

Определение технологических параметров процесса нанесения защитного корундового покрытия на элементы стальных трубопроводов

Изложены методические подходы, определены технологические параметры процесса нанесения износостойкого корундового покрытия на внутреннюю поверхность металлических труб методом СВС в поле центробежных сил. Проведены расчеты изменения стандартной мольной энергии Гиббса для всех возможных реакций между компонентами шихты с целью выяснения, какие из этих реакций теоретически могут протекать самопроизвольно. Для определения энергетической способности шихты проведены также расчеты тепловых эффектов (энтальпий) соответствующих реакций. Рассмотрены теплообменные процессы между металлической трубой и продуктами экзотермической реакции при формировании корундового слоя. Получены опытные образцы элементов стального трубопровода с наплавленным корундовым слоем, исследован материал покрытия.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), реакционная смесь, реактор, центробежные силы и ускорения, гравитационный коэффициент, корундовое покрытие

Проблема защиты металлического оборудования, в частности трубопроводов, которые используются в условиях интенсивного абразивного износа и коррозии, а также увеличения срока их промышленной эксплуатации всегда были в поле зрения ученых, производителей и изобретателей. Современный научно-технический арсенал содержит достаточно широкий спектр технических средств для решения этой проблемы – использование литых базальтовых вкладышей, электродуговая наплавка рабочей поверхности элементов трубопроводов карбидосодержащими твердыми сплавами, поверхностное упрочнение различными методами, напыление рабочей поверхности [1-3]. Кроме того, в последние десятилетия применяются технологии с использованием явления СВС (самораспространяющегося высокотемпературного синтеза) [4-5].

Процесс СВС обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами металлургии, где используются энергозатратные высокотемпературные печи. Внедрение этих технологий не требует громоздкого и дорогостоящего специального оборудования, а также больших площадей, и их легко приспособить к имеющимся производственным помещениям [5].

В информационных источниках имеются обзорные сведения о фактах проведения работ по получению трубчатых изделий из тугоплавких материалов методом СВС, двухслойных труб с внутренним рабочим корундовым слоем с применением центробежных технологий [5, 6]. Однако данные, касающиеся технологических параметров производства таких изделий, практически отсутствуют.

На первый взгляд, задача нанесения корундового покрытия на внутреннюю поверхность металлической (керамической) трубы определенного диаметра представляется простой. Протекание СВС-процесса реакционной смеси определенного состава, находящейся в полости трубы, которая вращается вокруг

своей геометрической оси, обеспечивает получение равномерно распределенного на внутренней поверхности глиноземистого расплава, его кристаллизацию и формирование защитного корундового слоя. На практике эта задача является более сложной и зависит от целого ряда технологических факторов и физико-химических параметров.

Основными параметрами, влияющими на протекание экзотермической реакции и формирование защитного корундового слоя, безусловно, являются химический состав реагентов шихты и количественные соотношения между этими реагентами. Важным фактором в исследуемом технологическом процессе является теплообмен между стальной трубой, выполняющей роль реактора, и высокотемпературным расплавом – продуктом экзотермической реакции компонентов шихты. Доминирующее влияние в исследуемом процессе оказывают центробежные силы, воздействующие как на исходную реакционную смесь, так и на формирование материала покрытия, образующегося при охлаждении и кристаллизации высокотемпературного металлооксидного расплава. И, безусловно, нельзя не учитывать такие технологические факторы, как фракционный состав, дисперсность компонентов реакционной смеси, степень их перемешивания и гомогенности.

В данной работе изложены методические подходы при решении поставленной задачи. Определены несколько материалов-реагентов для приготовления экзотермических смесей, обеспечивающих образование в процессе реакции глиноземного расплава и кристаллизацию корундовой фазы. Сконструирована и изготовлена экспериментальная оснастка, подготовлено оборудование для выполнения экспериментальной части работы. Проведен термодинамический анализ экзотермических смесей различных составов и определены количественные соотношения шихтовых компонентов. Выполнены расчеты теплообменных процессов в реакционных объемах между

продуктом экзотермической реакции, высокотемпературным расплавом и трубой-реактором. Разработаны способы пиростимуляции реакционной смеси непосредственно во вращающемся реакторе. Проведены испытания оборудования как в холостом режиме, так и в процессе протекания экзотермических реакций. Получены опытные образцы корундового покрытия. Определены методы и проведены исследования синтезированного материала покрытия.

