

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.18.046.5

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (БНТУ),
С. С. БРОДСКИЙ, канд. техн. наук
(Ассоциация сталеплавильщиков Украины),
А. Д. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук (РУП БМЗ),
В. Ю. БОЛОТОВ, канд. техн. наук,
О. И. ПАВЛЮЧЕНКОВ (ДГТУ),
Д. К. ГРИБОК (БНТУ), В. А. ТРУСОВ (ДМК им. Дзержинского)

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ И СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ

Комплексная внепечная обработка металла (так называемая «ковшевая металлургия»), широко используемая в зарубежной и отечественной практике, по существу стала неотъемлемым этапом сталеплавильного производства и считается самым мощным и эффективным средством стабилизации химического состава, глубокого очищения металла от вредных примесей, повышения свойств и качества металлопродукции, ресурсосбережения в черной металлургии и металлопотребляющих отраслях. Большой интерес среди внепечных процессов микролегирования, модифицирования и доводки стали по химическому составу представляет технология обработки металла в ковше, наполненном порошковыми проволоками [1 – 4].

По сравнению с конкурирующим методом глубокого вдувания метод доводки плавки проволокой имеет следующие преимущества [4 – 8]:

- простота – отсутствие требований к квалифицированному обслуживанию;
- большая гибкость процесса – возможность обработки различных масс металла (в изложницах, ковшах), в то время как вдувание производится преимущественно в ковши большой вместимости;
- повышение стабильности перехода в металл легирующих и модифицирующих элементов;
- уменьшение капиталовложений (примерно в 10 раз) и эксплуатационных расходов (при незначительных переделках данная технология может вписаться в условия любого цеха в кратчайший срок);
- более высокая экологическая чистота процесса из-за отсутствия балластных газов;

- низкая скорость падения температуры расплава, не превышающая скорости падения температуры металла при продувке аргоном.

С учетом изложенного, несмотря на более высокую стоимость вводимого материала, технология корректировки химического состава расплава порошковой проволокой предпочтительнее по сравнению с вдуванием материалов. Данная технология позволяет уменьшить капитальные затраты и эксплуатационные расходы, кроме того, улучшаются экологические условия труда [6, 9]. Например, при вводе силикокальция в виде порошковой проволоки по сравнению с инъекционным способом его применения для модифицирования стали достигается снижение приведенных затрат с 9,09 до 6,4 у. е./т [1].

По данным [5, 8 – 11], ковшевая доводка стали и чугуна порошковой проволокой с разными наполнителями внедрена на большинстве крупных металлургических предприятий СНГ, производящих продукцию ответственного назначения. При этом обеспечено повышение технического уровня производства стали до мировых стандартов, достигнуто снижение себестоимости металлопродукции на 0,5 – 2,3 у. е./т [10].

Впервые массовая поставка порошковых проволок была организована фирмами «Валурек» (Франция), «Хитачи» (Япония), «Пфицер» (США) [1]. В настоящее время во Франции, Германии, Италии, Ирландии, Австрии, Швеции, США, Японии, Чехии, Словакии, Болгарии, России, Украине производят порошковую проволоку с наполнителями, содержащими кальций, редкоземельные металлы, углерод, марганец, кремний, хром, титан, ванадий, ниобий, бор, барий, свинец, магний, теллур и другие элементы [4, 11, 12]. В Украине порошковую проволоку выпускает ОАО «Завод “Универсальное оборудование”» – крупнейший поставщик ее в страны СНГ; годовая мощность составляет 20 тыс. т. Причем по требованию заказчиков завод может производить порошковую проволоку из любых материалов или композиций [12]. Наиболее широко применяются порошковые проволоки прямоугольного и круглого сечения с одним или двумя замковыми соединениями, диаметром (размером) 8 – 20 мм и толщиной стальной оболочки 0,2 – 0,5 мм [1, 4, 11, 12].

Порошковая проволока успешно используется на АО «Северсталь» для корректировки содержания в стали углерода [5]. Применение проволоки с графитовым наполнителем для науглероживания конвертерной стали исключает выделение угарного газа, повышает степень усвоения углерода металлом до 95% и обеспечивает его стабильное содержание в готовом продукте с минимальным колебанием результатов анализа между отдельными плавками. Усвоение углерода из порошковой проволоки существенно выше, чем при его вдувании в металл по действующей технологии коксиком на установках доводки металла, когда степень усвоения 45 – 60%. В работе [5] показано также, что технологический процесс обработки чугуна магниевой проволокой позволяет по сравнению с продувкой чу-

гуна гранулированным магнием через погружную фурму снизить на 30 – 40% расход магния.

