

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИИ
КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ С ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКОЙ
НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТАЛИ**

Институт черной металлургии НАН Украины

Целью является экспериментальное исследование влияния различных вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней продувкой, предусматривающих повышение теплосодержания расплава, на изменение содержания в расплаве азота, кислорода и серы. Сформулированы основные положения по характеру влияния изученных вариантов на показатели качества стали. Использование вариантов технологии с применением дополнительных видов топлива позволяет увеличить количество перерабатываемого лома в случае использования дополнительных средств по уменьшению газонасыщенности стали.

Ключевые слова: кислородный конвертер, верхняя продувка, содержание газов в стали, дополнительное топливо

Состояние вопроса. Одной из перспективных задач, стоящих перед отечественным конвертерным производством, является снижение себестоимости выплавляемой стали. Наряду с необходимостью улучшения качества и расширением сортамента это требование обусловлено усилением конкуренции между производителями металлопродукции, как отечественными, так и зарубежными. Важное значение имеет также и соревнование между конвертерным и электросталеплавильным производствами, что способствует техническому и технологическому прогрессу. При совершенствовании электросталеплавильных печей активно используются все достижения конвертерной технологии (нагрев лома, применение кислорода, продувка расплава через днище и т.д.). В то же время кислородный конвертер уступает электросталеплавильным печам по количеству перерабатываемого металлолома, стоимость которого заметно ниже, чем чугуна.

Среди основных мероприятий по снижению себестоимости конвертерной стали, учитывая степень отработанности технических решений и реальную возможность их реализации в промышленной практике, преимущество принадлежит вариантам конвертирования, обеспечивающим снижение доли жидкого чугуна в завалке конвертеров с компенсацией его более дешевым металлоломом. Это в полной мере относится к разновидности конвертерной плавки с продувкой расплава только через верхнюю фурму, которая практически повсеместно распространена на предприятиях Украины [1].

Известные способы снижения удельного расхода чугуна при конвертерной плавке, предусматривающие использование мероприятий по до-

полнительному повышению теплосодержания расплава, можно разделить на две основные категории. Первая предусматривает более полное использование внутренних источников тепла, в частности, за счет обеспечения более высокой степени дожигания выделяющегося из ванны CO до CO₂, а вторая – применение внешних теплоносителей. В отношении первой разновидности мероприятий их влияние на газонасыщенность связано с изменением состава газовой атмосферы в конвертере и количества отходящих газов. Дожигание в полости конвертера CO до CO₂ за счет дополнительной подачи кислорода увеличивает окислительный потенциал атмосферы и определяет потенциальную возможность увеличения содержания кислорода в шлаке и металле. Помимо этого следует учитывать и уменьшение объема покидающих конвертер газов, поскольку при дожигании выходящих из расплава пузырей CO из двух молекул CO и одной молекулы O₂ образуется только две молекулы CO₂. Кроме этого, возникающий подсос воздуха при выходе конвертерного газа обуславливает возможность увеличения концентрации в стали азота и кислорода.

Наиболее эффективным представителем мероприятий второй категории является нагрев расплава за счет сжигания в объеме конвертера природного газа, который имеет меньшее количество недостатков, в т.ч. в отношении качества металла [2]. Однако, в связи с высокой стоимостью этого вида топлива в настоящее время данный вариант не находит применения. В плане использования внешних теплоносителей более реальным является применение твердых углеродсодержащих материалов. При подаче в полость конвертера твердых углеродсодержащих материалов следует учитывать [3] повышенное содержание серы в них (от 0,3% в кузнечном до 1,5% в донецком антраците), а также высокую концентрацию летучих (от 2% в донецком до 25% в кузнечном и до 25% в газовом угле), в состав которых входит азот. Обобщающие данные о влиянии содержания серы в угле на концентрацию ее в стали приведены в табл.1.

Таблица 1. Данные об увеличении содержания серы в стали при вводе в конвертер угля [3]

Расход угля, кг/т стали	Содержание серы в угле, %				
	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0
	Увеличение содержания серы в стали 10 ⁻³ %,				
5,0	0,5-0,7	1,2-1,7	2,4-3,4	3,6-5,2	4,9-6,9
10,0	1,0-1,4	2,4-3,4	5,0-7,0	7,3-10,3	9,7-13,8
15,0	1,5-2,1	3,6-5,2	7,3-10,8	11,6-13,5	14,6-20,7

Применение углеродсодержащих видов твердого топлива меняет не только содержание серы, но также состав и объем выделяющихся из полости конвертера газов, а, следовательно, и интенсивность подсоса азота и кислорода воздуха, что влияет на степень насыщения расплава этими газами. Прямым источником поступления азота в расплав является также

применение этого газа в качестве несущего для вдувания порошкообразных углеродсодержащих реагентов. Кроме того, при всех способах повышения теплосодержания имеет место повышение температуры расплава по сравнению с обычной плавкой, что напрямую обуславливает увеличение степени усвоения азота из атмосферы.

