

- V.A. Maslov, L.A. Trofimova, Y.P. Pustovalov // Visnik of Priazovsk state technical university: scientific transactions. – Mariupol, 1999. – V. №8. – pp.29-31. (Rus.)
16. Tul'chinskii L.N. Magnetic Measurements of Powder / L.N. Tul'chinskii // Poroshkovye magnitnye materialy (Magnetic Powders). – Kiev: IPM AN UkrSSR, 1984. – pp. 117-127. (Rus.)

Рецензент: А.М. Скрещцов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 12.11.2012

УДК 669.184.135

©Харлашин П.С.¹, Бакст В.Я.², Бендич А.В.³

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ В ЖИДКОМ РАСПЛАВЕ

Рассмотрен полный баланс массы вещества в процессе растворения твёрдого тела. На основании баланса составлены дифференциальные уравнения изменения во времени массовой и линейной скорости растворения твёрдого тела в жидкой фазе. Выведенные новые уравнения принципиально отличаются от общепринятых тем, что при наличии концентрированного раствора расчётная скорость растворения значительно больше, т.к. в них учитывается не только изменение концентрации расплава во времени, но и величина коэффициента массопереноса β . Предложенные уравнения наиболее актуальны при расчётах кинетики растворения твёрдых тел в концентрированных растворах (например, железа в железозуглеродистом расплаве, извести в шлаке и т.д.).

Ключевые слова: диффузионное плавление, твёрдое тело, расплав, коэффициент диффузии, массоперенос, концентрация, граница раздела фаз, баланс массы, линейная скорость.

Харлашин П.С., Бакст В.Я., Бендич А.В. Кінетичні особливості розчинення твердих тіл у рідкому розплаві. Розглянуто повний баланс маси речовини у процесі розчинення твердого тіла. На підставі балансу складені диференціальні рівняння зміни у часі масової і лінійної швидкості розчинення твердого тіла у рідкій фазі. Виведені нові рівняння принципово відрізняються від загальноприйнятих тим, що при наявності концентрованого розчину розрахункова швидкість розчинення значно більша, тому що в них враховується не тільки зміна концентрації розплаву в часі, але й величина коефіцієнта масопереносу. Запропоновані рівняння найбільш актуальні при розрахунках кінетики розчинення твердих тіл у концентрованих розплавах (наприклад, заліза у залізовуглецевому розплаві, вапна у шлаку, тощо).

Ключові слова: дифузійне плавлення, тверде тіло, розплав, коефіцієнт дифузії, масоперенос, концентрація, межа розділу фаз, баланс маси, лінійна швидкість.

P.S. Kharlashin, V.Y. Bakst, A.V. Bendich. Kinetic features of the dissolution of solids in the liquid melt. Consider a complete mass balance of the substance in the process of dissolution of the solid. On the basis of the balance made up differential equations change in time of mass and linear velocity of dissolution solid in the liquid phase. Derived new equations are fundamentally different from the usual in that the presence of a concentrated solution of the estimated rate of dissolution is much more, because they took into account not only the change in concentration of the melt in time, but the magnitude

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

of the mass transfer coefficient. The proposed equations are most relevant in the calculation of the kinetics of dissolution of solids in concentrated solutions (e.g. iron in iron melts, lime in the slag, etc.).

Keywords: diffusion melting, solid, melt, diffusion coefficient, mass transfer, concentration, phase boundary, mass balance, linear velocity.

Постановка проблемы. Расчёт линейной скорости диффузионного растворения твёрдых тел в жидкостях («диффузионное плавление») возможен лишь при расчёте полных балансов теплоты и массы компонентов в жидком слое на поверхности его контакта с твёрдым телом.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработана теория конвективной диффузии в жидком растворе и выведены новые уравнения, которые позволяют правильнее, чем общепринятые, рассчитать скорость растворения твёрдых тел в концентрированных жидких расплавах и получить при известных значениях коэффициента массопереноса близкие к реальным данным результаты расчётов. Дополнительно было выявлено, что по ходу растворения твёрдого тела в жидкости коэффициент массопереноса увеличивается в связи с уменьшением размера тела, которое обуславливает уменьшение толщины пограничного слоя. В течение нескольких десятков лет изучается теория диффузионной кинетики сталеплавильных процессов. Этим вопросам посвящено большое число работ учёных – А.Н. Щукарева, В.Г. Нернста, М.Я. Меджибожского, В.И. Явойского, О.И. Островского, В.И. Баптизманского, П.С. Харлашина.

