

УДК 669.187:541.123

А.В. ХАРЧЕНКО ⁽¹⁾, доцент, кандидат технических наукР.В. СИНЯКОВ ⁽²⁾, начальник отдела, кандидат технических наук

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия⁽²⁾ Технологическая компания «Мин Цинь», г. Пекин (КНР)

На основе метода химических потенциалов Гиббса получены термодинамические соотношения, описывающие зарождение и рост неметаллических включений в стали. Определены закономерности изменения массы и химического состава неметаллических включений в жидкой стали при ее охлаждении. Приведены способы определения критического размера неметаллических включений. Показана возможность образования гетерогенных включений с тугоплавким ядром, насыщенным оксидами щелочноземельных металлов, и легкоплавкой гомогенной оболочкой.

Ключевые слова: сталь, неметаллические включения, термодинамика, поверхностная энергия, химический потенциал, критический размер зародыша

Введение. Одной из нерешенных проблем теории металлургических процессов остается надежный расчет массы, размеров и состава неметаллических включений (НВ) в стали. Существует большой массив экспериментальных данных по этой тематике, однако имеющиеся теоретические разработки могут претендовать лишь на решение отдельных аспектов проблемы для немногих классов неметаллических включений. Обширный экспериментальный материал по наиболее значимым для металлургии сталей системам неметаллических включений, включая часто встречающиеся системы $FeO-MnO-SiO_2-Al_2O_3$, приведен в работах Кислинга [1,2].

Постановка задачи. В работе ставится задача составить термодинамическое описание неметаллических включений в стали, которое позволит по составу металла количественно оценивать их массу, размер и химический состав. На первом этапе вводили упрощение, согласно которому все эндогенные жидкие включения имеют сферическую форму. Неметаллическая фаза, составляющая неметаллические включения, может иметь различное агрегатное состояние и химический состав, однако предполагается существование наиболее вероятного химического состава этой фазы, отвечающего термодинамическому равновесию в системе «металл-НВ». В тексте статьи индексы величин, относящихся к неметаллическим включениям, заключены в брэкеты <>.

Основная часть исследований. Кривизна поверхности неметаллического включения требует введения в выражение для химического потенциала каждого компонента в неметалличе-

ской фазе слагаемого λ , зависящего от молярного объема, радиуса включения и его удельной поверхностной энергии, именуемого обычно поправкой Томсона-Гиббса [3]:

$$\lambda = \frac{2\sigma \cdot v^M}{r}, \quad (1)$$

где σ – удельная поверхностная энергия (поверхностное натяжение); r – радиус включения; v^M – молярный объем.

При этом величина молярного объема для разных компонентов раствора, каковым является неметаллическое включение, существенно различается. Более того, учитывая, что в первом приближении химический состав оболочки неметаллического включения идентичен его объемному составу, величину λ следует индексировать, полагая ее индивидуальной для каждого i -го компонента раствора:

$$\lambda_i = \frac{2\sigma \cdot v_i^M}{r} = \frac{2\sigma \cdot M_i}{r \cdot \rho}, \quad (2)$$

где v_i^M – молярный объем i -го компонента (химического элемента); M_i – молярная масса i -го компонента; ρ – плотность включения (при отсутствии точных данных обычно принимаемая равной 3000 кг/м^3).

Поверхностное натяжение σ неметаллического включения произвольного состава является неизвестной величиной, но в литературе имеются данные об этих величинах для ряда жидких химических соединений – оксидов, солей и сульфидов [3,4], из которых при помощи регрессионного анализа можно получить вклад каждого компонента $\sigma_{<i>}$. Тогда величина σ принимает следующий вид:

$$\sigma = \sum_{j=1}^k x_{<j>} \cdot \sigma_{<j>} , \quad (3)$$

где $x_{<j>}$ – мольная доля j -го компонента; k – число компонентов (химических элементов), составляющих неметаллическую фазу.

