

2. Промышленный опыт применения вращающихся фурм / С.Л. де Соуза Коста, Е.П.Меирелес де Араухо, И.Л.Алвес, Д.Лима де Сиквейра // IX Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали, 18-21 сентября, Галати, Румыния, 2006. – С.27-35.
3. Высокотемпературное и численное моделирование десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния через погружную вращающуюся фурму / Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Чубин К.И., Зарандия С.А. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С.60-65.
4. Гидрогазодинамика ванны при продувке через вращающуюся фурму / Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Зарандия С.А., Сидоренко Д.В. // Проблемы математического моделирования: міждерж. наук.-метод. конф., 25-27 травня 2011 р.: тези доповідей. – ДДТУ: Дніпродзержинськ. – С.115-118.
5. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / Горбис З.Р. – М.: Энергия, 1970. – 424с.
6. Куземко Р.Д. Математическая модель течения в фурмах для глубокой продувки расплавов порошками и инертными газами / Р.Д.Куземко, В.А.Нахимов // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства. – М.: Металлургия. – 1991. – С.103-126.
7. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С.Кутателадзе, В.М.Боришанский. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 423с.
8. Ганин П.Г. Теоретическая оценка устойчивости адсорбционного взаимодействия частиц твердой и газообразной дисперсных фаз в аппарате с механическим перемешиванием и аэрацией (обзор) / П.Г.Ганин // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2008. – Т. 8. – Вып.4. – С.553-569.
9. Колмогоров А.Н. Рассеяние энергии при локальной изотропной турбулентности / А.Н.Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 32. – Вып. 1. – С.19-21.

УДК 669.184

КУЛИК А.Д., к.т.н., доцент  
 КАЩЕЕВ М.А., к.т.н., доцент  
 ПОХВАЛИТЫЙ А.А., ассистент  
 ПОНОМАРЬ А.С., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

### **О НАЗРЕВШЕЙ НЕОБХОДИМОСТИ РАСШИРЕНИЯ РАФИНИРОВОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА КОНВЕРТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ (РАБОЧИЕ ГИПОТЕЗЫ: В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)**

**Введение.** В XXI веке доминируют конвертерный и электродуговой процессы. И если дуговой был рожден еще на заре XX века, в настоящее время он переживает вторую молодость, составляя основную конкуренцию относительно молодому кислородно-конвертерному переделу. Родившийся в 50-ые годы – через 100 лет после бессемеровского конвертера – он продолжает развиваться и его возможности, по-видимому, еще не полностью раскрыты.

Однако в последние десятилетия этот передел начал бурно превращаться в дуплекс-процесс, работающий по схеме: *кислородный конвертер – установка печь-ковш* (П-К).

**Постановка задачи.** Концепция развития сталеплавильного передела сейчас опирается на принцип [3, 4], который не может быть оправдан. Благодаря ему, совершеннейший сталеплавильный агрегат, каким является кислородный конвертер, служит при производстве металла массового назначения только для перевода исходной шихты в жидкое состояние с нагревом до требуемой температуры и получением

заданных углерода и фосфора. Все процессы, которые не связаны с проблемами окисления, перенесены во второе звено, основой которого стала установка печь-ковш. Такая тенденция развития оказалась оправданной в долгий докризисный период, которому, казалось, не будет конца – имел место повышенный спрос на стальную продукцию. Ныне, когда спрос на металл резко упал и цены на него изменились неадекватно [1], технологи должны пересмотреть подходы к функциям такого уникального СП агрегата, каким является кислородный конвертер. Другими словами, нужно посмотреть, насколько оправданным является применение в условиях ККЦ дополнительного плавильного (сложного и дорогостоящего) агрегата в виде установки П-К. Особенно, если учесть, что в настоящее время цикл разлива плавки МНЛЗ продолжает быть, как правило, в полтора раза больше цикла плавки в конвертере.

