

УДК 669.1:382

О.А. Бабанина

Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина

**«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ ВЫСОКОАКТИВНЫМИ РЕАГЕНТАМИ»**

*Разработана математическая модель расплавления порошковой проволоки, которая учитывает: процессы, протекающие в проволоке; теплофизические и динамические явления, протекающие в сталеразливочном ковше в процессе ввода проволоки в расплав.*

*A mathematical model was developed to melt the flux-cored wire. It takes into account: the processes occurring in the wire, thermal and dynamic phenomena occurring in the ladle in the input wire into the melt.*

*Розроблена математична модель розплавлення порошкового дроту, який враховує: процеси, що протікають в дроті; теплофізичні і динамічні явища, що протікають в сталеразливочному ковші в процесі введення дроту в розплав.*

Ключевым направлением, обеспечивающим высокие механические свойства металлопроката из высококачественных конструкционных сталей является их обязательная внепечная обработка порошковой проволокой с высокоактивными реагентами, наиболее распространенным из которых является кальций. Подтверждением этому может служить оснащение всех сталеплавильных цехов, ориентированных на производство качественных конструкционных сталей оборудованием и технологией для ввода порошковой проволоки в сталеразливочный ковш.

Наряду с широким применением данной технологии, при ее использовании в серийном промышленном производстве ряд недостатков, которые проявляются в значительном снижении степени усвоения кальция иногда на единичных плавках, а иногда на длительных сериях. Это приводит к снижению положительного влияния на свойства стали, так и к его дополнительному расходу, в случае выхода на поверхность металла нерастворившийся порошковой проволоки или ухудшению экологических показателей процесса.

Для обеспечения высокой эффективности обработки расплавов в ковше порошковой проволокой с высокоактивными реагентами необходимо применить рациональные параметры данной технологии, такие как скорость и область ввода порошковой проволоки. Эти параметры существенно зависят от гидродинамической и теплофизической обстановки в ковше, а также от температуры и химического состава расплава.

Определение этих параметров экспериментальным путем в производственных условиях связаны с большими техническими и финансовыми трудностями. Физическое моделирование, в связи с трудностями, связанными с учетом чисел подобия не может обеспечить получения объективных результатов. Поэтому для предварительной оценки разрабатываемого процесса, а также оптимизации его параметров используют математическое моделирование.

В настоящее время, математическое моделирование является наиболее приемлемым и надежным методом исследования. Несмотря на допущения и предположения, сопутствующие математической и физической постановке задачи, полученные результаты при численном моделировании не только совпадают с экспериментальными и аналитическими, но и раскрывают неизвестные аспекты при решении задач гидродинамики и тепломассопереноса.

В связи с этим, в данной главе рассматривается математическое описание гидродинамических и

теплофизических процессов в расплаве сталеразливочного ковша; теплофизических процессов в системе порошковая проволока – расплав; движение частиц силикокальция в расплаве после растворения оболочки порошковой проволоки; математическая реализация перечисленных процессов.

Разливочный ковш емкостью 10 тонн представляют собой зауженный книзу усеченный цилиндр с верхним диаметром 1400, а нижним 1280 мм, высотой 1675 мм, толщиной металлического кожуха 25 мм и толщиной футеровки 140 мм. Температура футеровки в ковше составляет 900<sup>0</sup>С, а температура залитого в ковш металла – 1600<sup>0</sup>С.

Приняты следующие допущения:

- расплав в начальный момент времени неподвижен и имеет постоянную температуру по всему сечению полости ковша; теплофизические параметры расплава постоянны и соответствуют теплопроводности, плотности, и теплоемкости жидкой стали;
  - теплофизические параметры футеровки и кожуха не зависят от температуры;
- Схема расчетной области и принятых координат представлены на рис. 1.

