



A mathematical model is worked out of combined problem of movement and melting of crystal and powder wire which takes into account freezing of slag envelope upon the steel envelope. Based on numerical calculation, rational conditions of treatment of wire alloys are determined

*И. А. ПАВЛЮЧЕНКОВ, Днепродзержинский государственный технический университет,
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, БГПА, В. Ю. БОЛОТОВ, С. М. ХЕЙЛИК,
Днепродзержинский государственный технический университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСВОЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВОВ В КОВШЕ

УДК 669.18.046.5

Внеагрегатная обработка металла является одним из наиболее эффективных направлений повышения качества и свойств металлопродукции массового назначения и ресурсосбережения в металлургии. Один из наиболее эффективных способов ресурсосберегающей технологии внепечной обработки металла — ввод порошковой или кристаллической проволоки в расплав сталеразливочного ковша. С использованием этой технологии осуществляются следующие технологические операции внепечной обработки металла: раскисление, легирование, дегазация, десульфурация, модифицирование и др.

Различные варианты обработки металлических расплавов разными проволоками применяются в зарубежной и отечественной металлургической практике более двух десятков лет [1–3]. Вопросы изучения указанного процесса занимались исследователи в разных аспектах.

1. Проведена обработка опытных плавов на УКДМ. При этом определена степень усвоения добавок для разных марок стали и чугуна в зависимости от температуры и массы металла [1, 2]. Эмпирическим путем установлены параметры обработки, обеспечивающие усвоение проволок, но комплексно влияние технологических параметров на степень и качество усвоения добавки не изучено.

2. Методами математического моделирования изучена продолжительность плавления проволок в расплавах. В работах [4, 5] исследован процесс плавления проволок по методу Дюзинбера и Никитенко. В этой работе не учитывались возможность образования на поверхности проволоки оболочки шлакового расплава и влияние гидродинамических факторов на кинетику плавления. В работе [6] изучена продолжительность плавления проволок без учета образования шлаковой оболочки и с учетом влияния гидродинамического фактора.

3. Методами математического моделирования сделаны попытки определения места полного расплавления добавки в ковше. В работе [4] априорно за траекторию движения проволоки принято ее вертикальное перемещение. В работе [6] траекто-

рия движения проволоки в расплаве под воздействием гидродинамических факторов моделировалась в приближении движения сферической частицы. При этом не учитывались упругие силы в проволоке и возможность расплавления отдельных частей проволоки в разных местах ковша. Кроме того, не учтено влияние изменения диаметра проволоки в процессе ее плавления на характер движения. Очевидно, что такой подход не отражает реального процесса движения проволоки, поэтому определение места ее расплавления в указанных работах невозможно считать достаточно адекватным.

Несмотря на то что задачам применения проволок для обработки металлов посвящено достаточное количество теоретических и экспериментальных работ, остались неисследованными вопросы:

- определение места расплавления добавки при взаимном учете влияния движения проволоки под воздействием гидродинамики расплава на процесс плавления и процесса плавления на движение;

- влияние технологических параметров обработки (диаметр проволоки, скорость и место ввода на зеркале металла, интенсивность и вид продувки, угол отклонения проволоки от вертикали при вводе, температура расплава), поскольку они оказывают существенное влияние на степень усвоения добавок, т.е. на эффективность процесса. Неверное априорное определение указанных параметров обработки вызывает ряд дополнительных нежелательных эффектов — неравномерное распределение расплавленной добавки в объеме ковша, увеличение продолжительности усреднения добавки, аварийный выход проволоки на поверхность ковша в виде петли, потери добавок за счет низкой степени усвоения.

Критический анализ современного состояния тенденций применения проволок при внепечной обработке металла и широкие технологические возможности уменьшения материалозатрат в этих процессах указывают на необходимость изучения

теплообменных процессов и технологических особенностей в процессе обработки расплавов проволоками с целью снижения материалозатрат:

- уменьшения расхода проволоки за счет повышения эффективности ее усвоения;
- снижения затрат аргона на производство за счет уменьшения времени аргоновой продувки после окончания ввода проволоки.

В настоящей работе для решения поставленных вопросов решены следующие задачи:

1) разработаны математические модели и алгоритмы, программы расчетов совместной задачи движения и плавления проволоки с дальнейшим усреднением расплавленной добавки в объеме ковша;

2) исследовано влияние технологических параметров обработки (диаметр проволоки, скорость и место ввода на зеркале металла, интенсивность и вид продувки, угол отклонения проволоки от вертикали при вводе, температура расплава) на степень и продолжительность усвоения;

3) установлены рациональные режимы обработки расплавов проволоками.

