

**В.П.Корченко, В.Ф.Поляков, Л.Г.Тубольцев, С.И.Семыкин,  
В.С.Лучкин, Н.И.Падун, В.А.Горохова**

### **ГАЗОНАСЫЩЕННОСТЬ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЙ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ**

Рассмотрены основные направления снижения газонасыщенности стали при выплавке ее в кислородных конвертерах, в т.ч. с учетом перевода отечественных конвертеров на комбинированную продувку. На основе данных лабораторных исследований (конвертер садкой 1,5 т) выполнен анализ изменения содержания азота и кислорода на заключительных периодах плавки при продувке кислородом сверху и азотом через днище. Показано, что в связи с особенностями условий их проведения (высокая температура металла и низкое содержание углерода) эти периоды оказывают существенное влияние на конечное содержание газов в металле.

**конвертер, сталь, газонасыщенность, азот, кислород**

**Состояние вопроса.** Исходя из анализа мирового опыта производства стали перед сталеплавильщиками стоит задача производить металл со следующими пределами содержания химических элементов: <0,002–0,9% С; <0,2–3% Mn; 0,01–4,8% Si; 0,0035–0,3% P; 0,001–0,3% S; 0,02–0,6% V; 0,02–2% Cr; 0,01–5,0% Ni; 0,08–0,55% Mo; 0,005–0,03% Ti; 0,02–0,1% Nb; 0,0005–0,0080% B; 0,02–2,00% Al; ~ 0,002% Ca; 0,03–0,3% Cu; 0,0010–0,0015% O; 0,0001–0,0002% H; 0,0001–1% N; <0,01–0,3% Pb; <0,01% Zn; <0,01–0,1% Bi; <0,01% Sn [1–3].

Приведенные величины характеризуются очень низкими минимальными значениями содержания газов и вредных примесей (S и P), которые определяются современными требованиями к высококачественным и «чистым» сталям. Учитывая весь комплекс требований по содержанию всех элементов, их производство в рамках сквозной технологии целесообразно осуществлять кислородно-конвертерным процессом, обеспечивающим высокую чистоту по содержанию примесей цветных металлов, сопутствующих элементов и газов. Сквозная технология включает в качестве основных технологических этапов предварительную подготовку чугуна (десульфурация, десиликонизация, дефосфорация), выплавку в конвертерах чистого металлического полупродукта и доводку его на установках внепечной обработки, включая агрегаты для вакуумирования. Наличие указанных составляющих данной схемы является предпосылкой получения стали с суммарным содержанием вредных примесей (S и P), а также водорода, азота и кислорода не более 0,005%.

В настоящее время, исходя из существующего наличия участков внедоменной десульфурации чугуна, конвертеров с комбинированной продувкой, установок для доводки и вакуумирования стали, МНЛЗ, имеются определенные предпосылки для производства сталей с указанным содер-

жанием химических элементов и газов только на Алчевском МК. Реализация той части сортамента высококачественной и «чистой» стали, которая относится к тонколистовой продукции, станет возможной после введения в эксплуатацию кислородно-конвертерного цеха на МК «Запорожсталь». В определенной степени к числу таких предприятий может быть отнесен комбинат им.Дзержинского, для которого закуплено оборудование для комбинированной продувки и где предусматривается строительство установки для десульфурации чугуна и сооружение вакууматора.

**Целью данной работы** является анализ основных направлений снижения газонасыщенности стали при выплавке ее в кислородных конвертерах, в т.ч. с учетом перевода отечественных конвертеров на комбинированную продувку.

### Изложение основных результатов исследования.

Газонасыщенность металла определяется многими факторами. К основным из них относятся следующие:

растворимость газов (кислорода, азота, водорода) в расплавленном железе при высокой температуре;

условиями взаимодействия газов с жидким металлом;

условия и мероприятия по обеспечению дегазации жидкого металла.

Для обоснования теоретических положений могут быть использованы представленные в базовых монографиях диаграммы и зависимости, которые позволяют определить концентрации растворимого газа в железо-углеродистых расплавах. На рис.1 представлена известная диаграмма «железо-кислород» [4].

