 300 мм (массой 2,7 и 5,4 т) и диаметром 520 мм (массой 7,6 т) высоколегированных сталей 13Х11Н2В2МФ (ЭИ961), 12Х25Н16Г7АР (ЭИ835) и 03Х11Н10М2Т (ЭП678У). Слитки диаметром 300 мм получали литьем в два кристаллизатора: в первом использовали экзотермическую смесь, во втором – теплоизолирующую. Литьё проводили под уровень и через слой теплоизолирующей смеси, а также в изложницы сифоном [6]. Литьё под уровень теплоизолирующей смеси позволяет получать слитки для ЭШП и ВДП, значительно превышающие по качеству поверхности, макроструктуры, загрязнённости неметаллическими включениями, точности размера сечения, плотности и другим характеристикам, слитки, отлитые под экзосмесью. Поверхность без свищей и заворотов корки; степень искажения профиля в сравнении с разливкой под экзосмесью снизилась вдвое и не превышает 1,2% (диаметр 300 мм) и 2,8% (диаметр 520 мм). Макроструктура плотная, без дефектов, глубина залегания усадочной раковины при переходе от экзосмеси к разливке под теплоизолирующей смесью снижается на 12-15% с 550-650 до 350-450 мм. Макроструктура слитков на поперечных темплетах после головной обрези приведена на рис. 2.

Основным видом включений при разливке сталей типа 13Х11Н2В2МФ и 12Х25Н16Г7АР под уровень теплоизолирующей смеси являются оксиды размером 10-20 мкм, равномерно распределённые по высоте и сечению слитка; их количество при переходе от экзосмеси заметно снижается. Основным видом включений при разливке стали 03Х11Н10М2Т под уровень экзосмеси являются нитриды титана размером 10-20 мкм и кислородные включения более 40 мкм экзогенного происхождения, встречающиеся в краевой и осевой зоне слитка по дефекту «титановая корочка» и в местах запутывания шлака и составляющих экзосмеси в металле; при переходе к разливке под теплоизолирующей смесью количество включений снижается в 3 раза; преобладающий размер включений 10-20 мкм. Оценка качества слитков по токовому режиму ВДП показала, что количество слитков, переплавляемых без замечаний (выделение шлака, ионизация, ионизация со шлаком) при переходе к разливке под уровень теплоизолирующей смеси снижается в 3-3,5 раза; отмечающиеся нарушения токового режима носят эпизодический и кратковременный характер.

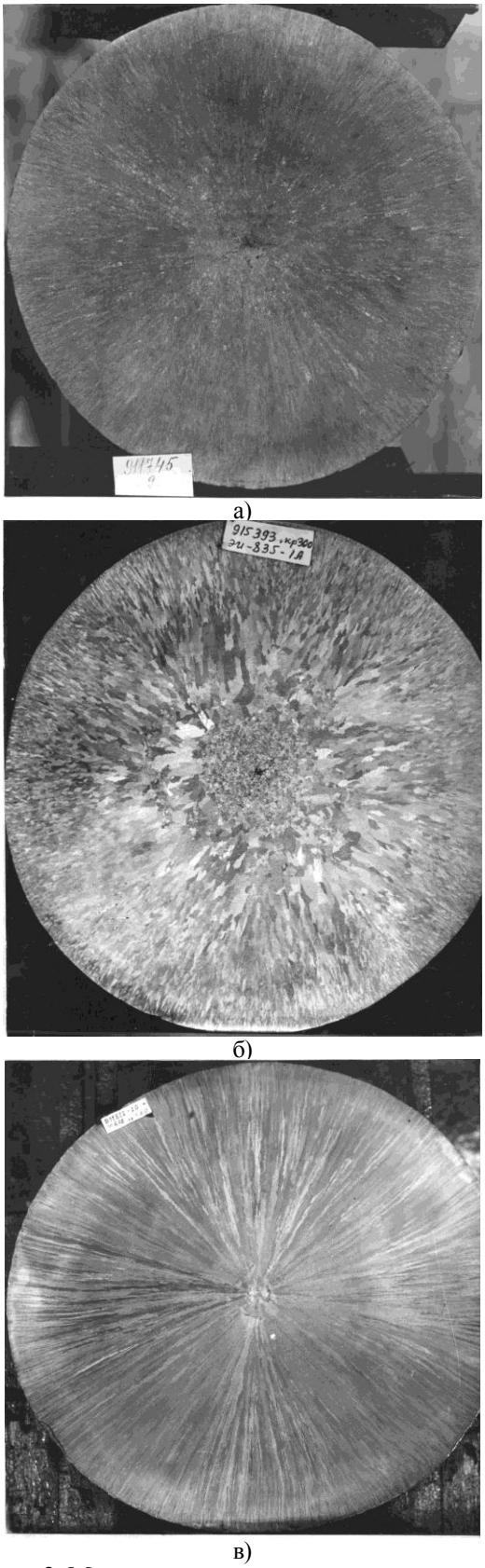

Рис. 2. Макроструктура поперечного сечения полунепрерывнолитых слитков:
а) сталь 13Х11Н2В2МФ (Ø300 мм); б) сталь 12Х25Н16Г7АР (Ø300 мм); в) сталь 03Х11Н10М2Т (Ø520 мм)

Качество металла удовлетворяет предъявляемым требованиям; механические свойства проката ВД слитков не отличаются от свойств металла, наплавленного из катаных электродов и превышают нормы ТУ по ряду показателей на 40-50%.