Нельзя не коснуться временных рамок существования конвертерной технологии (КТ). Первая стадия – бессемеровский и томасовские процессы, существовавшие более 100 лет. Вторая совершенно новая стадия – кислородное конвертирование, родившееся в 1954...1956 годы (Австрия, VAI, позднее Украина, МЗ им. Петровского). На данном этапе наиболее успешным ее продолжением, на наш взгляд, является один из вариантов комбинированной обработки металла – кислородом сверху, нейтральными газами снизу. По прогнозам специалистов доминирование КТ в ближайшие десятилетия обеспечено.

При оценке перспектив развития КТ нужно иметь в виду следующее:

– динамичный рост производства стали в мире в связи с кризисом прекратился и в ближайшем будущем ожидается его восстановление очень медленными темпами;

– устойчиво низкими остаются цены на сталеплавильную продукцию (согласно [1], по сравнению с летом 2008 г. средние цены остаются на более низком уровне: на 35% в Азии, на 44% в Северной Америке, на 52% в странах Евросоюза);

– главный акцент металлургии вынуждены сделать на дальнейшем улучшении качественных показателей стальной продукции не только специального, но и рядового назначения. Это обусловлено, помимо прочего, расширением сферы применения технологии непрерывной разливки стали;

– в таком же направлении происходит усиление требований по снижению вредных выбросов, по экологической безопасности отрасли.

Простота, широкая палитра возможностей воздействия на металл и быстротечность их реализации делают конвертерную технологию наиболее конкурентоспособной и с позиций указанных, набирающих все большую значимость ограничений.

*Важнейшие достоинства и особенности конвертерной технологии.* Среди периодических процессов производства стали КИСЛОРОДНЫЙ КОНВЕРТЕРНЫЙ ПЕРЕДЕЛ продолжает оставаться НЕДОСЯГАЕМЫМ ЛИДЕРОМ ПО ПРОСТОТЕ РЕАЛИЗАЦИИ и по ЭФФЕКТИВНОСТИ, особенно по важнейшей ее составляющей – производительности. При более тщательном анализе нетрудно установить, что этот передел продолжает лидировать и по ВОЗМОЖНОСТЯМ воздействия на металл, которые уже установлены/выявлены, но еще не оценены по достоинству и поэтому имеют ограниченное применение.

Несмотря на очевидность и известность преимуществ КТ, вынуждены о них напомнить, собрав их воедино. Это позволит более убедительно представить доказательную базу выдвинутого выше утверждения:

– широкий диапазон вместимостей конвертеров (по жидкому): 50...60 т; 150...180 т; 230...260 т; 350...380 т;

– очень удобный близкий к цилиндрическому (или цилиндрический с одной или двумя конусностями) профиль конвертера с внутренним объемом, в котором отношение высоты к диаметру достигает 1,2...1,7, а удельный объем – 0,8...1,2 м<sup>3</sup>/т металла;

– практичная система подвески конвертера в виде кольца с двумя цапфами, опирающимися через подшипники на две мощные опоры, на одной из которых расположен односторонний привод. Конвертер вращается вокруг горизонтальной оси на 360 градусов в любую сторону – такой удобной механической (по надежности приближающейся к космической технике) системой не обладает ни один СП агрегат;

– расположенная на верхних этажах система бункеров с дозаторами, позволяющая подавать исходные материалы в конвертер самотеком относительно быстро в любой момент плавки;

– основным рабочим инструментом является 4-х...6-ти сопловая кислородная водоохлаждаемая фурма (с наружным диаметром 219...426 мм, СНГ), с центральной или периферийной подачей кислорода (расход от 400...500 до 1200...1500 м<sup>3</sup>/мин.);

– в последние десятилетия наиболее эффективным видом воздействия на шлако-металлическую ванну является комбинированная продувка, предусматривающая подачу кислорода сверху и нейтральных газов через дно снизу; ввиду невысокой стойкости днища с донными фурмами в отдельных регионах продолжает доминировать продувка кислородом сверху;

– наличие надежного газоотводящего тракта, обеспечивающего очистку и аккумуляцию газообразных продуктов (СО и др.) для последующего их использования в качестве альтернативных источников тепла (зарубежная практика); с помощью этого тракта в полости конвертера после окислительного рафинирования может создаваться разрежение в рамках 20-30 мм вод. ст.;

– быстротечность протекания практически всех физических, теплообменных процессов и химических реакций. Длительность продувки ванны кислородом, как правило, составляет 12...20 мин. независимо от вместимости конвертера. Интенсивность продувки ванны кислородом, изменяющаяся в пределах 2,0...5,0 м<sup>3</sup>/т·мин., является уникальной характеристикой процесса, которая определяет его производительность;

– достигнутая в последние годы высокая (3,0...6,0 тыс. в СНГ) и сверхвысокая (10,0...20,0 тыс. плавов за рубежом) стойкость футеровки конвертера обеспечивается за счет применения периклазоуглеродистых огнеупоров, специальных приемов ведения плавки с ее торкретированием и/или разбрызгиванием конечных шлаков;

– удалось решить важную для работы установок Печь–Ковш проблему отсечки конечных шлаков, благодаря электромагнитной индикации потоков и пневматическому стопору [2].

*Недостатки одношлаковой технологии /технологические трудности и проблемы/.* Заострим внимание на общеизвестных недостатках, которые сегодня воспринимаются как признаки технологии, раз и навсегда установленные и не подлежащие изменению:

1. Продолжает оставаться очень высокой доля вспомогательных операций: если цикл продувки ванны кислородом длится всего 12...20 мин., то при общей длительности плавки 40...50 мин. его доля составляет в среднем  $16 : 45 \cdot 100 = 35 \%$ . Этот показатель является косвенным свидетельством того, что уникальные возможности конвертерной технологии – простота и быстротечность – используются явно недостаточно. Подобным низким уровнем эффективности работы отличались не так давно кислородный мартеновский передел, классический электродуговой.

2. Невозможность получить в процессе окислительного рафинирования требуемое содержание серы в выпускаемом металле.

3. Высокая окисленность конечных шлаков и невозможность производить в конвертере операции раскисления. На выпуске из конвертера окисленность металла по известным причинам может достигать 800...1200 ppm.

4. Сложность, граничащая с неосуществимостью, получения в конвертере стали с очень низким или сверхнизким – 0,002...0,005% – содержанием углерода.

5. Продолжают иметь место трудности, связанные с контролем состава металла, его температуры и окисленности по ходу плавки, несмотря на наличие автоматических /динамических систем контроля состава отходящих газов, сочетаемых с работой фурмы – зонда. Опыт работы отечественных предприятий в условиях кризиса продолжает фиксировать до 20...30% плавов с додувками на температуру, серу, шлак. Одна из причин негативного состояния – сложность установки фурма-зонд, дороговизна измерительных блоков TSC и TSO.

6. Относительно низкая стойкость днищ и донных фурм (500...600 плавов), предназначенных для подачи нейтральных газов в ванну при комбинированной продувке. При общей стойкости футеровки 3000...3500 плавов комбинированная продувка на некоторых предприятиях Украины используется неэффективно или не используется вообще.

**Результаты работы.** *Недоосвоенная зона ВОЗМОЖНОСТЕЙ.* Несложный теоретический анализ свидетельствует о том, что наиболее удобным сосудом для реализации процесса, сопровождающегося вводом в ванну и выделением большого количества газов, является конвертер, на что первым обратил внимание Г.Бессемер. Но очень долгое время этот агрегат рассматривался и продолжает рассматриваться как агрегат, приспособленный для реализации в основном окислительных реакций (с фиксацией попутно протекающих процессов восстановления, которым обычно уделяется мало внимания).