Таким образом, для всестороннего определения целесообразности применения альтернативных вариантов с целью повышения теплосодержания расплава необходимо, как минимум, знание их влияния на тепловую сторону процесса, газонасыщенность расплава и уровень концентрации серы. Если в отношении тепловых возможностей основных вариантов технологии для повышения теплосодержания литературные данные можно считать, в принципе, достаточными, то в части газонасыщенности и изменения содержания серы количество имеющихся публикаций малочисленно, а содержащихся в них сведений недостаточно даже для качественного ранжирования соответствующих вариантов технологии. Усугубляющим фактором является не только малый объем информации, но и то, что известные из литературы данные, как правило, не сопоставимы, т.к. получены не только в разных условиях (садка конвертеров, шихтовка плавки, технология ведения процесса, сортамент стали т.д.), но и с использованием отличающихся методик отбора проб и приборного оборудования для оценки газонасыщенности. Кроме того, содержащиеся в литературе сведения обычно не содержат достаточно данных для характеристики вариантов технологии и оборудования, определяющих содержание газов в расплаве[4]. При этом следует учитывать, что все варианты наиболее распространенного и эффективного в настоящее время способа дегазации жидкой стали (ковшовое, порционное, циркуляционное вакуумирование) связаны с дополнительным объемом капитальных затрат, удлинением общего цикла обработки стали от выплавки до разливки, потерей температуры и значительным расходом материалов (электроэнергия, специальные дорогостоящие огнеупоры) [5].

Для преодоления отмеченных сложностей и недостатков и формирования более обоснованных представлений о влиянии основных вариантов повышения теплосодержания расплава в конвертере могут быть использованы результаты специально проведенных на лабораторном конвертере ИЧМ НАНУ опытных плавок. По мнению авторов данной статьи полученные при этом сведения могут быть использованы не только для качественного сопоставления опробованных разновидностей технологии, но и для количественной оценки областей их применения. Это обусловлено как представительным количеством плавок по каждому варианту технологии, так и проведением их на одном и том же агрегате с соблюдением одинаковых условий шихтовки, продувочных и шлаковых режимов, одним и тем же персоналом и при одинаковых условиях отбора проб, методик и оборудования для определения содержания газов с фиксацией всех

необходимых параметров, всесторонне характеризующих технологию ведения плавки и показателей качества металла.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния различных вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней продувкой, предусматривающих повышение теплосодержания расплава, на изменение содержания в расплаве азота, кислорода и серы. Кроме этого, проведено дополнительное уточнение тепловых возможностей изучаемых вариантов технологии. Анализ содержащихся в данной статье материалов представляет собой, на взгляд авторов, попытку внести дополнительную ясность в определение областей рационального использования основных вариантов конвертерной плавки с верхней продувкой и путей снижения доли чугуна в завалке для уменьшения себестоимости стали.

Методика проведения исследований. При проведении исследований на 1,5-тонном конвертере экспериментальной базы ИЧМ опробованы 8 опытных вариантов технологии плавки, в т.ч с дополнительной подачей в ванну конвертера твердых углеродсодержащих видов топлива, характеристика которых приведена в табл.2.

Таблица 2. Характеристика твердых углеродсодержащих видов топлива, использованных при проведении экспериментальных исследований на 1,5-тонном конвертере

Вид материала	Концентрация серы, %	Содержание летучих, %	Влажность, %
Кусковой уголь (антрацит)	03-0,4*	1,98	2-10
Пыль УСТК	1,43-1,54	2,03	0,4-1,0
Полукок	0,20-0,50	11,9	1,4-6,2
Термоуголь	0,45-0,46	25,12	3,7-4,6
Уголь марки Т	0,15-0,40	13,27	15-18

* Антрацит Кузнецкого месторождения, в донецком антраците содержание серы 1,43-1,54%.

Классификация вариантов технологии плавки осуществлялась по особенностям конструкции верхних кислородных фурм, по виду и количеству используемого угольного топлива и содержанию в нем летучих веществ. В качестве базового (или сравнительного) (табл.3) был принят вариант с верхней продувкой без ввода теплоносителей и дополнительного дожигания (вариант А1). Отличия остальных разновидностей вариантов определяются использованием продувочных фурм различной конструкции, применением кускового и разных видов углеродсодержащего топлива, а также методом их ввода в расплав. При реализации варианта А1 применяли односпловую фурму с критическим диаметром кислородного сопла 8,3 мм. Для обеспечения дожигания отходящего газа к этой же фурме присоединяли перемещающуюся по высоте кольцевую головку (с 3-мя цилиндрическими соплами диаметром 4,5 мм и углом наклона их к

оси фурмы 20°). Для ввода кислорода и порошкообразных углеродсодержащих материалов применяли фурмы с диаметром канала для вдувания порошков 10 мм, щелевым кислородным соплом с внутренним диаметром 14 мм, наружным (в критическом сечении) 20 мм и в выходном – 25 мм. В качестве несущего газа при всех вариантах ввода порошков использовали азот. Высота расположения головки фурмы по отношению уровня расплава в спокойном состоянии была одинакова для всех вариантов.