Цель статьи – установить, что кинетика растворения твёрдого тела в жидком расплаве зависит не только от разницы концентраций диффундирующего вещества в жидкости вблизи поверхности её контакта с твёрдым телом и в объёме жидкости, но и от коэффициента массопереноса, величина которого в значительной степени обусловлена концентрацией расплава.

Изложение основного материала. Растворение твёрдых тел в жидкостях протекает при температуре плавления твёрдого тела, превышающей температуру раствора, и в большинстве случаев с поглощением тепла (при прогреве твёрдого тела до температуры поверхности необходимое тепло q , Дж/кг, равно скрытому теплу плавления, за вычетом теплоты смешения компонента E с растворителем) [1].

В этих условиях растворение, которое можно назвать «диффузионным плавлением», возможно лишь при одновременном протекании двух процессов: подвода тепла из раствора к поверхности твёрдого тела, компенсирующего расход тепла на растворение, а также встречной диффузии компонента E в объём жидкости и растворителя из объёма жидкости к поверхности её контакта с твёрдым телом, обеспечивающей снижение температуры поверхностного слоя $t_{\text{нас}} = F([E]_{\text{нас}})$ и необходимый тепловой поток:

$$\alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{нас}}) \cdot S = -\frac{dM_{\text{ТВ}}}{d\tau} \cdot q, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град.);

$t_{\text{ж}}$ и $t_{\text{нас}}$ – температура раствора и поверхностного слоя жидкости, °С [2].

Согласно экспериментальным законам количество твёрдого вещества, растворяющегося в жидкости в единицу времени при контакте с нею твёрдого тела, определяется в кг/с по формуле:

$$-\frac{dM}{d\tau} = k(c_{\text{нас}} - c) \cdot S, \quad (2)$$

где $c_{\text{нас}}$ – концентрация насыщенного раствора в слое жидкости, кг/м³;

c – фактическая концентрация раствора в данный момент, кг/м³;

S – поверхность растворяющегося твёрдого тела, м²;

k – коэффициент пропорциональности, м/с.

Основную суть теории конвективной диффузии выражает уравнение скорости диффузионного растворения твёрдого тела в жидкости:

$$Q = \frac{D}{\delta}(c_{\text{нас}} - c) \cdot S, \quad (3)$$

где $Q = \frac{dM}{dt}$ – количество твёрдого вещества, растворившегося в жидкости за единицу времени, кг/с;
 D – коэффициент диффузии, м²/с;
 δ – толщина пограничного слоя, который не перемешивается, м.

Следовательно, коэффициент k (2) пропорционален коэффициенту диффузии вещества в жидкости [1].

Согласно Нернсту скорость реакции, которая происходит по законам диффузионной кинетики, определяется диффузией в неподвижном пограничном слое небольшой толщины ($\delta \approx 10^{-2} - 10^{-4}$ см). Диффузионный поток в этом слое обусловлен разницей концентраций диффундирующего вещества в жидкости вблизи поверхности другой фазы $c_{\text{нас}}$ и в объёме жидкости c_0 . Движение жидкости обеспечивает постоянство концентраций растворённых веществ во всём объёме за исключением границы раздела фаз. Концентрации изменяются от $c_{\text{нас}}$ до c_0 согласно линейным законам только на границах слоя толщиной δ . Этот слой назвали диффузионным слоем Нернста [3].

Толщину пограничного слоя можно определить из выражения:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{Dr}{V}}, \quad (4)$$

где V – скорость потока жидкости вблизи данного твёрдого вещества, м/с;
 r – радиус тела, которое омывается потоком жидкости, м.

При турбулентном режиме диффундирующее вещество распределено в объёме фазы приблизительно равномерно. Поэтому уравнение (3) упрощается:

$$Q = \frac{D}{\delta} (c_{\text{нас}} - c) \cdot \frac{S}{V}. \quad (5)$$

Это уравнение справедливо в том случае, когда концентрация выражена отношением массы к объёму (кг/м³, кмоль/м³) [1]. Отношение $\frac{D}{\delta} = \beta$ называется коэффициентом массопереноса и может быть выражено уравнением:

$$\beta = \frac{D}{\delta} \approx \sqrt{\frac{DV}{r}}. \quad (6)$$

Поскольку $\delta \approx 10^{-2} - 10^{-4}$ см, то в турбулентной жидкой среде в зависимости от интенсивности перемешивания, которая влияет на скорость набегающего потока жидкости, величина β колеблется в пределах $10^{-2} - 10^{-1}$ см/с.