Высокая температура, непрозрачность и агрессивность жидкого металла, а также дороговизна натуральных экспериментов не позволяют достаточно эффективно в промышленных условиях исследовать указанные процессы, поэтому для их изучения предпочтение отдается методам математического

моделирования. При построении математической модели кинетики плавления кристаллической и порошковой проволоки, учитывающей намерзание шлаковой оболочки на поверхность первоначальной стальной оболочки, учтены также всевозможные виды наполнителей проволоки — тугоплавкие, сверхтугоплавкие и легкоплавкие. Разработанные алгоритмы расчета для различного вида наполнителей проволоки и периодов ее плавления основаны на разностном методе с явным выделением границы плавления [7].

При расчете плавления наполнителя проволоки учитывается суммарный тепловой эффект от растворения, окисления, молизации и кипения при взаимодействии его поверхности с расплавом. При этом принято, что указанный тепловой эффект распределяется между плавящимся наполнителем и жидкой сталью пропорционально коэффициентам их теплопроводности. При расчете плавления легкоплавкой проволоки предусматривается возможность повторного нарастания стальной оболочки на оставшуюся твердую фазу наполнителя проволоки. Результаты продолжительности плавления различных проволок в расплавах приведены на рис. 1, 2.

Для подтверждения адекватности разработанных моделей и алгоритмов расчетов плавления проволоки проведено численное исследование модельной задачи плавления проволоки без учета ее движения в ковше.

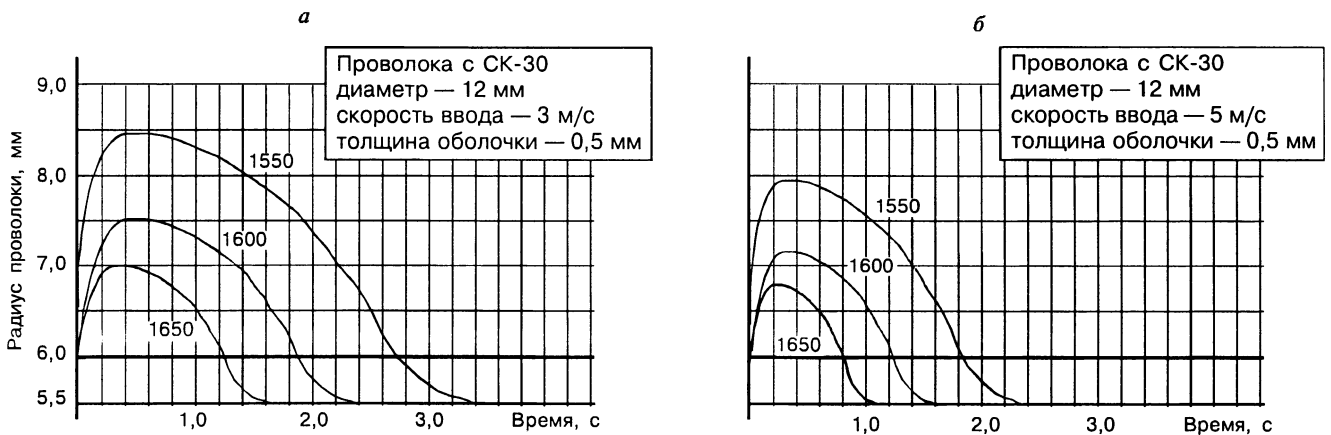


Рис. 1. Продолжительность расплавления намерзшей оболочки расплава и первоначальной стальной оболочки проволоки с силикокальцием СК-30 без учета шлаковой оболочки. Цифры у кривых — температура расплава, °С

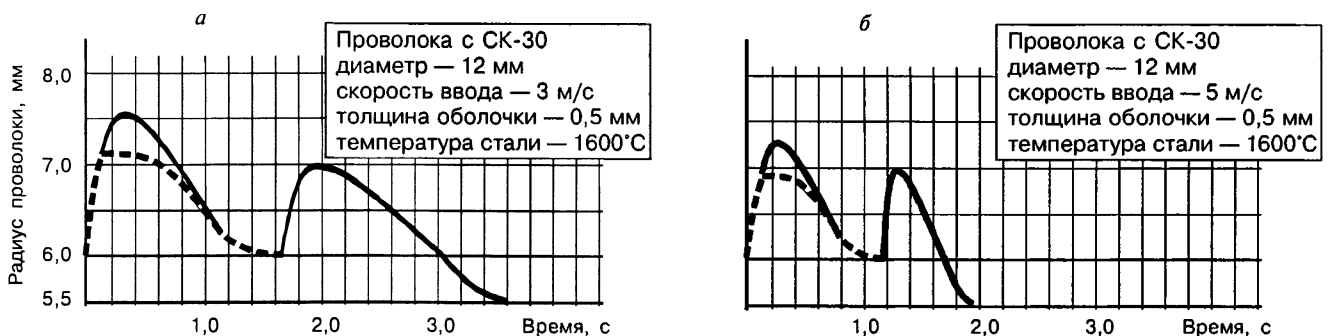


Рис. 2. Продолжительность расплавления намерзшей шлаковой оболочки (пунктирная линия), оболочки расплава (сплошная линия) и первоначальной стальной оболочки проволоки с силикокальцием СК-30 при температуре 1600°С

Сопоставление полученных результатов по плавлению алюминиевой катанки без учета образования шлаковой оболочки с результатами отечественных и канадских авторов [4,8] указывает на их удовлетворительное соответствие. Максимальная относительная погрешность по продолжительности плавления катанки составляет 11%.

Сопоставление полученных результатов по продолжительности полного расплавления порошковой проволоки с результатами работ [5, 6] дает максимальную относительную погрешность расчетов 15%.

Исследовано влияние образования шлаковой оболочки на кинетику плавления проволок. Показано, что образование шлаковой оболочки на поверхности проволоки обеспечивает увеличение продолжительности полного расплавления проволоки на 15–50%.

В результате вычислительного эксперимента по исследованию продолжительности плавления проволок в расплавах установлено, что:

- увеличение диаметра проволоки вызывает значительное увеличение времени расплавления проволоки;
- повышение скорости ввода, приводящее к росту коэффициента теплоотдачи, обеспечивает существенное сокращение времени полного расплавления проволоки;
- образование на поверхности проволоки шлаковой оболочки вызывает значительное увеличение времени ее полного расплавления.

Траектория пространственного движения проволоки проведена в настоящей работе по модели, описанной в [9, 10]. При этом учтена зависимость упругих свойств материала проволоки, стальной и шлаковой оболочек от температуры [11]. Проведенные исследования траектории движения проволоки в расплаве под влиянием гидродинамики расплава показали, что материал алюминиевой катанки полностью теряет упругость еще до окончания намерзания стальной оболочки на поверхности катанки, а упругие силы при движении проволоки обеспечиваются только лишь упругостью высокопластичной стальной оболочки. Для порошковой проволоки упругость обеспечивается упругими силами стальной оболочки проволоки и упругими силами высокопластичной оболочки расплава. Более 60% упругости стальная оболочка теряет за период намерзания и плавления оболочки расплава на поверхности проволоки, т. е. движение порошковой проволоки носит более выраженный упругий характер по сравнению с движением алюминиевой катанки, которое практически представляет собой движение гибкой нити.

Задача определения стационарного трехмерного поля скоростей в сталеразливочном ковше при верхней аргонной продувке и нижней продувке металла решена численно в цилиндрических коор-

динатах в естественных переменных скорость—давление. При этом введено предположение о сплошности единой газожидкостной среды, которая стратифицирована по плотности вязкой несжимаемой жидкостью [11].

Задача расчета гидродинамики ковшевой ванны при продувке инертным газом описывается системой уравнений Навье—Стокса в приближении Буссинеска:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} P + \nu \Delta \vec{V} + (1 - \bar{\alpha}) \vec{g}, \\ \text{div} \vec{V} = 0, \\ \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \tau} + \vec{V} \cdot \text{div} \bar{\alpha} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где τ — время; $\vec{V} = \{v_r, v_\varphi, v_z\}$ — вектор скорости;

$\bar{\alpha}$ — коэффициент газосодержания; $\rho = \rho_0(1 - \bar{\alpha})$ — локальная плотность расплава при продувке; ρ_0 — плотность жидкого расплава.

Система (1) дополняется соответствующими граничными условиями. Для вектора скорости на стенках и днище ковша граничные условия ставятся из условий непротекания и прилипания, на свободной поверхности они определяются условиями непротекания и скольжения, в барботажной зоне — из условий отсутствия завихренности и горизонтального перемещения среды. На коэффициент газосодержания на твердой стенке, днище ковша и свободной поверхности налагается условие непротекания, а в зоне барботажа (заглубленного под слой жидкого металла конца фурмы) — условие свободного протекания. Граничные условия для давления получаются проектированием уравнения движения на соответствующие орты.

Расчет задачи определения стационарного поля скоростей проводили с учетом на установление по схеме расщепления Белоцерковского [12].