Таблица 3. Перечень и характеристика опробованных в 1,5 тонном конвертере вариантов технологии с верхней продувкой кислородом

№ п.п.	Шифр варианта	Вид продувочной фурмы	Вид теплоносителя	Способ ввода теплоносителя	Расход теплоносителя, кг/т стали	Количество плавов
1	A1	Односопловая	-	-	-	19
2	A1a01	Двухъярусная с высотой 2-го яруса H=200 мм	Дожигание-СО	-	-	3
3	A1a02	Двухъярусная с высотой 2-го яруса H=380 мм	Дожигание-СО	-	-	3
4	A2г	Односопловая	Кусковый уголь (антрацит)	На поверхность ванны	10	6
5	A3	Щелевая фурма, предназначенная для вдувания угольных порошков сверху*	-	-	-	8
5	A4г	Щелевая фурма**	Пыль УСТК	Сверху через фурму	17	12
6	A5г	Щелевая фурма**	Полукок	Сверху через фурму	21	6
7	A6г	Щелевая фурма**	Термоуголь из бурого угля (порошок)	Сверху через фурму	27	12
8	A7г	Щелевая фурма**	Угольный порошок из углей марки Т (тощий)	Сверху через фурму	46	8

* использовалась только для подачи кислорода;

** использовалась для одновременной подачи кислорода и ввода порошкообразных реагентов.

Таблица 4. Характеристика основных параметров и результатов опытных плавков по различным вариантам технологии с верхней продувкой

Показатели	Значение	Величина показателей по вариантам технологии									
		A1	A1a01	A1a02	A2г	A3	A4г	A5г	А6г	A7г	
[C] чуг, %	Мак	4,10	3,98	3,98	4,00	3,92	4,22	3,72	4,17	4,02	
	Мин	3,49	3,55	3,72	3,79	3,53	3,67	3,49	3,19	3,49	
	Среднее	3,93	3,75	3,85	3,88	3,82	3,93	3,62	3,66	3,786	
[C] ст, %	Мак	3,79	0,14	0,12	0,14	0,66	1,25	0,84	1,40	0,038	
	Мин	3,72	0,06	0,04	0,06	0,00	0,05	0,21	0,10	0,06	
	Среднее	3,55	0,09	0,02	0,11	0,36	0,36	0,48	0,45	0,1392	
[C] чуг - [C] ст, %	Мак	4,02	3,84	3,86	3,88	3,82	3,93	3,47	4,07	3,95	
	Мин	3,31	3,49	3,63	3,69	3,05	2,66	2,65	1,96	3,38	
	Среднее	3,78	3,66	3,37	3,77	3,46	3,57	3,31	3,21	3,6468	
[S] чуг, %	Мак	0,0340	0,013	0,00105	0,022	0,079	0,0183	0,073	0,078	0,084	
	Мин	0,0140	0,0021	0,0038	0,018	0,044	0,081	0,049	0,039	0,023	
	Среднее	0,0223	0,007	0,0079	0,0195	0,0549	0,0441	0,061	0,06	0,0514	
[S] ст, %	Мак	0,02	0,0083	0,0076	0,022	0,036	0,045	0,037	0,041	0,033	
	Мин	0,009	0,0026	0,0056	0,014	0,022	0,017	0,027	0,0215	0,02	
	Среднее	0,0136	0,0053	0,0063	0,0185	0,0273	0,0265	0,032	0,031	0,0252	
[S] чуг - [S] ст, %	Мак	0,015	0,0047	0,0039	0,005	0,005	0,041	0,039	0,047	0,054	
	Мин	0,002	0	0	0	0,019	0	0,021	0,006	0,001	
	Среднее	0,0086	0,0018	0,0017	0,001	0,0306	0,0176	0,029	0,029	0,0262	
Т чуг, град.С	Мак	1330	1320	1315	1320	1320	1360	1345	1330	1350	
	Мин	1270	1310	1310	1305	1290	1300	1290	1290	1310	
	Среднее	1308	1313	1313	1314	1304	1320	1311	1306	1324	

Тст, град.С	Max	1725	1650	1635	1690	1675	1770	1630	1680	1720
	Min	1520	1630	1620	1660	1635	1650	1600	1560	1640
	Среднее	1644	1637	1627	1674	1655	1688	1618	1620	1676
Тчуг - Тст, град.С	Max	435	330	325	370	370	455	320	360	410
	Min	200	320	305	345	335	310	275	270	310
	Среднее	336	323	313	360	351	368	307	314	352
[N], %	Max	0,0047	0,0031	0,0034	0,0025	0,0049	0,0076	0,0068	0,0093	0,044
	Min	0,0014	0,0029	0,0032	0,0018	0,0021	0,0016	0,0048	0,0024	0,0057
	Среднее	0,0026	0,003	0,0033	0,0023	0,003	0,0033	0,0058	0,0051	0,0142
[O], %	Max	0,104	0,0587	0,0523	0,0915	0,0534	0,1026	0,0501	0,0600	0,1359
	Min	0,0303	0,0553	0,0438	0,0614	0,0194	0,0217	0,0166	0,0146	0,0384
	Среднее	0,0614	0,0566	0,0475	0,0745	0,0319	0,0366	0,0348	0,0299	0,085

Таблица 5. Величина статистических оценок сравниваемых показателей опытных плавков по различным вариантам технологии (среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации)