Однако последние работы по физико-химической гидродинамике показали, что даже на незначительном отдалении (10^{-5} см) от твёрдой стенки наблюдается движение жидкости, поэтому предположения Нернста о неподвижности жидкости на границе слоя утратили своё обоснование. В пограничном слое происходит не только молекулярный, но и конвективный перенос вещества, хотя последний менее интенсивен, чем в основном потоке жидкости [4].

Толщина пограничного слоя δ существенно различна на разных точках поверхности тела. Кроме того, δ зависит не только от свойств раствора и скорости его течения, но также и от коэффициента диффузии D (δ пропорциональна $D^{1/2}$). По этой причине коэффициент массопереноса β пропорционален коэффициенту диффузии не в первой степени, как это следует из формулы (3), а в степени, меньшей единицы. Дополнительно необходимо учитывать, что по ходу растворения твёрдого тела в жидкости β непрерывно увеличивается в связи с уменьшением размера тела, которое обуславливает уменьшение δ [2].

Для расчётов диффузионных потоков по уравнению (3) обычно используют средние эффективные значения β , определяемые на основе экспериментальных уравнений взаимосвязи между критериями подобия:

$$Nu_d = \frac{\beta d}{D} = k(Re)^m (Pr_d)^{1/3} = k \left(\frac{ud}{\nu} \right)^m \left(\frac{\nu}{D} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

где Nu_d и Pr_d – диффузионные критерии Нуссельта и Прандтля;
 d – характерный размер тела (для сферы – диаметр), м;
 Re – критерий Рейнольдса;
 u – скорость набегающего на тело потока жидкости, м/с;
 ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Величина $m = 0,3 - 0,8$ в зависимости от Re .

Коэффициент массопереноса β_E вещества E в растворе простейшим образом можно определить, если известны данные скорости его растворения в растворе и все параметры в уравнении (3):

$$\beta_E = \frac{-dM_E / dt}{(c_{нац} - c) \cdot S}, \quad (8)$$

где M_E – масса вещества E , кг.

Между объёмной концентрацией c_E и массовой [%E] существует такая взаимосвязь:

$$c_E = \frac{[\%E] \cdot \rho}{100}, \quad (9)$$

где ρ – плотность жидкости или твёрдого тела, кг/м³.

Если выразить концентрацию в массовых процентах, то [1]:

$$-\frac{dM_E}{dt} = \frac{\beta_E ([\%E]_{нац} - [\%E]) \cdot \rho \cdot S}{100}. \quad (10)$$

Для тела сферической формы:

$$-\frac{dM_E}{dt} = -\frac{dr}{dt} S \cdot \rho_{ТВ} = \beta (c_{нац} - c) \cdot S, \quad (11)$$

где $\rho_{ТВ}$ – плотность твёрдого слоя, кг/м³.

Линейная скорость растворения твёрдого слоя в жидкости определяется уравнением:

$$-\frac{dr}{dt} = \frac{\beta (c_{нац} - c)}{\rho_{ТВ}}. \quad (12)$$

В случае значительного влияния концентрации компонента на плотность раствора:

$$-\frac{dr}{dt} = \frac{\beta ([\%E]_{нац} \cdot \rho_{нац} - [\%E] \cdot \rho_{[E]})}{100 \cdot \rho_{ТВ}}, \quad (13)$$

где $\rho_{нац}$ – плотность насыщенного раствора (поверхностного слоя), кг/м³;

$\rho_{[E]}$ – плотность раствора (основной его массы) при концентрации [E].