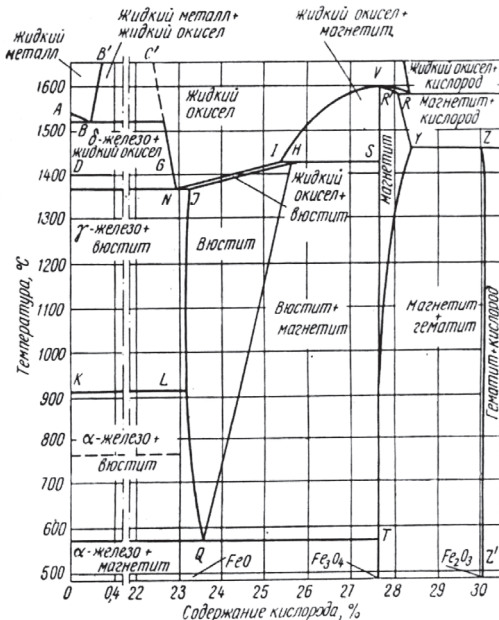


Рис.1. Диаграмма состояния «Железо-кислород».

Диаграмма характеризует растворимость кислорода в виде жидкого и твердого раствора, не учитывая иных форм его обычного присутствия в стали, в т.ч. в виде окислов различных компонентов стали и других химических соединений, в частности, неметаллических включений.

Растворимость кислорода в жидком железе зависит от температуры и характеризуется на диаграмме состояния линией ВВ'. Растворимость кислорода ограничивается образованием жидкой фазы окислов железа. В кислородном конвертере при прохождении плавки имеются все компоненты представленной диаграммы: растворимый кислород в жидком металле; кислород в составе окислов железа в шлаке и в отходящем газе.

Температурная зависимость растворимости кислорода в чистом железе, находящемся в равновесном состоянии с чистым железистым шлаком представлена на рис.2 [4–8]. Как видно из рисунка, возможности растворения кислорода в железе весьма значительные. Аналитически зависимости растворимости кислорода от температуры выражаются уравнениями:

$$\lg [O] = -6320/T + 2,734;$$

$$\lg [FeO] = -6320/T + 3,386.$$

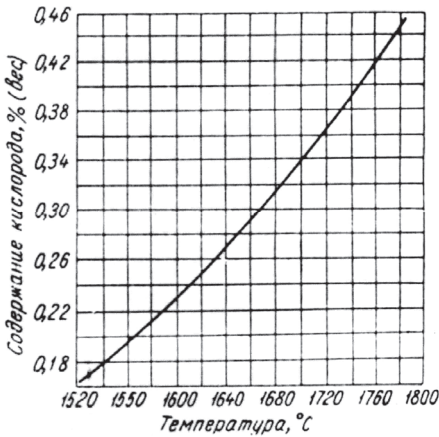


Рис.2. Зависимость растворимости кислорода от температуры в чистом железе, равновесном с чистым железистым шлаком.

Реальное содержание кислорода в металле различных сталеплавильных процессов представлено на рис.3 [6,7,8,]. Из рисунка следует, что концентрация кислорода определяется, прежде всего, содержанием углерода в металле.

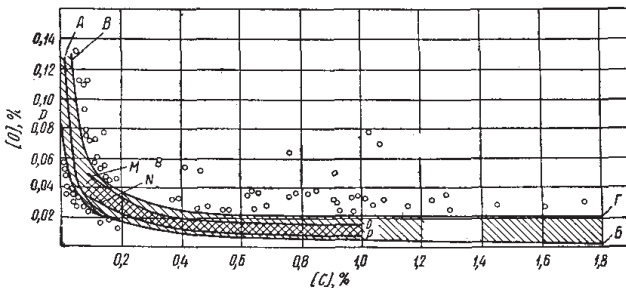


Рис.3. Содержание кислорода в металле при основном мартеновском и кислородно-конвертерном процессах в зависимости от содержания углерода: А,Б —равновесная кривая Вечера и Гамильтона; В,Г,Б,А — область концентраций углерода и кислорода при кислородно-конвертерном процессе; М,О,Р, N — тоже при мартеновском процессе.

Содержание углерода в высококачественных и «чистых» сталях обычно не превышает 0,002–0,02%, равновесные с ними содержания кислорода находятся на уровне 0,01–0,15%, что выше чем требуемые показатели. При этом следует учитывать (рис.4), что средство углерода к кислороду с повышением температуры увеличивается [9].