Показатели	Значение	Величина показателей по вариантам технологии									
		A1	A1a01	A1a02	A2т	A3	A4т	A5т	A6т	A7т	
[C] чуг - [C]ст, %	Ср.кв.откл.	0,188	0,1432	0,0995	0,0654	0,252	0,343	0,2796	0,5272	0,2026	
	Квар.	0,050	0,0392	0,0364	0,0173	0,0729	0,096	0,00892	0,1641	0,0535	
[S]чуг - [S]ст, %	Ср.кв.откл.	0,003	0,0033	0,0033	0,0756	0,0107	0,0136	0,0082	0,0112	0,1216	
	Квар.	0,399	1,2309	1,2309	-2,3625	0,3509	0,7754	0,2835	0,3865	0,8733	
Тчуг - Тст, град.С	Ср.кв.откл.	57,00	4,71	8,50	10,00	10,50	39,76	16,61	25,59	41	
	Квар.	0,170	0,0146	0,0271	0,0266	0,0299	0,1082	0,0541	0,0816	0,0070	
[N], %	Ср.кв.откл.	0,0009	0,0001	0,0001	0,0003	0,0009	0,0016	0,0008	0,0017	0,0149	
	Квар.	0,3709	0,0146	0,0283	0,1069	0,3045	0,4856	0,1445	0,3298	1,0491	
[O], %	Ср.кв.откл.	0,0155	0,0015	0,0036	0,0101	0,0114	0,0230	0,0137	0,0146	0,0032	
	Квар.	0,2527	0,0268	0,0751	0,1356	0,3578	0,6285	0,3924	0,4890	0,3782	

Изложение основных результатов исследования. В табл.4 представлена характеристика основных параметров и результатов опытных плавков по различным вариантам технологии с верхней продувкой, а в табл.5 – результаты статистической оценки достоверности этих показателей и обоснованности их сопоставления.

Из табл.4, несмотря на заметные различия между вариантами по содержанию углерода, который является основным определяющим показателем хода плавки (длительность продувки, расход и интенсивность подачи кислорода), а также состояния расплава по газонасыщенности и температуре, можно однозначно сделать вывод о существенном влиянии исследованных вариантов технологии на газонасыщенность стали. Так, если в базовом варианте содержание азота находится на уровне 0,0025%, то при дожигании оно более значительно, причем тем в большей степени, чем выше расположен 2-й ярус сопел (0,0033% против 0,0030%). В варианте продувки кислорода через фурму, предназначенную для вдувания порошков, но без их использования, содержание азота мало отличается от базового варианта, что логически вполне объяснимо. При вводе на расплав кускового угля содержание азота находится на уровне базового варианта, также как и при вдувании через верхнюю фурму пыли УСТК. В последнем случае влияние применения в качестве газа-носителя азота, по всей вероятности, нивелировано более существенным действием других факторов, присущих данному способу, например низкое содержание летучих и влаги.

При использовании остальных трех вариантов технологии концентрация азота в расплаве (при сопоставлении как средних, так и предельных значений) в 2,2; 2,0 и 5,6 раза выше, чем при базовом варианте. Это может быть обусловлено как применением различного вида теплоносителей, так и их более высоким расходом. Указанные различия более наглядно прослеживаются при графическом представлении данных, отражающих величину средних, минимальных и максимальных значений (рис.1).

Четкого влияния содержания углерода в стали на концентрацию в ней азота не отмечается для всех вариантов плавки (рис.2). Это может свидетельствовать, скорее всего, не о слабом влиянии этого фактора, что не соответствует теоретическим представлениям и литературным данным, а о противоположной направленности действия всех присущих каждому варианту особенностей, например, о частичной дегазации в связи с изменением окисленности металла, состава газовой атмосферы в конвертере и т.п.

При оценке по величине средних значений содержания азота варианты технологии располагаются (в порядке возрастания содержания) в следующем порядке: А2т, А1(базовый), А1а01 и А3, А4т и А1а02, А6т, А5т и А7т. Полученные данные свидетельствуют также о том, что на изменение содержания азота в расплаве оказывает влияние как вид теплоносителя, так и его расход и способ ввода.

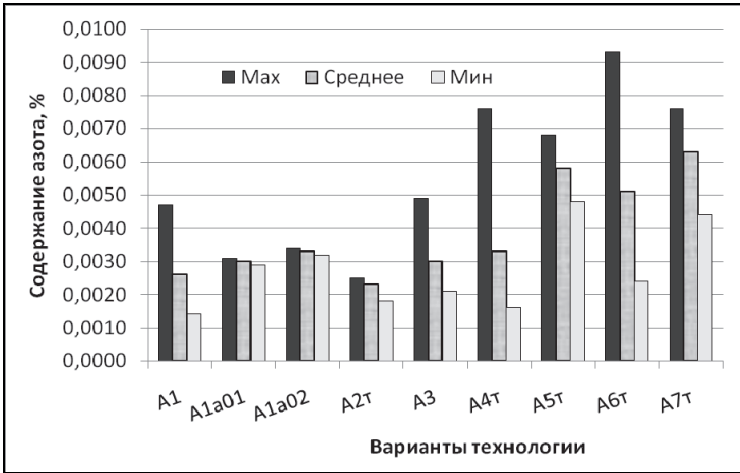


Рис.1. Фактические значения максимального, среднего и минимального содержания азота в стали при различных вариантах технологии кислородно-конвертерной плавки.