При выборе шихтовых материалов исходили из их термодинамических характеристик, доступности и рыночной цены. В качестве окислителей использовали такие полиоксидные материалы, как железный сурик, кузнечная железистая окалина, конверторные выносы и шламы Побужского ферроникелевого комбината (Кировоградская обл.) и Мариупольского металлургического комбината им. Ильича (г. Мариуполь), табл. 1. Кузнечную окалину предварительно

вали образцы стандартных стальных труб различных типоразмеров наружным \varnothing 78, 114, 140, 219 мм с толщиной стенки 4-10 мм и длиной 220-240 мм. По торцам образцов труб выполнены ступенчатые проточки для плотной посадки торцевых крышек и последующего центрирования отдельных сегментов трубопровода при его сборке и сварке. С одного конца устанавливали глухую стальную крышку толщиной 10 мм для защиты испытательного стенда от высокотемпературных воздействий продуктов реакции. На другом торце крепили составную крышку с осевым отверстием \varnothing 30 мм и стальной точечной вставкой для этого отверстия. Осевое отверстие крышки может быть использовано для пирометрических замеров температуры реакции с помощью визуального промышленного пирометра «Проминь». Дополнительно в крышке выполнены два отверстия \varnothing 10 мм для поджига шихты и частичного выхода

Таблица 1

Химический состав используемых в работе шихтовых материалов

Шихтовой материал	Содержание компонентов, %							
	Fe ₃ O ₄	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O
Сурик железный	67,8	–	23,0	8,3	–	–	–	–
Конверторная пыль ПНЗ	66,0	–	2,0	–	7,0	20	2,0	3,0
Конверторная пыль ММЗ	82,1	–	2,5	0,4	11,0	–	2,0	–
Кузнечная окалина	–	92,7	5,7	–	–	0,8	0,8	–

измельчали в шаровой мельнице, затем просеивали через сито калибром 0,25 мм. Конверторную пыль также просеивали, сурик использовали без какой-либо предварительной подготовки.

В качестве восстановителя применяли алюминиевый порошок с размером частиц 0,16-0,25 мм и содержанием алюминия не менее 98 %, а также измельченную стружку как отходы механической обработки алюминиевых деталей. Компоненты шихты, взятые в стехиометрическом соотношении, взвешивали на технических весах РН-3Ц13У с точностью до 0,5 % и тщательно перемешивали в шнекороторном смесителе, получая таким образом реакционную смесь. Качество перемешивания, гомогенность реакционной смеси, а также размеры частиц контролировали под микроскопом МИМ-8. Заданное в соответствии с расчетами количество реакционной смеси помещали в реакторы, на которых исследовали процесс синтеза корундового покрытия.

Реакторами (рис. 1) для исследований использо-

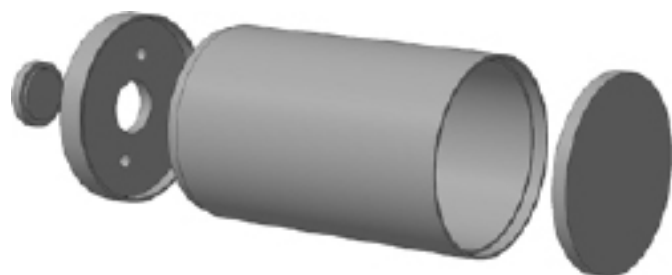


Рис. 1. Оснастка, используемая для получения корундового покрытия

В качестве центробежного испытательного стенда использовали несколько доработанный токарный станок 1К62. Образцы труб-реакторов, заполненные реакционной смесью, надежно закрепляли в патроне станка и приводили во вращение. Частоты вращения регламентированы техническими характеристиками установки и отображены в табл. 2.

