

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ МНОГОСЛОЙНОЙ МОРФОЛОГИИ В МЕТАЛЛЕ СВАРНОГО ШВА

Л. А. ТАРАБОРКИН, В. В. ГОЛОВКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Целью работы было создание расчетной модели для практического прогнозирования кинетики формирования многокомпонентных эндогенных неметаллических включений в металле сварного шва. Предложенная математическая модель представляет собой нестандартную нелинейную краевую задачу для системы диффузионных уравнений со специфическим условием на движущейся межфазной границе расплав–включение и учитывает кинетику и гетерогенность процесса в условиях реального термического цикла сварки. Созданная как компьютерная реализация разработанной модели расчетная программа позволяет оценивать в вычислительном эксперименте размер и состав оксидных эндогенных неметаллических включений в зависимости от концентрационного и теплового режимов в сварочной ванне. Библиогр. 10, рис. 2.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочная ванна, неметаллические включения, математическая модель, прогнозирование

Неметаллические включения являются естественной составляющей структуры любой стали, выполняя существенную роль в различных процессах и явлениях как при ее производстве, так и в течение последующей эксплуатации [1–3].

Имеющиеся в научной литературе математические модели для прогнозирования состава, размера и количества неметаллических включений характеризуются тем, что, пытаясь упростить их математическую и компьютерную реализацию, авторы вынуждены делать определенные предположения, не в полной мере соответствующие особенностям физико-химических и теплофизических процессов при сварке [4, 5]. В частности, речь идет о необходимости учета высоких градиентов температур и концентраций, которые сопровождают образование сварного шва, а также существенной нестационарности и гетерогенности соответствующих процессов. Указанные особенности можно учесть, используя для формулировки математической модели уравнения типа реакционной диффузии с добавлением специфического условия на подвижной поверхности образованного неметаллического включения, что и сделано в данной работе.

Физико-химическое описание процесса. В основу математической модели положено следующее физико-химическое описание процесса формирования неметаллических включений в металле сварного шва:

1) диапазон рассматриваемых температур при охлаждении металла сварочной ванны — от 2300 до 1670 К в соответствии с реальным термиче-

ским циклом сварки (верхняя граница температурного диапазона соответствует наименьшей температуре образования оксида алюминия Al_2O_3 , который является наиболее тугоплавким соединением по сравнению с другими составляющими неметаллических включений в заданной системе);

2) в начальный момент времени элементы-раскислители (Al, Ti, Si, Mn и т. д.) гомогенно растворены в расплаве;

3) зародыши неметаллических включений имеют форму сферы (начальный радиус которой равен критическому радиусу, исчисляемому через свободную энергию образования) и равномерно распределены в объеме расплава;

4) формирование включений начинается в жидком металле сварочной ванны и продолжается в двухфазной зоне, причем рост включений происходит в диффузионной ячейке определенного размера по механизму реакционной диффузии, а именно: реагенты (кислород и элементы-раскислители) диффузионным переносом доставляются к поверхности включения, на которой происходит соответствующая химическая реакция взаимодействия между ними, и продукты реакции адсорбируются на указанной поверхности;

5) вероятность образования включений определенного состава зависит от температур их плавления и энергии образования, так что, в отличие от известных моделей, в определенных температурных поддиапазонах рассматриваются различные наборы химических реакций, соответственно меняется и состав металлической матрицы расплава;

6) диффузионные области растущих включений не перекрываются;

7) в каждый момент времени в течение всего процесса на межфазной поверхности раздела «включение–расплав» имеет место термодинамически равновесное состояние;

8) температурный режим процесса задан как функциональная зависимость температуры от переменной времени.

