

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ КИСЛОРОДНО- КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ УВЕЛИЧЕННОЙ ДОЛИ ЛОМА В МЕТАЛЛОШИХТЕ

Выполнена сопоставительная оценка возможностей кислородно-конвертерных технологий в условиях повышенной доли металлолома в шихте, в т.ч. при использовании недефицитных энергоносителей и организации дожигания отходящих газов в полости конвертера, а также экономическое сопоставление вариантов технологии конвертерной плавки.

Современное состояние вопроса. На металлургических предприятиях Украины порядка 44% всей выплавляемой стали производится в мартеновских цехах. В Программе развития ГМК определено расширение кислородно-конвертерного производства стали как наиболее прогрессивного.

В предыдущие годы постановка вопроса о выводе из эксплуатации мартеновских печей и сооружении конвертерных цехов, в основном, была связана с ограничениями по производству в мартеновских цехах стали перспективного сортамента из-за невозможности организации в них комплексной внепечной обработки и непрерывной разливки, а также из-за чрезвычайно тяжелых условий труда при ремонтах нижнего строения мартеновских печей.

В настоящее время острота проблемы резко усилилась из-за многократного увеличения стоимости природного газа, который является основным видом топлива мартеновских и двухванных печей. Поскольку расход природного газа в конвертерных цехах примерно в 10 раз ниже, чем в мартеновских, аргументы в пользу замены последних получили дополнительное весьма серьезное обоснование, что позволяет прогнозировать интенсификацию деятельности по осуществлению указанной замены. В связи с этим крайне актуальным и важным для народного хозяйства становится вопрос о рациональном использовании высвобождающегося металлолома, общее количество которого достигает порядка 9–10 млн.т в год.

Постановка задачи. Наиболее реальным направлением использования высвобождающегося металлолома является увеличение доли лома в шихте кислородных конвертеров. В стране имеется в наличии 19 конвертеров: 3 из них емкостью по 60 т, 12 – по 160 т, 2 – по 250 т 2– по 350 тонн. В 2006 году выплавлено более 21 млн.т конвертерной стали [1,2].

Определенные возможности увеличения доли лома в садке конвертеров имеются, в частности, за счет применения недефицитных энергоносителей (угля), организации дожигания отходящих газов в полости конвер-

тера, использования возможностей технологии с комбинированной продувкой. Эти приемы разрабатывались и использовались в предыдущие годы, в том числе при активном участии ИЧМ. Однако, круг изучаемых вопросов не предусматривал ряда аспектов, которые приобрели важное значение в современных условиях – энергетика, экономика, качество металла. На экспериментальной базе ИЧМ были проведены крупномасштабные исследования вариантов кислородно-конвертерных технологий с верхней и комбинированной продувкой, в т.ч. с организацией дожигания отходящих газов в полости конвертера и с применением различных теплоносителей. Как правило, достижение положительного результата в увеличении доли металлотома приводит к изменению ряда затратных показателей кислородно-конвертерного процесса. В целом, общий результат определяется по разности суммарной эффективности достигнутого уровня одних показателей и затрат, связанных с изменением других показателей.

Методика исследования. Для анализа полученных экспериментальных данных и сопоставления технологических и технико-экономических показателей были выделены базовые технологии (таблица). В качестве классификационных признаков определения базовых технологий кислородно-конвертерной плавки приняли способ подачи дутья, как наиболее существенный, а также характер технологических газов (нейтральный, окислительный). Исходя из принятых видовых отличий к базовым отнесли следующие технологии (в таблице базовые технологии обозначены символами I, II, III):

1. Технология с верхней продувкой кислородом в глухдонном конвертере;
2. Технология с комбинированной продувкой с подачей кислорода через верхнюю фурму и нейтрального газа (азота) через донные дутьевые устройства (металлические и керамические фурмы, пористые пробки);
3. Технология с комбинированной продувкой с подачей кислорода через верхнюю фурму и в оболочке защитного газа через донные фурмы.

Опытные плавки проводили в 1,5-тонном конвертере ИЧМ. Основные элементы реализации и методика были общими для всех исследуемых базовых технологий. Различия касались дутьевых устройств. Следует отметить, что опытные плавки отличались по химическому составу чугуна, конечному содержанию углерода в металле, окисленности конечного шлака, длительности продувки.

С целью корректного сопоставления вариантов технологий показатель прироста температуры металла ($T_{ст}-T_{чуг}$) и связанный с ним состав металлозавалки скорректировали, исходя из условий обеспечения одинакового состава чугуна по содержанию углерода (3,85%) и кремния (0,64%), одинакового прироста температуры за плавку (315⁰С), а также содержания железа общего в шлаке (13,6%) для тех вариантов технологий, на которых

изменение в концентрации железа общего в шлаке не является особенностью технологии, т.е. для условий комбинированной продувки.

При проведении анализа для расчетов были приняты наиболее достоверные для условий конвертерной плавки следующие исходные данные: тепловой эффект окисления одного кг кремния – 30857 кДж (7382 ккал); одного кг углерода – 11416 кДж (2731 ккал); одного кг железа – 4815 кДж (1152 ккал); теплоемкость стали – 0,84 кДж/кг град (0,2 ккал/кг град); количество тепла, затрачиваемого на передел одного кг лома – 1400 кДж (335 ккал) [3–12]. Для 1,5–тонного конвертера принята величина тепловых потерь, равная 25%, вес жидкой стали – 1400 кг, количество шлака – 15% от веса металлозавалки.

По ряду причин, связанных с технологией и условиями проведения опытных плавок, интенсивность и, соответственно, длительность продувки на них были различными. Поскольку тепловые потери на 1,5–тонном конвертере, ввиду малого веса садки велики и довольно сильно зависят от длительности продувки, варианты технологий, проведенные с высокой интенсивностью продувки, нельзя напрямую, т.е. без соответствующей корректировки, сопоставлять по расходу лома с принимаемым в качестве сравнительного варианта с верхней продувкой, который характеризуется меньшей интенсивностью. Для обеспечения корректного сопоставления фактические данные по длительности плавки с верхней продувкой были экстраполированы в область более низких значений, вплоть до условного варианта мгновенно проведенного процесса (без тепловых потерь). На основании проведенной корректировки была определена зависимость доли перерабатываемого лома в металлозавалке от длительности продувки плавки с верхней подачей кислорода (рис.1), также доля лома, которая может быть переработана при других вариантах процесса.

Результаты исследования. Результаты корректировочных расчетов количества лома и определения прироста доли перерабатываемого лома для исследованных вариантов технологий кислородно-конвертерной плавки по сравнению с процессом верхней продувки представлены в таблице. В таблице базовые технологии в пределах каждого варианта обозначены цифрой 1, а разновидности технологий, отличающиеся конструкцией верхней фурмы и в дополнительном использовании угля – цифрами 2, 3 и 4. При исследовании применяли следующие конструкции верхних дутьевых фурм: А – односопловая торцевая фурма с диаметром сопла 8,3 мм; В – 2-х ярусная с высотой 2-го яруса 200 мм; С – 2-х ярусная с высотой 2-го яруса 380 мм; D – 2-х ярусная с высотой 2-го яруса 400 мм; Н – 3-х сопловая торцевая с диаметром сопла 6,5 мм и углом наклона к оси фурмы 30°; К – 2-х ярусная фурма с 3-мя соплами в торце и с высотой 2-го яруса 200 мм; М – 2-х ярусная фурма с 3-мя соплами в торце и с высотой 2-го яруса 400 мм. Во 2-м ярусе каждой фурмы располагалось по 3 сопла диаметром 4,5 мм с углом наклона к оси фурмы 20°.

Таблица. Прирост доли перерабатываемого лома для различных вариантов технологий кислородно-конвертерной плавки по сравнению с технологией с верхней продувкой кислородом (на тонну стали)

Базовая технология	Варианты технологий	Конструкция верхней фурмы	Расход кускового угля		Скорректированное количество лома, %		Время продувки, мин	Количество лома*, %	Прирост количества лома за счет подачи азота		Прирост количества лома за счет дожигания		Прирост количества лома за счет подачи кислорода сверху и снизу		Прирост количества лома за счет добавки угля		Количество лома, кг/кг угля
			кг	кг/т	%	кг/т			%	кг/т	%	кг/т	%	кг/т	%		
I	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
	1	A	-	-	2,2	13,8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	B	-	-	7,9	13,0	3,7	-	-	4,2	45,0	-	-	-	-	-	-
	3	C	-	-	6,2	14,0	2,1	-	-	4,1	43,9	-	-	-	-	-	-
II	4**	A + уголь	15	10,7	4,5	16,3	2,2	-	-	-	-	-	-	-	2,3	24,6	2,3
	1	A	-	-	4,3	12,7	4,0	0,3	3,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	D	-	-	10,2	12,2	5,0	0,3	3,2	4,9	52,5	-	-	-	-	-	-
	3	B	-	-	10,9	12,9	3,8	0,3	3,2	6,8	72,9	-	-	-	-	-	-
III	4	C	-	-	10,7	12,15	5,0	0,3	3,2	5,4	57,9	-	-	-	-	-	-
	5**	D + уголь	15	10,7	15,7	13,8	10,2	0,3	3,2	4,9	52,5	-	-	-	5,5	58,9	5,5
	1	H	-	-	17,4	8,25	11,5	-	-	5,9	69,2	5,9	69,2	-	-	-	-
	2	K	-	-	17,4	9,0	10,2	-	-	7,2	77,1	5,9	69,2	-	-	-	-
4**	3	M	-	-	17,3	8,4	11,0	-	-	6,3	67,5	5,9	69,2	-	-	-	-
	4**	H+уголь	15	10,7	21,8	9,4	17,4	-	-	-	-	-	-	4,4	47,1	4,4	-