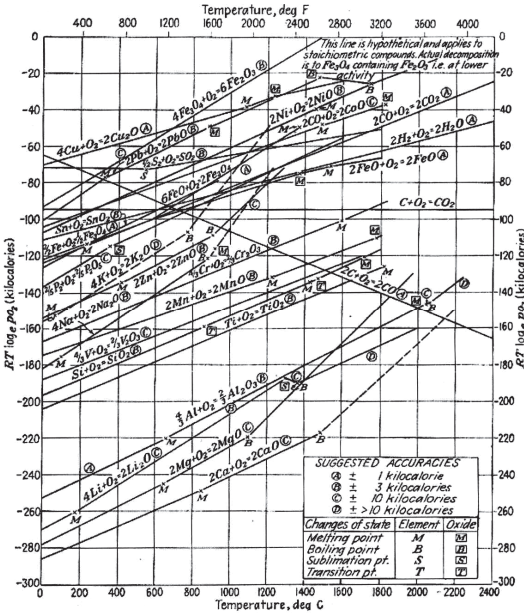


Рис.4. Свободная энергия образования окислов.

При высоких температурах углерод является раскислителем для всех элементов, отмеченных на рис.4. В пределах температур выплавки стали 1600-1700°C свои свойства как раскислителя сохраняют только Al, Li, Mg, Ca.

Что касается водорода, то количество этого газа, растворенного в железе, на всем исследованном до сих пор интервале температур (0-1745°C) пропорционально квадратному корню из парциального давления водорода:  $[H]_{Fe} = K_{Fe-H} \sqrt{P_{H_2}}$ .

Растворимость водорода в твердом и жидком железе (т.е. его количество, растворенное в металле при парциальном давлении водорода  $P_{H_2} = 1$  атм (10 бар) в зависимости от температуры приведена на рис.5 [5–8,10]. Поскольку возможности для растворения водорода в железе весьма значительны, естественным путем предотвращения повышения содержания водорода является ограничение его присутствия в газовых фазах сталеплавильных агрегатов. Водород в металле при различных технологиях находится в пределах 0,0002-0,0008%. Кислородно-конвертерный металл обычно содержит 0,00035-0,00050% водорода [5]. В «чистых» сталях содержание водорода не должно превышать 0,0001-0,0002%, что значительно ниже исходного содержания этого газа при выпуске плавки из сталеплавильного агрегата.

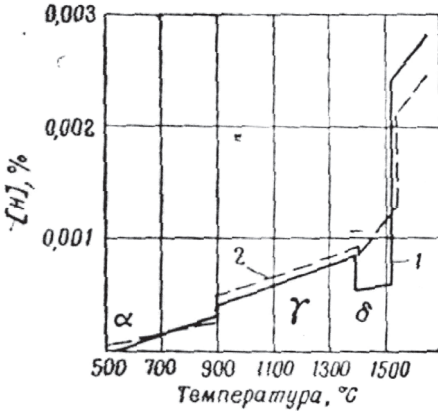


Рис.5. Температурная зависимость растворимости водорода в чистом железе.

Зависимость растворимости азота в чистом железе от температуры представлена на рис.6 [5–8,10]. Во всем исследованном интервале температур (от комнатной до 1650<sup>0</sup>C) растворимость азота пропорциональна квадратному корню из парциального давления азота:  $[N]_{Fe} = K_N \sqrt{P_{N_2}}$ , где  $P_{N_2}$  – парциальное давление азота, атм;  $[N]$  – содержание азота, процент весовой. Для жидкого железа  $\lg [K_N] = -634/T - 1,06$ .

где  $P_{N_2}$  – парциальное давление азота, атм;  $[N]$  – содержание азота, процент весовой. Для жидкого железа  $\lg [K_N] = -634/T - 1,06$ .

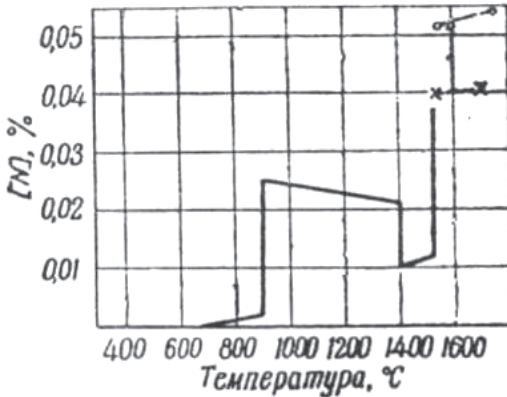


Рис.6. Температурная зависимость растворимости азота в чистом железе.

Из рис.5 и 6 видно, что при определенных температурах склонность водорода и азота к растворению в металлическом расплаве резко увеличивается, что связано с процессами изменения фазового состояния металла.

Изменения фазового состояния металла.