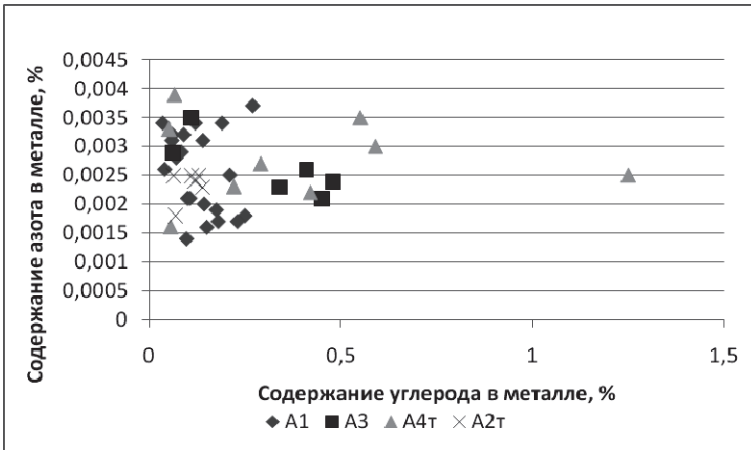


Рис.2. Зависимость содержания азота от содержания углерода в металле при различных вариантах технологии кислородно-конвертерной плавки.

Выявленные закономерности позволяют с относительно невысокой погрешностью осуществлять ранжирование вариантов технологии и определять область применения каждого из них в зависимости от сортамента производимой стали и предъявляемых к ней ограничительных нормативных требований. Низкие содержания азота получены только при технологии A2т (0,0026%) и A1 (0,000026%) – базовый вариант. Показатели для вариантов A1a01, A1a02, A3 и A4т весьма близки (0,0030 – 0,0033%) и

только варианты А5т, А6т и А7т характеризуются существенно худшими показателями (0,0058, 0,0051 и 0,0063% соответственно).

Что касается влияния вариантов технологии на изменение концентрации кислорода в расплаве, то оно носит более сложный характер, учитывая зависимость содержания кислорода в расплаве от содержания углерода. В связи с этим первоначально были сопоставлены средние и предельные значения содержания кислорода по вариантам технологии (табл.4) без учета определенных различий по содержанию углерода. Анализ этих сведений, в т.ч. и их графическое представление (рис.3) позволил представить следующий порядок распределения вариантов по влиянию на окисленность (в порядке его возрастания): А6т, А3, А5т, А4т, А1а02, А1а01, А1 (базовый вариант), А2т и А7т.

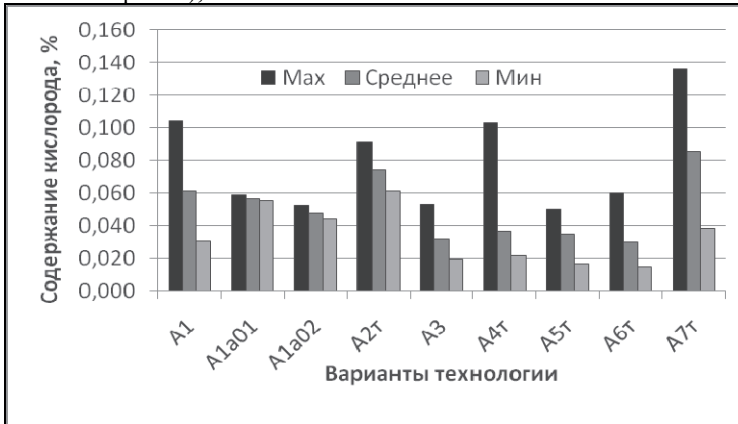


Рис.3. Максимальное, среднее и минимальное содержание кислорода в расплаве при различных вариантах технологии кислородно-конвертерной плавки.

Для обеспечения более высокой надежности заключения о влиянии вариантов технологии на окисленность и их ранжирование была выполнена дополнительная обработка данных, которая предусматривала привязку показателей содержания кислорода к конкретному содержанию углерода по каждому варианту. С этой целью был рассчитан коэффициент

$$K_p = [O]_{\text{факт}} / [O]_{\text{равн.}}$$

Где $[O]_{\text{факт}}$ – фактическое содержание кислорода при определенном содержании углерода;

$[O]_{\text{равн}}$ – равновесное содержание кислорода при том же определенном содержании углерода.

Коэффициент K_p является производным от общепринятого критерия равновесности $[O] \cdot C$, используемого при анализе воздействия различных факторов на окисленность металла и учитывающего влияние углерода как базового фактора. Математически расчетный показатель получен путем

деления $[O]_{\text{факт}} \cdot [C]_{\text{факт}}$ на $[O]_{\text{равн}} \cdot [C]_{\text{факт}}$ с использованием общепринятой в литературе величины последнего произведения $[O] \cdot [C] = 0,0025$.