При растворении нечистого твёрдого тела, т.е., когда $c_{ТВ} < \rho_{ТВ}$, $[\%E]_{ТВ} < 100\%$, скорость процесса определяется по уравнению:

$$-\frac{dM_E}{dt} = -\frac{dM_{ТВ} c_{ТВ}}{dt \cdot \rho_{ТВ}} = \beta_E (c_{нац} - c) \cdot S. \quad (14)$$

При выражении концентрации в кг/м³:

$$-\frac{dM_{ТВ}}{dt} = \frac{\beta_E (c_{нац} - c) \cdot S \cdot \rho_{ТВ}}{c_{ТВ}}, \quad (15)$$

и при выражении концентрации в массовых процентах:

$$-\frac{dM_{ТВ}}{dt} = \frac{\beta_E ([\%E]_{нац} - [\%E]) \cdot \rho_{ж} \cdot S}{[\%E]_{ТВ}}. \quad (16)$$

Рассмотрим баланс массы компонента E по ходу растворения твёрдого тела. За время dt в

растворённый слой твёрдого тела массой $-dM_{\text{ТВ}}$ поступит $-0,01dM_{\text{ТВ}} [\%E]_{\text{ТВ}}$ вещества E. Из образовавшегося жидкого слоя массой $dM_{\text{Ж}} = -dM_{\text{ТВ}}$ в объём жидкой фазы продиффундирует $0,01\beta_E \{[\%E]_{\text{нас}} - [\%E]\} \rho_{\text{Ж}} S dt$ вещества E. В этом слое останется $0,01dM_{\text{Ж}} [\%E] = -0,01dM_{\text{ТВ}} [\%E]$ того же компонента [5].

Баланс массы компонента E за время dt :

$$-0,01dM_{\text{ТВ}} [\%E]_{\text{ТВ}} - 0,01\beta_E \{[\%E]_{\text{нас}} - [\%E]\} \rho_{\text{Ж}} S dt = -0,01dM_{\text{ТВ}} [\%E]. \quad (17)$$

Массовая скорость растворения твёрдого тела будет, кг/с:

$$-\frac{dM_{\text{ТВ}}}{dt} = \frac{\beta_{\text{ТВ}} \{[\%E]_{\text{нас}} - [\%E]\} \rho_{\text{Ж}} S}{[\%E]_{\text{ТВ}} - [\%E]}, \quad (18)$$

а линейная (для сферической частицы $-\frac{dx}{dt} = -\frac{dr}{dt}$, м/с):

$$-\frac{dx}{dt} = -\frac{dM_{\text{ТВ}}}{dt \cdot \rho_{\text{ТВ}} \cdot S} = \frac{\beta_E \{[\%E]_{\text{нас}} - [\%E]\} \rho_{\text{Ж}}}{\{[\%E]_{\text{ТВ}} - [\%E]\} \rho_{\text{ТВ}}}. \quad (19)$$

В случае большого влияния концентрации вещества E на плотность расплава в уравнениях (18) и (19) необходимо вместо $\{[\%E]_{\text{нас}} - [\%E]\} \rho_{\text{Ж}}$ подставить $\{[\%E]_{\text{нас}} \cdot \rho_{\text{нас}} - [\%E] \cdot \rho_{[\%E]}\}$ [5], где $\rho_{\text{нас}}$ – плотность насыщенного раствора (поверхностного слоя), кг/м³; $\rho_{[\%E]}$ – плотность раствора (основной его массы) при концентрации $[\%E]$.

Таким образом, при наличии концентрированного раствора (при высоком $[\%E]$) расчётная скорость растворения по уравнениям (18) и (19) значительно больше, чем по уравнениям (10) и (13), где в знаменателях фигурирует лишь концентрация компонента в твёрдом теле $[\%E]_{\text{ТВ}}$.

Уравнения (18) и (19) применимы и в том случае, когда процесс «диффузионного плавления» лимитируется диффузией растворителя из объёма жидкости к поверхности её контакта с твёрдым телом. В таких случаях величины $[\%E]$, $[\%E]_{\text{нас}}$ и $[\%E]_{\text{ТВ}}$ означают массовую концентрацию растворителя в жидкости, поверхностном её слое и в твёрдом теле. Тогда в уравнениях (18) и (19) необходимо изменить лишь знаки в числителях и знаменателях.