Разливку сверху через слой теплоизолирующей смеси проводили одноструйно и через огнеупорную чашу с шестью донными отверстиями. Одноструйная разливка позволяет получать слитки, не уступающие по качеству макроструктуры, химической однородности, содержанию неметаллических включений слиткам, отлитым под уровень теплоизолирующей смеси; плотность металла в осевой зоне повышается. Разливка стали через слой теплоизолирующей смеси в период наполнения кристаллизатора позволила повысить качество поверхности и макроструктуры донной части слитков: отбраковка по поверхностным дефектам (заворотам, свищам) снизилась втрое, количество слитков (донная часть) стали 03Х11Н10М2Т, переплавлявшихся без замечаний на вакуумных дуговых печах, возросло в 3 раза. При разливке сверху через огнеупорную чашу (сталь марки 13Х11Н2В2МФ) отмечено снижение содержания неметаллических включений в 1,5 раза в сравнении с разливкой под уровень или сверху одноструйно через слой теплоизолирующей смеси; макроструктура по сечению плотная, в том числе, в осевой зоне слитка.

Переход от экзотермической смеси к теплоизолирующей позволил исключить из состава такие компоненты, как натриевая селитра и марганцевая руда, ответственных за загрязнение воздушной среды NO_2, N_2O_5 и MnO. До уровня требований санитарных норм снижается общая запылённость воздушной среды и выделение фтора, что связано с меньшим содержанием CaF_2 в составе теплоизолирующей смеси и использованием смеси плавленых шлаков.

Разливку металла в изложницы под теплоизолирующей смесью в слитки массой 0,5, 2,7 и 3,7 т проводили с целью снижения отбраковки металла по поверхностным дефектам (сталь марок 80Х20НС, 08-12Х18Н10Т), по дефектам макроструктуры и разнозернистости (сталь марки 18Х2Н4МА) и загрязнённости глобулярными включениями (сталь марки ШХ15). Установлено, что разливка сифоном с использованием теплоизолирующей смеси позволила значительно улучшить качество поверхности отливаемых слитков стали марок 80Х20НС и 08-12Х18Н10Т и снизить отбраковку на переделах по рванинам и волосовинам на 8,5%. На стали марки 18Х2Н4МА втрое снизилась отбраковка на переделах по макроструктуре; величина зерна отвечала предъявляемым требованиям. Загрязнённость стали марки ШХ15 глобулярными включениями снизилась с 1,83 до 1,33 (средний балл).

Выводы: исследованием физико-химических свойств расплавов теплоизолирующих шлакообразующих смесей с применением метода планирования эксперимента разработан оптимальный состав смеси на основе шлака феррохромового производства безуглеродистого феррохрома. Изучены физические, физико-химические и теплофизические свойства теплоизолирующей смеси и

расплава. Установлено, что использование теплоизолирующей шлакообразующей смеси для полунепрерывного литья слитков высоколегированных сталей приводит к повышению их качества в сравнении со слитками, отлитыми под ранее применяемой экзотермической смесью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Аникеев, В.В.* Влияние экзотермических и теплоизолирующих смесей на качество полунепрерывнолитых слитков из хромоникелевых сталей // Междун. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в машиностроении». – Самара: СамГТУ, 2005. С. 160-161.
2. *Аникеев, В.В.* Оценка качества полунепрерывнолитых расходуемых электродов по стабильности ВДП / *В.В. Аникеев, А.В. Лейтес* // Междун. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургического производства». – Волгоград, 2002. С. 221-223.
3. *Адлер, Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / *Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский*. – М.: Наука, 1981. 282 с.
4. *Френкель, Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. Т.3 / *Я.И. Френкель*. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 460 с.
5. *Аникеев, В.В.* Исследование свойств шлакообразующих смесей и расплавов для полунепрерывного литья стальных слитков // III Междун. науч.-практ. конф. «Прогрессивные литейные технологии». – М.: МИСиС, 2005. С. 118-120.
6. *Аникеев, В.В.* Влияние теплоизолирующих шлакообразующих смесей на качество стальных заготовок при полунепрерывном литье и в изложницы // Науч.-техн. конф. с междун. участием. «Высокие технологии в машиностроении». – Самара: СамГТУ, 2009. С. 221-222.

PROPERTIES OF HEAT-INSULATING SLAG-FORMING COMPOUNDS AND THEIR INFLUENCE ON QUALITY OF STEEL INGOTS AT SEMI-CONTINUOUS MOULDING

© 2012 V.V. Anikeev

Samara State Technical University

Results of researches the physical-chemical and thermal physical properties of heat-insulating slag-forming compounds are given. Their influence on quality of steel ingots is shown at semi-continuous molding.

Key words: *heat-insulating compound, property, steel, semi-continuous molding, ingots, quality*

Vladimir Anikeev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Foundry and High Effective Technologies". E-mail: tlp@samgtu.ru