Приведенная на рис.4 диаграмма, построенная с использованием описанного принципа, позволяет распределить изученные варианты в следующем порядке: А1а02, А1а01, А2т, А1 (базовый вариант), А3, А7т, А4т, А6т, А5т. При этом для указанных вариантов величина отношения $[O]_{\text{факт}} / [O]_{\text{равн}}$ составляет; 1,55; 2,13; 3,13; 3,70 (базовый вариант); 4,58; 4,73; 5,23; 5,37 и 6,71 соответственно. Обращает на себя внимание, что более низкое, по сравнению с базовым вариантом, отношение $[O]_{\text{факт}} / [O]_{\text{равн}}$ получено только для вариантов, предусматривающих дожигание СО с помощью специальных фурм, и варианта с подачей на поверхность расплава кускового угля, использованная разновидность которого характеризовалась низким содержанием серы. В остальных случаях величина этого соотношения выше в 1,23–1,81 раза.



Рис.4. Влияние варианта технологии кислородно-конвертерной плавки на величину отношения $[O]_{\text{факт}} / [O]_{\text{равн}}$ при одинаковом содержании углерода.

Практически такой же порядок распределения вариантов прослеживается при сопоставлении не усредненных и предельных значений, а конкретных показателей содержания газов по каждой отдельной плавке.

С целью всесторонней оценки влияния испытанных вариантов технологии при проведении обобщающего анализа были дополнительно использованы полученные при проведении описанного исследования данные об изменении содержания серы в расплаве, т.к. вид теплоносителя оказывает непосредственное влияние на этот показатель. Как следует из **рис.5** для всех испытанных технологий наблюдается существенный эффект десульфурации стали по сравнению с исходным содержанием серы в чугуна. Для варианта А2т (присадка на поверхность расплава кускового угля) зафиксирован самый низкий эффект уменьшения содержания серы в стали по сравнению с ее исходной концентрацией (величина отношения $[S]_{\text{ст}} / [S]_{\text{чуг}} = 0,95$).

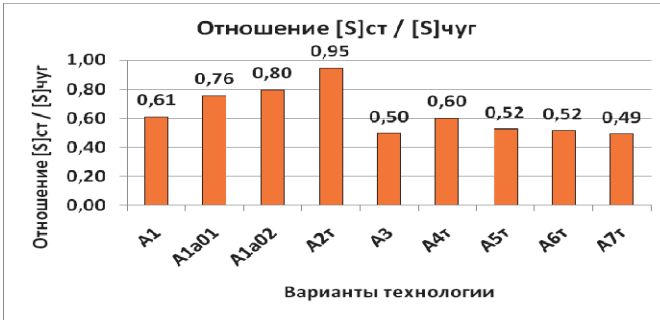


Рис.5. Уровень эффекта десульфурации вариантов технологии кислородно-конвертерной плавки по изменению концентрации серы в расплаве.

Для остальных вариантах с подачей твердых углеродсодержащих добавок отмечается еще больший эффект десульфурации. Это означает, что негативный эффект внесения вводимыми материалами существенного количества серы в расплав в целом ряде случаев может быть полностью нивелирован технологией кислородно-конвертерной плавки. Логичным объяснением этого эффекта является то, что исходя из термодинамических позиций увеличение температуры расплава, вследствие ввода теплоносителей, в значительной мере способствует развитию десульфурации (рис.6). Дополнительное влияние повышения теплосодержания проявляется и в ускорении формирования жидкоподвижного высокоосновного шлака благодаря улучшению усвоения и повышения коэффициента использования извести. Неудовлетворительные показатели при варианте использования кускового угля могут быть увязаны с увеличением гетерогенности шлака, уменьшением его реакционной способности и снижением эффекта десульфурации.

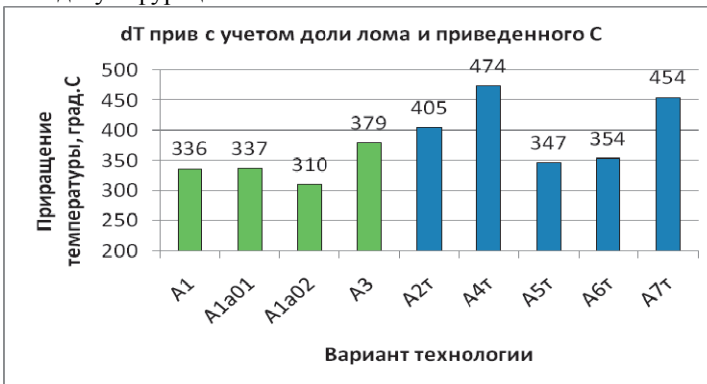


Рис.6. Влияние вариантов технологии кислородно-конвертерной плавки на прирост температуры расплава за период продувки, приведенной к одинаковым показателям по углероду и количеству металлолома.

Исходя из полученных экспериментальных данных по повышению теплосодержания расплава вариант технологии, предусматривающий вдувание пыли УСТК, может рассматриваться как перспективный, Этому способствует низкое содержание в пыли влаги (0,4-1,0%) и летучих (до 2%). Это соображение подтверждается также расчетными данными об изменении приведенной температуры расплава с учетом доли лома и приведенного содержания углерода, согласно которым максимальный прирост температуры металла для варианта технологии А4т составляет 474°С, в то время как для базовых вариантов без использования теплоносителей он находился на уровне 310-379°С. Вдувание угольного порошка из углей марки Т по технологии А7т также характеризуется существенным повышением тепловых возможностей плавки, что позволяет перерабатывать дополнительное количество металллома.

Комплексная оценка эффективности вариантов технологии произведена с использованием приема рейтинговой оценки по каждому из показателей (изменение содержания азота, кислорода и серы), т.е. путем присвоения им соответствующего места в порядке убывания положительного влияния и последующего суммирования присвоенных мест по трем показателям. Такой подход имеет смысл при наличии условий улучшения каждого из показателей на этапах после выпуска плавки (десульфурация в ковше с использованием различных приемов и вакуумирование). При таком подходе исследованные разновидности технологии достаточно четко распределяются по двум группам. В первую входят варианты А1а01, А1а02, А2т и А3, для которых сумма мест находится в пределах 10,5-13,5. Остальные варианты, для которых сумма мест значительно выше (16-20,5) составляют вторую группу и их использование, с позиций общего влияния на все три рассмотренных показателя, представляется менее целесообразным, т.к. предполагает последующее использование дополнительной обработки расплава.

Если осуществлять ранжирование по рейтинговой оценке, относящейся конкретно к каждому из показателей, то в отношении содержания азота преимущество принадлежит вариантам А1, А1а01, А1а02, А2т, А3 и А4т, при использовании которых экспериментально зафиксированная в расплаве концентрация азота находится на уровне 0,0023-0,0033%. Остальные варианты значительно уступают указанным (содержание азота (0,0051-0,0063%) и вряд ли могут быть использованы при производстве металла с повышенными требованиями к его концентрации (во всяком случае, при отсутствии возможности внепечного вакуумирования, либо использования других современных средств дегазации).

Что касается кислорода, содержание которого может быть в принципе снижено за счет увеличения расхода раскислителей, то без учета этой возможности наиболее благоприятными следует считать варианты А1, А1а01, А1а02 и А2т, при реализации которых величина отношения $[O]_{\text{факт}}/[O]_{\text{равн}}$ составляет 1,55-3,70. Варианты технологии А3, А4т, А5т,

А6т и А7т характеризуются более высокими значениями отношения $[O]_{\text{факт}}/[O]_{\text{равн}}$ (4,58-6,71) и более высоким уровнем содержания кислорода в расплаве до раскисления. При высоком исходном уровне раскисленности и повышенном расходе раскислителей возрастает содержание неметаллических включений в металле, которые при отсутствии дополнительных приемов удаляются лишь частично вследствие естественного всплывания с невысокой скоростью и последующей ассимиляции шлаком. Поэтому соответствующие ограничения, связанные с увеличением затрат на раскисление, могут определяться и сортаментными требованиями по обеспечению уровня загрязненности металла.

По отношению к изменению концентрации серы в расплаве варианты А1, А3, А4т, А5т, А6т и А7т следует считать практически равноценными (коэффициент снижения содержания серы составляет 0,49-0,52), причем по своим возможностям они даже превышают базовый вариант. Варианты А1а01, А1а02 менее благоприятны (величина коэффициента 0,76-0,80), хотя как и указанные выше способствуют снижению содержания серы в процессе продувки. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при всех вариантах технологии уровень десульфурации расплава в процессе кислородно-конвертерной плавки зависит и от исходного содержания серы в чугуне (рис.7).

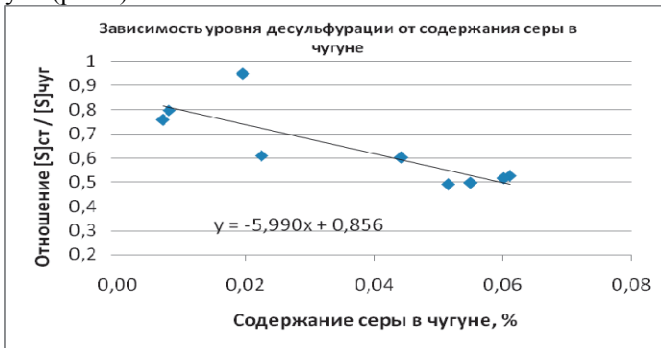


Рис.7. Изменение уровня десульфурации в процессе кислородно-конвертерной плавки в зависимости от исходного содержания серы в чугуне.

Анализ полученных результатов свидетельствует о неоднозначности влияния испытанных вариантов технологии на изучаемые параметры (содержание азота, кислорода и серы). Если при использовании какого-либо варианта технологии, по сравнению с базовым, отмечается, например, более низкое содержание азота, то для него может быть характерно более высокое содержание серы и наоборот. Поскольку ни один из испытанных вариантов не превосходит сравнительного базового по всему комплексу параметров, единственным возможным принципом выбора альтернативного варианта технологии, который может применяться с целью снижения расхода чугуна в завалке и, соответственно, себестоимости стали, может

быть следующий. В качестве такого варианта может рассматриваться технология, применение которой характеризуется относительно незначительным превышением одного или даже двух параметров, которые могут быть устранены с использованием традиционно применяемых в конвертерном цехе средств и приемов. Например, незначительное превышение содержания азота в стали может быть нейтрализовано изменением режима продувки расплава в ковше в сторону более ранней замены азота аргоном. Аналогичное по смыслу мероприятие может быть реализовано в конвертерах с нижней продувкой нейтральным газом. Соответственно допустимое превышение содержания серы может быть устранено традиционно применяемыми с этой целью приемами – загущением шлака, использованием раскислителей и ферросплавов с пониженным содержанием серы и т.п.

При таком подходе, по мнению авторов, заменителями базового могут быть альтернативные варианты технологии, предусматривающие дожигание CO до CO_2 с помощью двухъярусных фурм (A1a01 и A1a02), а также (с определенными ограничениями) варианты присадки кускового угля (A2т) и вдувание пыли УСТК (A4т). Вариант A3 не включен в этот перечень, т.к. он не применяется в промышленной практике и опробован сугубо в исследовательских целях.

При таком подходе дополнительные затраты на реализацию альтернативных вариантов технологии, согласно ориентировочному расчету, перекрываются экономией от снижения расхода чугуна и их применение становится экономически выгодным. Естественно, определяющим фактором в этом случае является соотношение стоимости чугуна и металлолома, при этом следует учитывать просматривающуюся на отечественных предприятиях тенденцию к снижению цены чугуна, сопровождающуюся ухудшением его показателей по содержанию серы и температуре, что в свою очередь требует дополнительных затрат.

Если же превышение изучаемых показателей является значительным, тем более если это касается не одного, а нескольких показателей, то замена традиционной технологии вариантами, повышающими теплосодержание расплава, возможна только при вводе новых технических средств (ковш-печь, вакууматор), позволяющих устранить существенные недостатки технологий-заменителей.

Другая возможность заключается в использовании таких технологий только для выплавки сталей с невысокими нормативными требованиями по газонасыщенности и содержанию серы. На наш взгляд, к числу таких вариантов, могут быть отнесены технологии вдувания в потоке азота различных разновидностей угля – полукокса (A5т), термоугля (A6т) и тощего угля (A7т), которые связаны со значительным увеличением содержания азота и сложностью его удаления обычно применяемыми в цеховой практике средствами.

Заключение. На основании результатов лабораторных исследований при выплавке металла в 1,5-тонном конвертере с продувкой кислородом сверху сопоставлено влияние различных вариантов технологии, в т.ч. с использованием различного вида теплоносителей, на изменение качественных характеристик расплава (газонасыщенность, концентрация серы). Сформулированы основные положения по характеру влияния изученных вариантов на показатели качества стали, а также условия их применения в промышленной практике.

Показана возможность использования изученных вариантов кислородно-конвертерной плавки при выплавке стали различного сортамента, отличающихся уровнем требований по концентрации азота, кислорода и серы в готовом металле.

Показано, что ряд изученных вариантов, в первую очередь предусматривающих использование двухъярусных фурм, несмотря на выявленное некоторое превышение показателей качества, могут быть рекомендованы в качестве заменителя базового варианта при условии устранения этих превышений традиционно применяемыми в цеха приемами и средствами.

Остальные варианты, для которых характерно превышение содержания газов, особенно азота, и концентрации серы, в целях снижения доли чугуна в завале могут быть использованы либо при выплавке стали с пониженными нормативными требованиями по азоту, кислороду и сере, либо после сооружения в цехах агрегатов (вакууматор, ковш-печь), позволяющих устранить присущие этим способам недостатки.

1. *Харахулах В.С., Лесовой В.В., Мельник В.М.* Состояние сталеплавильного производства на предприятиях объединения «Металлургпром» и перспектива его развития до 2015 года // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – №? . – С.4–9.
2. *Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С.* Конвертерное производство стали. – МС.: Днепропетровск, РВА «Дніпр_ВАЛ», 2006. – 454 с.
3. *Технология* производства стали в современных конвертерных цехах / С.В.Колпаков, Р.В.Старов, В.В.Смоктий и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.
4. *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.
5. Смителлс К., Газы и металлы. Пер. с англ., М. — Л., 1940.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук В.П.Питтюком*

Дослідження впливу варіантів технології киснево-конвертерного плавки з верхньою продувкою на якісні показники сталі

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу різних варіантів киснево-конвертерної плавки з верхньою продувкою, що передбачають підвищення тепловмістості розплаву, на зміну вмісту в розплаві азоту, кисню і сірки. Сформульовано основні положення щодо характеру впливу варіантів технології на показники якості сталі. Використання варіантів технології із застосуванням додаткових видів палива дозволяє збільшити кількість у шихті металевого брухту за умови використання додаткових засобів щодо зменшення газонасиченості сталі.

V.P.Korchenko, V.F.Polyakov, L.G.Tuboltsev, N.I.Padun, A.A.Semikina **Study of the influence of technology BOF melt on quality steel**

The purpose is to investigate the influence of different experimental variants BOF smelting top-blown to change the content of nitrogen, oxygen and sulfur in the melt. It is shown that technological possibilities BOF various embodiments allow the use of technologies to meet the demands on the chemical composition and the gas content in the steel. Using variants technology using additional fuels, increases the amount of scrap being processed with additional means for reducing the gas content in the steel.