Так, точные результаты расчётов линейной скорости плавления лома можно получить, рассчитав полные балансы теплоты и массы углерода в элементарном жидком слое на границе расплав – лом. Были предложены уравнения мгновенных балансов теплоты и массы углерода (на 1 м² поверхности) при расплавлении слоя лома толщиной dx за время dt [5]:

$$\alpha(t_p - t_{\text{пов}}) dt = -dx \rho_{\text{л}} [q_{\text{скр}} + (t_p - t_{\text{пов}}) c_p]; \quad (20)$$

$$0,01 \cdot \beta_{[\text{C}]} \{[\%C]_{\text{р}} - [\%C]_{\text{пов}}\} \rho_{\text{р}} dt = -dx \cdot 0,01 \{[\%C]_{\text{р}} - [\%C]_{\text{л}}\} \rho_{\text{л}}, \quad (21)$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{\delta_t}$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

λ – теплопроводность расплава, Вт/(м·К);

δ_t – толщина теплового пограничного слоя, м;

$q_{\text{скр}}$ – скрытая теплота плавления лома, Дж/кг;

c_p – удельная теплота жидкого металла, Дж/(кг·К);

$[\%C]_{\text{р}}$, $[\%C]_{\text{пов}}$, и $[\%C]_{\text{л}}$ – массовые доли углерода соответственно в объёме расплава, поверхностного жидкого слоя и лома, %.

При выведении этих уравнений было принято, что в конечном результате в слое dx содержание углерода изменяется от $[\%C]_{\text{л}}$ до $[\%C]_{\text{р}}$, а температура – от $t_{\text{пов}}$ до t_p . Соблюдение этих условий обеспечивается турбулентностью жидкой фазы: расплавленная часть лома не отличается по температуре и составу от расплава в целом, а очень тонкий пограничный слой, который имеет параметры $t_{\text{пов}}$ и $[\%C]_{\text{пов}}$, непрерывно перемещается к центру куска лома, не влияя на баланс те-

плоты и массы.

На основании уравнений (20) и (21) получим два выражения для расчёта линейной скорости диффузионного плавления лома [5]:

$$V_{\text{пл}} = -\frac{dx}{d\tau} = \frac{\alpha(t_p - t_{\text{нов}})}{[q_{\text{скр}} + (t_p - t_{\text{нов}})c_p] \cdot \rho_l}; \quad (22)$$

$$V_{\text{пл}} = -\frac{dx}{d\tau} = \frac{\beta_{[C]} \{ [\%C]_p - [\%C]_{\text{нов}} \} \rho_p}{\{ [\%C]_p - [\%C]_л \} \rho_l}. \quad (23)$$

При малых размерах твёрдых частиц (меньше 0,1 мм) диффузия в микрогетерогенных системах сильно интенсифицируется вследствие увеличения площади поверхности контакта жидкости с частицами и коэффициента массопереноса. Если масса твёрдой фазы устойчива, суммарная площадь поверхности частиц увеличивается обратно пропорционально их эффективному размеру [6, 7].

Например, при использовании порошкообразной извести с частицами диаметром 0,1 мм их суммарная площадь поверхности увеличивается по сравнению с поверхностью кусков извести ($d = 10 - 100$ мм) в 100-1000 раз. Если значения коэффициента массопереноса β и градиента концентраций Δc одинаковые, то скорость растворения извести и скорость роста концентрации оксида кальция в шлаке должны увеличиваться в такой же мере:

$$d(\text{CaO})/d\tau = \beta_{(\text{CaO})} \{ (\text{CaO})_{\text{нас}} - (\text{CaO}) \} \frac{S}{V}, \quad (24)$$

где $(\text{CaO})_{\text{нас}}$ и (CaO) – концентрации оксида кальция в шлаке соответственно около поверхности кусков извести (концентрация насыщения) и в остальной массе шлака; S – суммарная площадь поверхности кусков извести, м^2 ;
 V – объём шлака, м^3 .

Уравнение (24) для описания кинетики расплавления извести в шлаке справедливо, когда этот процесс лимитируется массопереносом оксида кальция. Если содержание оксида железа (II) в шлаке сравнительно невелико, то лимитирующей стадией процесса растворения извести становится встречная диффузия FeO, что обеспечивает в конечном результате увеличение $(\text{CaO})_{\text{нас}}$ и диффузионного потока CaO.

При использовании для обработки шлака сравнительно крупных частиц извести, т.е. при $Re > 500$, исследования показали, что коэффициент массопереноса β зависит от размера частиц и постоянно увеличивается по мере растворения частиц.