То, что конвертерный передел может работать с более широкими функциями, было убедительно показано еще в 70-ые...80-ые годы [2]. *Первыми обратили внимание на скрытые потенциальные возможности кислородно-конвертерной технологии те, кто испытывал известные трудности при производстве специальных низкоуглеродистых, коррозионно-стойких сталей.*

Таблица 1 – Сравнение показателей производства стали процессами AOD, VOD и VODK

Показатель	Способ выплавки		
	VOD	AOD (мал. конвертер)	VODK (мал. конвертер)
Начальное содержание углерода в металле, %	1,0	1,0-3,0	1,0-3,0
Начальная температура металла, °С	1600	1540	1520
Максимальная скорость окисления углерода, %/мин.	0,006-0,03	0,04-0,08*	0,08
Интенсивность продувки кислородом, м3/т*мин	0,2-0,7	0,3-0,8;1,2*	1,2
<b>Основность первого шлака</b>	<b>1,2-2,0</b>	<b>1,2-1,5</b>	<b>1,2-1,5</b>
<b>Коэффициент распределения серы</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Основность второго шлака</b>	<b>3-4</b>	<b>&gt;2</b>	<b>&gt;2</b>
<b>Коэффициент распределения серы</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>
Температура обработки, °С	1600-1700	1550-1700	1600-1700
Общая продолжительн. обработки, мин	140	90	90
Расход кислорода, м3/т	15-20	25	25
Степень использования кислорода, %	20-60	30-90	50-80
Расход аргона и азота, м3/т	0,8	15-25	1,0
Расход кремния, кг/т	5-8	11-18	10
Расход извести, кг/т	20-35	70-100	40-50
Усвоение хрома, %	98	98	98

\* – при использовании вертикальной фурмы

Различные схемы испытаний аргонно- (и вакуумно-) кислородного обезуглероживания, в конечном итоге, привели к идее их реализации в конвертере [5, 6]. Успех применения AOD, VOD и VODK был настолько убедительным, что уже в начале 80-ых авторы итогового материала [5] отметили: «... нет серьезных причин, препятствующих распространению этой технологии в область производства практически всех сталей, включая углеродистые. Показано, что такие стали ... демонстрируют уровень вязкостных свойств в 1,5-2,0 раза больше, чем у аналогичных сталей обычной выплавки... Самый крупный агрегат (160 т, 1981 год) введен на заводе Армко». Уже в тот период было установлено [6], что если агрегат оборудован верхней фурмой, то ускоряются массообменные процессы ... и «уменьшаются расходы по переделу как углеродистых, так и нержавеющей сталей».

Анализ эффективности использования конвертера в качестве агрегата для реализации специальных процессов приведен в работе [7].

Обратим внимание на выделенные показатели. Эти данные свидетельствуют о том, что в полости конвертера в системе металл-шлак-газ (прежде всего, аргон) кроме процессов восстановления хрома активно протекает процесс глубокой десульфурации:

– достигается *коэффициент распределения серы 100 при низкой основности 1,2...1,5*, что, в общем-то, очень эффективно (данные [7, табл.8.4, с. 349]);

– при основности 2,0...4,0 этот коэффициент возрастает до 200.

Косвенно это свидетельствует о том, что к моменту окончания плавки происходит достаточно глубокое раскисление металла. Если это так, то в условиях конвертерного передела можно реализовать большинство процессов по доводке, необходимых для получения стали высокого качества.

*Сущность новой технологии.* Изложенное выше достаточно убедительно свидетельствует о том, что кислородный конвертер может работать не только как окислительно-плавильный, но и как рафинировочно-раскислительный, а также (при необходимости) как восстановительный агрегат, в котором могут быть сформированы и использованы неокисленные основные шлаки. Особенно важно то, что в нем могут быть реализованы технологии, предусматривающие протекание реакции обезуглероживания в режиме углеродного раскисления.