Формулировка математической модели. Чтобы сформулировать по данному физико-химическому описанию соответствующую математическую модель, введем следующие обозначения:

N — общее количество элементов-реагентов (кислород, раскислители и др.) в системе;

i — номер рассматриваемого химического элемента;

C_i — содержание (концентрация) i -го элемента в расплаве, моль/см³;

M_i — молекулярная масса i -го элемента;

D_i — коэффициент диффузии i -го элемента в расплаве, моль/(см²·с);

t — переменная времени, с;

r — геометрическая переменная в сферической системе координат;

$a(t)$ — текущий радиус включения в момент времени t , см;

T — температура как функция времени, $T = T(t)$, К;

r_m — размер диффузионной ячейки, связанный с объемной долей V_f и средним объемом включений V_m соотношением, см

$$r_m = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{V_m}{V_f}}$$

Объемный массоперенос (за пределами включения) описываем с помощью уравнения диффузии Фика, которое в сферической системе координат имеет вид

$$\frac{\partial C_i(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_i(T) r^2 \frac{\partial C_i(r,t)}{\partial r} \right), \quad a(t) < r < r_m; \quad (1)$$

на межфазной поверхности концентрация реагента рассчитывается как равновесная величина $C_{i, \text{равн}} = f(C_j|_{r=a(t)}, T(t))$ согласно предположению 4);

$$C_i(r,t) \Big|_{r=a(t)} = C_{i, \text{равн}}; \quad (2)$$

на границе диффузионной ячейки поток вещества отсутствует, что соответствует равенству

$$\frac{\partial C_i(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_m} = 0; \quad (3)$$

радиус включения во время его роста увеличивается за счет совместного выделения на поверхности включения продуктов соответствующей химической реакции

$$\frac{1}{3} \frac{d}{dt} (\rho a^3(t)) = a^2(t) k(C_{j, \text{равн}}, T) \times \sum_{i=1}^N X_i(T) M_i D_i(T) \frac{\partial C_i(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=a(t)}, \quad (4)$$

где $X_i(T)$ представляет собой характеристическую функцию, которая фактически определяет набор оксидов, которые могут входить в неметаллические включения на каждом температурном интервале:

$$X_i(T) = \begin{cases} 0, & T > T_i, \\ 1, & T \leq T_i, \end{cases}$$

где через T_i обозначена температура плавления i -го оксида. Итак, считая, что $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > \dots$, получаем, что при температуре ниже T_2 неметаллическое включение содержит только первый оксид; при дальнейшем понижении температуры до T_3 неметаллическое включение будет образовываться за счет как первого, так и второго оксидов; на следующем температурном интервале оно образуется уже за счет трех оксидов, и так далее (заметим, что такая картина соответствует описанной в монографии [1]); коэффициент $k(C_{j, \text{равн}}, T)$ зависит от текущего концентрационного состояния у поверхности включения и может быть определен в каждый момент времени при условии равновесного перераспределения подведенного к поверхности включения вещества между металлической и шлаковой фазами.

Начальное условие заключается в том, что поля концентраций реагентов пространственно однородные (в области между поверхностью включения и границей диффузионной ячейки):

$$C_i(r,t) \Big|_{t=0} = C_{i,0}, \quad a(0) < r < r_m, \quad (5)$$

причем начальные условия рассчитываются по отдельному алгоритму, который учитывает реальные условия сварки;

начальный радиус включения, согласно предположению 3), равен критическому радиусу зародыша:

$$a(0) = r_{\text{crit}}(C_{i,0}, T(0)). \quad (6)$$

Таким образом, математическая модель образования неметаллических включений сформулирована в виде нелинейной краевой задачи (1)–(6) для системы уравнений типа диффузии в области с подвижной границей, причем по смыслу она является задачей реакционной диффузии.

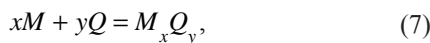
Отличительной особенностью этой модели является учет нестационарности процесса в условиях многокомпонентности системы, в которой формируются включения. Кроме того, благодаря нестандартному условию (4) на подвижной

поверхности растущего включения удается избежать от необходимости технически сложного определения констант скоростей указанных реакций, величины которых к тому же сильно зависят от температуры.

С другой стороны, граничное условие (4) на межфазной разделительной поверхности приводит к необходимости расчета равновесного состава многокомпонентной системы, которую можно представлять как составленную из двух растворов — металлического и шлакового.

Важным этапом численного моделирования процесса образования эндогенных неметаллических включений является расчет начального содержания легирующих элементов в сварочной ванне. Алгоритм этого расчета подробно изложен в работе [6]. Указанный алгоритм базируется на модели перехода легирующих элементов в сварочную ванну и шов для дуговой сварки под флюсом и позволяет численно оценить массовые доли легирующих элементов в сварочной ванне и металле сварного шва на основе сведений о химическом составе использованных сварочных материалов.