Если значения β и концентрации расплава устойчивы, то линейная скорость растворения частиц постоянна и может быть рассчитана по формуле (19). В этом случае продолжительность расплавления сферической частицы будет [1]:

$$\tau = \frac{(r_{\text{нач}} - r_{\text{кон}}) ([\%E]_{\text{ТВ}} - [\%E]) \rho_{\text{ТВ}}}{\beta_E ([\%E]_{\text{нас}} - [\%E]) \rho_p}, \quad (25)$$

где $r_{\text{нач}}$ и $r_{\text{кон}}$ – соответственно начальный и конечный радиусы частиц.

На основании уравнения (25) можно вычислить продолжительность полного растворения твёрдых частиц в шлаке при $r_{\text{кон}} = 0$. Продолжительность полного растворения кусковых материалов на три порядка больше, чем порошкообразных частиц. Так, при $r_{\text{нач}} = 2 - 5$ см продолжительность полного растворения извести в шлаке составляет 21,8-54,4 мин. [5].

Если допустить, что в уравнении (18) концентрация вещества E в жидкой фазе $[\%E]$ и суммарная площадь поверхности частиц S_{Σ} – переменные величины, то в любой момент:

$$[\%E] = [\%E]_{\text{нач}} + \frac{(M_{\text{нач}} - M) [\%E]_{\text{ТВ}}}{(M_{\text{р.нач}} + M_{\text{нач}} - M)}; \quad (26)$$

$$S_{\Sigma} = K_{\phi} \left(\frac{M}{\rho_{\text{ТВ}} N} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot N = K_{\phi} \left(\frac{M}{\rho_{\text{ТВ}}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot N^{\frac{1}{3}}, \quad (27)$$

где общее число частиц:

$$N = \frac{M_{\text{нач}}}{\rho_{\text{ТВ}} \cdot V_{\text{нач}}} = \frac{6 \cdot M_{\text{нач}}}{\rho_{\text{ТВ}} \pi d_{\text{нач}}^3}. \quad (28)$$

где $V_{\text{нач}}$ и $d_{\text{нач}}$ – соответственно объём и диаметр одной частицы в начале процесса;
 $[\%E]_{\text{нач}}$ и $[\%E]_{\text{ТВ}}$ – концентрации вещества соответственно в жидкой фазе в начале процесса и в твёрдых частицах, масс. %;

$M_{\text{р.нач}}$ и $M_{\text{нач}}$ – массы соответственно жидкой и твёрдой фаз в начале процесса, кг;

M – масса твёрдой фазы в момент τ , кг;

$K_{\phi} = \frac{S}{V^{\frac{2}{3}}}$ – коэффициент формы твёрдой частицы (для шара $K_{\phi} = 4,8$).

При анализе кинетики растворения извести в шлаке следует учитывать, что скорость процесса зависит не только от разницы концентраций оксида кальция в пограничном слое извести – шлак, но и от коэффициента массопереноса, величина которого в значительной степени обусловлена составом шлака. В результате скорость растворения извести может увеличиваться (при определённом увеличении содержания оксида кальция в шлаке), несмотря на уменьшение перепада концентрации $\Delta(\text{CaO}) = (\% \text{CaO})_{\text{нач}} - (\% \text{CaO})$ [8].

Выводы

1. По ходу растворения твёрдого тела в жидкости было учтено, что даже на незначительном отдалении от твёрдой стенки наблюдается движение жидкости.
2. При расчёте скорости растворения принимается во внимание не только изменение концентрации расплава во времени, но и величина коэффициента массопереноса.
3. Вопрос о кинетике растворения твёрдого тела в растворе рассматривался в полном контакте с расчётом полного баланса массы растворённого компонента в жидком растворе. На основе этого баланса были составлены новые дифференциальные уравнения изменения во времени массы и линейных размеров растворяемого в жидкой фазе твёрдого тела.
4. Новые уравнения дают более правильные результаты расчётов массовой и линейной скорости растворения по сравнению с общепринятыми уравнениями. Так, рассчитав полные балансы теплоты и массы углерода в элементарном жидком слое на границе расплав – лом, были получены точные результаты расчётов линейной скорости диффузионного плавления лома.
5. На основании новых уравнений был рассмотрен вопрос использования порошкообразной извести и крупных частиц для обработки шлака. Исследования показали, что коэффициент массопереноса зависит от размера частиц извести и постоянно увеличивается по мере растворения частиц. Следовательно, новые дифференциальные уравнения – актуальны.