Рассматриваемая технология находится в стадии патентования, поэтому вынуждены изложить здесь ее содержание в самых общих чертах:

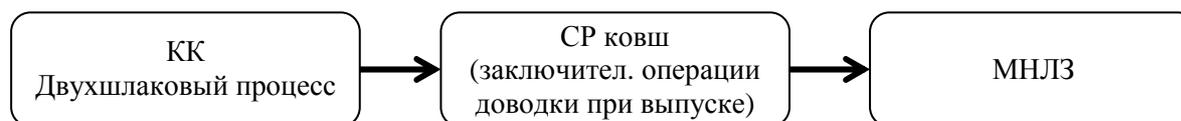
– остановка продувки на требуемых  $C_{ост}$  и степени окисленности металла;  
 – удаление шлака окислительного периода с помощью особых приемов;  
 – наведение нового неокисленного шлака и обработка ванны нейтральными газами;

– контроль состояния металла пробами: TSO, TSC, T.

В процессе реализации технологии поддерживается необходимый температурный режим, выполняются в конвертере операции доводки стали по специальной программе.

**Выводы.** 1. Кислородный конвертер, являясь лидером среди сталеплавильных агрегатов по простоте и по быстротечности протекания любых тепло- и массообменных процессов, продолжает оставаться высокоэффективным РАФИНИРОВОЧНЫМ агрегатом. При комбинированной технологии, кроме окислительных, можно производить операции восстановительного характера, раскисления и десульфурации. Особенно важной есть возможность организации углеродного раскисления, что облегчает проблему производства сверхнизкоуглеродистой стали.

2. В настоящее время в конвертерных цехах с комбинированной продувкой может успешно функционировать (кроме уже используемых) наименее энергоемкая технологическая линия:



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин С.З. Современное состояние и перспективы мирового рынка стали / С.З.Афонин // *Металлург.* – 2010. – №3. – С.5-9.
2. Fortschritte beim LD-process mit Bodenspülung / Kreiger W., Nakesch J., Pofelr G., Apfolterer R. // *“Berg- und Hüttenmann Monatsh.”.* – 1988, 133. – № 1. – P.3-8. (Прогресс процесса LD с донной продувкой (РЖ 5В419, 1988)).
3. Proceedings of Symposium on BOf END Point Determination, Hamilton, May 20–21, 1981, Ed. L u W. – K. McMaster Univ. Press, s/ a/ Vqr. pag., ill. (McMaster Symp. Iron and Steelmaking, N 9) / Симпозиум по определению момента окончания кислородно-конвертерной плавки (РЖ 12 В521, 1982).
4. A new role for ladle metallurgy: high tonnage output. McManus George. *“Iron Age”*, 1982, 225, № 16, МР-5, МР-7, МР-9, МР-11, МР-14, МР-16. / Новая роль ковшевой металлургии: массовое производство (РЖ 12В 629, 1982).
5. Made in the U.S.A., the AOD process takes on the world. Irwing R. *“Iron Age”*, 1982, 225, № 15, 78-79, 81-82, 84 / Разработанный в США процесс AOD завоевывает мир (РЖ 12 В628, 1982).
6. Кудрин В.А. *Металлургия стали: учебник для вузов* / Кудрин В.А. – М.: *Металлургия*, 1989. – 560с.
7. Бойченко Б.М. *Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів та екологія: підручник* / Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454с.

УДК 669.18.244.66

ОПЕРЧУК І.С., магістр  
ОГУРЦОВ А.П., д.т.н., професор

Дніпродзержинський державний технічний університет

### **ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ ПРОДУВКИ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ ДЛЯ УМОВ ДНІПРОВСЬКОГО МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ**

**Вступ.** Конструкція фурми і дуттьовий режим конвертерної плавки є основними факторами, що визначають інтенсивність викидів і виносів, від яких суттєво залежить вихід придатного і продуктивність конвертера.

Відсутність єдиної методики розрахунку кисневих фурм призводить до того, що в кожних конкретних умовах конструкцію фурми (розміри і кількість сопел, кут їх нахилу) доводиться вибирати емпірично, шляхом опробування різних варіантів, причому деякі з них можуть бути занадто далекими від оптимального.