Величины центробежных ускорений, возникающие при вращении реактора в цилиндрическом слое реакционной смеси, а также высокотемпературном расплаве, образовавшемся в процессе реакции, характеризовали коэффициентами гравитации. Коэффициент гравитации (k_r) определяет кратность превышения значений центробежных ускорений в заданных точках исследуемых образцов величины ускорения земного тяготения (g)

$$k_r = \frac{a_{ц}}{g}. \quad (1)$$

Центробежные ускорения ($a_{ц}$) рассчитывали по формуле

$$a_{ц} = 2\pi n^2 d \quad (2)$$

где n – частота вращения, d – внутренний диаметр стальной трубы.

Значения коэффициентов гравитации также представлены в табл. 2.

Необходимо отметить, что при формировании покрытия на внутренней поверхности образца стальной трубы воздействие центробежных сил различно в зависимости от \varnothing трубы и от толщины формирующегося слоя. В периферийной зоне образца, прилегающей к поверхности стальной трубы, их воздействие (соответственно, и значения коэффициентов гравитации) максимально. При формировании слоя толщиной 5-7 мм эти значения уменьшаются к оси вращения и на внутренней поверхности могут уменьшиться до 20 %.

Значения коэффициентов гравитации для периферийных точек формирующегося покрытия на трубах различных диаметров при заданных частотах вращения

Диаметр трубы		Частота вращения, 1/мин					
наружный	внутренний	500	800	1000	1250	1600	2000
78	70	3,1	7,9	12,4	19,5	31,9	49,8
114	104	4,6	11,8	18,5	28,9	47,4	74,1
140	128	5,7	14,6	22,8	35,6	58,4	91,2
219	200	8,9	22,8	35,6	55,6	91,2	142,5

Для стимуляции возгорания реакционной смеси непосредственно в процессе вращения трубы-реактора была разработана специальная электрическая схема, позволяющая дистанционно и безопасно обеспечивать подачу мощного электроимпульса на две вольфрамовые (нихромовые) спирали.

При подборе состава шихты выполнены термодинамические расчеты изменения стандартной мольной энергии Гиббса для всех возможных реакций между компонентами. Изменение стандартной мольной энергии реакций (ΔG°) рассчитывали как разницу между ΔG° образования продуктов реакции и ΔG° образования исходных веществ. Расчеты проводились с учетом молей каждого вещества в уравнении реакции. ΔG° простого вещества равняется нулю. Например, для реакции $Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow 2Fe + Al_2O_3$, $\Delta G^\circ = -841,7$ кДж/моль. Отрицательное значение ΔG° означает, что эта реакция при стандартных условиях самопроизвольно протекает в прямом направлении. Аналогичным образом выяснили, что самопроизвольно в прямом направлении также протекают реакции взаимодействия алюминия с Fe_3O_4 , FeO , Ca_2O_3 , SiO_2 .

Выполнены термодинамические расчеты [7] количества тепловой энергии, выделяемой в ходе экзотермических реакций, используемых в опытах реакционных смесей, а также теплообменных процессов между образовавшимся высокотемпературным расплавом и трубой-реактором.

Тепловые эффекты реакций образования оксида алюминия в реакционных смесях на основе различных шихтовых материалов (см. табл. 1) определяли в соответствии с законом Гесса алгебраическим суммированием изменения теплосодержаний при протекании реакций образования оксидов железа, кремния, хрома и оксида алюминия

$$\Delta H_{\text{реакции}}^0 = \sum \Delta H_{1n_1}^0 - \sum \Delta H_{2n_2}^0, \quad (3)$$

где $\sum \Delta H_{1n_1}^0$ – энергия образования продуктов реакции; $\sum \Delta H_{2n_2}^0$ – энергия образования исходных веществ.

Расчеты, выполненные для экзотермической смеси с использованием железного сурика, показывают, что количество тепла, выделяемого в 1 кг массы реакционной смеси, составит 797 ккал. При этом, в идеальном случае, продукты реакции составят (г) 554 Al_2O_3 , 367 Fe и 80 Si. По проведенным аналогичным расчетам в единице массы реакционной смеси

Таблица 2

на основе железистой окалины выделится 658 ккал с образованием 420 г Al_2O_3 (корунда); конверторного шлака ПНЗ – 623 ккал, с образованием 580 г Al_2O_3 ; шламов конверторного производства Мариупольского металлургического комбината им. Ильича выделится 710 ккал тепловой энергии при образовании 590 г Al_2O_3 .