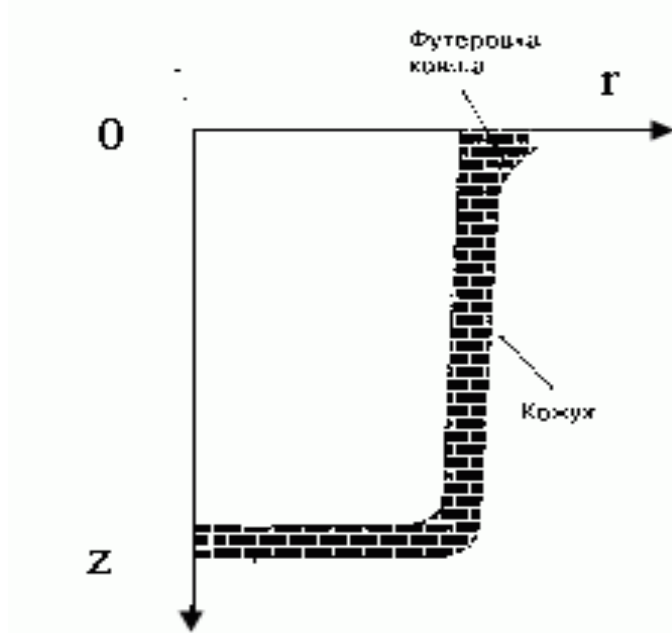


Рисунок 1. Схема расчетной области

В момент времени  $t > 0$  равновесие в системе расплав – ковш нарушается и в жидкой стали начинаются процессы конвективного теплообмена. Данные процессы в расплаве описываются следующей системой уравнений: уравнение Навье-Стокса в приближении Буссинеска [1] в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla(\nu \nabla \vec{V}) + \vec{g} \beta T, \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

уравнение переноса энергии

$$c\rho\left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)T\right] = \nabla(\lambda\nabla\vec{v}) \quad (3)$$

Здесь  $u, v$  – радиальная и осевая компоненты вектора скорости  $V$ ,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} + \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор Гамильтона,  $\nu = \nu_m + \nu_t$  – эффективный коэффициент вязкости,  $m^2/c$ ;  $\nu_m$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\nu_t$  – коэффициент турбулентной вязкости, механизм определения которого будет представлен ниже,  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ,  $\beta$  – коэффициент объемного расширения  $1/K$ ,  $r$  и  $z$  – радиальная и осевая координаты,  $m, T$  – текущая температура расплава,  $c, \rho$  и  $\lambda$  – теплоемкость, плотность и теплопроводность расплава.

Система уравнений (1)-(3) дополняется краевыми условиями:

$$t=0: \quad u=0, \quad v=0, \quad T=T_0, \quad T_{ct}=900^0C.$$

$$r=0 \quad u=0 \quad \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$z=0 \quad u=0 \quad v=0 \quad T=T_0 \quad (5)$$

$$r=r_{cn} \quad u=0 \quad v=0 \quad T=T_0 \quad (6)$$

$$z=z_{cn} \quad u=0 \quad v=0 \quad T=T_0 \quad (7)$$

На границе кожуха ковша – окружающая среда работает условие 3 рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\alpha(T - T_{cp}). \quad (8)$$

На границах расплав - футеровка и футеровка – кожух:

$$\lambda_{|pac} \frac{\partial T}{\partial r}|_{pac} = \lambda_{|фут} \frac{\partial T}{\partial r}|_{фут}, \quad T_{|pac} = T_{|фут}; \quad \lambda_{|руб} \frac{\partial T}{\partial r}|_{руб} = \lambda_{|фут} \frac{\partial T}{\partial r}|_{фут}, \quad T_{|руб} = T_{|фут}. \quad (9)$$

Где индексы *ст*, *рас*, *фут*, *руб*, *ср* – соответствуют стенке, расплаву, футеровки, кожуху, металлической рубашке, окружающей среды.

Для перехода в систему ( $\omega - \psi$ ), осуществляется операция «rot», после чего, уравнение Навье-Стокса переписывается в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u\omega}{\partial r} + \frac{\partial v\omega}{\partial z} - \frac{u}{r}\omega = \nu \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} - \frac{\omega}{r^2} \right] - \bar{g}\beta \frac{\partial T}{\partial r} \quad (10)$$

Функция тока представлена в следующем виде:  $u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ ,  $v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$ .

$$\text{Уравнение Пуассона } \omega = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}. \quad (11)$$

Краевые условия, записываются следующим образом:

$$t=0: \quad \omega=0: \quad \psi=0; \quad u=0; \quad v=0; \quad T=T_0.$$

Граничные условия для функции тока записываются в виде

$$r=0 \quad \psi=0 \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0$$

$$r=L_r \quad \psi=0 \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$$

$$z=0 \quad \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad \psi=0$$

$$z=L_z \quad \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad \psi=0$$

Перепишем уравнения (2) – (3), (10) и граничные условия для функции тока и температуры в критериальном виде, такая запись позволит решать целый класс задач. Введем характерные величины: в качестве масштаба длины, температуры и скорости выбраны диаметр ковша  $R_0$ , начальная температура расплава  $T_0$ , скорость  $V_0 = R_0/a$ , где  $a = \lambda/c\rho$ . Вводим понятия безразмерной величины:  $u = \tilde{u}V_0$ ;  $v = \tilde{v}V_0$ ;  $T = \theta T_0$ , где величины со знаком «тильдой» и  $\theta$  - являются безразмерными. При записи вышеперечисленных знак «тильда» опустим, т.к. все значения будут безразмерны.

$$c\rho \left[ \frac{\partial \theta}{\partial Fo} + \frac{\partial u\theta}{\partial r} + \frac{\partial v\theta}{\partial z} \right] = \lambda \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right]. \quad (12)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial Fo} + \frac{\partial u\omega}{\partial r} + \frac{\partial v\omega}{\partial z} - \frac{2u}{r} \omega + \frac{uv}{r^2} = \text{Pr} \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right] - \text{Pr}^2 \text{Gr} \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (13)$$

Где  $Fo = at/R_0^2$ ,  $\text{Pr} = \nu/a$ ,  $\text{Gr} = g\beta TR_0^3/\nu^2$  – критерии Фурье, Прандтля, Грасгоффа соответственно [2].

Граничные условия для уравнения гидродинамики останутся без изменения, а граничные условия на границе стенка ковша – окружающая среда для температуры, с учетом критериев

запишется в виде:  $\frac{\partial \theta}{\partial r} = -\text{Bi}(\theta - \theta_{cp})$ .

При решении многих задач переноса сплошной среды невозможно применить аналитические методы к системе дифференциальных уравнений в частных производных, что обусловлено нелинейностью и многомерностью. Наиболее приемлемым методом решения уравнений переноса, применяемым для широкого класса задач механики сплошных сред, является метод конечных разностей (метод сеток). Сущность его состоит в том, что область непрерывного изменения аргумента заменяется конечным дискретным множеством точек (узлов), образующих пространственно-временную разностную сетку [3]. Функция непрерывного изменения аргумента рассматривается как сеточная функция дискретного аргумента, в узлах сетки. Все рассматриваемые дифференциальные уравнения и краевые условия заменяются их конечно-разностными аналогами. В результате нелинейные дифференциальные уравнения заменяются нелинейными алгебраическими уравнениями. Такую систему называют разностной задачей или разностной схемой.

При моделировании использовались следующие методы: возмущенного оператора, разности против потока и прогонки для неявной конечно-разностной схемы второго порядка аппроксимации.

Пакет прикладных программ (ППП) разработан в среде Delphi 10.

В результате математического моделирования получено распределение функции тока и температуры в сталеразливочном ковше (рис. 2)

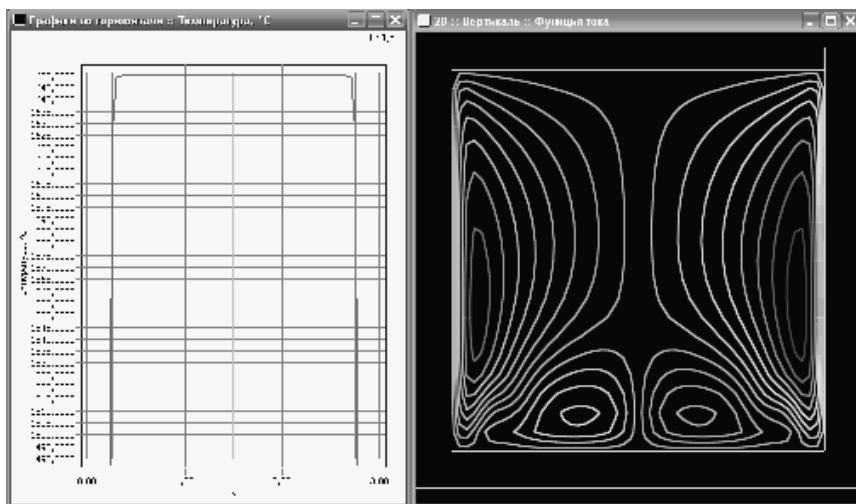


Рисунок 2. Распределение температуры (слева) и функции тока (справа) в сталеразливочном ковше через 10 минут после начала расчета в реальном времени

Эффективность внепечной обработки стали, во многом, зависит от того, на какой глубине высвобождается наполнитель из порошковой проволоки и начинается его взаимодействие с металлом. Оптимальная скорость ввода проволоки в расплав зависит от многих параметров, влияющих на кинетику процесса взаимодействия вводимого реагента с расплавом к которым следует отнести: состав, геометрические размеры порошковой проволоки, теплофизические характеристики наполнителя и оболочки, химический состав и температуру расплава, а также от условия теплоотдачи от расплава к оболочке порошковой проволоки.

Физические процессы, протекающие на поверхности оболочки при вводе порошковой проволоки в расплав могут быть представлены следующим образом. После погружения в расплав на поверхности проволоки образуется корочка затвердевшего шлака и расплава. Температура внешней поверхности затвердевшего слоя равна температуре ликвидус жидкой стали. Толщина корочки возрастает до определенного значения и затем по мере прогрева оболочки и наполнителя расплавляется до полного ее исчезновения, после чего начинается взаимодействие оболочки и расплава.

Диффузия углерода из расплава в поверхностный слой оболочки приводит к понижению температуры ликвидус стали до значения, меньшего температуры расплава, и начинается ее так называемое диффузионное плавление путем совместного протекания процессов тепло- и массообмена [4]. Поверхностный слой оболочки насыщается углеродом из расплава до концентрации солидус, и образуется жидкая фаза равновесного состава. При этом температура плавящейся поверхности меньше, чем температура расплава, что обеспечивает внешний тепловой поток, необходимый для продолжающегося прогрева проволоки и компенсации теплоты фазового превращения.

При постановке задачи приняты следующие допущения:

- тепловые контакты между внутренней поверхностью оболочки и порошковым наполнителем, а также между наружной поверхностью оболочки и слоем затвердевшего расплава приняты идеальными;
- науглероженный поверхностный слой оболочки считается плоским, что допустимо в силу его малой толщины;
- перенос тепла в осевом направлении очень мал, а фронты плавления – плоские;

- температура жидкой металла в ковше постоянна в течение всего периода ввода проволоки;
- направление движения вводимой в ковш проволоки рассматривается как вертикальное;
- коэффициент теплоотдачи к движущейся проволоке определяется по скорости ее перемещения в неподвижном расплаве.

Математическая модель, описывающая процессы, протекающие в порошковой проволоке, состоит из уравнения теплопереноса

$$c_n(T)\rho_n(T)\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_n(T)x\frac{\partial T_n}{\partial x}\right] + g(T), \quad 0 \leq x \leq R; \quad (14)$$

для учета фазового перехода в интервале температур солидус  $T_s$  и ликвидус  $T_l$  в уравнение теплопроводности введена функция источника теплоты:

$$g(T) = Q_n \rho_n \begin{cases} \xi(T), & T_s \leq T \leq T_l, \\ 0, & T > T_l, T > T_s, \end{cases} \quad (15)$$

где  $\xi(T) = V_{тв}/V_0$  – доля твердой фазы в двухфазной зоне,  $V_0$  – объем двухфазной зоны,  $m^3$ ,  $c = 1 - W/(c_{ж} T_0) \partial \xi / \partial T$  – эффективная теплоемкость, Дж/кг К [30];  $c_{ж}$  – теплоемкость в жидкой фазе расплава;  $W$  – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг;  $\xi$  – доля твердой фазы которая определяется из правила неравновесного рычага [5]:

$$\xi(y) = 1 - \left(1 + \frac{c}{W}(T_l - T_s)\right) \left[1 - \left(\frac{T_l - T}{T_l - T_s}\right)^{2/3}\right] + \frac{c}{W}(T_l - T_s); \quad (16)$$

которая для затвердевшей оболочки расплава имеет вид:

$$c_p(T)\rho_{pn}(T)\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{x}\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_p(T)x\frac{\partial T_p}{\partial x}\right], \quad R \leq x \leq z(t). \quad (17)$$

Условие теплообмена на границе между затвердевшей оболочкой и расплавом описывается уравнением:

$$\rho_p Q_p \frac{\partial z}{\partial t} = \alpha_{жс}(T_{жс} - T_l) - \lambda_p(T) \frac{\partial T_p}{\partial x}. \quad (18)$$

На оси ленты условие теплообмена задано в виде

$$\frac{\partial T_n}{\partial x} = 0.$$

На границе раздела поверхности проволоки и оболочки металла задано граничное условие 4 рода:

$$\lambda_p(T) \frac{\partial T_p}{\partial x} \Big|_{x=R-0} = \lambda_n(T) \frac{\partial T_p}{\partial x} \Big|_{x=R+0}$$

$$T_n(R-0, t) = T_p(R+0, t).$$

Начальные условия приняты следующими:

$$T(x,0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq R, \quad z(0) = R.$$

После расплавления намерзшего слоя расплава и исходной стальной оболочки происходит расплавление ее наполнителя. В этом случае необходимо учитывать тепловой эффект от воздействия порошковой проволоки с жидкой сталью. Условно принято, что тепловой эффект

растворения, окисления и испарения элементов порошковой проволоки распределяется между ней и расплавом пропорционально их коэффициентам теплопроводности. Математическое описание процесса плавления в этом случае включает уравнение (17) без свободного члена, уравнение (18) и условие теплообмена на границе раздела между поверхностью ленты и жидкой сталью с учетом аддитивности тепловых эффектов:

$$-\rho_n \left( Q_n - \frac{\lambda_N}{\lambda_n + \lambda_c} Q_{\Xi} \right) \frac{dz(T)}{dt} = \alpha_{жс} (T_{жс} - T_l) - \lambda_n(T) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (19)$$

где  $Q_{\Xi}$  - суммарный тепловой эффект, кДж/кг.

При достижении по сечению оболочки определенной температуры ( $T_D$ ), проволока начинает терять жесткость и ее поведение напоминает движение частицы в расплаве под действием конвективных и подъемных сил, которое можно описать следующей формулой, учитывающей присоединенную массу, силу Архимеда и гидродинамическое сопротивление;

$$d \left( \rho_g V_1 / \rho_T + 0,5V_0 \right) / dFo = -3\chi / 8r_0 |V_0| V_0 + Ar Pr^2 e_2; \quad (20)$$

$$d\vec{r} / dFo = V;$$

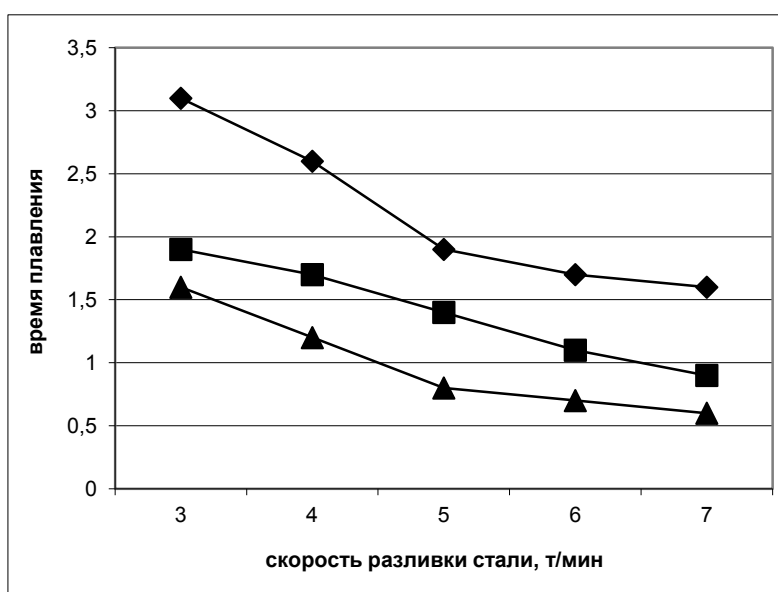
где  $\rho$  - суммарная плотность оболочки проволоки и модификатора  $\text{кг/м}^3$ ;  $\chi$ -коэффициент гидродинамического сопротивления  $\text{н/м}^2$ ;  $V_1$  и  $V_0$  - скорости движения расплава и проволоки, м;  $V_n = V_0 - V_1$ ;  $r_n$  - безразмерный радиус проволоки;  $r$ -радиус-вектор проволоки;  $Ar$ -критерий Архимеда [4].

Значение температуры  $T_D$  определяется согласно [6], для доэвтектоидной стали марки 08КП, применяемой для изготовления оболочки порошковой проволоки.

$$T_D = T_D^c + \Delta T_D$$

Здесь  $T_D^c$  -зависимость температуры  $T_D$  от содержания углерода  $C$ , в стали, для данной марки стали  $T_D = 103,125C^2 - 316,25C + 910 = 885^{\circ}\text{C}$  [5]. В наших расчетах  $\Delta T$  принималось равным  $35^{\circ}\text{C}$ , тогда температура потери жесткости проволоки  $T_D = 920^{\circ}\text{C}$ . При достижении этой температуры конец проволоки достигнет точки с координатами  $(x_2, y_2)$ .

Полученные результаты свидетельствуют, что время плавления порошковой проволоки с силикокальцием и алюминиевой катанки снижается при повышении температуры обрабатываемой стали и скорости ее разливки (рис.3).



Обозначения  
 ◆  $-1500^{\circ}\text{C}$ , ■  $-1600^{\circ}\text{C}$ , ▲  $-1650^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3. Время плавления порошковой проволоки диаметром 8 мм в зависимости от температуры расплава и скорости разливки стали: кривая

Это объясняется тем, что более высокая температура стали способствует более быстрому нагреву и плавлению намерзшего слоя и оболочки порошковой проволоки. Повышение скорости разливки стали приводит к увеличению скорости движения циркуляционных потоков, которые смывая более холодной пограничный слой металла на разделе фаз металл – замороженный слой (оболочка), также способствуют более быстрому нагреву и расплавлению порошковой проволоки. При увеличении температуры стали от  $1550^{\circ}\text{C}$  до  $1650^{\circ}\text{C}$  снижение времени плавления порошковой проволоки достигает 40-50%.

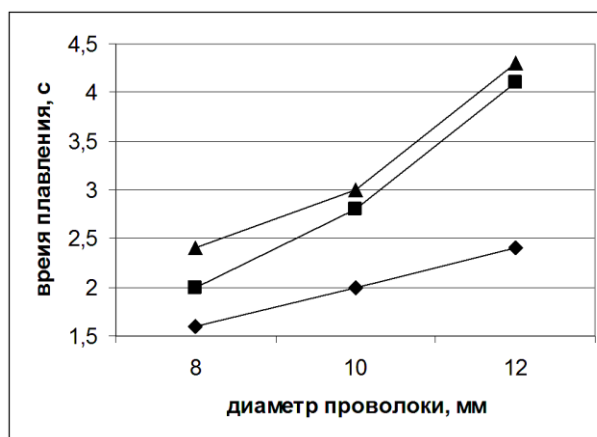


Рисунок 4. Скорость плавления порошковой проволоки, в зависимости от диаметра проволоки: кривая ◆  $-1500^{\circ}\text{C}$ , ■  $-1600^{\circ}\text{C}$ , ▲  $-1650^{\circ}\text{C}$ .

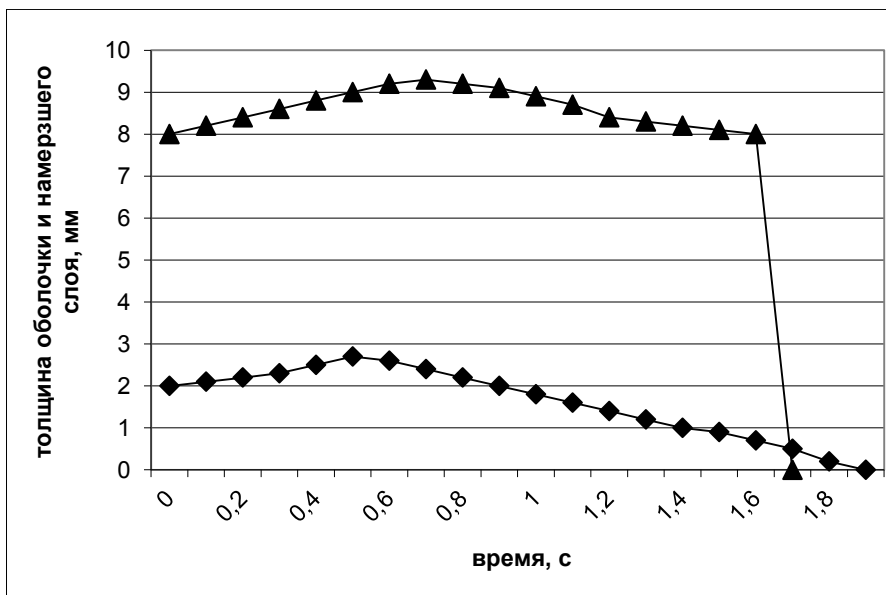


Рисунок 5. Изменение доли твердой фазы для порошковой проволоки с силикальцием (▲) и алюминиевой катанки (◆) при их расплавлении в стали при температуре  $1600^{\circ}\text{C}$ .



При увеличении диаметра порошковой проволоки время ее плавления в обрабатываемой стали увеличивается в среднем на 30 -40% (рис. 4)

На рисунке 5 представлена схема изменения доли твердой фазы в процессе растворения порошковой проволоки. В первый период времени на границе раздела фаз (стальной оболочкой толщина которой 0,5 мм и расплавом) происходит намерзание слоя металла, что приводит к увеличению радиуса проволоки, во второй, наблюдается плавление намерзшего слоя, а затем и оболочки проволоки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная математическая модель расплавления порошковой проволоки учитывает не только теплофизические процессы, протекающие в порошковой проволоке, в зависимости от их конструктивных особенностей, теплофизических характеристик наполнителя, но и теплофизических и динамических явлений, протекающих в сталеразливочном ковше в процессе ее ввода в расплав.

Модель базируется на системе нелинейных дифференциальных уравнений теплопроводности, описывающих процессы передачи тепла в проволоке и близлежащем расплаве. Тепловые эффекты плавления и кристаллизации учитываются с помощью квазиравновесной модели двухфазной зоны.

В результате математического моделирования определено время плавления порошковой проволоки с силикокальцием диаметром 8, 10 и 12 мм при ее вводе в трехсекционный промежуточный ковш МНЛЗ в зависимости от температуры обрабатываемой стали и скорости ее разлива.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А.Н. Внепечное вакуумирование стали. – М.: Металлургия. – 1975. -285с.
2. Освоение технологии производства конвертерной стали для листового проката с повышенными требованиями по ультразвуковому контролю / О.В. Носоченко, С.Г. Мельник, Л.С. Лепихов и др. //Сталь. – 2002. - №11.- С.15.
3. Филиппов Г.А., Радионова И.Г., Бакланов О.Н. и др. Коррозионная стойкость стальных трубопроводов // Технология металлов. – 2004. – №2.- С. 24-27
4. Развитие технологических основ производства качественных сталей массового назначения / А.И. Троцан, Л.А. Позняк, Б.Ф. Белов и др. // Труды IV Конгресса сталеплавильщиков. – Москва. – 1997.- С. 59-61.
5. Рациональный режим обработки стали в промежуточном ковше порошковыми и монолитными проволоками / О.В. Носоченко, А.И. Троцан, Е.А. Чичкарев и др. //Металл и литье Украины. – 2003. - № 7-8. – С. 28-30.
6. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991. – 400с.