Содержание азота в металле при различных технологиях находится в пределах 0,002-0,010%. Кислородно-конвертерный металл содержит 0,005–0,007% азота [5]. В сталях с особыми свойствами, в составе которых дополнительно увеличивают концентрацию азота для обеспечения высоких прочностных характеристик, содержание азота может достигать 1%, что требует принятия специальных мер.

В конвертерной стали содержание азота в значительной мере зависит от содержания азота в дутье. При содержании азота в дутье на уровне 0,5% обеспечивается содержание азота в металле 0,004% (рис.7) [11].

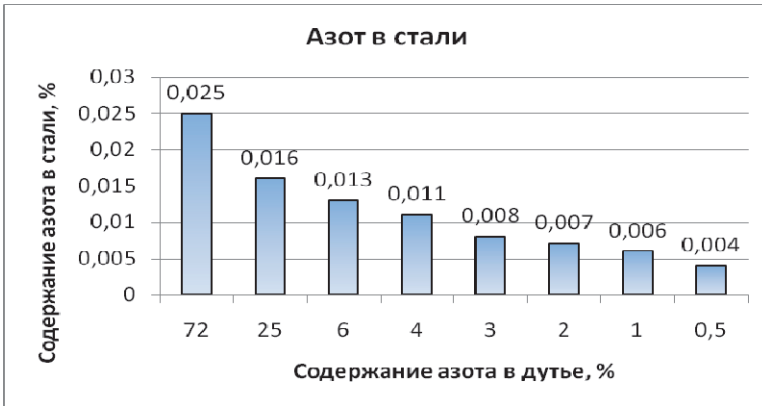


Рис.7. Зависимость содержания азота в стали от содержания азота в дутье.

В условиях экспериментальной базы ИЧМ на 1,5-тонном конвертере было проведено исследование влияния кислородно-конвертерных технологий на содержание кислорода и азота в металле.

Всего было опробовано более 60-ти вариантов технологий, из которых выделено 5 базовых:

- А – верхняя продувка ( $O_2$  сверху);
- Б – комбинированная продувка ( $O_2$  сверху,  $N_2$  снизу);
- В – комбинированная продувка ( $O_2$  сверху,  $O_2$  снизу);
- Г – 100% лома (без жидкого чугуна);
- Д – донная продувка ( $O_2$  снизу).

По 22 вариантам полученные результаты частично представлены на рис.8 и 9.

На рис.8 представлены данные по содержанию углерода и кислорода в металле при различных вариантах технологии кислородно-конвертерной плавки. Как видно из представленных данных содержание кислорода зависит от содержания углерода в металле и в меньшей степени связано с вариантом технологии продувки, что подтверждает зависимость, представленную на рис.3.

На рис.9 представлены данные по содержанию азота в металле при различных конвертерных технологиях (А,Б,В,Г,Д). Содержание азота в металле в значительной степени зависит от варианта технологии продувки и использования топлива, которое применяется для повышения доли лома в завалке и при технологии получения металла без применения жидкого чугуна. Химический состав угольного топлива представлен в таблице.

При применении природного газа увеличивается содержание водорода в газовой фазе. При использовании угольного топлива в газовой фазе с большой вероятностью могут появляться составляющие летучих угольного топлива, в состав которых входят следующие газы:  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,

$C_2H_4$ ,  $C_mH_n$ ,  $H_2S$ ,  $N_2$ . Состав и количество летучих зависят от состава и свойств угольного теплоносителя.



Рис.8. Содержание углерода и кислорода в металле при различных технологиях кислородно-конвертерной плавки (углерод – левые столбики, кислород – правые столбики). А,Б,В,Г,Д – базовые технологии, цифры – подварианты базовых технологий. Индекс «Т» обозначает применение топлива (теплоносителей: природный газ, угольное топливо в кусковом и порошкообразном виде).



Рис.9. Содержание азота в стали при различных технологиях кислородно-конвертерной плавки. Обозначения те же, что и на рис.8.

Наиболее низкие содержания азота получены в условиях донной и верхней продувки. При комбинированной продувке с использованием азота и, особенно, в случаях применения топлива, содержание азота в металле значительно увеличивается. Отмечено, что колебания по содержанию азота связаны также с конструкцией продувочных фурм.

Таблица. Химический состав угольного топлива.

Наименование	Технический анализ, %					Химсостав золы, %				
	C	W <sub>a</sub>	A <sub>a</sub>	V <sub>a</sub>	S	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>общ</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Угольные порошки:										
из углей марки Т (тощий)	77-78,8	1,45	7,21	13,27	0,31	53,27	3,43	1,67	6,21	24,63
пыль УСТК	83,43	1,0	9,97	2,03	0,5	11,29	36,6	3,56	12,09	21,88
полукокс (из бурого угля)	68,77	7,68	11,6	11,9	0,32	32,08	29,54	3,66	17,33	6,46
термоуголь (из бурого угля)	63,09	4,6	7,75	25,12	0,36	35,94	11,56	4,35	12,69	6,28
из антрацита Листвянского шахтоуправления	78,7-79,9	2,9	13,11	2,95	0,24	2,1	61,6	0,6	3,6	22,99
Уголь кусковый:										
антрацит	82,0	2,6	11,75	1,98	1,54	4,82	31,94	23,95	18,54	9,2
СС (слабоспекающийся)	80,2-82,7	2,06	5,6	15,7-18,7	0,4	1,4	42,04	0,4	6,1	24,1



Особый интерес представляют полученные данные по содержанию азота в металле при комбинированной продувке с использованием азота для донного дутья (вариант Б). Такая технология наиболее простая и планируется к использованию в кислородно-конвертерных цехах Украины в ближайшем будущем. С целью более подробного изучения такого варианта технологии исследовалась технология комбинированной продувки, которая включала следующую совокупность заключительных этапов плавки:

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.

Как следует из полученных экспериментальных данных, заключительные этапы характеризуются высокой температурой металла (рис.10) и низким содержанием углерода (рис.11), что предопределяет возможности существенного влияния этих факторов на уровень газонасыщенности металла.



Рис.10. Изменение температуры металла по заключительным этапам кислородно-конвертерной плавки. На представленных рисунках левый столбик обозначает минимальное значение из совокупности данных, правый столбик – максимальное значение.

Содержание кислорода в металле на исследуемых заключительных этапах технологии с комбинированной продувкой (рис.12) 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% [3-5]. При этом следует отметить, что содержание углерода на исследуемых этапах комбинированной продувки были несколько ниже, чем при верхней, и находились в пределах 0,01–0,053%. При анализе поэтапной динамики отмечаются следующие особенности. Концентрация

кислорода в период передуха после полного падения факела снижается от 0,0579–0,1199% до 0,0411–0,0916%. В периоды продувки нейтральным газом после полного падения факела и после передуха содержание кислорода в металле стабилизируется и в целом снижается.



Рис.11 Изменение содержания углерода в металле по заключительным этапам плавки. Обозначения как и на рис.10.

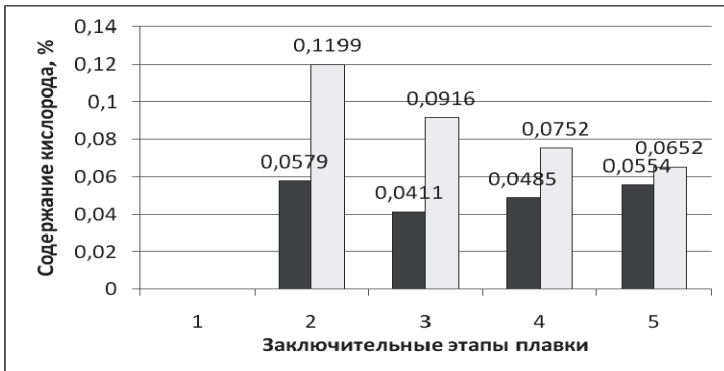


Рис.12. Изменение содержания кислорода в металле по заключительным этапам плавки. Обозначения как и на рис.10.

Полученные данные по содержанию азота в металле на заключительных этапах плавки представлены на рис.13. Как и предполагалось, 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 (аргона).

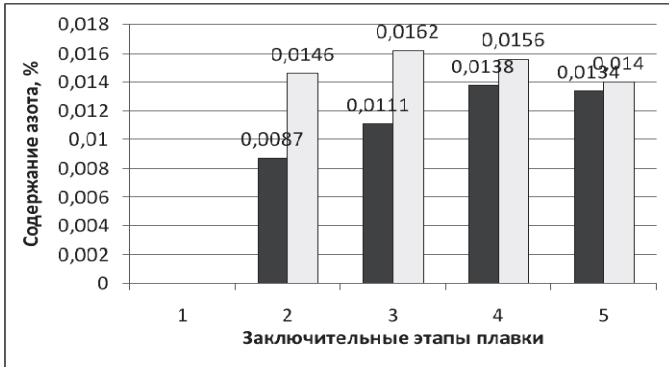


Рис.13. Изменение содержания азота в металле по заключительным этапам плавки. Обозначение как и на рис.10.