Таким образом, химический потенциал i -го компонента неметаллического включения составляет:

$$\begin{aligned} \mu_{<i>} &= \mu_{<i>}^0 + R \cdot T \cdot \ln a_{<i>} + \lambda_i = \\ &= \mu_{<i>}^0 + R \cdot T \cdot \ln x_{<i>} \gamma_{<i>} + \lambda_i , \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mu_{<i>}^0$ – химический потенциал чистого компонента i в стандартном состоянии; $a_{<i>}$ – активность i -го компонента в неметаллических включениях; $\gamma_{<i>}$ – коэффициент активности i -го компонента.

В полученном выражении коэффициенты активности компонентов целесообразно вычислять в соответствии с термодинамической моделью многокомпонентной жидкой шлаковой фазы, учитывающей валентность химических элементов [5]:

$$\begin{aligned} \ln \gamma_{<i>} &= \ln \gamma'_{<i>} + \mu_{<e>} v_i = v_i \cdot \ln \psi_{<i>} + \\ &+ \sum_{j=1}^k x_{<j>} \cdot v_j \cdot (1 - \psi_{<j>} \cdot \beta_{<j>}) + \mu_{<e>} \cdot v_i , \end{aligned} \quad (5)$$

где $\gamma'_{<i>}$ – коэффициент активности i -го компонента без учета электрохимического слагаемого; $\mu_{<e>}$ – химический потенциал электронов (уровень Ферми); v_i – валентность i -го элемента;

$$\psi_{<i>} = \left(\sum_{j=1}^k x_{<j>} \cdot \beta_{<j>} \right)^{-1} ; \beta_{<j>} = \exp \left[-\varepsilon_{<ij>} / (R \cdot T) \right] ;$$

R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; $\varepsilon_{<ij>}$ – парные энергетические параметры взаимодействия.

В термодинамическом описании системы «металл-шлак» [6] фигурируют не абсолютные значения химических потенциалов, а их разности между контактирующими фазами, что позволяет заменить стандартные химические потенциалы в металле и шлаке соответствующей константой равновесия, определяемой экспериментально как линейная функция обратной температуры. Аналогично формулируется выражение для разности химических потенциалов элементов в металле и неметаллических включениях:

$$\begin{aligned} \Delta \mu_{[i]} &= R \cdot T \cdot \ln K_{[i]} + R \cdot T \cdot \ln a_{[i]} - R \cdot T \cdot \ln a_{<i>} - \lambda_i = \\ &= R \cdot T \cdot \ln \left(K_{[i]} \cdot a_{[i]} / a_{<i>} \right) - \lambda_i , \end{aligned} \quad (6)$$

где $\ln K_{[i]} = (\mu_{[i]}^0 - \mu_{<i>}^0) / R \cdot T$ – логарифм константы равновесия в системе «металл-НВ»; $a_{[i]}$, $a_{<i>}$ –

активности i -го компонента в металле и неметаллических включениях соответственно.

Важно отметить, что константы равновесия в системе «металл-НВ» совпадают с константами равновесия системы «металл-шлак», так как неметаллическая фаза, составляющая неметаллические включения, взаимодействует с металлом по тем же законам физической химии, что и шлак. Однако, в отличие от шлака, жидкие неметаллические включения приходят в состояние термодинамического равновесия с металлом практически мгновенно, и для них необходимо учитывать поверхностные эффекты.

Условием термодинамического равновесия в системе «металл-НВ» является равенство химических потенциалов компонентов (химических элементов) в металле и неметаллических включениях. Кроме того, должна быть обеспечена электронейтральность неметаллической фазы. Эти условия формулируются в виде системы $k+1$ уравнений:

$$\begin{cases} \Delta \mu_{[i]} = 0 , & i = 1..k ; \\ \sum_{i=1}^k x_{<i>} v_i = 0 , \end{cases} , \quad (7)$$

которая, как показано в работе [6], может быть преобразована к эквивалентной системе двух нелинейных уравнений относительно двух неизвестных $\mu_{<e>}$ и L :

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i \cdot v_i}{1 + \exp(-A_{<i>} + L + \lambda_i / R \cdot T + \mu_{<e>} \cdot v_i)} = 0 ; \\ F_2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{1 + \exp(-A_{<i>} + L + \lambda_i / R \cdot T + \mu_{<e>} \cdot v_i)} - \frac{N}{1 + \exp(L)} = 0 , \end{cases} \quad (8)$$