В конвертерном производстве ОАО «Северсталь» впервые в мировой практике разработана и внедрена технология внепечного микролегирования стали ниобием и ванадием из порошковых проволок, обеспечивающая 85 – 90% усвоения ниобия и 90 – 95% ванадия, при этом выдерживается требуемый уровень механических и других свойств проката [5]. Это позволило, в частности, за счет снижения энергетических и материальных затрат повысить экономическую эффективность легирования по сравнению с использованием для этой цели кускового феррониобия.

В работе [8] показано, что при выплавке металла на ОАО «Днепро-спецсталь» без обработки на установке печь-ковш усвоение кальция из Si – Ca проволоки составило 14 – 18%, при обработке почти столько же – 13 – 23%. В то же время использование кускового Si–Ca в ковше дает усвоение кальция не более 5%.

Возможность использования на НЛМК при производстве качественной низколегированной трубной стали порошковой проволоки с наполнителем из силикокальция позволила в 2 – 2,5 раза снизить расход порошка силикокальция по сравнению с технологией его ввода в сталь с помощью пневмонасосов и существенно улучшить экологию процесса: количество пыли над ковшом снизилось более чем в 16 раз [9].

На основе анализа опытно-промышленных данных по внедрению технологии обработки расплавов проволоками подтверждается факт, что изложенная технология эффективнее конкурирующих (вдувание порошков, ввод кусковых добавок в ковш или при выпуске плавки).

К настоящему времени разработаны и применяются два способа ввода порошковой проволоки в металл [4, 12]:

1) инерционный метод подачи – проволока подается в ковш с вращающейся шпули;

2) безынерционная подача с неподвижного бунта.

Второй метод получил более широкое распространение, так как исчезла необходимость применения тормозящего устройства при размотке шпули и не тратится время на замену пустой шпули в разматывающем устройстве.

Технология ввода проволоки под уровень расплава хотя и не является слишком сложной, однако характеризуется некоторыми особенностями. Авторами работ [5, 8, 9, 13 – 15] показано, что для улучшения усвоения вводимой в расплав добавки и ее равномерного распределения в объеме ковша, а также обеспечения десульфуризирующего эффекта силикокальция необходима одновременная обработка ковшевой ванны аргоном. Обработка расплава проволокой осуществляется как во время донной продувки через пористые пробки, так и верхней через погружную фурму.

Скорость ввода проволоки в расплав и угол ее отклонения от вертикали при вводе являются существенной особенностью технологии, поскольку в значительной мере определяют глубину погружения проволоки под

уровень расплава и, как следствие, степень и качество усвоения добавки [16]. ОАО «Завод “Универсальное оборудование”» постоянно проводит работы по усовершенствованию конструкций трайб-аппаратов, предназначенных для подачи проволоки. В зависимости от вида подаваемой проволоки и условий обработки (емкость ковша, постановочное место) потребителю поставляются трайб-аппараты необходимой модификации и с оптимальным диапазоном скоростей подачи проволоки [12]. Характеристики проволоки, такие как диаметр, толщина стальной оболочки, вид наполнителя и степень заполнения наполнителем, являются первоопределяющими факторами кинетики плавления проволок в расплаве и должны выбираться в зависимости от других условий обработки.

Место ввода проволоки на зеркале металла при аргонной продувке ковша в значительной мере обуславливает степень и качество усвоения добавки. Во-первых, определяют ввод проволоки либо через слой шлака, либо в область оголенного металла, во-вторых – возможность расплавления добавки в восходящем или нисходящем потоке металла, от чего существенно зависят продолжительность ее усреднения в объеме ковша и возможность выноса расплавленной добавки в шлак восходящими потоками металла.

Таким образом, видно, что на степень и качество усвоения добавок проволоки все перечисленные выше технологические параметры обработки (характеристики проволоки, скорость и место ввода на зеркале металла, размеры и объем ковша, угол отклонения от вертикали при вводе, температура металла, наличие шлака в месте ввода проволоки, интенсивность и вид продувки) оказывают комплексное влияние, и только взаимный учет всех параметров обработки может позволить установить рациональные и эффективные режимы обработки расплавов проволоками. Следует также принимать во внимание, что качество и продолжительность усвоения проволоки в ковше определяются рядом теплофизических и физико-химических процессов при плавлении или растворении проволоки и наполнителя, поскольку кинетика их протекания обуславливает продолжительность плавления добавки.

К настоящему времени для получения информации о степени и качестве усвоения добавок проведено достаточно большое количество обработок опытных плавок проволоками на УКДМ [1, 3, 5 – 10, 13, 15 – 18]. В работе [15] отмечено, что по технологии внепечной обработки металла проволоками на предприятиях Украины, России, Беларуси, Молдовы порошковыми проволоками производства ОАО «Завод “Универсальное оборудование”» обработано более 18 млн т чугуна и стали, что в значительной степени позволило обобщить накопленный промышленный опыт. В работах [5, 9, 10, 15 – 18] отмечено, что данные, полученные в результате обширных промышленных исследований, позволили выработать принципиальную концепцию оптимальной технологии внепечной обработки металла порошковыми проволоками с кальциевыми наполнителями. На ос-

нове накопленного опыта в работе [15] предложена формула для скорости ввода проволоки с кальциевым наполнителем в зависимости от высоты ковша, температуры стали, диаметра и толщины оболочки проволоки. Однако в этой же статье отмечено, что, несмотря на накопленные эмпирические знания по применению порошковых проволок в расплавах и достаточно широкое использование данной технологии, на разных предприятиях результаты обработки далеко неоднозначны как по количеству вводимого кальция, так и по его усвоению и остаточному содержанию.

Порошковая проволока представляет собой сложный многофазный объект, включающий одну и более твердую фазу, а также газообразную – воздух. При нагреве проволоки могут иметь место следующие процессы [19]:

- плавление реагентов внутри стальной оболочки, протекающее с эндотермическим тепловым эффектом;
- образование растворов или химических соединений между компонентами проволоки, сопровождающееся либо экзотермическим, либо эндотермическим тепловым эффектом;
- взаимодействие расплавленного реагента с материалом оболочки;
- окисление реагентов кислородом воздуха, находящегося внутри проволоки, и образование нитридов – экзотермические реакции;
- испарение реагентов в случае использования наполнителя на основе кальция, магния и т. д. – эндотермический процесс.

Таким образом, при введении в сталь порошковой проволоки с высокоактивными реагентами, обладающими большим сродством к кислороду (кальций, магний, силикокальций, титан, силикобарий, РЗМ и др.), можно ожидать повышенной скорости растворения за счет внутреннего источника теплоты.

При вводе порошковой проволоки с силикокальцием СК-30 и алюминиевой катанки за основополагающие режимы приняты следующие факторы:

- добавки кальция должны вводиться на максимально возможную глубину для обеспечения повышения степени его усвоения, при этом температура освободившихся от оболочки проволоки частиц силикокальция должна быть как можно более низкой, что объясняется особенностями процесса усвоения кальция железоуглеродистым расплавом;
- процесс обработки расплава проволокой для введения необходимого количества добавки должен производиться за минимальный промежуток времени, что обуславливается строгой ограниченностью во времени процессов внепечной обработки металла [4]. Технологические режимы ввода проволоки должны полностью исключать аварийные ситуации запутывания проволоки или ее выход на поверхность шлака;
- продолжительность усреднения в объеме ковша расплавленной добавки должна быть минимальной для уменьшения продолжительности продувки и снижения расхода аргона на продувку ковша.

В настоящее время на РУП БМЗ применяется порошковая проволока, изготавливаемая по ТУ 05400783-006–97. Материал оболочки – сталь

08Ю, ПП-10А-2-130 диаметром 10 мм, с массой в одном метре 130 г, заполненная силикокальцием (ГОСТ 4762–71), и ПП-10Б-1.2.3.4-37-30-20-15 диаметром 10 мм с массой в одном метре магния гранулированного – 37 г (ТУ 48-10-54–78), силикокальция – 30 г (ГОСТ 4762 – 71), ферротитана – 20 г (ГОСТ 4761 – 91), ферросилиция – 15 г (ГОСТ 4763 – 79).

Ввод пруткового алюминия и порошковой проволоки производится вертикально к зеркалу металла для исключения аварийных ситуаций выхода проволоки на поверхность ковша. Проволока вводится у борта сталеразливочного ковша, чтобы нисходящие потоки металла в этой зоне не способствовали ее выносу на поверхность. Это содействует исключению аварийных ситуаций выхода проволоки на поверхность ковша в виде петли.

Следует отметить, что результаты опытно-промышленных исследований технологических параметров обработки расплавов проволоками хотя и обеспечивают усвоение добавок, но не являются унифицированными, т. е. они получены для определенных температур стали, масс металла, характеристик проволоки. Существенный недостаток накопленных опытных данных: они не отражают комплексного взаимовлияния технологических параметров на степень и качество усвоения добавки.

Высокая температура, непрозрачность и агрессивность жидкого металла, а также дорогостоящие натурные эксперименты не позволяют достаточно эффективно в промышленных условиях исследовать процессы усвоения проволоки, поэтому для их изучения необходимо использование методов математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Квессир А., Буссард Р.* Применение проволок с наполнителем при внепечной обработке // СІТ. Revue de Metallurgie. – 1984. – № 8-9. – С. 641 – 650.
2. *Вихлевицук В. А., Харахулах В. С., Черевко В. П.* Внепечная обработка конвертерной стали: Достижения и перспективы развития // Металл и литье Украины. – 1995. – № 7-8. – С. 7 – 9.
3. Внепечная обработка в конвертерном цехе комбината им. Ильича / Э. П. Шебаниц, А. А. Ларионов, А. В. Побегайло и др. // Металл и литье Украины. – 1997. – № 10. – С. 21 – 23.
4. *В. А. Вихлевицук, В. С. Харахулах, С. С. Бродский.* Ковшевая доводка стали // Системные технологии. – Днепропетровск, 2000. – 190 с.
5. Обработка металла в ковшах порошковой проволокой с различными составами наполнителей / А. Ф. Каблуковский, С. И. Ябуров, А. П. Никулин и др. // Тр. 4-го конгр. сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1997. – С. 273 – 277.
6. Технология обработки стали в ковше порошковой проволокой с углеродсодержащим наполнителем / Д. А. Дюдкин, В. П. Онищук, В. В. Сисиленко и др. // Сталь. – 1998. – № 9. – С. 16 – 18.

7. *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. – № 1. – P. 26 – 31.

8. Повышение качества электростали при использовании Si – Ca порошковой проволоки / В. В. Лоза, С. С. Казаков, Л. Н. Король и др. // Тр. 5-го конгр. сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1999. – С. 345 – 346.

9. Опыт обработки металлических расплавов порошковыми проволоками на металлургических предприятиях СНГ / Ю. И. Бать, Д. А. Дюдкин, В. М. Титиевский, В. П. Онищук // Тр. 4-го конгр. сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1997. – С. 281 – 284.

10. *Дюдкин Д. А., Бать Ю. И., Онищук В. П.* Обработка стали порошковой проволокой и порошкообразными материалами // Тр. 5-го конгр. сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1999. – С. 337 – 342.

11. Порошковая проволока для внепечной обработки металла / А. Ф. Каблукowski, С. И. Ябуров, А. Н. Никулин и др. // Электromеталлургия. – 1998. – № 3. – С. 24 – 28.

12. Освоение промышленного производства порошковых проволок для обработки металлургических расплавов / В. М. Титиевский, Д. А. Дюдкин, Ю. Т. Шевченко и др. // Тр. 4-го конгр. сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1997. – С. 279 – 281.

13. Эффективность различных способов внепечного рафинирования стали порошкообразным силикокальцием / В. А. Вихлевщук, А. С. Стороженко, В. П. Пиптюк, С. Г. Мельник // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 5. – С. 21 – 22.

14. *Edheth G., Diener A., Pluschkell W.* Model computations on the injection of an aluminum wire into a steel melt // Arch. f.d. Eisenhüttenwes. – 1978. – 49. – P. 563 – 568.

15. Повышение качества металла обработкой расплава порошковой проволокой / Д. А. Дюдкин, Ю. И. Бать, В. П. Онищук // Тр. 5-го конгр. сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1999. – С. 337 – 342.

16. Технология микролегирования и модифицирования стали порошковой алюмокальциевой проволокой / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко, В. П. Онищук и др. // Тр. 5-го конгр. сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1999. – С. 348 – 349.

17. Технология обработки стали порошковой проволокой в сталеразливочном ковше / В. А. Вихлевщук, В. М. Черногрицкий, Г. Г. Подопрigора и др. // Черн. металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1991. – Вып. 12. – С. 39 – 40.

18. Эффективность использования порошковой проволоки для обработки стали в сталеразливочном ковше / В. А. Вихлевщук, В. М. Черногрицкий, В. М. Жолоб и др. // Сталь. – 1993. – № 8. – С. 29 – 30.

19. *Никулин А. Ю., Девятков Д. Х., Алфимова Н. А.* Математическая модель процесса растворения порошковой проволоки в жидкой стали при внепечной обработке в ковше // Черная металлургия стран СНГ в XXI веке. – М.: Металлургия, 1978. – Т. 3. – С. 65 – 69.