Уравнения переноса количества движения и газосодержания интегрируются по неявной схеме бегущего счета с разностной аппроксимацией против потока на каждом направлении переноса, что обеспечивает абсолютную устойчивость счета по схеме. Эффект турбулентного переноса субстанции учитывали при помощи введения эффективного коэффициента вязкости, включающего в себя аппроксимационную и турбулентную составляющие [12].

Учитывали этап усреднения расплавленной жидкой фазы проволоки в объеме ковша по мере расплавления проволоки. Построена консервативная неявная схема бегущего счета с разностной аппроксимацией против потока на каждом направлении переноса, что обеспечивает абсолютную устойчивость счета по схеме.

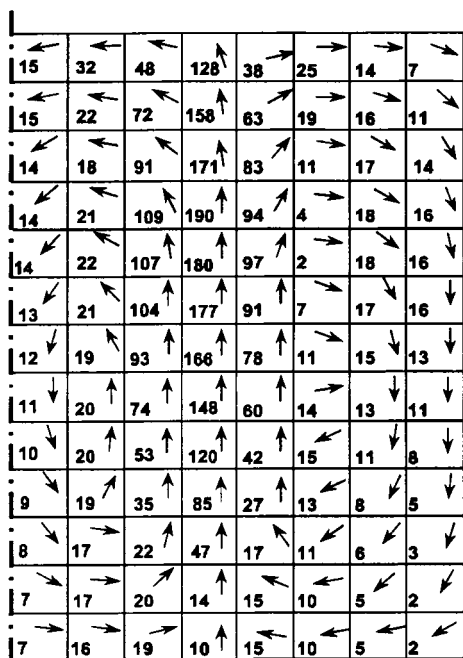


Рис. 3. Поле скоростей в продольном осевом сечении ковша при донной продувке

Проведены численные расчеты поля скоростей жидкого металла при обоих видах аргонной продувки: продувки через донные пористые пробки и верхней продувки через погружную фурму. Результаты численных расчетов полей скоростей при донной аргонной продувке жидкой стали в 250-тонном сталеразливочном ковше представлены на рис. 3. Для анализа адекватности полученных результатов по продувке они сопоставлены с ранее опубликованными расчетными и экспериментальными данными [13], для чего было проведено численное исследование процесса при тех же условиях и параметрах продувки, что и в отмеченной работе. Сопоставление эпюр скоростей на разных глубинах ковша и полей скоростей в разных сечениях ковша указывает на качественную согласованность полученных результатов.

На основании моделей гидродинамики расплава при продувке и движения проволоки с учетом зависимости упругих сил от температуры проведено исследование максимально возможного угла отклонения проволоки от вертикали, которое не приведет к аварийной ситуации выхода проволоки на поверхность ковша в виде петли.

Проведено исследование совместного процесса движения проволоки и ее плавления с массопереносом расплавленной жидкой добавки в объеме ковшевой ванны в период аргонной продувки. Исследования выполнены при различных параметрах продувки, вариантах ввода проволоки, характеристиках самой проволоки, с учетом и без учета прохождения проволоки через слой жидкого шлака.

Для рассмотренных вариантов обработки стали и чугуна различными проволоками установлены

те параметры обработки, при которых обеспечивается минимальная продолжительность усреднения расплавленной добавки и максимально возможное погружение проволоки под слой жидкого металла, что приводит к снижению затрат аргона на продувку и повышению степени усвоения добавки.

Из анализа проведенных исследований сделаны практические рекомендации по оптимизации процесса обработки расплавов проволоками в 250-тонном технологическом сталеразливочном ковше:

1) ввод пруткового алюминия и порошковой проволоки должен производиться около борта ковша, чтобы нисходящие потоки металла не способствовали их выносу на поверхность;

2) ввод пруткового алюминия и порошковой проволоки должен производиться вертикально для исключения аварийных ситуаций выхода проволоки на поверхность;

3) с учетом продолжительности плавления и усреднения добавки и небольшого резерва времени заканчивать ввод порошковой проволоки и алюминиевой катанки необходимо за 3 мин до окончания продувки в наполненном сталеразливочном ковше. Более ранний ввод алюминия нецелесообразен, поскольку он может привести к его дополнительному окислению шлаком.

Для сталей 22ГЮ, 08ГСЮФ, Ст20, 17Г1С, 45Г, 45ХН, 18Г порошковую проволоку с силико-кальцием СК-30 рекомендовано использовать со следующими параметрами:

1) толщина исходной стальной оболочки — 0,2—0,5 мм;

2) диаметр проволоки — 12—16 мм;

3) скорость ввода — 3—7 м/с.

Для сталей СтЗсп, 10, 30 алюминиевую катанку рекомендовано использовать со следующими параметрами:

1) диаметр проволоки — 8—10 мм;

2) скорость ввода — 7—10 м/с.