где $A_{<i>}$ – консолидированная константа равновесия по i -му компоненту, включающая собственно константу равновесия в системе «металл-неметаллическое включения (НВ)» и коэффициенты активности в металле и неметаллических включениях; $A_{<i>} = \ln \left(K_{[i]} \cdot \gamma_{[i]} / \gamma'_{<i>} \right)$; L – логарифм мольной кратности неметаллических включений; $L = \ln (N_m / N_n)$; N_m , N_n – число молей в металле и неметаллических включениях, $N = N_m + N_n$; n_i – общее число молей i -го компонента в системе «металл-НВ».

В результате решения системы уравнений (8) находим неизвестные величины $\mu_{<e>}$ и L и равновесные числа молей в неметаллических включениях и металле при помощи следующих выражений:

$$\begin{aligned} n_{<i>} &= \frac{n_i}{1 + \exp(-A_{<i>} + L + \lambda_i / R \cdot T + \mu_{<e>} \cdot v_i)} ; \\ n_{[i]} &= n_i - n_{<i>} , & i = 1..k . \end{aligned} \quad (9)$$

Для решения системы уравнений (8) не имеет принципиального значения, в каком исходном состоянии находится система «металл-НВ», в частности, числа молей n_i в системе могут совпадать с числами молей в металле $n_{[i]}$ при первоначальном отсутствии неметаллической фазы. В этом случае неметаллические включения зарождаются при охлаждении системы вплоть до температуры кристаллизации металла.

При охлаждении системы константы равновесия элементов с положительной валентностью увеличиваются, что приводит к появлению неметаллической фазы. Однако, в отличие от шлаковой фазы, зарождение неметаллических включений зависит также от их радиуса и соответствующих величин λ_i . При очень малом радиусе величины λ_i будут велики, и снижение температуры не приведет к появлению включений. Таким образом, для каждой температуры существует определенный критический радиус, который служит нижним пределом для реально зарождающихся неметаллических включений. Чем больше сдвиг температуры при охлаждении системы, тем более мелкие включения могут быть термодинамически устойчивыми. Поскольку зарождение эндогенных неметаллических включений имеет флуктуационную природу, фактически будут появляться включения различного радиуса, однако только те из них будут иметь тенденцию к росту, которые имеют радиус больше критического. Остальные включения будут растворяться.

Из анализа системы уравнений (8) следует, что условием сосуществования в системе металлической и неметаллической фаз при определенной температуре является неразрешимость характеристического уравнения $H = 0$ относительно $\mu_{<e>}$ при некотором заданном радиусе включений:

$$H = \sum_{i=1}^k n_i \cdot [1 - \exp(A_{<i>} - \lambda_i/R \cdot T - \mu_{<e>} \cdot \nu_i)] = 0 \quad (10)$$

Как показано схематически на рис. 1, при наличии для этого уравнения двух рациональных корней система состоит только из одного металла. При наличии одного корня (кривая H – касательная к оси абсцисс) система переходит в состояние сосуществования металлической и неметаллической фаз. При отсутствии рациональных корней (кривая H – ниже оси абсцисс) в системе имеются неметаллические включения в равновесии с металлом. Чем больше радиус включений, тем больше масса неметаллической фазы и тем меньше величины λ_i .

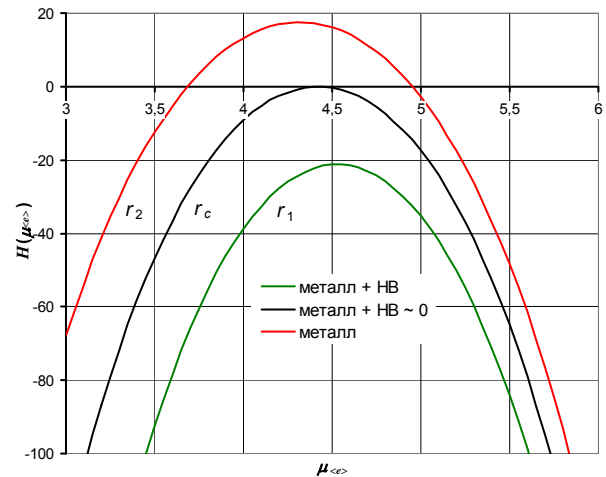


Рисунок 1 – Фазовый состав системы «металл-НВ» при различных радиусах неметаллических включений ($r_1 > r_c > r_2$)

При отсутствии решения уравнения (10) можно подобрать такие значения λ_i , при которых решение появляется, а неметаллическая фаза исчезает. Эти значения соответствуют критическому радиусу неметаллических включений r_c .

В структуре выражения (2) для λ_i удобно выделить величину, постоянную для всех компонентов:

$$\Lambda = \frac{\lambda_i}{R \cdot T \cdot M_i} = \frac{2\sigma}{r \cdot \rho \cdot R \cdot T} \quad (11)$$

так что

$$\frac{\lambda_i}{R \cdot T} = \Lambda M_i, \quad i = 1..k \quad (12)$$

Таким образом, для определения критического радиуса неметаллических включений r_c необходимо найти решение системы уравнений $H = 0$ и $\partial H / \partial \mu_{<e>} = 0$ относительно Λ и $\mu_{<e>}$:

$$\begin{cases} H = \sum_{i=1}^k n_i \cdot [1 - \exp(A_{<i>} - \Lambda M_i - \mu_{<e>} \cdot \nu_i)] = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial \mu_{<e>}} = \sum_{i=1}^k n_i \cdot \nu_i \cdot \exp(A_{<i>} - \Lambda M_i - \mu_{<e>} \cdot \nu_i) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

в которой второе уравнение определяет координату максимума кривой $H(\mu_{<e>})$. Решение данной системы соответствует кривой на рис. 1, касательной к оси абсцисс. Найденное критическое значение Λ_c позволяет вычислить критический радиус неметаллических включений из уравнения (11):

$$r_c = \frac{2\sigma}{\Lambda_c \cdot \rho \cdot R \cdot T} \quad (14)$$

Известен также другой способ определения критического радиуса неметаллических включений, основанный на том, что существует макси-

мум энергии Гиббса зародыша в зависимости от его радиуса [7].

Изменение энергии Гиббса при образовании зародыша одного неметаллического включения можно представить в виде двух слагаемых, отвечающих изменению его объемной и поверхностной энергии:

$$\begin{aligned} \Delta G_1 &= -\sum_{i=1}^k n_{<i>} \cdot \Delta \mu'_{<i>} + 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma = \\ &= -N_1 \cdot \sum_{i=1}^k x_{<i>} \cdot \Delta \mu'_{<i>} + 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma, \end{aligned} \quad (15)$$

где $n_{<i>}$ – число молей i -го компонента; $\Delta \mu'_{<i>}$ – изменение химического потенциала i -го компонента при его переходе из неметаллического включения в металл (без поправки Томсона-Гиббса); $\Delta \mu'_{<i>} = R \cdot T \cdot \ln(K_{<i>} a_{<i>}/a_{<i>})$; N_1 – число молей в одном включении, которое определяется как отношение объема включения V_1 к молярному объему v^M : $N_1 = \frac{V_1}{v^M} = 4\pi \cdot \rho \cdot r^3 / 3 \sum_{i=1}^k x_{<i>} \cdot M_i$.

Подстановка выражения для N_1 в уравнение (15) позволяет выразить изменение энергии Гиббса при зарождении неметаллического включения как функцию его радиуса r :

$$\Delta G_1 = -\frac{4\pi \cdot r^3}{3} \cdot \frac{\rho \cdot \sum_{i=1}^k x_{<i>} \cdot \Delta \mu'_{<i>}}{\sum_{i=1}^k x_{<i>} \cdot M_i} + 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma. \quad (16)$$

Если химические потенциалы элементов в неметаллическом включении меньше, чем в металле ($\Delta \mu'_{<i>} > 0$), создается движущая сила перехода элементов из металла во включение, и возможен его рост. В этом случае функция $\Delta G_1(r)$, вычисляемая по формуле (16), имеет вид (рис. 2):

