

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ И РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ДСП

М.В. Шишимиров¹, О.М. Сосонкин²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва;*

² *Московский государственный вечерний металлургический институт, г. Москва*

Приведены результаты анализа тепловой работы различных дуговых сталеплавильных печей. Рассмотрены пути повышения эффективности выплавки стали в ДСП за счет специальных мероприятий, направленных на снижение угара металла, и разработки рациональных энерготехнологических режимов ведения плавки. Снижение угара может быть достигнуто укладкой шихты в корзину с учетом насыпной плотности ее составляющих, обеспечением подачи охладителя (окатыши, шлакообразующие, мелкий лом и т. п.) в зоны горения дуг с момента образования жидкой ванны под электродами и в зоны продувки кислородом, продувкой ванны кислородом с рассредоточением зоны протекания реакций окисления элементов расплава в объеме ванны, принудительным перемешиванием металла, снижением температуры металла на выпуске. Рационализация режимов работы печи включает в себя увеличение вводимой электрической мощности оптимизации токового режима, сокращение времени работы газокислородных горелок до 40–50 % от времени расплавления при соотношении кислород/природный газ 2 : 1, обеспечивающем максимальную температуру факела, установление расходов природного газа и кислорода с учетом тепловых условий в рабочем пространстве печи, синхронную работу всех газокислородных устройств, сбалансированный расход кислорода на плавление для снижения испарения металла, применение режима дожигания отходящих газов, своевременное вдувание углеродосодержащего материала для вспенивания шлака и др.

Ключевые слова: печь; материальный баланс; тепловой баланс; угар металла; продувка кислородом; энерготехнологический режим.

Современный этап развития электросталеплавильного производства в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) средней и большой вместимости (50–180 т) характеризуется технологией, предусматривающей совмещенный период плавления и окисления. Получают полупродукт, превращение которого в сталь заданного состава, обычно углеродистого и низколегированного, осуществляют методами внепечной обработки. Сталь легированного и высоколегированного сортамента получают в печах малой вместимости (3–25 т) по классической технологии (плавка на «свежей» шихте, переплав легированных отходов) с проведением восстановительного периода.

Главной целью процесса плавки в ДСП является получение стали (полупродукта) с минимальными затратами и при максимальной производительности агрегата. В настоящее время производительность ДСП большой вместимости составляет 150–200 т/ч при длительности плавки от «выпуска до выпуска» 45–55 мин с удельными расходами электроэнергии и электродов 250–450 кВт·ч/т и 1,5–2,5 кг/т соответственно. Это произошло в результате внедрения передовых технических и технологических разработок: применения высокомоощных трансформаторов, кислорода, АСУТП, водоохлаждаемых элементов кладки, эркерного выпуска, газокислородных горелок и манипулято-

ров, донной продувки, подогрева лома, пенистого шлака, использования методов внепечной обработки [1–2].

Достижение указанных показателей работы современных ДСП сопровождалось изменениями условий теплообмена в системе «дуга – кладка – металл». Для маломощных ДСП металлургических предприятий и литейных цехов машиностроительных заводов характерна кирпичная кладка стен и свода печи. Тепло к ванне расплавленного металла передается от «горячего пятна» под электродом, имеющего высокую температуру, равную температуре кипения железа, а на остальной поверхности ванны – через шлак, подогреваемый частью дуги над его поверхностью и переизлучением от кирпичной кладки стен и свода. В дальнейшем по мере роста вводимой мощности ухудшалась стойкость кирпичной кладки, особенно участков свода и стен печи, расположенных напротив электродов.

Внедрение водоохлаждаемого свода сняло ограничение на величину вводимой мощности, но при этом увеличился удельный расход электроэнергии на 3–10 % [3]. Кроме того изменились условия теплообмена. Теперь тепловой поток от поверхности шлака к водоохлаждаемому своду увеличился, что привело к снижению теплового потока к металлу. С целью сохранения производительности печи увеличивают вводимую мощность.

При этом вследствие повышения напряжения на дуге возрастают ее длина и облученность поверхности шлака, что уменьшает разницу между величинами тепловых потоков, передаваемых от шлака к металлу, для печей с кирпичной кладкой свода и стен и водоохлаждаемым сводом. Увеличение количества теплоты, поступающей от «горячего пятна» в глубь ванны, также может достигаться расширением его площади за счет роста тока дуги. Кроме того, компенсация дополнительных тепловых потерь с охлаждающей водой наращиванием вводимой мощности сопровождалась более интенсивным износом нижней части кладки печи напротив электродов и образованием корочки шлака на поверхности между электродами у откосов. Условия теплопередачи к ванне металла ухудшились, так как температура шлака стала ниже, чем в случае полностью кирпичной кладки.