Для сталей А36, 35ГС, кордовых сталей 80КМ, 80К, Ст80(Nippon Steel) порошковую проволоку с науглероживателем рекомендовано использовать со следующими параметрами:

1) толщина исходной стальной оболочки — 0,2—0,5 мм;

2) диаметр проволоки — 10—12 мм;

3) скорость ввода — 5—7 м/с.

Адаптацию разработанных моделей производили на опытно-промышленных плавках с вводом алюминиевой катанки у борта наполненного сталеразливочного ковша под углом 0—5° и 20—25° к вертикали со скоростью 7 м/с [13]. Критерием эффективности разных способов ввода корректирующих добавок алюминиевой катанкой диаметром 8 мм являлось усвоение алюминия спокойной сталью марок СтЗсп, 10, 20. Содержание алюминия в пробах металла после гомогенизирующей аргонной продувки составляло 0,005—0,007%. Рас-

ход алюминиевой катанки в обоих случаях составлял 0,12—0,15 кг/т, скорость ввода — 7—8 м/с.

Установлено, что оптимальный режим внепечной доводки стали наблюдается при вводе добавок за 3 мин до окончания гомогенизирующей аргонной продувки у борта ковша, при этом достигаются наиболее высокие результаты по усвоению алюминия ванной и однородности металла по ходу разливки плавки. Это показывает, что разработанные трехмерные модели с достаточной достоверностью описывают процессы усвоения корректирующих и микролегирующих прутковых добавок в ванне заполненного сталеразливочного ковша при внепечной обработке стали.

Литература

1. Бать Ю. И., Дюдкин Д. А., Титиевский В. М. и др. Опыт обработки металлических расплавов порошковыми проволоками на металлургических предприятиях СНГ // Тр. 4-го конгресса сталеплавильщиков. М., 7—10 окт., 1996. М., 1997. С. 281—284.
2. Дюдкин Д. А., Онищук В. П., Сисиленко В. В. и др. Технология обработки стали в ковше порошковой проволокой с углеродсодержащим наполнителем // Сталь. 1998. № 9. С. 16—18.
3. Faris F., Gibbins P. C., Graham C. Comparison of different calcium infection for production of aluminium-treated steels for billet casting 2 iron making and steel making. 1982. Vol. 13, N1. P. 26—31.
4. Вихлевщук В. А., Огурцов А. П., Павлюченков И. А., Черномаз Г. Н. Математическое моделирование процессов внеагрегатной обработки стали. Днепродзержинск, 1997.
5. Павлюченков И. А., Вихлевщук В. А., Тимошпольский В. И. и др. Исследование кинетики плавления порошковой проволоки при вводе в жидкую сталь // Изв. вузов. Энергетика. 1992. № 9—10. С. 87—91.
6. Дюдкин Д. А., Онищук В. П., Недопекин Ф. В. и др. Влияние гидродинамических и теплофизических процессов на параметры обработки металлических расплавов порошковыми проволоками // Тр. 4-го конгресса сталеплавильщиков. М., 7—10 окт., 1996. М., 1997.
7. Никитенко Н. И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток. Киев: Наукова думка, 1978.
8. Edheth G., Diener A., Pluschkell W. Model computations on the injection of an aluminum wire into a steel melt // Arch. f.d. Eisenhüttenwes. 1978. Vol. 49. P. 563—568.
9. Тимошпольский В. И., Болотов В. Ю., Павлюченков И. А. и др. Исследование процессов плавления и траектории движения проволоки при вводе в сталь // Литье и металлургия. 1999. №2. С. 21—23.
10. Болотов В. Ю., Самохвалов С. Е. Комплексная задача движения, плавления и усвоения проволоки при продувке металла в сталеразливочном ковше // Сб. науч. тр. Днепродзержинского гос. техн. ун-та. 1998. С. 39—44.
11. Математическое моделирование трехмерной задачи движения алюминиевой и порошковой проволоки с учетом их плавления и усреднения при донной продувке металла аргоном // Теория и практика металлургии. 2000. № 3. С. 46—50.
12. Огурцов А. П., Самохвалов С. Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства. Киев: Наукова думка, 1993.
13. Эль-Каддах Н., Зекели Дж. Турбулентность и перемешивание в технологических процессах ковшовой металлургии // Инжекционная металлургия: Тр. конф. М.: Металлургия, 1986. С. 90—105.
14. Пилюшенко В. Л., Вихлевщук В. А., Лепорский С. В. и др. Научные и технологические основы микролегирования стали М., 1983.