Примечание: * – количество лома на плавках с верхней продувкой при времени продувки, равном времени продувки сравнимого варианта; ** – Сравнительным вариантом для данной технологии являются варианты 1 каждой базовой технологии соответственно.

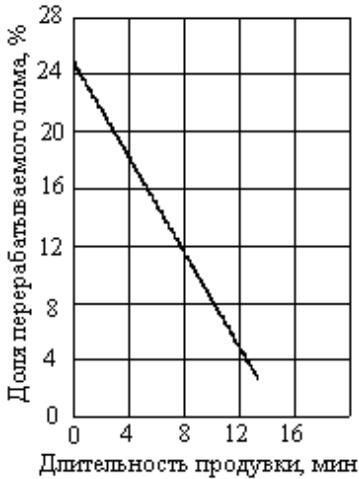


Рис.1. Зависимость доли перерабатываемого лома в металлозавалке от длительности продувки плавки с верхней подачей кислорода в 1,5-т конвертере.

Дополнительный приход тепла в конвертерную ванну достигается, в основном, за счет организации дожигания отходящих газов в полости конвертера. Организация дожигания заключается в техническом обеспечении подачи части верхнего кислородного дутья рассредоточенными струями на уровне или выше торца кислородной фурмы. Дополнительный приход тепла в металлическую ванну обеспечивался

также добавками кускового угля (антрацита). В опытных плавках с угольным теплоносителем также применялся металлический лом.

Анализ эффективности вариантов, предусматривающих увеличение степени дожигания, показывает, что направления изменения показателей являются одинаковыми для всех базовых технологий. Однако, численное значение величин изменения показателей находятся в зависимости от вида базовых технологий и связанных с ним возможностей организации дожигания. Отмеченное относится также и к применению внешнего теплоносителя (угля).

Показателем, определяющим величину (уровень) дожигания отходящих газов в полости конвертера являются концентрация CO_2 и CO в отходящих газах. Динамика изменения содержания этих газов по ходу продувки плавки представлена на рис.2 и 3. Величина усредненных за плавку показателей содержания CO_2 по вариантам 1, 2, 3 и 4 составляет 18,5%, 23,5%, 41,0% и 38,7% соответственно, т.е. наибольшая при вариантах 3 и 4. Представленные на рисунках данные показывают, что наиболее рациональными для организации дожигания и, следовательно, ввода угольных теплоносителей являются базовые технологии с комбинированной продувкой, а наименее рациональной – технология с верхней продувкой кислородом в глуходонном конвертере.

Применение 2-х ярусных фурм использованных конструкций в условиях продувки в глуходонном конвертере позволило увеличить расход лома на 4,1–4,2% или на 43,9–45,0 кг/т стали. Переход на комбинированную продувку с подачей нейтрального газа через днище без организации дожигания обеспечивает увеличение расхода лома на 0,3% (3,2 кг/т стали) за счет технологических преимуществ. Применение 2-х ярусных фурм при такой базовой технологии позволяет дополнительно повысить расход

лома на 4,9–6,8% (52,5–72,9 кг/т стали). Полученные результаты достаточно точно совпадают с данными исследования вариантов технологии в промышленных условиях [13–14].

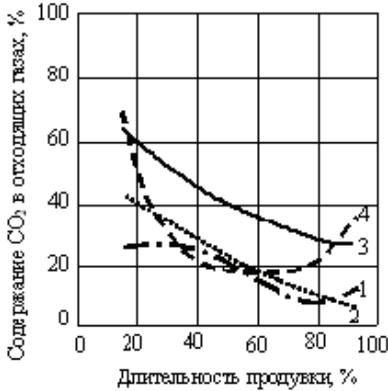


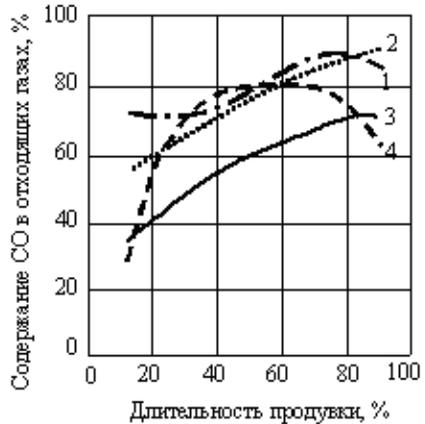
Рис. 3. Изменение содержания CO в отходящих газах по ходу продувки (обозначения как на рис. 2).

В условиях комбинированной продувки кислородом сверху и снизу расход лома, по сравнению с верхней продувкой, повышается на 5,9% (69,2 кг/т стали). Организация дожига путем использования 2-х ярусных фурм обеспечивает в целом прирост расхода лома на 6,3–7,2% (67,5–77,1 кг/т стали), т.е. на 0,4–1,3% выше по сравнению с базовой технологией.

Организация дожига повышает показатели использования угольного топлива в кислородных конвертерах. По экспериментальным данным при вводе угля в количестве 10,7 кг/т стали в условиях верхней продувки расчетный прирост добавки лома составил 2,3% (24,6 кг/т стали), что практически полностью совпадает с рекомендуемыми корректировками для промышленных конвертеров [13]. Технология с комбинированной продувкой с подачей нейтрального газа и применением 2-х ярусной фурмы (с организацией дожига) при такой же величине добавки угля обеспечивает прирост расхода лома на 5,5% (89,9 кг/т стали). Количество дополнительного лома на один кг угля увеличивается с 2,3 до 5,5 кг лома/кг угля.

Рис. 2. Изменение содержания CO₂ в отходящих газах по ходу продувки.

1 – верхняя продувка кислородом; 2– продувка кислородом сверху и нейтральным газом через днище; 3– продувка кислородом сверху через 2-х ярусную фурму и нейтральным газом через днище; 4– продувка кислородом сверху и через донные фурмы.



Технология комбинированной продувки кислородом сверху и снизу при добавке угля 10,7 кг/т стали обеспечивает прирост доли лома на 4,4% (47,1 кг/т стали), а эффективность использования угля – 4,4 кг лома/кг угля.

Реализация технологии с комбинированной продувкой требует усложнения конструкции днища и дополнительных систем подачи нейтрального газа, кислорода и защитного газа и, следовательно, дополнительных конструкционных и эксплуатационных затрат, которые могут перекрываться за счет преимуществ технологий в технологических возможностях и технико-экономических показателях.

Комбинированная продувка требует дополнительного расхода нейтрального газа (можно применять азот) и природного газа (для защиты донных кислородных фурм). По экспериментальным данным расход азота составляет порядка 0,7 м³/т, а природного газа – 2,2 м³/т. Однако, при комбинированной продувке, за счет дополнительного перемешивания конвертерной ванны и, следовательно, приближения реакций к равновесному состоянию, расход кислорода сокращается, и, кроме этого, улучшаются условия получения низкого содержания углерода в металле, снижается окисленность шлака и степень окисления марганца. При комбинированной продувке с подачей через донные фурмы нейтрального газа снижение общего расхода кислорода составляет порядка 2 м³/т, а при подаче кислорода через донные фурмы кислорода – порядка 6 м³/т. Использование азота для донной продувки приводит к увеличению концентрации азота в стали примерно в 2 раза, а при применении природного газа для защиты донных фурм – на 25–30%.

При использовании технологии с комбинированной продувкой сокращается время продувки. При равном минутном расходе кислорода в комбинированной продувке с подачей через днище нейтрального газа длительность продувки металла снижается на 1 мин. При комбинированной продувке с подачей кислорода через донные фурмы возможности сокращения времени продувки значительно возрастают. Так, при минутном расходе кислорода через донные фурмы, составляющем порядка 44% расхода через верхнюю фурму, в условиях эксперимента время продувки сократилось на 4,5 мин. В условиях скоротечных конвертерных процессов такое сокращение составляет значительную величину даже от всего цикла плавки.

Анализ экономической эффективности исследованных вариантов технологий выполнили по изменению затрат на металлошихту (чугун + металлолом), которые составляют основную часть (порядка 85%) себестоимости стали, исходя из возможностей замены чугуна металлоломом.

Для обеспечения прогнозного характера расчетов анализировали также динамику цен. Анализ показал, что отмечается постоянный рост цен на чугун и металлолом, а также приближение цен внутреннего рынка к мировым. При резком изменении цен разница между стоимостью чугуна и

металлолома составляет от 20 до 85 долл/т. В периоды стабилизации цен разница между стоимостью чугуна и металлолома составляет порядка 40 долл/т. Разница в ценах 40 долл/т была принята для расчета затрат на металлошихту при замене чугуна ломом.

Заключение. В глуходонном конвертере при использовании обычных фурм, не предусматривающих организацию дожигания увеличение расхода лома возможно только при использовании теплоносителей. Наиболее приемлемым в этом случае способом увеличения доли лома является использование угля, применение которого в количестве порядка 11 кг/т стали обеспечивает увеличение расхода лома на 24 кг/т стали и снижение затрат на металлошихту примерно на 1 долл/т стали. При использовании в глуходонном конвертере 2-х ярусных фурм снижение затрат на металлошихту составляет порядка 1,7–1,8 долл/т стали.

Переход на комбинированную продувку с подачей нейтрального газа через днище обеспечивает при применении обычных фурм снижение затрат на металлошихту примерно на 0,13 долл/т стали. Использование 2-х ярусных фурм сопровождается снижением затрат на 2–3 долл/т стали. При варианте технологии с 2-х ярусными фурмами и добавками угольного топлива снижение затрат на металлошихту достигает 4,5 долл/т стали.

В условиях комбинированной продувки кислородом сверху и снизу снижение затрат на металлошихту составляет 2,7 долл/т стали при использовании обычных фурм и 2,7–3,1 долл/т стали при применении 2-х ярусных фурм. Незначительная эффективность применения 2-х ярусных фурм объясняется более значительными (в этих условиях) возможностями организации дожигания отходящих газов обычными торцевыми фурмами. Комбинированная продувка кислородом и использование угольного топлива обеспечивает снижение затрат на величину порядка 4,5 долл/т стали.

В целом, анализ результатов оценки затрат на металлошихту подтверждает преимущества применения в кислородных конвертерах технологий с комбинированной продувкой, по крайней мере, в отношении возможностей замены чугуна ломом.

По результатам проведенного исследования также установлено, что реализация технологий в комбинированной продувкой обеспечивает улучшение ряда других технологических и технико-экономических показателей кислородно-конвертерной плавки: получение низких содержаний углерода в металле, снижение окисленности шлака и степени окисления марганца, сокращение расхода кислорода и продолжительности продувки.

Таким образом, украинская черная металлургия обладает значительными резервами в повышении конкурентоспособности металлопродукции за счет реализации технологий кислородно-конвертерной плавки с комбинированной продувкой в существующих конвертерных цехах, а также при строительстве новых взамен мартеновских цехов.

1. *Харахулах В.С., Лесовой В.В., Бродский С.С.* Итоги работы и перспективы технического перевооружения сталеплавильного производства в Украине // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – №7. – С.13–16.
2. *Статистика* // *Металл Украины*. – №1 (396). – 1–15 января 2007. – С.23.
3. *Баттизманский В.И.* Механизм и кинетика процессов в конвертерной ванне. М.: *Металлургия*, 1960. – 283 с.
4. *Перлов Н.И., Квитко М.П.* Прогресс в кислородно-конвертерном производстве. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии., 1963. –422 с.
5. *Ойкс Г.М., Иоффе Х.М.* Производство стали. Расчеты. –Государственное научно-техническое издательство литературы по черпной и цветной металлургии., 1964. –552 с.
6. *Туркенич Д.И.* Автоматизация процесса плавки в кислородном конвертере. – М.:Металлургия, 1966. –135 с.
7. *Афанасьев С.Г.* Краткий справлчник конвертерщика. – М.: *Металлургия*, 1967. – 159 с.
8. *Дои Дзе.* Конвертерное производство стали. Пер. с яп. Митькина В.А. Под научной ред. проф. д.т.н. Явойского В.И. – М.:Метиаллургия, 1971. – 296 с.
9. *Туркенич Д.И.* Управление плавкой стали в конвертере.М.: *Металлургия*, 1971. – 360 с.
10. *Металлургия* стали / Под ред.В.И.Явойского, Г.Н.Ойкса. – М.: *Металлургия*, 1973. – 816 с.
11. *Баттизманский В.И., Бойченко Б.М., Черевко В.П.* Тепловая работа кислородных конвертеров. –М.:Металлургия, 1988. – 174 с.
12. *Якушев А.М.* Справочник конвертерщика. –Челябинск: *Металлургия*, Чеолябинское отделение, 1990. –448 с.
13. *Технология* производства стали в современных конвертерных цехах. /Под редакцией С.В.Колпакова. М.:Машиностроение, 1991. – 464 с.
14. *Бойченко Б.М., Охотский В.Б.,Харлашин П.С.* Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкция агрегатов, рециркуляция материалов и экология. Учебник. – Днепропетровск. – РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук Э.В.Приходько