

Министерство образования Украины
Приазовский государственный технический университет

На правах рукописи
УДК 669.18.046.516.2

Аспирант Полозюк Олег Евгеньевич

**Математическое моделирование и рациональные
режимы обработки металлургических расплавов
порошковой проволокой.**

Специальность 05.16.02 - металлургия
черных металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мариуполь 1997 г.

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Приазовском государственном техническом университете и в ОАО МК "Азовсталь"

Научный руководитель - доктор технических наук, старший научный сотрудник Троцан А.И.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент Захаров Н.И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор, ПГТУ, профессор Скребцов А.М.;
- кандидат технических наук, концерн "Азовмаш", начальник бюро ТОМП МНИПКТИ Буров С.Д.

Ведущее предприятие - Донецкий научно-исследовательский институт черной металлургии Министерства промышленности Украины, лаборатория комплексной обработки металлургических расплавов.

Защита состоится 4 июля 1997 года в 12.00 на заседании специализированного ученого совета К14.01.03 при Приазовском государственном техническом университете по адресу: 341000, г. Мариуполь Донецкой обл, пер. Республики, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Приазовского государственного технического университета.

Автореферат разослан 3 июня 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

Маслов В.А



00751179 (U)

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последние годы при внепечной обработке чугуна и стали широко используется порошковая проволока (ПП). Для получения оптимальных и стабильных результатов рафинирования, модифицирования и микролегирования расплавов ПП с различными наполнителями необходимо выдерживать определенные режимы ее ввода с учетом конкретных условий обработки. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что в большинстве случаев режимы ввода ПП устанавливаются эмпирически, не всегда являются оптимальными, а в некоторых случаях малоэффективны и экономически нецелесообразны.

Перспективным и весьма актуальным для разработки эффективных и экологически чистых технологий использования ПП является создание математических моделей поведения порошковой проволоки в расплавах и их применение для прогнозирования рациональных режимов ввода ПП и оптимизации технологии внепечной обработки.

Предложенные до сих пор немногочисленные модели построены либо на основе чисто регрессионных уравнений с использованием баз данных конкретных процессов, что ограничивает область их применения, либо на основе фундаментальных уравнений переноса, но без учета всех протекающих процессов, что приводит к отличию наблюдающегося поведения проволоки от прогнозируемого математической моделью. Поэтому актуально и целесообразно дальнейшее совершенствование и развитие математического моделирования в области внепечной обработки.

Работа выполнялась в рамках Государственной научно-технологической программы по проекту 07.07.00/041-94 "Разработка технологии производства высококачественного проката с улучшенными характеристиками для судостроения путем рафинирования и микролегирования порошковыми проволоками".

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. Целью работы является разработка, оптимизация и внедрение режимов ввода порошковых проволок на основе математического моделирования процессов, протекающих при их плавлении и растворении в металлургических расплавах.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

– построение математической модели теплообмена порошковой проволоки с расплавленной сталью с учетом конечных размеров ковша;



- разработка алгоритмов и программных средств для изучения кинетики расплавления различных ПП в сталеразливочном ковше;
- разработка методики расчета интенсивности массообмена капель расплавленного наполнителя ПП с жидкой сталью и степени усвоения компонентов наполнителя;
- установление и промышленное опробование оптимальных режимов ввода ПП в сталеразливочный ковш;
- определение технико-экономической эффективности использования порошковой проволоки при обработке стали в ковше.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА, ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ.

1. Разработана математическая модель плавления порошковой или монолитной проволоки вводимой в жидкую сталь с учетом процессов теплообмена в многофазной области с подвижными границами фазового перехода, учитывающая конечность размеров сталеразливочного ковша.

2. Предложено критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях продольного обтекания ПП расплавом.

3. Получено соотношение для оценки времени расплавления ПП в зависимости от температуры, скорости ввода, а также от параметров используемой проволоки.

4. Разработана методика оценки диаметра и скорости всплывания капель силикокальция после высвобождения из оболочки ПП для различных условий ввода проволоки в ковш. Проведена количественная оценка межфазной поверхности всплывающих капель.

5. Разработана методика расчета степени усвоения кальция расплавом при микролегировании стали с помощью силикокальциевой ПП. На основании вычислительного эксперимента установлено, что основным фактором, определяющим степень усвоения кальция является время пребывания капель силикокальция в жидком металле. Показано, что это время для условий сталеразливочного ковша определяется глубиной высвобождения из оболочки ПП.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Разработаны и внедрены рациональные режимы ввода кальцийсодержащей порошковой проволоки, которые позволяют получать в стали заданное содержание кальция, а также обеспечивать экономию вводимого элемента и улучшение экологии внепечной обработки стали.

Результаты работы учтены при разработке в конвертерном цехе меткомбината "Азовсталь" рекомендаций по технологическому процессу производства сталей, обрабатываемых кальцием, алюминием и др. элементами в сталеразливочном ковше на УДМ и в промежуточном ковше МНЛЗ (РТП 232-109-94, РТП 232-61-96, РТП 232-31-97, РТП 232-32-97).

Экономическая эффективность применения рациональных режимов внепечной обработки стали порошковой проволокой с силикокальцием в конвертерном цехе меткомбината "Азовсталь" обусловлена снижением затрат на выплавку стали. Личный вклад диссертанта составляет около 5% от полученного экономического эффекта и соответствует 110 тыс. гривень.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Материалы диссертации докладывались на Республиканской конференции "Термодинамика технологических систем" (г. Краматорск, 1993г), на III и IV региональных научно-технических конференциях в ПГТУ (г. Мариуполь, 1995, 1997 г.), на научных семинарах отдела материаловедения стали ИПМ НАН Украины, на технических совещаниях меткомбината "Азовсталь", на научных семинарах кафедры « Теория металлургических процессов» ПГТУ.

Основанные результаты работы изложены в 10 публикациях.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованной литературы из 153 наименований, приложения и содержит 112 страниц машинописного текста, 17 рисунков и 8 таблиц.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД ДИССЕРТАНТА В РАЗРАБОТКУ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, КОТОРЫЕ ВЫНОСЯТСЯ НА ЗАЩИТУ. Автором выполнен анализ теплофизических, физико-химических и гидродинамических процессов при внепечной обработке стали порошковыми проволоками заданного состава, разработаны математические модели плавления и растворения порошковой проволоки в расплавах, составлены алгоритмы и компьютерные программы численного эксперимента по определению рациональных режимов ввода ПП в металлургические расплавы. Разработанные режимы ввода ПП освоены и внедрены в конвертерном цехе меткомбината "Азовсталь" с личным участием автора. Автором подтверждено улуч-

шение качества стали при использовании рациональных режимов ввода ПП.

МЕТОДОЛОГИЯ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Методика проведения исследований включала разработку математических моделей гидродинамических процессов и тепло-массопереноса при внепечной обработке металлургических расплавов порошковыми проволоками, проведение численных экспериментов с помощью ПЭВМ и промышленных экспериментов на установках доводки металла.

Численные эксперименты выполнялись с применением пакета специально разработанных программ.

Качество стали определяли в соответствии с действующими ГОСТами с применением современных методик и аналитического оборудования. Методы определения химического состава, механических свойств и изучения макро- и микроструктуры стали сертифицированы при сертификации металлопродукции комбината "Азовсталь".

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ.

На основе анализа способов ввода порошковых реагентов в расплав показаны преимущества использования ПП. Приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о том, что эффективность обработки жидкой стали ПП существенно зависит от скорости ввода ПП, температуры расплава и наполнителя в момент вступления его в контакт с жидкой сталью, от температуры плавления и давления паров вводимого элемента.

Показано влияние состава стали на усвоение вводимых элементов, данные о котором неоднозначны. Управление усвоением вводимых элементов может осуществляться путем задания соответствующего состава наполнителей.

Проанализированы причины, снижающие эффективность действия химически активных элементов (ХАЭ), вводимых ПП, и показано, что для уменьшения потерь ХАЭ их следует вводить в предварительно раскисленный металл, причем степень раскисленности металла перед вводом должна возрастать с увеличением раскислительной способности вводимого элемента.

Характерным является то, что в настоящее время разработка режимов ввода ПП осуществляется преимущественно эмпирически, на основе результатов лабораторных и промышленных исследований. Математическое моделирование процессов, протекающих при вводе ПП и применение его при совершенствовании технологии обработки расплавов ПП начато сравнительно недавно. Проведенный анализ показал, что определилось два подхода к построению математических моделей. Первый подход заключается в начальном сборе экспериментальных данных и дальнейшей их обработке с целью обобщения и создания статистических моделей на основе чисто регрессионных уравнений либо уравнений, форма которых определяется характером протекающих процессов. Эти модели имеют узкое применение, поскольку построены на базах данных конкретных процессов и при изменении особенностей технологии требуют корректировки.

Второй подход к построению математических моделей поведения ПП в расплавах заключается в использовании фундаментальных уравнений переноса с последующей проверкой модели на основе баз экспериментальных данных. Большая часть детерминированных динамических моделей, построенных в рамках такого подхода, описывает процесс плавления ПП в жидкой стали без учета размеров ковша и сложности траектории движения проволоки, что затрудняет определение момента высвобождения наполнителя от оболочки, а также его состояние к этому моменту.

Явление гидродинамики и массообмена в существующих моделях процессов микролегирования и рафинирования стали порошковой проволокой практически не учитывается.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ.

Порошковая проволока представляет собой сложный многофазный объект, при взаимодействии которого с жидкой сталью возникает несколько немонотонно движущихся фронтов фазового превращения.

Начало технологического воздействия наполнителя ПП на расплав определяется его непосредственным контактом с жидким металлом после расплавления стальной оболочки.

Максимальное рафинирующее (микролегирующее) воздействие достигается при высвобождении наполнителя из оболочки в нижних объемах расплава у днища ковша, т.к. при этом наполнитель наибольшее время будет находиться в расплаве и подниматься с самой

большей глубины проникновения, для чего необходимо задание оптимальной скорости ввода ПП.

При погружении ПП в расплав от нее резко отнимается тепло, что приводит к намораживанию на оболочке слоя стали. Поэтому погруженную в расплав ПП можно рассматривать как многослойный бесконечный цилиндр с постоянной температурой на наружной границе раздела фаз, равной температуре расплава, и переменной внутри.

В основу математической модели теплообмена и расплавления наполнителя, а также оболочки ПП с замороженной стальной коркой при учете физико-химических, технологических и теплофизических аспектов обработки металлургических расплавов ПП положена система уравнений теплопроводности для многослойной области с подвижными границами фазового перехода:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где c_i , ρ_i , λ_i - теплоемкость, плотность, теплопроводность соответственно фазы i ; $T_i = T_i(r, \tau)$ - функция распределения температуры по сечению i -той фазы; $i=1$ - твердая фаза наполнителя (ферросплава), $0 \leq r \leq x_\phi$; $i=2$ - твердая сталь оболочки и корки $l < r \leq x$; $i=3$ - жидкий ферросплав $x_0 < r \leq l$.

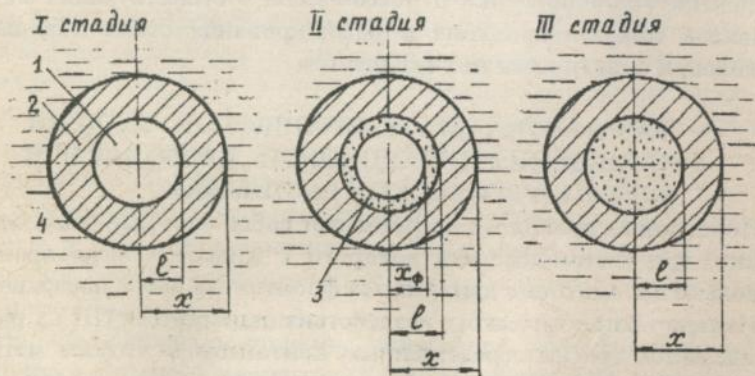


Рисунок 1 - Стадии плавления ПП с легкоплавким наполнителем
1 - твердый наполнитель; 2 - оболочка ПП с намерзшей коркой стали; 3 - расплав наполнителя; 4 - жидкая сталь.

Уравнения вида (1) рассматривались при следующих краевых условиях:

– ось проволоки является осью симметрии:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (2)$$

– на границе раздела “наполнитель-стальная оболочка-корка”

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \text{ и } T_1 = T_2; \quad (3)$$

– на границе раздела “стальная корка- расплав”

$$L'_2 \rho_2 \frac{dx}{d\tau} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - q_s, \quad (4)$$

где $L'_2 = L_2 + c_{ж}(T_{ж} - T_{пл})$; $q_s = \alpha(T_{ж} - T_{пл})$; $T_2|_{r=x} = T_{пл}$; $x|_{\tau=0} = l$; L_2 - теплота плавления стали; q_s - плотность теплового потока, направленного на поверхность намерзшей на проволоке корки; $T_{пл}$ - температура плавления стали; α - коэффициент теплоотдачи;

– на границе раздела “твердый ферросплав-жидкий ферросплав”

$$\rho_1 L_1 \frac{\partial x_\phi}{\partial \tau} = \lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial \tau} \right|_{t=x_\phi-0} - \lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial \tau} \right|_{t=x_\phi+0}; \quad (5)$$

– на границе раздела “жидкий ферросплав - стальная корка”

$$\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial r} \right|_{r=l-0} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=l+0} \quad (6)$$

Наряду с указанными граничными условиями приняты соответствующие начальные условия.

Использованная в работе постановка математической задачи отличается от известных тем, что учитывается изменение условий теплообмена проволоки с расплавом при изгибе погруженной части проволоки у днища ковша. На основании расчетного анализа кинетики намораживания и плавления стальной корки оценивается средняя ее толщина в момент достижения ПП днища ковша. Это позволяет найти скорость всплывания и в итоге – время полного расплавления проволоки.

Опробование разработанных ранее разностных схем решения тепловой задачи Стефана в условиях плавления ПП, характеризующихся наличием двух немонотонно движущихся фронтов фазового превращения, показал, что оптимальной является схема с дробными шагами

фронтов и итерационным методом уточнения положения фронтов фазовых превращений. Эта схема использована при разработке алгоритма решения задачи.

Детальное исследование теплообмена между расплавом и ПП с учетом продольного обтекания проволоки расплавом со скоростью, равной скорости ее ввода, позволило получить зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи, которая имеет вид:

$$Nu = 0,16 \cdot Re^{0,71}, \quad (7)$$

где Nu – критерий Нуссельта, $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$;

Re – критерий Пекле, $Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$;

ω – скорость потока, равная скорости ввода ПП;

ν – кинематическая вязкость расплава.

Эта зависимость справедлива для области $5 \cdot 10^5 < Re < 1 \cdot 10^9$, т.е. для турбулентного обтекания ПП.

Разработанная модель теплообменных процессов в ПП, погруженной в расплав, использована для численного исследования кинетики намораживания и плавления стальной корки на ПП, кинетики плавления наполнителя ПП (силикокальция марок СК15, СК20, СК30 и алюминиевой катанки), а также для определения распределения температуры по сечению ПП с течением времени. (рис. 2, 3).

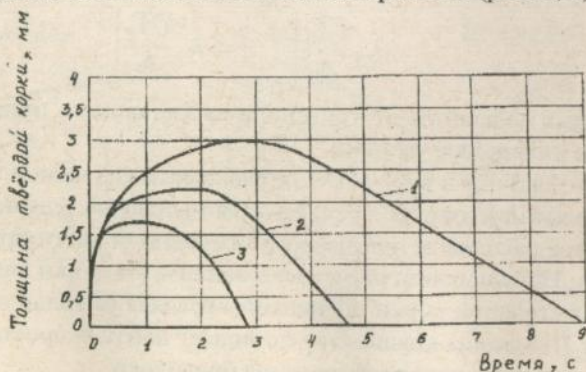


Рисунок 2 - Кинетика намораживания и плавления корки стали и оболочки ПП с силикокальцием диаметром 13 мм при температуре стали в ковше 1590 °С.

Плотность теплового потока, направленного на поверхность стальной корки: 1 - 1,5 МВт/м²; 2 - 3,0 МВт/м²; 3 - 5,0 МВт/м²;

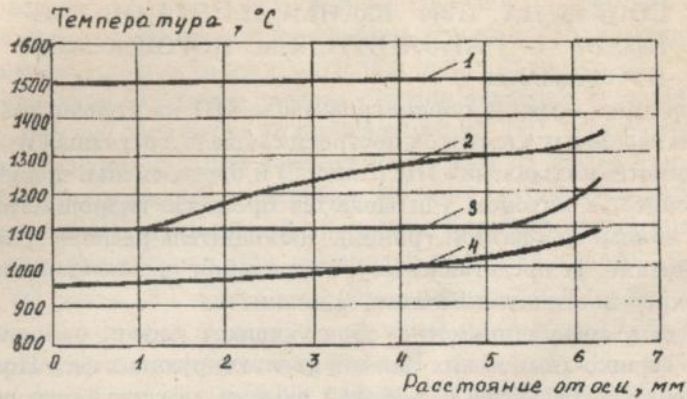


Рисунок 3 - Поле температур в сечении наполнителя для ПП с силикокальцием диаметром 13 мм при температуре стали в ковше 1590 °С. Плотность теплового потока, направленного на поверхность стальной корки 5,0 МВт/м².

Время от начала плавления: 1 - 2,5 с; 2 - 1,8 с; 3 - 0,5 с; 4 - 0,2 с.

Установлены зависимости времени плавления оболочки, намерзшей корки и наполнителя от плотности теплового потока, которые позволяют прогнозировать состояние ПП при вводе в соответствующий ковш. Условия внешнего теплообмена слабо влияют на время расплавления наполнителя ПП, которое определяется преимущественно его теплофизическими свойствами. Время же расплавления оболочки и стальной корки существенно зависит от интенсивности теплообмена в области ее значений, характерных для условий свободной конвекции или обтекания проволоки с низкой скоростью ($q = 1 - 3 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$).

При повышении интенсивности теплообмена (высокая скорость ввода ПП, высокая температура расплава) зависимость времени плавления корки и наполнителя ПП от плотности теплового потока ослабляется, а их значения становятся близкими.

Найдено уравнение зависимости времени расплавления ПП с силикокальцием от диаметра проволоки, температуры металла и скорости ввода ПП. Установлена также зависимость глубины расплава на которой наполнитель освобождается от оболочки, от параметров ввода и характеристик ПП.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И МАС- СООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАС- ПЛАВА С НАПОЛНИТЕЛЕМ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ.

Для изучения влияния параметров ввода ПП на степень усвоения расплавом вводимых элементов построена модель, состоящая из блока расчета кинетики плавления ПП (глава 2) и блока оценки локального массопереноса, в котором учитываются процессы гидродинамики и переноса вблизи межфазной границы наполнитель-расплав. Рассмотрение основано на представлении об идеальном перемешивании расплава в окрестности потока капель наполнителя.

Проведена оценка диаметра образующихся капель наполнителя, исходя из физико-химических свойств контактирующих фаз. Полученные значения согласуются с данными расчета для струйного режима истечения капель.

Показано, что всплывание капель наполнителя в расплаве носит турбулентный характер при $Re \gg 1$. На основе метода последовательных приближений и результатов численного решения уравнений Навье-Стокса получена система уравнений для скорости всплывания и диаметра капель наполнителя:

$$U_K = \sqrt{\frac{4 \Delta \rho g d}{3 \rho c_D}} \quad (8)$$

$$d = \frac{We_{kp} \sigma}{\rho U_K^2} \quad (9)$$

$$c_D = \left(\frac{16}{Re} + \frac{2,2}{Re^{0,5}} + 0,32 \right) \left(\frac{\mu_c + 1,5\mu_\delta}{\mu_c + \mu_\delta} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^{0,5} \quad (10)$$

где c_D — коэффициент сопротивления; a, b — главные оси деформированной капли; $Re = \frac{U_K d}{\nu_c}$ — критерий Рейнольдса; We_{kp} — критическое значение критерия Вебера; ν_c — кинематическая вязкость стали (сплошной фазы); μ_c, μ_δ — динамическая вязкость сплошной и дисперсной фаз соответственно; U_K — скорость всплывания капли расплава наполнителя; d — диаметр капли; $\Delta \rho$ — разность плотностей жидкой стали и расплава наполнителя; ρ — плотность жидкой стали.

Проведена оценка межфазной поверхности всплывающих капель и установлена ее зависимость от глубины, с которой всплывают капли наполнителя, плотности наполнителя и скорости ввода ПП.

Разработана методика расчета степени усвоения кальция жидкой сталью при ее обработке силикокальциевой ПП. Установлено, что степень усвоения кальция зависит не только от физико-химических свойств силикокальция и расплава, но и от глубины высвобождения наполнителя ПП из стальной оболочки. Количественная оценка степени усвоения кальция при обработке расплава сталеразливочного ковша ($H = 4$ м, $\Delta T = 80^\circ\text{C}$) силикокальциевой (СК30) ПП показала ожидаемое, согласно модели, ее значение на уровне 19,2%, что удовлетворительно согласуется с практикой.

Расчетная степень усвоения кальция из всплывающих капель для условий ввода ПП в сталковш на УДМ представлена на рис.4.

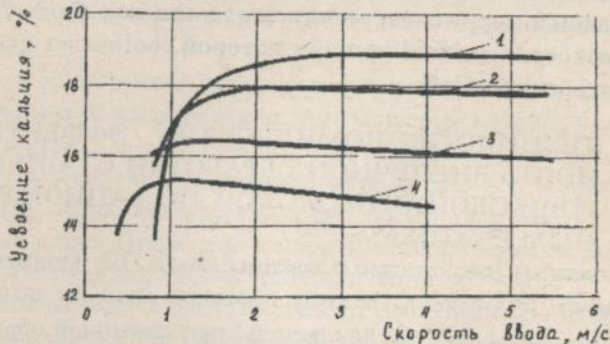


Рисунок 4 - Усвоение кальция из капель расплава силикокальция в зависимости от скорости ввода ПП различного диаметра (температура металла в ковше перед началом обработки 1600°C). Диаметр проволоки: 1 - 8 мм; 2 - 10 мм; 3 - 13 мм; 4 - 15 мм.

ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВВОДА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ В РАСПЛАВ.

Опробование прогнозируемых рациональных режимов ввода ПП осуществляли в промышленных условиях конвертерного цеха ОАО МК "Азовсталь". В качестве объектов исследования использовали трубную сталь марок 17Г1СУ, О9Г2Ф5, 10Г2БТ и др., судовую сталь О9Г2С, выплавленные в 350-тонных конвертерах. Варьирование скорости ввода ПП с СК30 и СК15 в сталковш на УДМ в диапазоне 2-6 м/с показало, что наибольший процент усвоения кальция (16,9%) на-

блюдается при следующих условиях ввода: $w = 4$ м/с, угол ввода $\sim 20^\circ$ к вертикальной оси ковша, место ввода - $1/3$ радиуса ковша от его стенки, что удовлетворительно согласуется с расчетными скоростью ($w_p = 3,5$ м/с) и степенью усвоения (19,2%).

При статистическом анализе текущих промышленных плавок (248 шт.) по усвоению кальция и алюминия установлено, что обработка расплавов ПП с этими химически активными элементами на УДМ не позволяет из-за большого угара обеспечить в готовой стали такое их остаточное содержание, которое необходимо для полного проявления их модифицирующего и микролегирующего действий.

Оценка степени загрязненности неметаллическими включениями металла с различными режимами ввода ПП показала, что в случае оптимального варианта существенно снижаются размер НВ и суммарная длина включений в единице площади шлифа.

Наблюдается корреляция между соотношением Ca/S и величиной ударной вязкости, средний прирост которой составляет около 10% на 0,1 роста отношения Ca/S.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ПО РАЦИОНАЛЬНЫМ РЕЖИМАМ.

Предложенные рациональные режимы ввода ПП положены в основу рекомендаций по технологическому процессу, которые используются в конвертерном цехе ОАО МК "Азовсталь" при внепечной обработке силикокальциевой ПП всей сертифицированной стали (марок А-36, RST-37, ST44 и др., трубной стали ряда марок и др.) с целью улучшения жидкотекучести, модифицирования включений и повышения свойств металлопродукции. Экономическая эффективность предложенной технологии обусловлена снижением угара вводимых элементов уменьшением выбросов металла, снижением вторичного окисления, сокращением потерь температуры металла на внепечную обработку.

Долевой экономический эффект от внедрения рациональных режимов ввода ПП составляет 110 тысяч гривенъ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложена концепция моделирования процессов тепло- и массообмена для условий ввода порошковой проволоки в металлургический расплав, предусматривающая построение математической модели из трех блоков, включающих расчет кинетики плавления порошковой проволоки с учетом процессов гидродинамики и теплообмена с

жидкой сталью; локального массообмена капли или струи расплавленного наполнителя после высвобождения из оболочки с жидкой сталью с учетом процессов гидродинамики и переноса вблизи межфазной границы; массообмена в ковше в целом с учетом переноса компонентов наполнителя по объему ковша.

2. Разработана математическая модель плавления порошковой проволоки в расплаве, в основу которой положены процессы теплопередачи в многофазной области с подвижными границами фазового перехода, а также гидродинамические процессы, обусловленные движением проволоки в расплаве. С помощью этой модели исследована кинетика намораживания и плавления стальной корки, плавления наполнителя для кальций- и алюминийсодержащих порошковых проволок в сталеразливочном ковше.

3. Получено критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях продольного обтекания порошковой проволоки расплавом.

4. Получено соотношение для расчета времени расплавления порошковой проволоки в жидкой стали, учитывающее глубину расплава и степень его перегрева, а также параметры вводимой проволоки.

5. Разработана методика оценки диаметра и скорости всплывания в расплаве каплей силикокальция после его высвобождения из оболочки проволоки в ковше. Приведена количественная оценка межфазной поверхности всплывающих каплей силикокальция.

6. Разработана методика расчета степени усвоения кальция жидкой сталью при ее обработке с помощью кальцийсодержащей порошковой проволокой. На основании вычислительного эксперимента установлено, что основным фактором, определяющим степень усвоения кальция, является время пребывания каплей его расплава в жидкой стали. Показано, что для условий сталеразливочного ковша время пребывания жидкого наполнителя в расплаве зависит преимущественно от глубины, на которой наполнитель высвобождается из оболочки, а для промежуточного ковша – от структуры потоков стали в нем.

7. Опробованы и внедрены прогнозируемые разработанной математической моделью рациональные режимы ввода силикальциевой порошковой проволоки в сталеразливочный ковш на УДМ. Установлено соответствие прогнозируемой степени усвоения ввода кальция (19,2%) и наблюдаемой при оптимальном режиме ввода ПП (16,9%).

8. Экономический эффект от внедрения рациональных режимов ввода порошковых проволок составил 110 тыс. гривень.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ
ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Полозюк О.Е., Чичкарев Е.А. Исследование кинетики плавления порошковой проволоки при внепечной обработке стали // Приднепров.науч.вестник.-Дн.-1997. №15(26).-С.9-12.
2. Захаров Н.И., Полозюк О.Е. Исследование процессов теплообмена при обработке жидкой стали порошковой проволокой // Приднепр.науч.вестник.-Дн.,-1997.-№17.- С.22-26.
3. Троцан А.И., Полозюк О.Е. Об использовании математического моделирования при разработке рациональных режимов обработки металлургических расплавов порошковыми проволоками // Приднепр.науч.вестник.-Дн.,-1997.-№15(26).-С.12-16.
4. Полозюк О.Е. К теории гидродинамического взаимодействия частиц с расплавом в процессе его внепечной обработки порошковой проволокой //Вестник Приазов.гос.техн.ун-та: Сб.науч.тр.-Мариуполь, 1996.- Вып.2.-С.27-30.
5. Захаров Н.И., Полозюк О.Е. Математическая формулировка задачи теплообмена порошковой проволоки с жидкой сталью в процессе внепечной обработки //Вестник Приазов.гос.техн.ун-та: Сб.науч.тр.-Мариуполь, 1996.-Вып.2.-С.31-33.
6. Полозюк О.Е., Захаров Н.И. Кинетика массопереноса элементов при внепечной обработке стали силикокальцием или алюминием //IV рег. научно-техн. конф., апрель, 1997: Тез.докл.-Мариуполь, 1997. - Т.1. Металлургия.- С.5.
7. Полозюк О.Е., Захаров Н.И. Математическое моделирование плавления порошковой проволоки при внепечной обработке стали // IV рег. научно-техн.конф., апрель, 1997: Тез.докл.-Мариуполь, 1997.- Т.1. Металлургия,-С.6.
8. Исследование процесса обработки металла на выпуске из плавильной печи /Захаров Н.И., Мармур Хасан, Полозюк О.Е., Данилов В.А.; Приазов.гос.техн.ун-т.-Мариуполь, 1996.-3с.-Библиогр.: 4 назв.- Деп. в ГНТБ Украины 14.05.96, №1186-УК.96.
9. Захаров Н.И., Полозюк О.Е., Данилов В.А. Научные предпосылки разработки энергосберегающей технологии внепечной обработки / Приазов.гос.техн.ун-т.-Мариуполь, 1996.-5с.-Библиогр.: 4 назв.- Деп. в ГНТБ Украины 15.05.96, № 1185-Ук.96.
10. Захаров Н.И., Полозюк О.Е. Теплообмен порошковой проволоки с жидкой сталью при внепечной обработке / Приазов.гос.техн.ун-т.-Мариуполь, 1996.-5с.-Библиогр.: 23 назв.- Деп. в ГНТБ Украины 14.05.96, №1185-УК.96.

АННОТАЦИЯ

Полозюк О.Е. Математическое моделирование и рациональные режимы обработки металлургических расплавов порошковой проволокой.
- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Металлургия черных металлов. Приазовский государственный технический университет, ОАО "Металлургический комбинат "Азовсталь", г. Мариуполь, 1997.

Диссертация содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса в системе "движущаяся порошковая проволока – расплав" при выпечной обработке стали. Предложена обобщенная модель плавления и растворения порошковой проволоки, позволяющая прогнозировать оптимальные режимы ввода проволоки и степень усвоения вводимого элемента (на примере кальция). Показано, что степень усвоения кальция расплавом сталеразливочного ковша на УДМ при его обработке силикокальциевой порошковой проволокой определяется глубиной ее погружения на которой происходит высвобождение наполнителя из оболочки.

Ключевые слова: порошковая проволока, тепло- и массоперенос, режим ввода, степень усвоения, математическая модель, расплав.

ANNOTATION

Polozjuk O.E. "Mathematical simulation and rational regimes of treatment the metallurgical melts by cored-wire". The thesis for the scientific degree of Candidate of Science (Eng.). Speciality 05.16.02 "Ferrous Metallurgy". Priasovskij State Technical University.

The thesis contains the results of theoretical and experimental investigations the processes of heat- and masstransfer in the system "moved cored-wire-melt" during the treatment of steel in the ladle. The generalized model for melting and dissolution of cored-wire, that allow to prognose optimal regimes of introduction the cored-wire and degree of assimilation the introduced element (calcium as example), is proposed. It is shown, that degree of calcium assimilation by the melt in steel ladle when the melt is treated by cored-wire, is determined by the depth of its immersion at which liberation of the filler from the shell takes place.

Key words: cored-wire, heat- and masstransfer, introduction regime, degree of assimilation, mathematical model, melt.



2 июня 1997 г.

Підп. до друку 3.05.97. Тир. 100. Зам. 341.
ПДТУ, 341000, Маріуполь, пров. Республіки, 7.

18 28 054

U39 998

AB

AB 38.074