

УДК 669.184.224.66: 660.235.001.5

**В.П.Корченко, Л.Г.Тубольцев, В.Ф.Поляков, Н.И.Падун,
Т.С.Семыкина, А.М.Шевченко**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ В КОНВЕРТЕРАХ С КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКОЙ НИЗКО- И СВЕХНИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Исследованы технологические возможности заключительных этапов кислородно-конвертерного процесса с комбинированной продувкой для обеспечения ряда ключевых параметров, определяющих качество металла и технико-экономические показатели процесса, в т.ч. и возможности для глубокого обезуглероживания металла.

Современное состояние вопроса.

В 2004 г. в Украине было выплавлено 19,9 млн.т кислородно-конвертерной стали. В конвертерных цехах производство стали приближается либо превышает докризисный уровень. Конвертерное производство вплотную подошло к этапу модернизации, одним из элементов которой является реализация прогрессивной технологии с комбинированной продувкой. Известно, что эта технология широко используется за рубежом и обеспечивает снижение энерго- и материалоемкости производства металла, повышение качества стали, возможность производства продукции со специальными свойствами [1,2]. В таких условиях возрастает потребность в информации об особенностях и возможностях технологий выплавки металла в конвертерах с комбинированной продувкой и, особенно, возможностях глубокого обезуглероживания металла [3].

Методика и результаты исследований.

На экспериментальной базе ИЧМ было проведено исследований возможностей технологии с комбинированной продувкой для получения металла с низким и сверхнизким содержанием углерода, в т.ч. для листовой продукции. Опытные плавки проводили в 1,5-т конвертере. Чугун расплавляли в 1,5-т дуговой электропечи. Известь вводили двумя добавками (с началом и по ходу продувки). Со второй добавкой извести вводили плавиковый шпат. Для подачи кислорода использовали односопловую верхнюю фурму с критическим диаметром сопла 8,3 мм. Для подачи нейтрального газа (азота) применяли трубчатые донные фурмы диаметром 3 и 4 мм в количестве 3-х штук. Положение верхней фурмы по ходу продувки составляло 800 мм от уровня спокойной металлической ванны. Пробы металла и шлака из конвертера отбирали зондом по ходу продувки либо при повалках. При отборе проб осуществляли измерение температуры металла. .

Основные методические и технологические параметры опытных плавок приведены в таблице.

Таблица. Технологические показатели опытных плавков

№	Технологические показатели	Min значение	Max значение
1	Вес чугуна, кг	1397	1467
2	Вес металлолома, кг	40	100
3	Общий вес металлошихты, кг	1496	1507
4	Температура чугуна, °С	1305	1315
5	Химический состав чугуна, %		
6	Углерод	3,55	4,32
7	Сера	0,0020	0,0093
8	Фосфор	0,110	0,160
9	Марганец	0,42	0,74
10	Кремний	0,48	0,83
11	Время 1-й добавки (известь 60 кг), с	40	56
12	Время 2-й добавки (известь 40 кг: CaF ₂ 4 кг), мин	5	6
13	Расход извести, кг/т стали	71,42	71,42
14	Расход O ₂ на продувку, м ³ /мин	5,5	5,5
15	Расход O ₂ на продувку, м ³ /т стали	48,0	64,82
16	Расход O ₂ на передув, м ³ /мин	5,5	5,5
17	Расход O ₂ на передув, м ³ /т стали	3,9	11,78
18	Расход N ₂ на продувку, м ³ /мин	0,065	0,22
19	Расход N ₂ на продувку, м ³ /т стали	0,64	2,22
20	Расход N ₂ на передув, м ³ /мин	0,065	0,47
21	Расход N ₂ на передув, м ³ /т стали	0,046	0,80
22	Расход N ₂ на промывку (продувку без подачи O ₂), м ³ /мин	0,10	0,60
23	Расход N ₂ на промывку (продувку без подачи O ₂), м ³ /т стали	0,14	0,89
24	Длительность передува после полного падения факела, мин	1	3
25	Длительность продувки нейтральным газом после полного падения факела, мин	2	3
27	Длительность продувки нейтральным газом после передува, мин	2	3
	Степень окисления элементов (по конечной пробе), %		
27	Марганец	77,42	94,28
28	Фосфор	91,18	97,75
29	Сера	-37,8	39,78

Известно, что лабораторные конвертеры отличаются высокими тепловыми потерями. В связи с этим расход лома был уменьшен по сравнению с промышленными плавками.

Исследовались технологии конвертерной плавки с комбинированной продувкой, которые включали следующую совокупность заключительных этапов:

1. начало падения факела;
2. полное падение факела;
3. передув после полного падения факела;
4. продувка (промывка) металла нейтральным газом после передува;
5. продувка (промывка) металла нейтральным газом после полного падения факела.

Проводилось сравнительное исследование технологий, включающих заключительные этапы плавки 1→2→3→4 и 1→2→5. Начало падения факела определялось визуально с момента снижения интенсивности и светимости факела, т.е. является в некоторой степени субъективным параметром. Однако, название этого этапа плавки является общепринятым и широко используется в практике кислородно-конвертерного производства для оценки состояния конвертерной ванны. Полное падение факела определялось моментом исчезновения факела и бурного выделения черного дыма (этапа горения железа).

Длительность периода передува после полного падения факела и периодов продувки нейтральным газом задавали в соответствии планом проведения эксперимента (таблица).

Время начала опытных плавок исчислялось с момента затопления донных фурм при подъеме конвертера. Начало падения факела происходило после 660-795 с после начала продувки и характеризуется достаточно большим временным разбросом. Полное падение факела происходило через 712–895 с. Разница во времени между верхним и нижним пределом периода падения факела составляет 2 мин 15 с, а полного падения факела 2 мин.45 с. Однако разница во времени между началом и полным падением факела составляет по верхнему пределу опытных совокупностей 1,5 мин, а по нижнему – 0,87 мин. По сравнению с длительностью продувки до начала падения факела (11-13 мин 15 с) период падения факела достаточно кратковременный, но этот период характеризуется значительным изменением ряда технологических параметров.

На опытных плавках отмечено повышение температуры в период падения факела на величину до 15-20⁰С (рис.1). Отмечается стабильное повышение температуры металла в период передува и естественное (тем более для лабораторного конвертера) снижение температуры в периоды продувки нейтральным газом без подачи кислорода. Лабораторный конвертер характеризуется большими потерями тепла по ходу процесса, что учитывалось и при шихтовке плавки (таблица). Следует отметить, что достигнутое на опытных плавках значение температурного параметра, особенно для нижних пределов совокупностей данных по технологическим этапам, несколько занижены и не могут быть типичными для промышленных конвертеров. Однако, в целом, технологические процессы на

всех исследуемых заключительных этапах технологии с комбинированной продувкой находились в пределах, характерных для реакций и кинетики сталеплавильных процессов (рис.1). На всех представленных рисунках левый столбик представляет максимальное значение из совокупности данных, правый столбик – минимальное значение.



Рис.1. Изменение температуры металла по заключительным этапам кислородно-конвертерной плавки.

Изменение содержания углерода по ходу плавки представлено на рис.2.

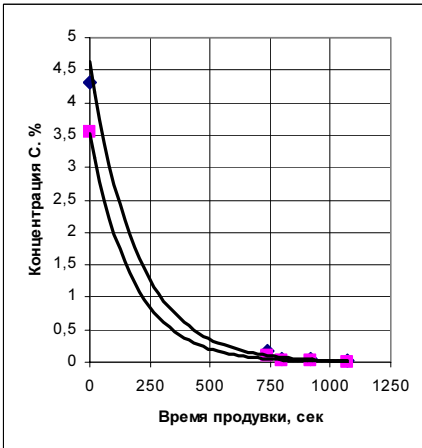


Рис.2. Изменение содержания углерода в металле по ходу плавки.

В укрупненном масштабе изменение содержания углерода по заключительным этапам плавки представлено на рис.3. К началу падения факела содержание углерода в металле составляет 0,089–0,170%, при полном падении факела – 0,021–0,053%, после передувки – 0,014–0,040%, после продувки нейтральным газом – менее 0,010–0,020%.

Во все технологические этапы процесса после начала падения факела содержание углерода стабилизируется и снижается.

Одной из главных задач исследования было определение элементов технологий, обеспечивающих получение как можно более низкого содер-

жания углерода в металле. Исходя из этого, варианты, обеспечившие содержание углерода менее 0,010%, проанализировали подробнее (рис.4).

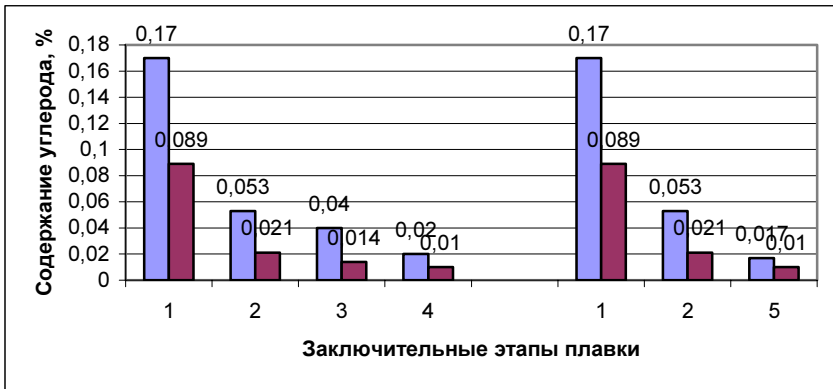


Рис.3. Изменение содержания углерода в металле по заключительным этапам плавки.

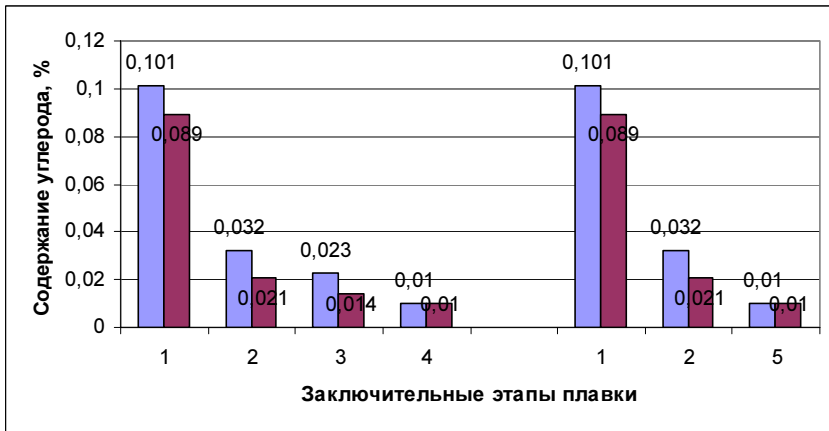


Рис.4. Изменение содержания углерода в металле по заключительным этапам плавки, обеспечившим содержание углерода в металле менее 0,01%.

При сопоставлении представленных на рис.3 и 4 данных выявлены следующие параметры, обеспечившие содержание углерода менее 0,010%:

содержание углерода в начале падения факела, при полном падении факела и после передувки находится близко к минимальным значениям анализируемых совокупностей;

длительность продувки нейтральным газом после передувки – 2-3 мин;

длительность продувки нейтральным газом после полного падения факела – 3 мин, т.е. максимальные значения для исследованных вариантов.

При проведении опытных плавков использовали чугун с низким содержанием серы – 0,0020–0,0093%. На ряде плавков, вследствие более высокого содержания серы в металлоломе, отмечена отрицательная степень десульфурации (таблица). Динамика окисления серы для плавков с положительной степенью десульфурации представлена на рис.5. От начала падения факела до полного падения факела и до окончания передуга наблюдается стабильное снижение содержания серы в металле – от 0,0045–0,0076% до 0,0030–0,0043%.

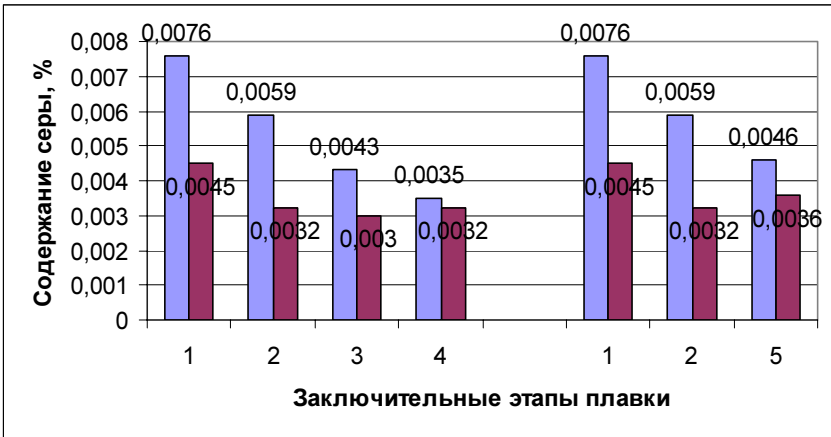


Рис.5. Изменение содержания серы в металле по заключительным этапам плавки.

На этапах продувки нейтральным газом отмечено некоторое увеличение нижнего предела концентрации серы. Так, при продувке после полного падения факела содержание серы изменилось от 0,0032–0,0059% до 0,0036–0,0046%, а при продувке после этапа передуга – от 0,0030–0,0043 до 0,0032–0,0035%. Такая динамика, скорее всего, связана с изменением химсостава шлака в периоды продувки нейтральным газом. С одной стороны, достигнутые на опытных плавках концентрации серы в большинстве случаев нереальны для существующей промышленной практики. С другой стороны, эти данные представляют интерес для оценки возможностей конвертерных технологий с комбинированной продувкой.

Содержание фосфора в чугуне находилось в пределах – 0,110–0,160% (таблица), т.е. в пределах ГОСТов и современной промышленной практики металлургических предприятий Украины. Отмечается, что к началу падения факела верхний предел содержания фосфора составляет 0,060%, что выше требований верхнего кондиционного предела содержания фосфора (0,040%) для многих марок стали (рис.6).

К моменту полного падения факела обеспечивается концентрация фосфора от менее 0,003 до 0,040%, т.е. в пределах требований для широкого круга марок стали.



Рис.6. Изменение содержания фосфора в металле по заключительным этапам плавки.

На этапе передова верхний предел содержания фосфора снижается с 0,040 до 0,013%. Этапы продувки металла нейтральным газом после полного падения факела и после передова обеспечивают снижение содержания фосфора до уровня менее 0,003–0,0069% (рис.6).

К началу падения факела содержание марганца снижается от исходного в чугуне 0,42–0,74% до 0,090–0,310% (таблица, рис.7).

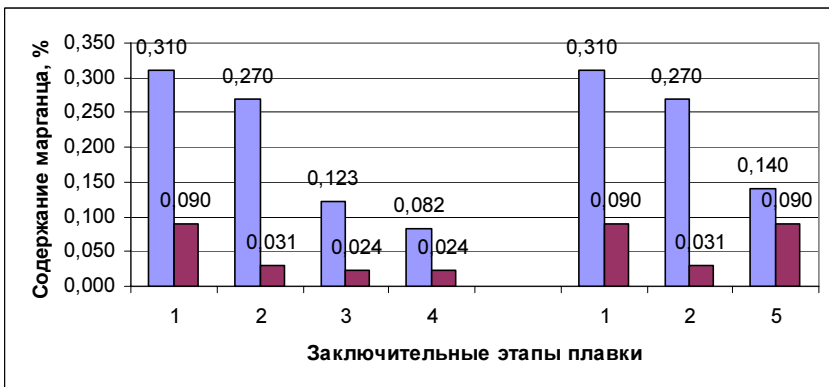


Рис.7. Изменение содержания марганца в металле по заключительным этапам плавки.

К моменту полного падения факела нижний предел концентрации марганца уменьшается с 0,090 до 0,031%, а верхний – с 0,310– до 0,270%. На этапе передувки нижний предел концентрации марганца изменяется незначительно – с 0,031 до 0,024%, а верхний более чем в 2 раза – с 0,270 до 0,123%. На рис.7 приведены данные в укрупненном плане, в основном, для общей оценки вероятных концентраций марганца на конечных этапах технологии с комбинированной продувкой. Для количественной оценки изменения концентраций марганца в периоды продувки нейтральным газом провели дополнительный поплавочный сопоставительный анализ. Определено, что при продувке нейтральным газом после полного падения факела содержание марганца несколько снижается – на 0,009–0,030%. Такая же тенденция и при продувке нейтральным газом после передувки, только величина снижения концентрации марганца уменьшается и составляет 0,003–0,015%.

Содержание кремния в металле к началу исследуемых этапов (к началу падения факела) от исходного – 0,48–0,83% по ходу продувки снизилось до величины менее 0,0100%. Минимальное значение из всей исследованной совокупности отобранных проб достигнуто в период передувки после полного падения факела и составляет 0,0055%. Значения содержания кремния, достигнутые в период полного падения факела и передувки после полного падения факела на этапе продувки нейтральным газом не уменьшаются. Напротив, в некоторых случаях отмечается тенденция увеличения, но в десяти тысячном знаке.

Содержание кислорода в металле на исследуемых заключительных этапах технологии с комбинированной продувкой находилось в пределах 0,0411–0,1199%, что соответствует уровню значений при чисто верхней кислородной продувке (0,040–0,12%) при содержаниях углерода 0,05–0,10% [4-5] (рис.8).

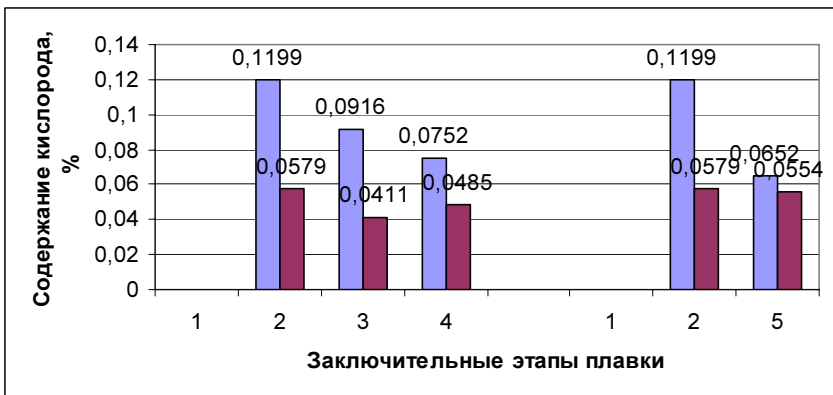


Рис.8. Изменение содержания кислорода в металле по заключительным этапам плавки.

Следует отметить, что содержание углерода на исследуемых этапах комбинированной продувки ниже и находится в пределах менее 0,01–0,053% (рис.3). В поэтапной динамике отмечаются следующие особенности. Концентрация кислорода в период передуха после полного падения факела снижается от 0,0579–0,1199% до 0,0411–0,0916% (рис.8), в то время как окисленность шлака увеличивается. Содержание железа общего в шлаке (суммарное железо в окислах FeO и Fe₂O₃) возрастает в этот период с 11,84 – 18,01% до 19,24–28,33% (рис.9). В периоды продувки нейтральным газом после полного падения факела и после передуха содержание кислорода в металле стабилизируется и в среднем снижается.

По окисленности шлака в эти периоды отмечаются следующие особенности. При продувки нейтральным газом после полного падения факела содержание железа общего стабилизируется и в среднем увеличивается с 11,84 – 18,01% до 16,48–21,51%. Такая же закономерность отмечается и при продувке нейтральным газом после передуха. Содержание железа общего изменяется от 19,24–28,33% до 23,24–28,18% (рис.9).

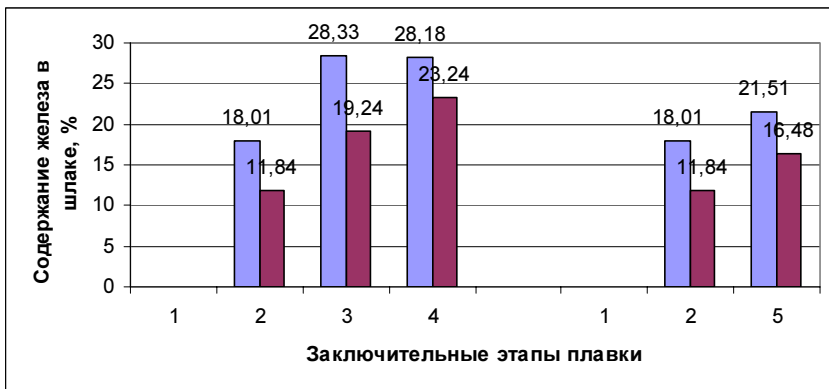


Рис.9. Изменение содержания железа общего в шлаке по заключительным этапам плавки

Вероятный механизм динамики окисленности металла и шлака связан с условиями перемешивания металла и шлака в анализируемые этапы технологии. К полному падению факела прекращается перемешивание конвертерной ванны за счет выделения СО при окислении углерода. В период передуха интенсивно окисляется железо металлической фазы и окислительный потенциал шлака возрастает. Однако, в результате недостаточного перемешивания металла и шлака и кратковременности этапа, дальнейшего насыщения металла кислородом не происходит. Напротив, отмечается определенная «промывка» металла нейтральным газом с удалением окислов, в т.ч. окиси железа.

К окончанию этапа падения факела (полное падение факела) основность шлака достигает высоких значений (3,34–4,65%). На этапах передувки и продувки нейтральным газом отмечается дальнейший рост основности (рис.10).

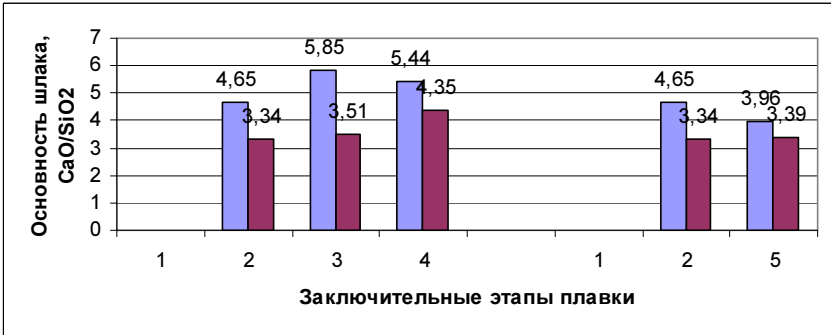


Рис.10. Изменение основности шлака по заключительным этапам плавки.

На опытных плавках в качестве нейтрального перемешивающего газа использовали азот. Естественно, предполагалось, что концентрация азота в металле может превысить требования, предъявляемые к кислородно-конвертерной стали. Однако, вопрос о фактических значениях вероятных концентраций азота был открытым. Также не было данных для оценки возможности ограниченного использования азота с целью экономии дорогостоящего инертного газа. Исходя из этих предпосылок в пробах металла определили концентрацию азота. Полученные данные представлены на рис.11.

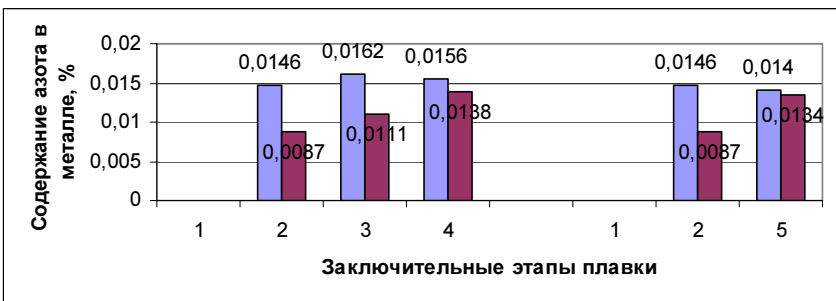


Рис.11. Изменение содержания азота в металле по заключительным этапам плавки.

Наиболее высокие концентрации азота после передувки (0,0216%) и после последующей продувки азотом (0,0234%) получены на плавке при

расходе азота в период передуву 0,47 м³/мин и 0,6 м³/мин в период продувки азотом, т.е. при максимальных расходах азота в эти периоды (таблица). Анализ динамики изменения концентраций азота в металле показывает, что в среднем повышение концентрации азота происходит в течение всех заключительных этапов плавки.

Заключение.

В результате проведенного исследования определена динамика изменения ряда параметров кислородно-конвертерной плавки с комбинированной продувкой на заключительных этапах процесса. Оценена роль конечных технологических этапов от падения факела до продувки нейтральным газом без подачи кислорода в решении вопросов обеспечения качества стали.

Заключительные этапы, по сравнению с длительностью продувки до начала падения факела, кратковременные, но они характеризуются значительными изменениями ряда важных технологических показателей. Именно на этих этапах достигаются низкие и сверхнизкие содержания углерода, фосфора и серы, снижается и стабилизируется содержание кислорода в металле. Все эти параметры определяют качество металла как по содержанию вредных примесей, так и по неметаллическим включениям. Особо следует отметить роль заключительных этапов в решении задач глубокого обезуглероживания металла. На заключительных этапах с комбинированной продувкой и продувкой металла только через донные фурмы решается комплекс вопросов получения стали высокого качества и стали со специальными свойствами. Получены количественные значения показателей, определяющих качество металла и технико-экономические показатели процесса.

1. *Технология* производства стали в современных конвертерных цехах / под ред. С.В. Колпакова. – М.: «Машиностроение», 1991. – 461 с.
2. *Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С.* Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Підручник. – Дніпропетровськ; «Дніпро-Вал», 2004. – 454 с.
3. *Охотский В.Б.* Термодинамика глубокого обезуглероживания при продувке металла // *Металл и литье Украины.* – 2005. – № 3–4. – С.29–30.
4. *Явойский В.И.* Теория процессов производства стали. – М.: «Металлургия», 1967. – 792 с.
5. *Металлургия* стали / под ред. В.И. Явойского, Г.Н. Ойкса – М.: «Металлургия», 1973 – 816 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Э.В. Приходько