Алгоритм расчета концентраций на межфазной подвижной поверхности. Применяя подход, изложенный в работе [7], будем считать, что на межфазной поверхности между неметаллическим включением и жидкой сталью происходит реакция по уравнению



где M — металлический (легирующий) элемент (Al, Mn, Ti, Si и др.), Q — неметаллический элемент (O, N, S и др.).

Для такой реакции константу равновесия задают уравнением

$$k_{eq} = \frac{a_{M_xQ_y}}{a_M^x a_Q^y} = \frac{1}{[f_M c_M^i]^x [f_Q c_Q^i]^y} = \exp\left(-\frac{\Delta G^0}{RT}\right), \quad (8)$$

где $a_{M_xQ_y}$, a_M , a_Q — активности веществ M_xQ_y , M , Q ; c_M^i , c_Q^i — концентрации на межфазной границе M и Q , соответственно, мас. %; f_M , f_Q — коэффициенты активности M и Q , соответственно; ΔG^0 — стандартная свободная энергия обмена для реакции (7).

Рассматривая отношение потоков M и Q на межфазной поверхности растущего включения, можно вывести уравнение

$$c_M^i = c_M^b - \frac{xm}{ym_Q} \sqrt{\frac{D_M}{D_Q}} (c_Q^b - c_Q^i) \quad (9)$$

где c_M^b , c_Q^b — концентрации M и Q (мас. %) в глубине металла; m_M , m_Q — атомные массы M и Q ; D_M , D_Q — атомные массы M и Q в жидкой стали.

Тогда межфазные концентрации M и Q , т. е. c_M^i , c_Q^i — соответственно можно найти, решив систему уравнений (8), (9).

Учитывая специальную структуру уравнений этой системы, для искомой величины концентрации кислорода c_Q^i на межфазной поверхности получили уравнение

$$c_Q^i = (c_Q^b)^{-y/x} \frac{1}{P \sqrt[k_{eq}]{f_M f_Q^{y/x}}} - \frac{c_M^b}{P} + c_Q^b, \quad (10)$$

где для краткости обозначено

$$P = (x/y) \left(m_M / m_Q \right) \sqrt{D_Q / D_M}.$$

Уравнение (10) решаем приближенно методом поразрядного деления с количеством разрядов 10, обеспечивающим число знаков после запятой, соответствующее порядку заданной точности решения.

Найдя c_Q^i для i -го элемента, по уравнению (9) численно определяем величину концентрации легирующего элемента на межфазной поверхности.

Алгоритм оценки средней плотности неметаллического включения. В условии (4) на подвижной межфазной границе фигурирует текущее значение плотности неметаллического включения, зависящее от времени процесса. Как оценку указанной плотности использовали среднюю плотность неметаллического включения, определяемую из тех соображений, что соотношение между количеством оксидов в неметаллическом включении в каждый момент времени численно такое же, как и в равновесном состоянии оксидной фазы для данной температуры. Количественный состав оксидной фазы целесообразно рассчитывать по теории шлака как системы с коллективной электронной фазой, которая в практически важных случаях обеспечена необходимым набором численных параметров [8].

В дальнейшем для краткости будем номеровать индексом i величины, относящиеся к элементам и соответствующим оксидам.

Обозначив через C_i ($i=1, n$), C_0 концентрации i -го элемента-раскислителя и кислорода, соответственно, через f_i ($i=1, n$), f_0 — их коэффициенты активности, γ_i — коэффициенты активности оксидов в расплавленном шлаке относительно стандартного состояния чистых оксидов, определяем константы равновесия K_i реакций (6) образования i -го оксида по формуле:

$$K_i = \frac{x_i \gamma_i}{C_i^m C_0^n f_i^m f_0^n}, \quad (11)$$

где x_i — мольные доли компонентов оксидной фазы.

Набор соотношений (11) представляет собой систему уравнений относительно мольных долей компонентов оксидной фазы, в результате решения которой, учитывая вычисленные коэффициенты активностей, получим уточненное содержание кислорода в стали и соответствующий состав шлаковой фазы, образовавшейся при определенных равновесных условиях.

Рассчитанный состав оксидной фазы составляет (мас. %):

$$X_i (\%) = \frac{x_i M_i}{\sum_{i=1}^n x_i M_i},$$

где индексом i обозначены такие оксиды элементов в шлаке: FeO, MnO, SiO₂, Al₂O₃, TiO и др.; M_i — молекулярная масса соответствующего оксида.

Алгоритм численной реализации задачи (1)–(6) и расчетная модель. Основной сложностью в процессе решения задачи (1)–(6) является необходимость учета граничного условия (4) на подвижной межфазной поверхности. Для этого применяли метод сеток численного решения задач этого типа в так называемом варианте «ловли» неизвестной границы раздела расплав-включение в узел дискретной сетки, использованный ранее в работе [4] для задачи с одним диффузионным уравнением.

Поскольку в математической модели (1)–(6) диффузионные уравнения в системе связаны только через условие на подвижной границе (4), то указанное условие можно использовать для итерационного уточнения шага по времени, что позволяет рассматривать на каждом временном шаге диффузионные уравнения (1) как независимые.

Чтобы решить поставленную задачу разностным методом, образуем равномерную по радиальной координате r сетку ω с постоянным шагом h , которая в каждый момент времени $t = t_k$ состоит из множества точек

$$\omega^{(k)} = \{r_i^{(k)} = a(t_k) + ih, i = \overline{0, M}\}.$$

Пусть промежуток времени τ_k такой, что за время от t_k до $t_{k+1} = t_k + \tau_k$ радиус включения изменился на величину шага сетки h , так что $a(t_{k+1}) - a(t_k) = h$. Тогда множество узлов сетки в момент времени $t = t_{k+1}$ описывается выражением

$$\omega^{(k+1)} = \{r_i^{(k+1)} = r_{i+1}^{(k)}, i = \overline{0, M-1}\}.$$

Обозначив содержание произвольного компонента расплава через $C_n = C_n(r, t)$ и используя стандартные обозначения, записываем дискретное уравнение, аппроксимирующее соответствующее дифференциальное уравнение в системе (1) на сетке $\omega^{(k+1)}$, в виде

$$\begin{aligned} \frac{C_{n,i}^{(k+1)} - C_{n,i+1}^{(k)}}{\tau_k} &= \frac{1}{\left(r_i^{(k+1)}\right)^2 h} \times \\ &\times \left[d_{n,i+1/2}^{(k+1)} \left(r_i^{(k+1)} + \frac{h}{2}\right)^2 \frac{C_{n,i+1}^{(k+1)} - C_{n,i}^{(k+1)}}{h} - \right. \\ &\left. - d_{n,i-1/2}^{(k+1)} \left(r_i^{(k+1)} - \frac{h}{2}\right)^2 \frac{C_{n,i+1}^{(k+1)} - C_{n,i}^{(k+1)}}{h} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

$$i = \overline{1, M-2},$$

где

$$C_{n,i}^{(k+1)} = C_n\left(r_i^{(k+1)}, t_{k+1}\right),$$

$$C_{n,i}^{(k)} = C_n\left(r_i^{(k)}, t_k\right), \quad d_{n,i\pm 1/2}^{(k+1)} = D_n\left(T\left(t_k \pm \frac{\tau_k}{2}\right)\right).$$

Разностные аналоги граничных условий (2) и (5) имеют вид

$$C_{n,0}^{(k+1)} = C_{n,0}^{(k)}, \quad (13)$$

$$C_{n,M-1}^{(k+1)} = C_{n,M-2}^{(k)}. \quad (14)$$

Значение шага по времени τ_k , в течение которого граница включения перемещается на один узел сетки, получаем как предел итераций по времени $\tau_k^{(0)}, \tau_k^{(1)}, \tau_k^{(2)}, \dots, \tau_k^{(s)}$. Указанный итерационный процесс уточнения шага по времени для перехода от k -го до $(k+1)$ -го временного слоя реализован следующим образом:

1) в качестве начального приближения для τ_k использовано значение шага по времени на предыдущем слое, т. е. $\tau_k^{(0)} = \tau_{k-1}$;

2) имея значения $\tau_k^{(s)}$, решаем методом прогонки N систем линейных разностных уравнений вида (12)–(14) с $\tau_k = \tau_k^{(s)}$ для $n = \overline{1, N}$ и определяем тем самым значения $C_{n,i}^{(k+1)}$; отметим, что при этом за время $\tau_k^{(s)}$ до поверхности включения будет перенесено такое количество X_n n -го компонента расплава:

$$X_n = 4\pi a^2(t_{k+1}) M_n d_{n,1/2}^{(k+1)} \frac{C_{n,1}^{(k+1)} - C_{n,0}^{(k+1)}}{h} \tau_k^{(s)};$$

3) решаем задачу (9)–(10) для расчета равновесных концентраций металлических элементов на границе $a(t_{k+1})$;

4) исходя из найденного равновесного состава, вычисляем среднюю плотность включения $c_{k+1}^{(s)}$ и массу $m^{(s)}$ вещества, которая выделилась в слой толщиной $h^{(s)}$;

5) если справедливо условие завершения итерационного процесса

$$\left|1 - \tau_k^{(s)} / \tau_k^{(s-1)}\right| < \varepsilon,$$

для достаточно малых значений ε (например, $\varepsilon = 10^{-4}$), то принимаем значение шага по времени $\tau_k = \tau_k^{(s)}$ и переходим на следующий временной слой, если же это условие не выполняется, то следующее приближение $\tau_k^{(s+1)}$ для временного слоя определяем из соотношения

$$4\pi r_{k+1}^{(s)} [a^3(t_{k+1}) - a^3(t_k)] / 3\tau_k^{(s+1)} = m^{(s)} / \tau_k^{(s)},$$

которое представляет собой разностный аналог условия (6);

б) в равенстве (11) устанавливаем $C_{n,0}^{(k+1)} = C_{n, \text{равн}}^{(s)}$ и возвращаемся к п. 2).

Пример результатов расчета. Компьютерную реализацию разработанной расчетной модели выполнили с помощью системы программирования Visual C++.

На рис. 1, 2 представлены графические иллюстрации соответствующих вычислений по созданной компьютерной программе для одного из 20 исследованных вариантов металла швов, наплавленных методом дуговой сварки с использованием экспериментальных флюсов в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO 6847 [10].

Полное изложение условий проведения сравнительного анализа, а также расчетных и экспериментальных результатов требует отдельного рассмотрения в следующей публикации.

Входными параметрами в процессе численного оценивания начального содержания легирующих элементов в сварочной ванне выступили следующие величины:

химический состав флюса, представленный в оксидном виде; считали, что первоначальный состав шлаковой системы совпадает с составом флюса и содержит такие (все или некоторые из перечисленных далее) компоненты: $\text{SiO}_2 = 40\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 40\%$, $\text{CaF}_2 = 20\%$, $\text{MgO} = 0\%$, $\text{MnO} = 0\%$, $\text{TiO}_2 = 0\%$, $\text{CaO} = 0\%$, сумма процентных содержаний которых должна быть равна 100 %;

содержание легирующих элементов в стали, мас. %: 0,88 Si, 0,001 Ti, 0,64 Mn, 0,02 Al;

содержание легирующих элементов в сварочной проволоке, мас. %: 0,065 Si, 0,01 Ti, 0,98 Mn, 0,002 Al;

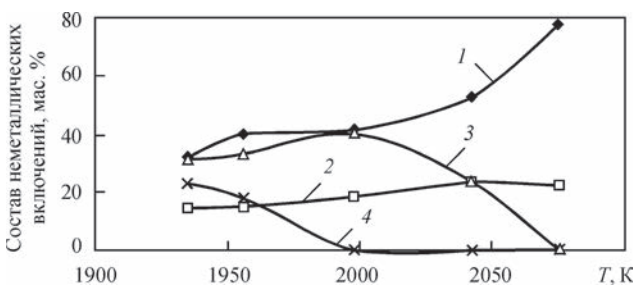


Рис. 1. Изменение состава неметаллических включений при остывании сварочной ванны: 1 — Al_2O_3 ; 2 — TiO_2 ; 3 — MnO ; 4 — SiO_2

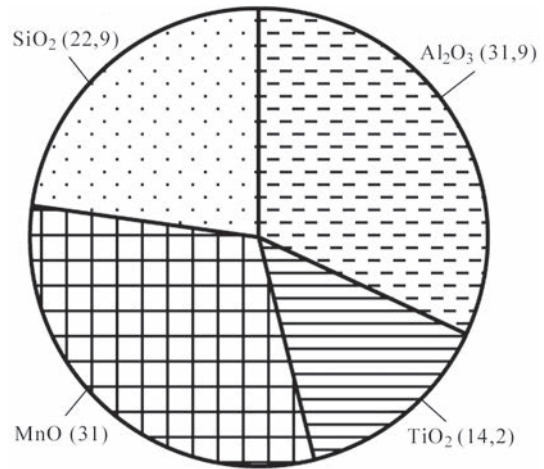


Рис. 2. Результаты расчета конечного состава неметаллических включений в наплавленном металле, мас. %

содержание кислорода, мас. %: в стали 0,02 и проволоке — 0;

относительная доля (0,33) участия основного металла в металле сварочной ванны;

температурные характеристики моделируемого процесса рассчитывали по методике Н. Н. Рыкалина.

Выводы

На основе физико-химического описания процесса формирования эндогенных неметаллических многокомпонентных включений в металле сварного шва разработана математическая модель рассматриваемого процесса. В математической модели учтены кинетика и гетерогенность процесса, в частности, нестационарный диффузионный перенос реагентов (в частности, элементов-раскислителей) к поверхности включения и реакции на межфазной поверхности расплав-включение, а также наличие двухфазной зоны во время кристаллизации сварного шва. Математическая модель представляет собой нестандартную нелинейную краевую задачу для системы диффузных уравнений со специфическим условием на подвижной межфазной поверхности.

На основе математической модели создана расчетная модель, которая предусматривает термодинамический расчет локального равновесного состояния на межфазной подвижной поверхности и численное решение краевой задачи для системы дифференциальных уравнений параболического типа на основе дискретизации с помощью метода сеток в варианте ловли подвижной границы в узел сетки.

Созданная соответствующая компьютерная программа может быть использована для численного прогнозирования в вычислительном эксперименте размера и состава оксидных (после соответствующей переработки — также оксисульфидных) неметаллических включений в зависи-

мости от концентрационного и теплового режимов в сварочной ванне.

Список литературы

1. Губенко С. И., Парусов В. В., Деревянченко И. В. (2005) *Неметаллические включения в стали*. Днепр, АРТ-ПРЕСС.
2. Ожигов Л. С., Митрофанов А. С., Рыбальченко Н. Д. и др. (2017) Влияние неметаллических включений в низколегированной углеродистой стали на ресурс трубопроводов АЭС. *Вопросы атомной науки и техники*, 4(110), 59–64.
3. Мясникова А. А. (2012) Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке. *Master's Journal*, 1, 50–54.
4. Hong T., Debroy T., Babu S. S., David S. A. (2000) Modeling of Inclusion Growth and Dissolution in the Weld Pool. *Metallurgical and materials transactions B*, 31B, 1, 161–169.
5. Kwon You-Jong, Zhang Jian, Lee Hae-Geon. (2008) A CFD-based Nucleation-growth-removal Model for Inclusion Behavior in a Gas-agitated Ladle during Molten Steel Deoxidation. *ISIJ International*, 48, 7, 891–900.
6. Головки В. В., Тараборкин Л. А. (2016) Моделирование химического состава металла ванны при дуговых способах сварки. *Автоматическая сварка*, 1, 14–18.
7. Hong T., DebRoy T. (2001) Time-temperature-transformation diagrams for the growth and dissolution of inclusions in liquid steels. *Scripta Materialia*, 44, 5, 847–852.
8. Григорян В. А., Стомахин А. Я., Пономаренко А. Г. и др. (1989) *Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов*. Москва, Металлургия.
9. Походня И. К., Демченко В. Ф., Демченко Л. И. (1979) *Математическое моделирование поведения газов в сварных швах*. Киев, Наукова думка.
10. (2015) ДСТУ ISO 6847:2015 (ISO 6847:2013, IDT) *Матеріали зварювальні. Направлення шару металу для хімічного аналізу*.

References

1. Gubenko, S.I., Parusov, V.V., Derevyanchenko, I.V. (2005) *Nonmetallic inclusions in steel*. Dnepr, ART-PRESS [in Russian].
2. Ozhigov, L.S., Mitrofanov, A.S., Rybalchenko, N.D. et al. (2017) Influence of nonmetallic inclusions in low-alloy carbon steel on service life of NPP pipings. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, 4(110), 59-64 [in Russian].
3. Myasnikova, A.A. (2012) Nonmetallic inclusions and their influence on welded joint quality in manual arc welding. *Master's J.*, 1, 50-54.
4. Hong, T., Debroy, T., Babu, S.S., David, S.A. (2000) Modeling of inclusion growth and dissolution in the weld pool. *Metallurg. and Mater. Transact. B*, 31B, 1, 161-169.
5. Kwon Yu-Jong, Zhang Jian, Lee Hae-Geon (2008) A CFD-based nucleation-growth-removal model for inclusion behavior in a gas-agitated ladle during molten steel deoxidation. *ISIJ Int.*, 48(7), 891-900.
6. Golovko, V.V., Taraborkin, L.A. (2016) Modelling of chemical composition of weld pool metal in arc methods of welding. *The Paton Welding J.*, 1, 12-16.
7. Hong, T., Debroy, T. (2001) Time-temperature-transformation diagrams for the growth and dissolution of inclusions in liquid steels. *Scripta Materialia*, 44(5), 847-852.
8. Grigoryan, V.A., Stomakhin, A.Ya., Ponomarenko, A.G. et al. (1989) *Physical-chemical calculations of electric steelmaking processes*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Pokhodnya, I.K., Demchenko, V.F., Demchenko, L.I. (1979) *Mathematical modeling of gas behavior in welds*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

10. (2015) DSTU ISO 6847:2015 (ISO 6847:2013, IDT): *Welding consumables. Deposition of a weld metal pad for chemical analysis* [in Ukrainian].

Л. А. Тараборкин, В. В. Головки

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

**РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ
НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ
БАГАТОШАРОВОЇ МОРФОЛОГІЇ
В МЕТАЛІ ЗВАРНОГО ШВА**

Метою роботи було створення розрахункової моделі для практичного прогнозування кінетики формування багатокомпонентних ендогенних неметалевих включень у металі зварного шва. Відповідна запропонована математична модель являє собою нестандартну крайову задачу для системи рівнянь типу реакційної дифузії зі специфічною умовою на рухомій міжфазній межі розплав–включення й урахує кінетику та гетерогенність процесу в умовах реального термічного циклу зварювання. Створена як комп'ютерна реалізація розробленої моделі розрахункова програма дозволяє оцінювати в обчислювальному експерименті розмір і склад оксидних ендогенних неметалевих включень залежно від концентраційного й теплового режимів у зварній ванні. Бібліогр. 10, рис. 2.

Ключові слова: дугове зварювання, зварна ванна, неметалеві включення, математична модель, прогнозування

L.A. Taraborkin, V.V. Golovko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

**CALCULATION MODEL OF FORMATION
OF NONMETALLIC INCLUSIONS OF MULTILAYER
MORPHOLOGY IN WELD METAL**

The objective of the work was development of a calculation model for practical prediction of the kinetics of formation of multicomponent endogenous nonmetallic inclusions in weld metal. The proposed mathematical model is a nonstandard nonlinear boundary problem for a system of diffusion equations with the specific condition on the moving melt-inclusion interphase, and allows for the kinetics and heterogeneity of the process under the conditions of the real thermal cycle of welding. The calculation program developed as a computer realization of the developed model allows evaluation in a computational experiment the size and composition of oxide endogenous nonmetallic inclusions, depending on concentrational and thermal mode in the weld pool. 10 Ref., 2 Fig.

Keywords: weld pool, nonmetallic inclusions, mathematical model, prediction

Поступила в редакцію 18.12.2018