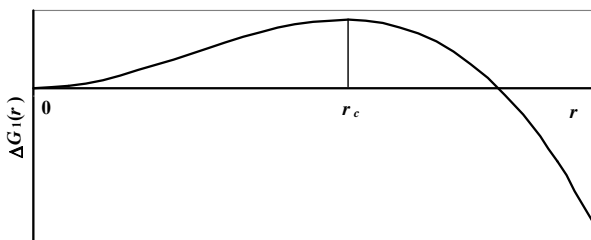


Рисунок 2 – Изменение энергии Гиббса как функция радиуса зародыша неметаллического включения

Максимум функции $\Delta G_1(r)$ соответствует зародышу критического размера. Если в результате флуктуации образовался зародыш меньше критического, то для последующего его самопроизвольного роста необходимо увеличение

энергии Гиббса, что невозможно в силу второго начала термодинамики. Зародыши, имеющие размер больше критического, имеют устойчивую тенденцию к росту.

Приравнявая первую производную ΔG_1 по r к нулю, находим критический радиус:

$$r_c = \frac{2\sigma}{\rho} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k x_{<i>} \cdot M_i}{\sum_{i=1}^k x_{<i>} \cdot \Delta \mu'_{<i>}}. \quad (17)$$

На рис. 3 приведены результаты расчета критического радиуса неметаллических включений в жидкой стали 12ГС двумя способами согласно формулам (13, 14) и формуле (17) в температурном интервале 1500...1620 °С.

Как видно, обратная величина критического радиуса неметаллических включений уменьшается с увеличением температуры металла. При этом с высокой точностью наблюдается почти линейная зависимость $1/r_c(t)$. При приближении к начальной температуре 1625 °С критический радиус стремится к бесконечности, так как при этой температуре металл до охлаждения находился в состоянии термодинамического равновесия со шлаковой и газовой фазами, которые по определению имеют нулевую кривизну межфазной поверхности с металлом.

Расчет критического радиуса включения по формуле (17) дает результат того же порядка, что и формулы (13,14), однако менее точен, так как требует предположений о химическом составе неметаллической фазы, который заранее не известен. Кроме того, недостаток данного подхода заключается в том, что он основан на локальном квазиравновесии в подсистеме «металл-включение», которое не учитывает изменения состояния системы «металл-НВ» в целом.

Следует иметь в виду, что при больших переохлаждениях ($t \sim 1500$ °С) критический размер включений становится настолько малым, что для образования зародыша, способного к росту, достаточно агрегирования нескольких положительно и отрицательно заряженных ионов, например, кальция, кремния и кислорода. Разумеется, для столь малых образований необходимо с осторожностью использовать термодинамические соотношения, так как в их основе лежит статистика. Отчасти данный микромасштабный эффект компенсируется увеличением поверхностного натяжения на границе металл-НВ при понижении температуры расплава.

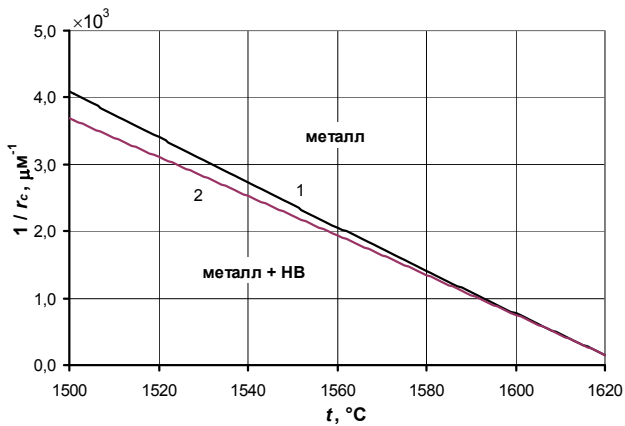


Рисунок 3 – Зависимость критического радиуса неметаллических включений в жидкой стали 12ГС от температуры при охлаждении от 1625 °С: 1 – расчет по формулам (13, 14), 2 – по формуле (17)

На рис. 4 показано изменение относительной массы и химического состава неметаллических включений в жидкой стали 12ГС при их росте от критического размера. В целом в составе включений преобладает диоксид кремния. В порядке убывания за ним следуют оксиды марганца, алюминия, магния и кальция. Содержание последнего является существенным только вблизи критического размера. Заметным является локальный максимум содержания оксида магния, который имеет ограниченную растворимость в системах с оксидами марганца, кремния и алюминия. Поэтому следует ожидать выпадения мелкодисперсной фазы MgO в объеме самих включений, что часто наблюдается на практике.

Поскольку неметаллическая фаза, насыщенная CaO и MgO в начальный период роста включения, имеет высокую температуру плавления, возможно образование тугоплавкого ядра и последующий послойный рост с градиентным изменением химического состава от центра до поверхности твердой фазы. Если неметаллическая фаза при каком-то отношении r/r_c становится жидкой из-за уменьшения содержания CaO и MgO , ее химический состав в дальнейшем изменяется синхронно с увеличением радиуса, так как равновесие с металлом в жидких неметаллических включениях малого размера ($< 1,0$ мкм) достигается почти мгновенно. Таким образом формируются включения со сложной морфологией – тугоплавким ядром и легкоплавкой (или менее тугоплавкой) гомогенной оболочкой.

Из-за высокого содержания диоксида кремния и оксида кальция в начале роста неметаллического включения возможно образование комплексного соединения $xCaO \cdot ySiO_2$ с температу-

рой кристаллизации в широком диапазоне от 1435 до 2570 °С в зависимости от состава.

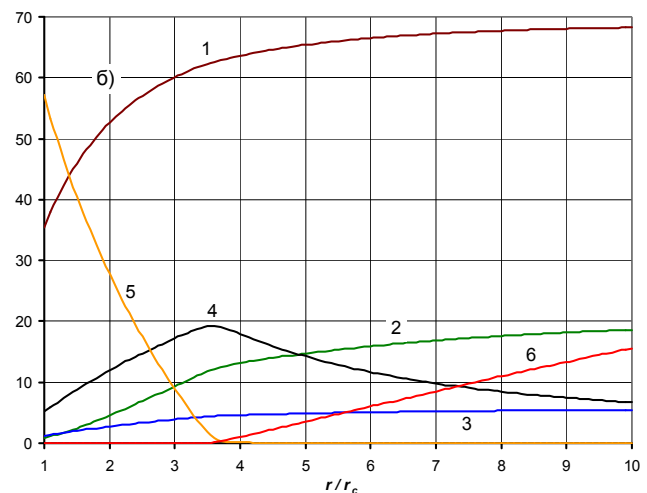
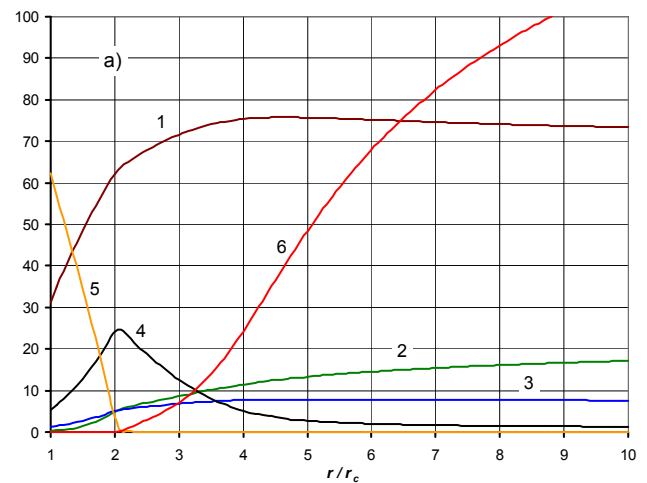


Рисунок 4 – Изменение химического состава (%) и относительной массы (г/т) эндогенных неметаллических включений в жидкой стали 12ГС при их росте от критического размера: 1 - SiO_2 , 2 - MnO , 3 - Al_2O_3 , 4 - MgO , 5 - CaO , 6 - остатит. масса. Охлаждение металла от 1625 °С до 1500 °С (а) и до 1550°С (б)

Следует отметить, что сложный характер изменения содержания компонентов, наблюдаемый при росте включений, характерен только для относительных величин процентов, тогда как их массы монотонно увеличиваются. Например, уменьшение содержания CaO и MgO (после максимума) в процентах на рис. 4 не сопровождается переходом кальция и магния в металл.

На рис. 5 показано изменение химического состава неметаллических включений в расплаве стали 12ГС при охлаждении от температуры 1625 до 1500...1620 °С.

Характерным является максимум содержания MgO в начале существенного увеличения массы включений при температуре 1540 °С для

$3 \times r_c$ и при температуре 1570°C для $10 \times r_c$, что может служить дополнительным доказательством насыщения ядра включений оксидом магния или выпадения его в объеме включений в виде мелкодисперсной твердой фазы.

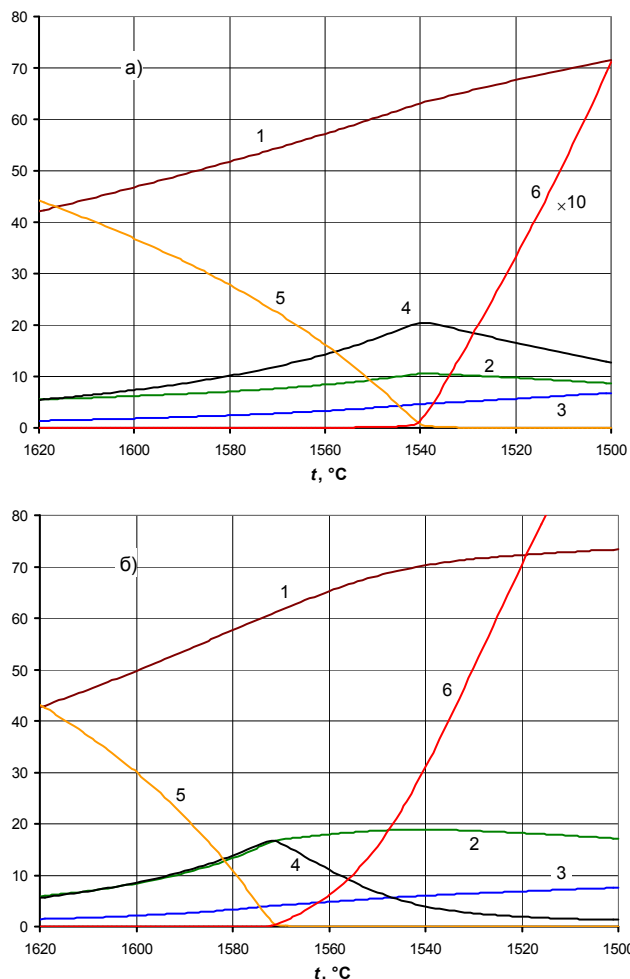


Рисунок 5 – Зависимость химического состава (%) и относительной массы (г/г) неметаллических включений в жидкой стали 12ГС от температуры при охлаждении от 1625°C : 1 - SiO_2 , 2 - MnO , 3 - Al_2O_3 , 4 - MgO , 5 - CaO , 6 - отн. масса. Относительный размер включений $3 \times$ (а) и $10 \times$ (б) критического радиуса

Следует отметить подобие графиков зависимости массы и химического состава неметаллических включений на рис. 4 и рис. 5: уменьшение температуры системы действует подобно

увеличению кратности радиуса включений r/r_c . Это объясняется однонаправленным влиянием обратной температуры и радиуса включений соответственно на консолидированные константы равновесия $A_{<i>$ и поправки Томсона-Гиббса λ_i в выражениях под знаком экспоненты в уравнениях (8), описывающих равновесие в системе «металл-НВ».

Выводы. Таким образом, на основе метода химических потенциалов Гиббса получены термодинамические соотношения, описывающие зарождение и рост неметаллических включений в стали. Показано, что в выражение для химического потенциала компонента фазы необходимо ввести учет кривизны поверхности неметаллического включения, зависящей от радиуса НВ и удельной поверхностной энергии. Приведены способы определения критического размера неметаллических включений. На основе моделирования определены закономерности изменения массы и химического состава неметаллических включений в жидкой стали при ее охлаждении.

На основе моделирования определены закономерности изменения массы и химического состава неметаллических включений в жидкой стали при ее охлаждении.

Применительно к стали 12ГС показана возможность образования гетерогенных включений с тугоплавким ядром, насыщенных оксидами щелочноземельных металлов, и легкоплавкой гомогенной оболочкой. Предложен механизм послойного роста неметаллического включения с градиентным изменением химического состава от центра до поверхности неметаллической фазы.

Предложенная термодинамическая модель неметаллических включений не противоречит ранее разработанной модели многокомпонентной жидкой шлаковой фазы и полностью совпадает с ней при отсутствии кривизны межфазной границы и поверхностного натяжения.

Библиографический список

1. **Kiessling, R.** Non-metallic Inclusions in Steel. Parts I-IV [Text] / R. Kiessling, N. Lange. – London : The Institute of Metals, 1978. – 465 p. – ISBN 978-0904357189.
2. **Kiessling, R.** Non-metallic Inclusions in Steel. Part V [Text] / R. Kiessling, F. B. Pickering. – London : The Institute of Metals, 1989. – 208 p. – ISBN 978-0901462442.
3. **Люпис, К.** Химическая термодинамика материалов [Текст] / К. Люпис. – М. : Metallurgiya, 1989. – 503 с. – ISBN 5-229-00001-5.
4. **Григорян, В. А.** Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов [Текст] / В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, А. Г. Пономаренко и др. – М. : Metallurgiya, 1989. – 288 с. – ISBN 5-229-00050-3.

5. **Харченко, А. В.** Термодинамическая модель многокомпонентной жидкой шлаковой фазы [Текст] / А. В. Харченко, Р. В. Синяков // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2016. – Вип. 2(36). – С. 16-22.
6. **Харченко, А. В.** Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали [Текст] / А. В. Харченко, А. Г. Пономаренко, С. В. Довгонюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 10. – С. 131-137.
7. **Кристиан, Дж.** Теория превращений в металлах и сплавах. Часть 1. Термодинамика и общая кинетическая теория [Текст] / Дж. Кристиан. – М. : Мир, 1978. – 808 с.

ХАРЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ, кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії, Запорізька державна інженерна академія (Запоріжжя, Україна). E-mail: odds@i.ua

СІНЯКОВ РОМАН ВОЛОДИМИРОВИЧ, кандидат технічних наук, начальник відділу, технологічна компанія «Мін Цинь» (Пекін, КНР). E-mail: rvsr@mail.ru

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТАЛІ

На основі методу хімічних потенціалів Гіббса одержано термодинамічні співвідношення, що описують зародження та зростання неметалевих включень у сталі. Визначено закономірності змінювання маси та хімічного складу неметалевих включень у рідкій сталі під час її охолодження. Наведено способи визначення критичного розміру неметалевих включень. Показано можливість утворення гетерогенних включень з тугоплавким ядром, насиченим оксидами лужноземельних металів, і легкоплавкою гомогенною оболонкою.

Ключові слова: сталь, неметалеві включення, термодинаміка, поверхнева енергія, хімічний потенціал, критичний розмір зародка

KHARCHENKO ALEXANDER, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Metallurgy, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: odds@i.ua

SINYAKOV ROMAN, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, Ming Xing Technology Company (Beijing, PRC). E-mail: rvsr@mail.ru

PHYSICAL AND CHEMICAL REGULARITIES OF FORMATION FOR NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEEL

Based on the Gibbs chemical potential method, thermodynamic relationships have been obtained that describe the nucleation and growth of non-metallic inclusions in steel. Regularities of the change in the mass and chemical composition of non-metallic inclusions in liquid steel during its cooling have been determined. Methods for determining the critical size of non-metallic inclusions have been suggested. It has been shown the possibility of the formation of heterogeneous inclusions with a refractory core saturated with an alkaline-earth metal oxides, and soft melting homogeneous shell.

Key words: steel, non-metallic inclusions, thermodynamics, surface energy, chemical potential, nucleus critical size.

Стаття надійшла до редакції 06.03.2017 р.

Рецензент, проф. С.О. Гаврилко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>