Таким образом, все четыре рассматриваемых варианта реакционных смесей обладают достаточно

высокой энергетической способностью и могут быть использованы на практике.

Образованная в процессе экзотермической реакции тепловая энергия будет израсходована на нагрев и проплавление продуктов реакции. Расчетное значение температуры продуктов реакции определяли по формуле

$$Q = (C_k m_k + C_{Fe} m_{Fe} + C_{Si} m_{Si})t + (\lambda_k m_k + \lambda_{Fe} m_{Fe} + \lambda_{Si} m_{Si}), \quad (4)$$

откуда получаем значение температуры продуктов реакции

$$t = \frac{Q - (\lambda_k m_k + \lambda_{Fe} m_{Fe} + \lambda_{Si} m_{Si})}{C_k m_k + C_{Fe} m_{Fe} + C_{Si} m_{Si}}, \quad (5)$$

где λ_k – удельная теплота плавления корунда, 1088 кДж/кг; λ_{Fe} – удельная теплота плавления железа, 277 кДж/кг; λ_{Si} – удельная теплота плавления кремния, 164 кДж/кг; C_k – среднее значение теплоемкости корунда, 0,25 кал/г/°C; C_{Fe} – среднее значение теплоемкости железа, 0,153 кал/г/°C; C_{Si} – среднее значение теплоемкости кремния, 0,191 кал/г/°C; m_k – масса образованной корундовой фазы; m_{Fe} – масса восстановленного железа; m_{Si} – масса восстановленного кремния.

Подставляя в выражение (5) численные значения величин, получим расчетное значение температуры продуктов реакции $t = 2580$ °C.

Рассчитали также соотношение масс реакционной смеси и стальной трубы с тем, чтобы передаваемая стальной трубе образовавшаяся тепловая энергия реакции не привела к перегреву стальной обечайки и ее прогоранию.

При заданной температуре нагрева трубы 800 °C, ее масса определяется из выражения теплового баланса

$$C_k m_k + C_{Fe} m_{Fe} + C_{Si} m_{Si} + C_{Fe} m_t \cdot t^\circ = Q. \quad (6)$$

Откуда выражение для массы трубы принимает вид

$$M_T = \frac{Q}{C_{Fe} t} - \left(\frac{C_k}{C_{Fe}} \cdot m_k + \frac{C_{Si}}{C_{Fe}} \cdot m_{Si} + m_{Fe} \right). \quad (7)$$

Подставляя в (7) относительные (долевые) количества продуктов реакции, получаемые в единице массы шихты ($M_{ш}$): $M_k = 0,554 M_{ш}$; $M_{Fe} = 367 M_{ш}$; $M_{Si} = 0,08 M_{ш}$, а также средние значения теплоемкостей продуктов реакции – глинозема (C_k),

восстановленных железа (C_{Fe}) и кремния (C_{Si}) в интервале температур $0-t$ °C ($t = 700$ °C), получим

$$M_T = \frac{Q}{C_{Fe}t} - K \cdot M_{ш}, \quad (8)$$

где

$$k = 0,554 \frac{C_k}{C_{Fe}} + 0,08 \frac{C_{Si}}{C_{Fe}} + 0,366. \quad (9)$$

Численное значение K для заданной реакционной смеси $K = 1,12$. Из выражения (4) определяем выражение для максимально допустимой массы определенной реакционной смеси для синтеза покрытия на внутренней поверхности стальной трубы (массой M_T) при допустимой температуре нагрева ее наружной поверхности t , °C.

$$M_{ш} = \frac{1}{k} M_T - \frac{Q}{C_{Fe}t}. \quad (10)$$

Таким образом, учитывая унос шихты во время экзотермической реакции до 6 % [8], расчетная величина массы стальной трубы будет составлять 2650 г, а соотношение масс реакционной шихты и стальной трубы – обечайки не должно превышать 0,38. Учитывая значительные теплотери реакции через излучение, а также через теплопроводность поверхности трубы и крышек в окружающую среду, можно утверждать, что такое соотношение масс может быть безопасным в плане проведения опытов, поскольку исключает перегрев исследуемых образцов стальных труб и возможные их деформацию или прожог.

Для проведения первых пробных опытов использовали образцы стандартных стальных бесшовных труб типоразмеров $114 \times 105 \times 4,5$ и $140 \times 130 \times 5$ мм и длиной 230 ± 5 мм. Масса образцов составляла соответственно 2750 ± 50 , и 3760 ± 50 г. После установки торцевых крышек масса собранных контейнеров увеличилась до соответственно 4190 ± 50 и 5930 ± 50 г. Для получения экзотермической смеси использовали железный сурик и алюминиевый порошок.

В первом опыте использовали образец трубы меньшего диаметра и реакционную смесь массой 1 кг, что соответствовало 0,37 массы образца трубы. Установленный на центробежном стенде реактор приводили во вращение с частотой 500 об/мин, при этом средняя величина центробежного ускорения, действующая на реакционную смесь, составляла 4,6 g. Пиростимуляцию экзотермической реакции осуществляли термитными спичками. Торцевой участок цилиндрического слоя реакционной смеси воспламенялся от теплового импульса термитной спички, реакция шла с выделением большого количества тепла; часть тепла передавалась прилегающему холодному слою, который, в свою очередь, достигнув температуры, воспламенялся и далее передавал тепловую энергию следующему слою. Таким образом, самораспространяющаяся волновая реакция протекает в ограниченной кольцевой зоне цилиндрического слоя смеси в зоне горения, где расчетная температура достигает 2500 °C. Кольцевая зона горения смеси продвигается по длине образца со скоростью 1 см/с, время реакции составило 23 с. Температура

наружной поверхности трубы-реактора в этом опыте достигала 350 °C.

Во втором опыте использовали трубу-реактор большего диаметра. Масса реакционной смеси была увеличена до 1800 г, что составило ≈ 50 % от массы образца трубы. Собранный контейнер с загруженной реакционной смесью приводили во вращение на предустановленной частоте 1250 об/мин, что соответствует величине центробежного ускорения 43 g. Процесс реакции также инициировали с помощью термитной спички.

Увеличение массы реакционной смеси во втором опыте и, соответственно, количества выделяемой тепловой энергии обусловило повышение температуры поверхности трубы-реактора до 700 °C. Кроме того, скорость продвижения волны горения в цилиндрическом слое реакционной смеси по длине образца возросла втрое и составила 3 см/с, время протекания реакции уменьшилось до 8 с. В результате опыта получено корундовое покрытие на внутренней поверхности образца трубы. В полученном образце материал покрытия равномерно распределен по цилиндрической поверхности, толщина покрытия составляет 5,4 мм. Рабочая поверхность синтезированного покрытия гладкая, без видимых дефектов.

При исследовании материала синтезированного покрытия применяли методы петрографического и рентгенографического анализов. Химический состав материалобразующих фаз определяли методом микрорентгеновского спектрального анализа.

Рентгенографический анализ структуры полученного материала показал, что все отражения (линии) характерны для фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунда) на дифрактограмме образца исследуемого образца.

Пектографические исследования образца проводили на микроскопе NEOFOT.

Как видно на микрофотографии (рис. 2), было установлено, что материал образца сложен пластинчатыми кристаллами корунда различного размера и формы. Размеры пластинок корунда в разных участках образца изменяются от 5-10 до 100 мкм. В промежутке между пластинками корунда в аморфной форме присутствует сложный алюмосиликат,

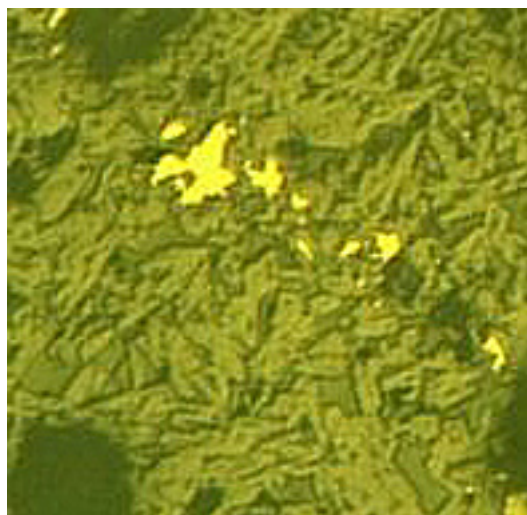


Рис. 2. Микроструктура синтезированного материала покрытия

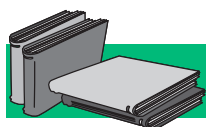
характеризуються більш темною окраскою, кількість якого становить 20-30 %. В досліджуваному зразку присутні метали (залізо і алюміній) у вигляді малих сферичних включень розміром 1-5 мм. В периферійній частині зразка, близькій до металічної частини труби-реактора, присутні великі металічні включення у вигляді крапель розміром 4000-5000 мкм. Для зразка характерна пористість, в великій кількості присутні як газові, так і міжкристалітні пори. Розподіл пористості по товщині зразка нерівномірний. Вблизи вільної литої поверхні, виконуючої функцію робочого шару, пористість матеріалу мінімальна, але збільшується до межі контакту з металічною поверхнею труби.

Мікрорентгеновський спектральний аналіз зразків синтезованого матеріалу покриття виконано на електронно-зондовому рентгеновському мікроаналізаторі «Kamebax 5X-50». Дослідження показали, що основна (світла) фаза складається головним чином з Al_2O_3 (не менше 99,4 %), утворюючи корунд

з незначительним вмістом оксиду заліза. Серий аморфний (стеклоподібний) матеріал, що утворює покриття, містить до 48 % SiO_2 , 35 % Al_2O_3 , а також сумарно до 17 % оксидів **Mg, Fe, Ca, K** і **Cr**, утворюючи таким чином складні алюмосилікати, що відповідає петрографічним дослідженням.

Корундове покриття має достатню витривалість для експлуатації труби в оборотній системі пневмотранспорту піску литейного цеху ФТІМС НАНУ, що заплановано на наступному етапі досліджень. Поверхня покриття переважно гладка, подібна розплавленому стеклу, при постукуванні дає звук, характерний для кераміки. Патрубки сталевих труб з нанесеним корундовим шаром легко з'єднуються зваркою в довготривалу конструкцію.

Результати досліджень служать доброю основою початку розробки вітчизняної технології корозіо-ерозійностійкої захисту сталевих труб методом СВС.



ЛИТЕРАТУРА

1. Косинская А. В. Специальные виды литья из неметаллических расплавов // Металл и литье Украины. – 2004. – № 1-2. – С. 34-38.
2. Куртский Ю. Л. Износостойкие наплавочные материалы – классификация, характеристики, применение. (www.subarc.ru)
3. Евдокимов В. Д., Клименко Л. П., Евдокимова А. Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов. – Киев: Професионал, 2006. – 1051 с.
4. Мерджанов А. Т. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Физическая химия / Под ред. акад. Я. М. Колотыркина. – М.: Химия, 1983. – 224 с.
5. Мерджанов А. Т. Процессы горения и синтез материалов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
6. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика / Под ред. А. Е. Сычева. – Черноголовка: Территория, 2001. – 432 с.
7. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. – Л.: Химия, 1977. – 375 с.
8. Силяков С. Л., Песоцкая Н. С., Юхвид В. И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез и свойства абразивного композиционного материала на основе корунда // Неорганические материалы. – Черноголовка: ИСМАН, 1995. – Т. 31, № 3. – С. 351-357.

Анотація

Шинський О. І., Бабіч М. В., Буровський Н. І.

Визначення технологічних параметрів процесу нанесення захисного корундового покриття на елементи сталевих трубопроводів

Викладено методичні підходи; визначено технологічні параметри процесу нанесення зносостійкого корундового покриття на внутрішню поверхню металевих труб методом СВС в полі відцентрових сил. Проведено розрахунки зміни стандартної молярної енергії Гіббса для всіх можливих реакцій між компонентами шихти для з'ясування, які з цих реакцій теоретично можуть протікати самочинно. Для визначення енергетичної здатності шихти проведено також розрахунки теплових ефектів (ентальпій) відповідних реакцій. Розглянуто теплообмінні процеси між металевою трубою та продуктами екзотермічної реакції при формуванні корундового шару. Отримано дослідні зразки елементів сталевих трубопроводів з наплавленим корундовим шаром, досліджено матеріал покриття.

Ключові слова

самопоширювальний високотемпературний синтез (СВС), реакційна суміш, реактор, відцентрові сили і прискорення, гравітаційний коефіцієнт, корундове покриття

Methodical approaches are stated; technological parameters of process of putting a wearproof corundum coating on inner surface of metal pipes by SHS method in centrifugal force field are defined. Calculations of change standard Gibbs mole energy for all possible reactions between charge components for finding-out what of these reactions can theoretically proceed spontaneously are performed. For determination of charge power ability calculations of thermal effects (enthalpy) corresponding reactions also are performed. Heat processes between a metal pipe and products of exothermic reactions at corundum layer formation are considered. Pre-production models of elements of the steel pipeline with corundum overlay are received, the covering material is investigated.

УДК 669.35.669.12.669.018.25

Е. Н. Парахневич, В. В. Лунев, В. П. Пирожкова, Л. К. Чеботарь, Н. М. Бурова

Запорожский национальный технический университет, Запорожье

Морфология сульфидных включений в металле электрошлаковой наплавки

Рассмотрены процессы трансформации неметаллических включений и структуры в металле электрошлаковой наплавки с повышенным содержанием серы. Установлено, что в зонах сплавления формируется другая форма неметаллических включений и иная микроструктура.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, неметаллические включения, сера, микроструктура, зона сплавления

Введение

Сера, как известно [1, 2], является вредной примесью, образует легкоплавкие эвтектические сульфиды, выделяющиеся по границам зерен, что приводит к охрупчиванию металла, образованию кристаллизационных трещин и в целом – к снижению физико-механических свойств.

Для снижения вероятности образования кристаллизационных трещин в металл вводят различные присадки – десульфураторы. Более интенсивная десульфурация металла (до 60 %) [3] наблюдается после электрошлакового переплава.

Результаты исследования. В настоящей работе проведено сравнительное исследование микроструктуры и природы неметаллических включений (НВ) в металле, наплавленном электрошлаковым способом с повышенным содержанием серы. Варианты наплавки приведены в таблице.

Опытный металл выплавляли в индукционной печи емкостью 60 кг с основной футеровкой. Высокие концентрации серы обеспечивались вводом в металл сернистого железа, содержащего 32 % S. Конечное раскисление производили 0,2 % Al.

Наплавки проводили на установке А-550М с

применением стандартного шлака АНФ-6 (в %, CaF_2 – 65-70; Al_2O_3 – 23-31; CaO – 8; SiO_2 – 2,5; FeO – 0,5), обеспечивающего высокую десульфурацию.

В качестве расходных электродов использовали литые заготовки из сталей марок 45 (0,08 % S) и 12X13 (0,06 % S) сечением 60 мм, Ø кристаллизатора 100 мм.

Зоны сплавления однородных и разнородных по химическому составу сталей выявляли на полированных шлифах с использованием методов химического и теплового травления [4].

Микроструктуру исходного и наплавленного металла, в том числе и зоны сплавления, исследовали на световых оптических микроскопах МИМ-8 и «EpiQuant» при увеличениях 100-1000. Изменения микроструктуры фиксировали замерами микротвердости с помощью микротвердомера ПМТ-3 (таблица).

Распределение элементов в зонах сплавления определяли на растровом электронном микроскопе JSM-6360. Природу неметаллических включений изучали металлографическим и петрографическим методами. Определение поэлементного состава