Как свидетельствуют полученные данные, наиболее высокие концентрации азота после передувки (0,0216%) и после последующей продувки (промывки) металла азотом (0,0234%) зафиксированы при максимальных расходах азота в эти периоды. В целом тенденция к повышению концентрации азота проявляется в течение всех заключительных этапов плавки.

Таким образом, в условиях технологии комбинированной продувки (подача кислорода сверху и азота через донные фурмы) в конвертере содержание кислорода в металле на заключительных этапах плавки снижается, а азота – увеличивается. Естественно, при необходимости получения низкого содержания азота в металле на заключительных этапах плавки должен применяться другой перемешивающий газ – аргон.

### **Заключение.**

Рассмотрены основные направления снижения газонасыщенности стали при выплавке ее в кислородных конвертерах, в т.ч. с учетом перевода отечественных конвертеров на комбинированную продувку. На основе данных лабораторных исследований (конвертер садкой 1,5 т) выполнен анализ изменения содержания азота и кислорода на заключительных периодах плавки при продувке кислородом сверху и азотом через днище. Показано, что в связи с особенностями условий их проведения (высокая температура металла и низкое содержание углерода) заключительные периоды плавки оказывают существенное влияние на конечное содержание газов в металле.

Установлены основные технологические направления, обеспечивающие уменьшение газонасыщенности кислородно-конвертерного металла, а именно:

выбор оптимального варианта базовой технологии (верхняя, донная, комбинированная продувка);

выбор оптимальной конструкции дутьевых устройств;

использование перемешивающего и защитного газа на заключительных этапах кислородно-конвертерной плавки;

оптимизация использования различных видов топлива в процессе кислородно-конвертерной плавки с повышенной долей лома.

1. *Новые* разработки в производстве ультранизкоуглеродистой стали для автомобильного производства на фирме «CSN Frsilog» в Бразилии. / С.Родригес, Ж.Тран, С.Л.Кардозо, М.А.Кастро Барселос // *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2007. – №6. – С.76-77
2. *Бродов А.А. Смирнов Г.И.* Перспективы рынка сталей повышенной прочности для автомобилестроения // *Сталь.* – 2005. – №3. – С.101-105.
3. *Банненберг Н., Стрейсетбергер А., Швинн В.* Новые толстолистовые стали для нефтяной и газовой промышленности // *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2007. – №6. – С.77-78.
4. *Трубин К.Г. Ойкс Г.Н.* Металлургия стали (Маргеновский процесс). – М.:Металлургиздат, 1951.
5. *Сталеплавильное* производство. Справочник. Том.1. Под общей редакцией чл.корр.АН СССР А.М.Самарина. М.: Металлургия, 1964. – 527 с.
6. *Явойский В.И.* Теория процессов производства стали. – М.:«Металлургия», 1963. – 820с.
7. *Явойский В.И.* Теория процессов производства стали. – М.:«Металлургия», 1967. – 792с.
8. *Металлургия* стали. Под редакцией В.И.Явойского, Г.Н.Ойкса. – М.:Металлургия, 1973. – 816 с.
9. *Basic open hearth steelmaking.* Edited by W.O.Philbrook and M,B.Bever, New York, 1951. – 940 p.
10. *Явойский В.И.* Газы и включения в стальном слитке. – М.:Металлургия, 1955. –247 с.
11. *Афанасьев С.Г.* Краткий справочник конвертерщика. – М.Металлургия, 1967. – 160 с.

*Статья рекомендована к печати докт.техн.наук, проф. Э.В.Приходько*

***В.П.Корченко, В.Ф.Поляков, Л.Г.Тубольцев, С.І.Семикін,  
В.С.Лучкін, Н.І.Падун, В.О.Горохова***

**Газонасиченість металу в умовах різних варіантів технологій киснево-конвертерної плавки**

Розглянуто основні напрями зниження газонасиченості сталі при виплавці її в кисневих конвертерах, у т.ч. з урахуванням переведення вітчизняних конвертерів на комбіновану продувку. На основі даних лабораторних досліджень (конвертер садкою 1,5 т) виконано аналіз зміни вмісту азоту і кисню на заключних періодах плавки при продувці киснем зверху і азотом через днище. Показано, що, у зв'язку з особливостями умов проведення заключних періодів плавки (висока температура металу і низький вміст вуглецю), ці періоди справляють істотний вплив на кінцевий вміст газів у металі.