Список использованных источников:

1. Меджибожський М.Я. Основи термодинаміки і кінетики сталеплавильних процесів / М.Я. Меджибожський, П.С. Харлашин // К. : Вища школа, 1993. – 328 с.
2. Меджибожський М.Я. Уточнение основного закона кинетики растворения твёрдых тел в жидкостях / М.Я. Меджибожский // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 1974. – № 2. – С. 53-57.
3. Харлашин П.С. Мышьяк и его роль в металлургических процессах / П.С. Харлашин // К. : Вища школа, 1993. – 304 с.
4. Меджибожський М.Я. Теоретические основы сталеплавильных процессов / М.Я. Меджибожский, П.С. Харлашин // К. : УМК ВО, 1992. – 250 с.
5. Меджибожський М.Я. Основи термодинаміки і кінетики сталеплавильних процесів / М.Я. Меджибожский // Киев, Донецк. : Вища школа. Головное издательство, 1986. – 280 с.

6. Харлашин П.С. Влияние мышьяка на свойства металлических систем и качество стали / П.С. Харлашин, М.А. Шумилов, Е.И. Якушечкин // К. : Вища школа, 1991. – 344 с.
7. Явойский В.И. Теория процессов производства стали / В.И. Явойский // М.: Металлургия, 1967. – 792 с.
8. Островский О.Н. Свойства металлических расплавов / О.И. Островский, В.А. Григорян, А.Ф. Вишкарев // М. : Металлургия, 1988. – 304 с.

Bibliography:

1. Medzhibozhsky M.Y. Fundamentals of thermodynamics and kinetics of steelmaking processes / M.Y. Medzhibozhsky, P.S. Kharlashin // K. : High School, 1993. – 328 p. (Ukr.)
2. Medzhibozhsky M.Y. Clarification of the basic law of the kinetics of dissolution of solids in liquids / M.Y. Medzhibozhsky // Lime universities. Iron and steel. – 1974. – N 2. – P. 53-57. (Rus.)
3. Kharlashin P.S. Arsenic and its role in metallurgical processes / P.S. Kharlashin // K.: High School, 1993. – 304 p. (Rus.)
4. Medzhibozhsky M.Y. Theoretical basis of steelmaking processes / M.Y. Medzhibozhsky, P.S. Kharlashin // K.: EMC HE, 1992. – 250 p. (Rus.)
5. Medzhibozhsky M.Y. Fundamentals of thermodynamics and kinetics of steelmaking processes / M.Y. Medzhibozhsky // Kiev, Donetsk: High School, 1986. – 280 p. (Rus.)
6. Kharlashin P.S. The influence of arsenic on the properties of metallic systems and the quality of steel // P.S. Kharlashin, M.A. Shumilov, E.I. Yakushechkin // K.: High School, 1991. – 344 p. (Rus.)
7. Yavoysky V.I. Theory of processes of steel production / V.I. Yavoysky // M.: Metallurgy, 1967. – 792 p. (Rus.)
8. Ostrovsky O.N. Properties of metallic melts / O.V. Ostrovsky, V.A. Grigoryan, A.F. Vishkarev // M: Metallurgy, 1988. – 304 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.10.2012

УДК 669.18.046:621.746.56

©Харлашин П.С.¹, Левицкая Т.А.²

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СОСТАВОВ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛА ВО ВРЕМЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Разработаны оптимальные составы порошковых шлакообразующих смесей для защиты зеркала металла во время непрерывной разливки, которые не содержат дорогостоящих импортных компонентов, улучшают качество непрерывно-литых заготовок, менее токсичны и имеют более низкую температуру плавления по сравнению с применяемыми в производстве.

Ключевые слова: *шлакообразующая смесь, непрерывно-литая заготовка, МНЛЗ, кристаллизатор, разливка, качество, сталь, поверхностное натяжение, вязкость, плавкость, температура плавления, доменный шлак, шлакопортландцемент, симплекс планирование, ассимилирующая способность.*

Харлашин П.С., Левицкая Т.А. Розробка нових складів шлакоутворюючих сумішей для захисту металу під час безперервного розливання сталі. Розроблені оптимальні склади порошкових шлакоутворюючих сумішей для захисту дзеркала металу під час безперервного розливання, які не містять дорогих імпорتنних компонентів, покращують якість безперервно-литих заготовок, менш токсичні і мають більш низьку температуру плавлення в порівнянні з застосовуваними у виробництві.

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь
² ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь