

5.16.02
1194

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Малков Игорь Васильевич

УДК 669.18

ГИДРОДИНАМИКА И МАССООБЕМНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПОРЦИОННОМ
ВАКУУМИРОВАНИИ МЕТАЛЛА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОЛУЧЕНИЕ
ОСОБОНИЗОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ПОВЫШЕННЫМИ СЛУЖЕБНЫМИ
СВОЙСТВАМИ

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

1988

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола и на Челябинском металлургическом комбинате.

Научный руководитель

- лауреат премии Совета Министров СССР и Государственной премии УССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Д.Я. Поволоцкий.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.М. Бигеев,
кандидат технических наук
Б.С. Иванов.

Ведущее предприятие

- Череповецкий металлургический комбинат.

Задача диссертации состоится 4 января 1989 г. на заседании специализированного совета (шифр К 063.13.03) в 14-00 в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола по адресу: 454044, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 28 ноября 1988 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент

О.Токовой О.К. Токовой

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для выплавки в дуговых печах стали и сплавов с особыми свойствами требуется высококачественная шихтовая заготовка с особоизским содержанием углерода - технически чистое железо. Однако при производстве такой заготовки возникают значительные трудности получения требуемого химического состава металла, главным образом углерода. Получить сталь с особоизским содержанием углерода можно лишь подвергнув металл глубокому вакуумному обезуглероживанию.

Важное значение для народного хозяйства имеет производство другой особоизкоуглеродистой стали - динамной, наиболее вредными примесями в которой являются углерод и сера. Высокое качество такого металла обеспечивается, в основном, внепечной обработкой, в частности, обезуглероживанием и десульфурацией. Вакуумированная низкосернистая повышеннолегированная динамная сталь в нашей стране не производилась.

В связи с изложенным совершенствование технологии порционного вакуумирования особоизкоуглеродистой стали, разработка технологии производства высококачественной изотропной электротехнической стали являются актуальными задачами научно-технического прогресса производства черных металлов в нашей стране.

Цели работы. 1. Исследование на модели гидродинамики и явлений массопереноса при порционном вакуумировании.

2. Разработка и исследование технологии порционной вакуумной обработки особоизкоуглеродистой стали с интегринацией процесса обезуглероживания продувкой инертным газом.

3. Разработка и исследование технологии производства изотропной электротехнической стали трех групп легирования.

4. Исследование кинетики вакуумного обезуглероживания особоизкоуглеродистой стали при порционном вакуумировании.

Научная новизна. В работе с соблюдением теории подобия выведены критерии для моделирования гидродинамики и массообменных процессов при порционном вакуумировании стали.

Установлен характер движения жидкого металла при порционном вакуумировании, определены скоростные характеристики жидкого металла в широком интервале изменения рабочих параметров вакуумато-

ра. Определены коэффициенты турбулентной диффузии при порционном вакуумировании.

Определена величина и установлен характер зависимости параметра массопереноса от рабочих характеристик вакууматора, определена величина параметра массопереноса для элементов, растворенных в металле.

Определен коэффициент массопереноса растворенных в металле элементов и установлены зависимости интенсивности массообмена от режима продувки металла нейтральным газом через патрубок вакуум-камеры.

Изучено поведение компонентов металлического и шлакового расплавов в процессе внепечной обработки динамной стали.

Исследована кинетика процесса обезуглероживания особенизкоуглеродистой стали при порционном вакуумировании. Установлено, что процесс окисления углерода описывается кинетическим уравнением второго порядка и лимитирующей является адсорбционно-химическая стадия. При продувке металла аргоном через патрубок вакуум-камеры скорость процесса обезуглероживания определяется диффузией компонентов к месту реакции и описывается уравнением нулевого порядка.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты ее использованы при разработке технологии порционной вакуумной обработки особенизкоуглеродистой стали с продувкой аргоном через патрубок вакуум-камеры и технологии производства изотропной электротехнической стали. Установлено, что при порционной вакуумной обработке с продувкой металла аргоном можно получить более низкое содержание углерода (до 0,004%) за меньшее количество циклов, чем при вакуумировании стали без продувки аргоном. Разработано несколько технологических схем производства динамной стали, одна из которых обеспечивает выплавку металла с содержанием углерода не более 0,020% и серы не более 0,003%.

Реализация работы. В кислородно-конвертерном цехе Челябинского металлургического комбината внедрена технология порционной вакуумной обработки особенизкоуглеродистой стали с продувкой аргоном через патрубок вакуум-камеры. Внедрена технология производства повышеннолегированной изотропной электротехнической стали. Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составил 192,3 тыс. руб. (доля автора 50%).

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на:

1. Всесоюзной научно-технической конференции "Теория и практика внепечной обработки стали", Москва, 1985 г.
2. Четвертой всесоюзной конференции по тепло- и массообменным процессам в ваннах сталеплавильных агрегатов, Днанов, 1986 г.
3. Республиканской научно-технической конференции "Современные процессы обезуглероживания и дегазации легированных сталей и сплавов", Днепропетровск, 1987 г.
4. Восьмом всесоюзном совещании по физике и металловедению электротехнических сталей и сплавов, Липецк, 1988 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных трудов.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 146 наименований, 16 приложений и содержит 95 страниц машинописного текста, 56 рисунков и 33 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Моделирование гидродинамики металла и явлений массопереноса при порционном вакуумировании стали.

Во многих металлургических установках гидродинамические и массообменные процессы играют решающую роль, а остальные процессы в какой-то мере зависят от них (например, тепловые, химические). Наиболее простым и доступным методом изучения гидродинамики и массообмена является физическое моделирование.

Для описания подобных физических систем и анализа условий их подобия удобно пользоваться безразмерными величинами – критериями подобия.

При порционном вакуумировании стали на гидродинамику основное воздействие оказывают следующие параметры: ΔP – остаточное давление в вакуумной камере; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность металла; t – время выдержки вакуумной камеры в верхнем (ВР) и нижнем (НР) рабочих положениях; W – скорость перемещения камеры; l_1, \dots, l_i – геометрические размеры.

Целью исследования гидродинамики являлось определение направления и скорости перемещения потоков жидкости в ковше и вакуумной камере (W). После приведения величин, описывавших сис-

тему, безразмерному виду, получена совокупность, состоящая из критерия подобия:

$$\frac{W^2}{gl_i} = \phi\left(\frac{\Delta P}{pgl_i}; \frac{g\tau^2}{l_i}; \frac{W_k^2}{gl_i}; \frac{l_i}{l_i}\right). \quad (1)$$

Эти критерии подобия позволяют рассчитать для модели необходимые скорость движения камеры, время ее выдержки в ВРП и НРП, остаточное давление в вакуум-камере, а также пересчитать скорость движения потоков жидкости в модели на оригинал.

При моделировании массообменных процессов совокупность критерия подобия представлена в виде

$$\frac{dl_i}{D} = F\left(\frac{W_k l_i}{D}; \frac{\Delta P l_i^2}{D^2}; \frac{\tau D}{l_i^2}; \frac{gl_i^3}{D^2}; \frac{l_i}{l_i}\right), \quad (2)$$

где d - коэффициент массопереноса; D - коэффициент диффузии.

Эта совокупность позволяет определять численные значения коэффициентов массопереноса элементов, растворенных в металле.

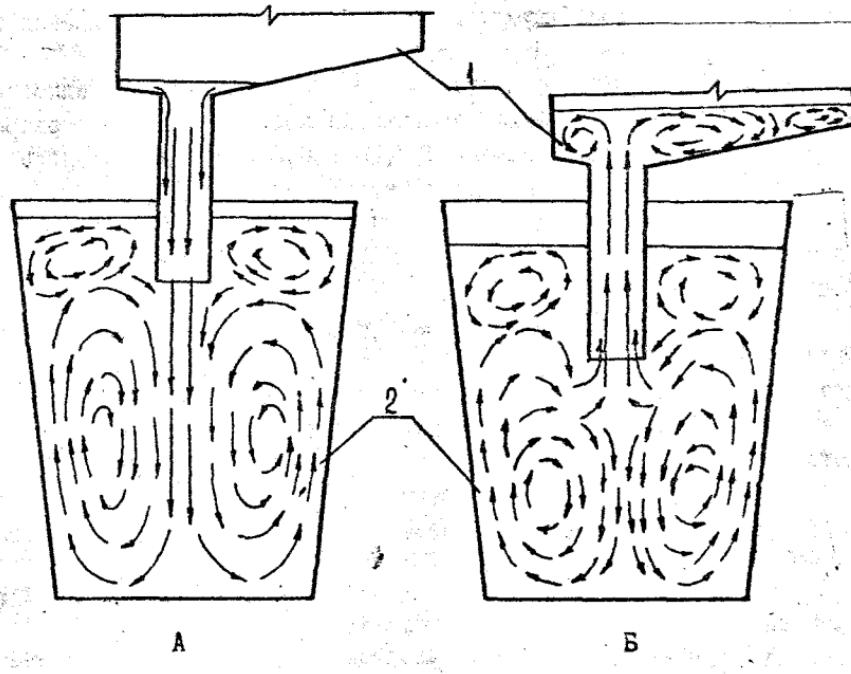
Для исследования гидродинамики и массообменных процессов, происходящих при порционном вакуумировании стали, была создана модель порционного вакууматора ВП-130 в масштабе 1:10 из органического стекла.

Гидродинамика изучалась с использованием метода киносъемки. Стальмоделирующей жидкостью была вода, индикатор - метиленовая синь, которую с помощью шприца и длинной трубки вводили в различные участки модели сталеразливочного ковша и вакуум-камеры. На основании результатов киносъемки строились векторные диаграммы движения индикатора в модели при различных режимах работы вакууматора. Обработка векторных диаграмм позволила сделать вывод, что независимо от изменяемых параметров работы вакууматора характер движения жидкости в нем остается неизменным и обобщенно может быть выражен схемой, представленной на рисунке I.

Векторные диаграммы позволили определить поля скоростей движения жидкости в моделях сталеразливочного ковша и вакуум-камеры.

Определено влияние различных режимов работы вакууматора на скорость движения металла в ковше и вакуум-камере. Отмечено, что скорость движения жидкости при сливе всегда выше, чем при засасывании в камеру. Причем, при прочих равных условиях скорость циркуляции металла в нижней части ковша в 3...4 раза выше, чем в подшлаковом слое, который назыян "эластичной зоной".

Гидродинамика жидкого металла в вакуум-камере и сталеразливочном ковше



I. Вакуум-камера

2. С талеразливочный ковш

Перемещение камеры вверх (А) и вниз (Б)

Рис. I.

Наибольшее влияние на скорость движения жидкости в ковше оказывает скорость перемещения камеры. Так, с увеличением скорости перемещения камеры с 2 до 12 м/мин, скорость циркуляции металла в ковше возрастает с 10,1 до 25,2 м/мин. Очевидно, что для лучшего перемешивания металла в ковше необходимо работать на максимальной скорости подъема камеры. Выдержка камеры в ВРП и НРП уменьшает скорость циркуляции металла, поэтому для эффективного перемешивания необходимо минимальное время выдержки камеры, однако ограничением по минимуму здесь является степень заполнения камеры металлом.

Влияние рабочего хода камеры на скорость движения жидкости аналогично влиянию скорости перемещения камеры. Изменение разрежения в вакуум-камере в пределах 0,13...6,5 кПа незначительно оказывается на скорости движения металла в ковше.

При изученных параметрах работы вакууматора скорость движения металла колеблется от 3,0 до 25 м/мин в зависимости от режима работы вакууматора.

Влияние параметров работы вакууматора на скорость движения жидкости в вакуум-камере аналогично сталеразливочному ковшу. Однако скорость движения металла здесь в 3...4 раза выше, чем в ковше и составляет 4...68 м/мин в зависимости от режима работы вакууматора.

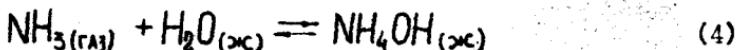
Используя данные моделирования, вычислили коэффициенты турбулентной диффузии металла в ковше и камере по уравнению Эйнштейна

$$\Phi_t = \frac{x^2}{2t} . \quad (3)$$

Для наиболее интенсивно перемешиваемых частей ковша эта величина составляет 90...800 см²/с, что соизмеримо с перемешиванием металла при продувке его кислородом в конвертере (110...350 см²/с). В вакуумной камере коэффициент турбулентной диффузии колеблется от 800 до 6500 см²/с в зависимости от режима работы вакууматора.

Для изучения процессов массообмена между жидкостью и растворенным в ней газом, а также получение значений коэффициента массопереноса использовался колориметрический метод. В качестве моделирующей жидкости применялся водный раствор аммиака. Суть применяемой методики состоит в том, что в присутствии реактива Несслера оптическая плотность раствора, измеряемая с помощью

спектрометра SPEKOL, возрастает с увеличением концентрации амиака в воде. При вакуумировании реакция



сдвигается влево, что приводит к уменьшению оптической плотности раствора.

Полученные по результатам опытов средние значения оптической плотности раствора пересчитывали на содержание в растворе амиака. Таким образом определяли изменение концентрации амиака в растворе через определенное число циклов.

Опыты показали, что концентрация амиака в растворе во время вакуумной обработки уменьшается. Однако степень удаления газа зависит от параметров работы вакууматора. Так, с увеличением рабочего хода и уменьшением остаточного давления в вакуум-камере степень дегазации раствора возрастает. Следует отметить, что при разрежении 0,13...1,3 кПа степень дегазации почти не зависит от давления в вакуум-камере.

Увеличение скорости перемещения камеры увеличивает степень дегазации раствора вследствие интенсификации процессов массообмена. Однако этот параметр должен быть согласован со временем выдержки камеры в ВРП и НРП. Опыты показали, что при малой выдержке (5 с) и большой скорости перемещения (более 10 м/мин) жидкость не успевает сливаться и заполнять камеру, что приводит к неполному обновлению порции раствора, и, следовательно, к уменьшению эффекта дегазации.

Увеличение времени выдержки камеры в НРП способствует повышению степени дегазации раствора, однако такое влияние заметно лишь при выдержке до 10 с.

Полученные опытные данные позволяют оценить величину коэффициента массопереноса α при различных рабочих режимах вакууматора.

Для расчета этой величины выведено уравнение

$$\alpha = - \frac{\ln \left(\frac{\sqrt[n]{C_n^k/C_0^k} - 1}{F/V \cdot \tau} + 1 \right)}{F/V \cdot \tau} \quad : \quad (5)$$

где C_0^k, C_n^k — концентрация элемента в начале и конце вакуумирования в ковше; $\alpha = V^*/V$ — отношение объема порции ко всему объему

жидкости; Π - количество циклов; τ - время одного цикла;
 F/V - удельная поверхность в вакуум-камере.

Так как величина удельной поверхности F/V при различных режимах не постоянна, то при оценке их влияния на эффективность вакуумной обработки удобно пользоваться сравнением значений параметра массопереноса

$$\frac{dF}{V} = - \frac{\ln\left(\frac{\sqrt{C_n^k/C_0^k} - 1}{a} + 1\right)}{\tau} \quad (6)$$

Уравнение (6) может быть преобразовано:

$$C_n^k = C_0^k [1 + a(e^{-dF/V\tau} - 1)]^\Pi \quad (7)$$

и использоваться для прогнозирования изменения содержания компонента C_n после Π циклов вакуумной обработки.

Определенные по уравнению (6) параметры массопереноса аммиака и пересчитанные с помощью критериальных зависимостей на элементы, растворенные в металле, равны $(0,4...3,3) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ для азота; $(4,8...42,3) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ для водорода; $(0,8...7,0) \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ для углерода и кислорода.

Полученные значения параметра массопереноса были обработаны на ЭБМ. Получено уравнение, позволяющее рассчитать величину параметра массопереноса при любых внешних воздействиях на порционный вакууматор:

$$\frac{dF}{V} = \frac{\Phi}{D} (0,354\Pi_k - 6,062PX - 0,1134P - 0,054\tau^2 + 1,037\tau - 0,421) \cdot 10^{-4}, \quad (8)$$

где Φ - коэффициент диффузии элемента, растворенного в металле; D - коэффициент диффузии аммиака в воде.

Таким образом, уравнение (8) позволяет рассчитать величину параметра массопереноса C, O, H_2, N_2 в порционном вакууматоре, а в сочетании с уравнением (7) прогнозировать конечное содержание этих элементов в металле.

Одним из методов повышения эффективности порционной вакуумной обработки является продувка металла нейтральным газом. С целью исследования физико-химических закономерностей при продувке металла и разработки конструкции устройства для промышленного вакууматора были проведены опыты на модели. На расстоянии 50 мм от торца патрубка модели вакуум-камеры разместили щелевые

фурмы, через которые проводили продувку раствора аммиака воздухом или аргоном.

Опыты показали, что степень удаления аммиака зависит от расхода газа на продувку и количества фурм, через которые ведется продувка. При использовании одной фурмы эффект от продувки начинает проявляться при расходе газа $6,2 \text{ м}^3/\text{ч}$. Эффект от продувки через 2,3 и 4 фурмы проявляется при расходе газа, соответственно, более $4,7; 3,3; 4,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Это связано, видимо, с тем, что дегазация раствора зависит как от степени рассредоточения дутыя, так и от величины удельной поверхности жидкость - газовый пузырь.

Определенный по результатам опытов коэффициент массопереноса элементов, растворенных в металле, составляет: для водорода, азота, углерода и кислорода, соответственно: $(5,3...14,7) \cdot 10^{-3}$; $(0,4...1,2) \cdot 10^{-3}$; $(0,9...2,5) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Значение коэффициента массопереноса зависит от режима продувки и выше при рациональном сочетании степени рассредоточения дутыя и интенсивности продувки.

2. Разработка и исследование технологии производства особонизкоуглеродистой стали

Результаты моделирования использованы при разработке конструкции устройства для продувки металла нейтральным газом через патрубок вакуум-камеры в вакууматоре ВП-130 при производстве особонизкоуглеродистой стали.

Продувка металла аргоном при порционном вакуумировании интенсифицирует массообменные процессы, что способствует получению особонизкоуглеродистых сталей. Об этом свидетельствуют результаты одной кампании, за которую было выплавлено две серии плавок: одна с продувкой металла через патрубок вакуум-камеры, другая без продувки. При прочих равных условиях среднее содержание углеродра в первой серии плавок составило 0,008%, причем все плавки имели углерод не выше 0,010%. Вторая серия плавок без продувки аргоном содержала в среднем 0,013% углерода. В результате использования аргона были получены сверхнизкие концентрации углерода в металле (0,004...0,006%), что без применения аргона ранее не достигалось.

Результаты моделирования и промышленного эксперимента использовались в разработке технологии производства динамной стали

трех групп легирования. Изучено пять вариантов выплавки и внешней обработки динамной стали: А - с вакуумированием металла и последующей обработкой жидким синтетическим шлаком; Б - с вакуумированием без десульфурации; В - обработка синтетическим шлаком; Г - вариант В с последующей обработкой твердой шлаковой смесью при переливе в другой ковш; Д - вариант Г без обработки смесью при переливе. Всего представленный в работе материал базируется более чем на 15 тыс. т динамной стали.

В процессе внешней обработки стали исследовали поведение компонентов стального и шлакового расплавов. Установлено, что за время вакуумного обезуглероживания при выплавке стали по вариантам А и Б удаляется 0,014...0,018% углерода. Однако, вместе с ферросплавами в металл вносится 0,004...0,005% углерода. Конечное содержание углерода при выплавке по этим вариантам 0,014...0,18%. Варианты В, Г и Д не позволяют получить металл с углеродом менее 0,028...0,031%, что почти в два раза выше, чем в вакуумированной стали.

Металл, выплавленный по варианту А, имеет и более низкое содержание серы (0,002%). По-видимому, высокий эффект обработки связан, с одной стороны, с улучшением кинетических условий взаимодействия фаз при переливе стали из ковша в ковш, а с другой стороны, с улучшением термодинамических условий десульфурации глубокораскисленного вакуумированного металла и исключения смешения синтетического шлака с конвертерным.

Хорошие результаты получены и при двойной обработке металла шлаковыми смесями (вариант Г). Обработка твердой шлаковой смесью на второй стадии позволяет снизить содержание серы в металле в среднем на 0,002% и стабильно обеспечить в металле содержание 0,003% серы и менее.

Однократная обработка динамной стали в ковше жидким синтетическим шлаком обеспечивает содержание серы в металле 0,004...0,009%, причем только 65% плавок менее 0,006% серы (варианты В и Д). Вариант с вакуумированием (Б) не позволяет понизить содержание серы ниже 0,010%, так как металл не подвергается внешней десульфурации.

Для более глубокого исследования влияния способа выплавки динамной стали на десульфурацию рассчитали на ЭВМ согласно теории регулярных ионных растворов равновесный коэффициент распределения серы между металлом и шлаком при различных вариантах

выплавки и сравнили его с фактическим. Состояние, близкое к равновесию по сере, достигается при обработке металла синтетическим шлаком по варианту А. Достаточно близок к равновесным значениям коэффициент распределения серы при обработке металла твердошлаковой смесью на второй стадии обработки по варианту Г. При сливе металла из конвертера (вариант В и первая стадия варианта Г) фактический коэффициент распределения серы в три раза меньше равновесного. Это связано, по-видимому, с интенсивностью перемешивания металла и шлака. Расчеты показывают, что полная работа перемешивания металла при переливе стали из ковша в ковш с одновременной продувкой его аргоном составляет в среднем 7,86 МДж. При сливе металла из конвертера значительно ниже (5,5 МДж). Можно предположить, что в последнем случае из-за менее интенсивного перемешивания металлической ванны равновесие между металлом и шлаком не достигается. Определенную роль здесь играет и продолжительность слива. Обработка экспериментальных данных показала, что с увеличением времени контакта металла с синтетическим шлаком степень десульфурации закономерно возрастает.

Применив закон распределения для расчета процессов экстрагирования серы из металла синтетическим шлаком, вывели уравнения, позволяющие прогнозировать конечное содержание серы в металле при однократной

$$[S] = \frac{\frac{m_{me}}{m_{shl}} [S]_o + (S)_o}{L_s + \frac{m_{me}}{m_{shl}}} \quad (9)$$

и двукратной обработке

$$[S] = \left(\frac{\frac{m_{me}}{m_{shl1}} [S]_o + (S)_o}{L_{s1} + \frac{m_{me}}{m_{shl1}}} \cdot \frac{\frac{m_{me}}{m_{shl2}} [S]_1 + (S)_1}{L_{s2} + \frac{m_{me}}{m_{shl2}}} \right) : [S]_1 \quad (10)$$

где $[S]_o, (S)_o$ – исходное содержание серы в металле и шлаке; m_{me}, m_{shl} – масса металла и шлака; L_s – коэффициент распределения серы.

Важной характеристикой динамной стали является ее технологическая пластичность. Снижение содержания углерода при внешней вакуумной обработке способствует улучшению пластичных свойств

металла. Так, уменьшение концентрации углерода с 0,04 до 0,012% позволяет увеличить суммарную концентрацию кремния и алюминия до 4% при достаточном уровне технологической пластичности (не менее 7 гибов).

Вакуумированный металл, обработанный синтетическим шлаком (вариант А) имеет наименьшие удельные ваттные потери (средние 3,07 Вт/кг) и высокий выход высшей марки стали 24I3. Несколько худшие свойства ($P_{1,5/50} = 3,10$ Вт/кг) имеет динамная сталь, подвергнутая двойной десульфурации (вариант Г). Вакуумированная повышеннолегированная сталь (вариант Б) без обработки синтетическим шлаком из-за высокого содержания в ней серы имеет существенно худшие электротехнические характеристики ($P_{1,5/50} = 3,18$ Вт/кг). Металл, выплавленный по вариантам В и Д, имеет наиболее высокие удельные ваттные потери и низкий выход высших марок изотропной стали.

Хорошие электротехнические свойства получены при производстве низколегированной вакуумированной динамной стали. По уровню индукции и удельных потерь этот металл превосходит не только марки 20I2 и 21I2, но даже укладывается в уровень требований для слабодегированной стали марки 22I2.

3. Кинетика обезуглероживания при порционной вакуумной обработке особонизкоуглеродистой стали

Подробное изучение химического состава металла при порционном вакуумировании показало, что ход кинетических кривых изменения содержания углерода свидетельствует о более глубоком вакуумном обезуглероживании металла при интенсификации массопереноса продувкой инертным газом. Кинетические кривые плавок без продувки аргоном обычно после 20...30 циклов обработки выходят на прямую, параллельную оси абсцисс (Рис. 2а). Это свидетельствует о том, что дальнейшая обработка существенно не снижает концентрацию углерода в металле. В отличие от этого характер кривых содержания углерода в плавках с продувкой металла аргоном (Рис. 2б) свидетельствует о незавершенности процесса вакуумного обезуглероживания за время обработки. Среднее содержание углерода в этой серии плавок составило 0,007% против 0,017% в серии плавок, обработанных по принятой в цехе технологии.

Изменение содержания углерода при порционной вакуумной обработке стали
без продувки (а) и с продувкой (б) металла инертным газом

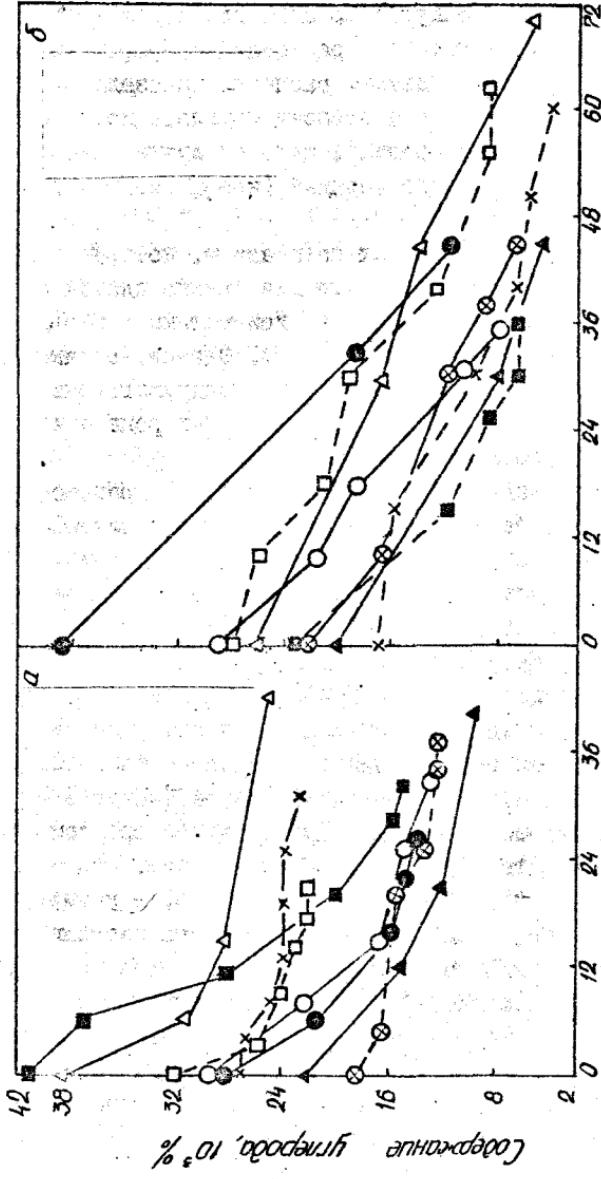


Рис. 2.

Используя уравнение (5), рассчитали величину коэффициента массопереноса. При продувке аргоном среднее за плавку значение коэффициента массопереноса $3,9 \cdot 10^{-3}$ м/с существенно выше, чем в серии плавок, обработанных по принятой в цехе технологии без продувки ($2,7 \cdot 10^{-3}$ м/с).

Порядок процесса вакуумного обезуглероживания по углероду оценили используя два метода – расчетный и графический. Анализ графических данных и результаты расчетов показали, что процесс вакуумного обезуглероживания особенностью углеродистой стали в порционном вакууматоре без продувки аргоном лучше описывается кинетическим уравнением второго порядка (коэффициент корреляции $r = 0,965$).

Графический анализ данных по плавкам, которые вакуумировали с продувкой аргоном, показал, что эта группа плавок одинаково хорошо описывается прямолинейными зависимостями в координатах нулевого и первого порядков ($r = 0,99$). Однако, оценка расчетным методом свидетельствует о том, что при вакуумировании с продувкой аргоном скорость процесса окисления углерода описывается уравнением нулевого порядка...

Расчеты показали, что энергия активации процесса вакуумного обезуглероживания без продувки аргоном составляет 500 кДж/моль, при интенсификации продувкой аргоном – 100 кДж/моль.

Полученные результаты определения порядка и энергии активации процесса окисления углерода позволяет описать кинетические особенности обезуглероживания при порционном вакуумировании особенностью углеродистой стали. При обычном порционном вакуумировании лимитирующим звеном процесса окисления углерода является, по-видимому, стадия образования газообразной фазы CO. Для этой стадии характерны второй порядок и большое значение энергии активации (более 500 кДж/моль). При продувке аргоном в металлическую ванну вводятся готовые пузыри газообразной фазы, объем которых значительно превышает объем металла. Поэтому происходит смена лимитирующего звена процесса, скорость которого определяется в этом случае, видимо, подводом углерода к месту реакции и диффузией углерода и кислорода через пограничную плёнку на поверхности пузыря. Это требует относительно небольшой энергии активации (менее 130 кДж).

Об этом свидетельствует и величина произведения концентраций углерода и кислорода в металле, которая при примерно равных

исходных (до вакуумирования) значениях $m = 0,0019 \dots 0,0022$ после вакуумной обработки без продувки аргоном составляет в среднем $m = 0,00095$, а после вакуумной обработки с продувкой аргоном $m = 0,0004$. Уменьшение величины m более чем в два раза при продувке в патрубок вакуум-камеры аргоном подтверждает предположение о лимитирующем влиянии стадии образования газообразной фазы на развитие процесса вакуумного обезуглероживания особонизкоуглеродистой стали.

ОНИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика моделирования и исследование гидродинамика и явления массопереноса при порционном вакуумировании металла. Определены факторы, влияющие на эффективность вакуумной обработки стали. Найдены коэффициенты турбулентной диффузии металла и параметры массопереноса при различных режимах вакуумирования.

2. Исследована способ интенсификации массообменных процессов при порционном вакуумировании посредством продувки металла через патрубок вакуум-камеры инертным газом и выявлены рациональные режимы продувки; найдены коэффициенты массопереноса.

3. На основании результатов моделирования сконструировано устройство для продувки металла аргоном в вакууматоре ВП-130. Разработана и внедрена технология порционной вакуумной обработки особонизкоуглеродистой стали, позволяющая значительно повысить выход высшей марки передельного железа.

4. Исследована кинетика процесса вакуумного обезуглероживания особонизкоуглеродистой стали. Показано, что удаление углерода при порционном вакуумировании описывается кинетическим уравнением второго порядка, лимитирующей является адсорбционно-химическая стадия. При продувке металла аргоном через патрубок вакуум-камеры скорость обезуглероживания определяется диффузией компонентов к месту реакции и описывается уравнением нулевого порядка.

5. Исследовано пять технологических схем выплавки и вакуумной обработки изотропной электротехнической стали, одна из которых обеспечивает производство металла с содержанием углерода не более 0,020% и серы не более 0,003%.

6. Внедрение технологии порционной вакуумной обработки особонизкоуглеродистой стали, технологии производства повышенной

рованной динамической стали позволяло получить годовой экономический эффект в размере 192,3 тыс. рублей.

Материалы диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Марков Б.Л., Малков И.В. Массоперенос при порционном вакуумировании стали // Известия АН СССР. Металлы.-1988. - № 2. - С. 26-30.

2. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Малков И.В. и др. Производство особонизкоуглеродистой стали путем продувки аргоном при обработке в порционном вакууматоре // Сталь.-1988. - № 7. - С. 34-36.

3. Токовой О.К., Поволоцкий Д.Я., Марков Б.Л., Малков И.В. Разработка методики моделирования гидродинамики металла при порционном вакуумировании // Известия вузов. Черная металлургия. - 1987. - № 1. - С. 46-49.

4. Токовой О.К., Поволоцкий Д.Я., Марков Б.Л., Малков И.В. Исследование гидродинамики металла при порционном вакуумировании // Известия вузов. Черная металлургия. - 1987. - № 3. - С. 47-49.

5. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Малков И.В. Моделирование гидродинамики металла в сталеразливочном ковше и вакуум-камере порционного вакууматора// Всесоюзная научно-техническая конференция (27-29 ноября 1985 г.) "Теория и практика внепечной обработки стали": Тезисы докладов. - М.- 1985. - С. 40-41.

6. Кудаков В.В., Малков И.В., Поволоцкий Д.Я. Массообмен и гидродинамика металла при порционном вакуумировании// Четвертая всесоюзная конференция по тепло- и массообменным процессам в ваннах сталеплавильных агрегатов (9-11 сентября 1986 г.): Тезисы докладов.- Ндаев.- 1986. - С. II4.

7. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Малков И.В. Производство легированной динамичной стали с низким содержанием углерода// Республикаанская научно-техническая конференция (21-22 октября 1987г.): Тезисы докладов.- Днепропетровск.- 1987. - С. I35-I36.

8. Поволоцкий Д.Я., Токовой О.К., Малков И.В. и др. Анализ различных технологических схем выплавки в кислородных конвертерах и внепечной обработки изотропной электротехнической стали 4 группы легирования// Восьмое всесоюзное совещание по физике и металловедению электротехнических сталей и сплавов (19-21 апреля 1988 г., г.Липецк): Тезисы докладов (часть I).-М.- 1988.- С. II.

Лев