Применение водоохлаждаемых панелей стен привело к дальнейшему увеличению тепловых потерь с охлаждающей водой, которое компенсировалось введением дополнительной мощности и способствовало уменьшению стойкости нижней части стен, которая не могла быть защищена охлаждаемыми панелями в связи с наклоном печи на выпуск металла. Условия теплопередачи стали хуже, так как температура поверхности шлака стала ниже температуры на границе раздела с металлом. Теперь тепло поступает к ванне только через «горячие пятна» под электродами и через шлак вокруг электродов, а на большей части поверхности раздела тепловой поток направлен от поверхности ванны через шлак к охлаждаемым поверхностям стен и свода.

Внедрение эркерного выпуска металла позволило опустить охлаждаемые панели стен практически до поверхности шлака. Теперь ванна получает тепло исключительно через «горячие пятна» под электродами, а на всей поверхности раздела тепловой поток направлен от поверхности ванны через шлак к охлаждаемым поверхностям стен и свода печи. При этом на наружных поверхностях нижней части стальных панелей обнаружены острые углубления в зонах отслоившейся окалины, которые могут служить микронадрезами и привести к зарождению трещин в условиях циклического нагрева и охлаждения. С течением времени стальные панели разрушаются и их приходится заменять медными. Все это подтверждено практикой эксплуатации стальных стеновых панелей на ДСП-150 ОАО «Северсталь».

Для исключения описанных явлений и уменьшения тепловых потерь с охлаждающей водой применяют технологию ведения плавки с пенистым шлаком, который наводят, вдувая на границу раздела «металл–шлак» уголь в струе кислорода таким образом, что дуга полностью экранируется от рабочего пространства печи. При этом дуга горит в объеме, ограниченном мениском на зеркале

ванны, торцом электрода и пенистым шлаком. Тепло, выделяемое в этом объеме, расходуется на поддержание температуры мениска на зеркале ванны, равной температуре кипения железа. Часть тепла передается теплопроводностью от поверхности мениска в глубь ванны и вынужденной конвекцией, возникающей за счет электродинамических сил и барботажа ванны выделяющимися пузырьками СО. Оставшаяся часть выделяемого в замкнутом объеме тепла расходуется на испарение металла и шлака.

Поскольку количество теплоты, передаваемой теплопроводностью от «горячих пятен» и от шлака, зависит только от параметров дуги, шлака и металла (тока и напряжения дуги, толщины слоя шлака и его теплопроводности, температуры кипения металла), то увеличение общего количества теплоты, получаемой всей массой металла, может быть достигнуто за счет интенсификации вынужденной конвекции [4].

Изменение технологии плавки и условий теплообмена в ДСП привело к существенным различиям материальных и тепловых балансов плавки в печах малой и большой вместимости.

Иллюстрацией сказанного служат наши данные анализа плавки углеродистого полупродукта (~ 0,15 % С), полученного в ДСП-160 ЛПК ОАО «ОМК-Сталь», для последующей внепечной обработки (табл. 1) [5]. В табл. 2 приведены тепловые балансы плавки в современных ДСП вместимостью от 50 до 180 т.

Из табл. 1 видно, что по отношению к общему расходу металлошихты выход жидкой стали в ДСП-160 составляет 92,7 %.

Низкий выход жидкой стали и большая масса образующейся плавильной пыли свидетельствуют об интенсивном окислении железа. Это подтверждают данные табл. 2, которые показывают, что основными статьями прихода тепла являются: электрическая энергия (35–50 %), окисление железа (15–30 %), тепло, вносимое материалами (5–24 %). Полученное тепло, расходуется на нагрев металла и шлака (50–75 %) и потери (25–50 %). Отличия в соотношениях статей прихода и расхода тепла в современных ДСП вместимостью от 50 до 180 т обусловлены конструктивными и технологическими особенностями – применение чугуна (жидкого и твердого), железа прямого восстановления (окатыши, брикеты), скрапа, использование предварительного подогрева металлошихты, различных энерготехнологических режимов и режимов отдачи материалов.

Таким образом, низкий расход электрической энергии в значительной мере определяется использованием железа в качестве топлива.

Насколько рационально использовать железо в качестве топлива? Ответ на этот вопрос должна дать экономика. Сегодня в большинстве развитых стран стоимость энергоресурсов выше, чем в России,

Таблица 1

Материальный баланс полупродукта в ДСП-160 ЛПК ОАО «ОМК-Сталь»

Внесено		Получено	
Статьи	кг	Статьи	кг
Металлошихты, в том числе:	100,00	Металла	92,70
металлолома	81,21	Шлака	11,77
твердого чугуна	7,75	Пыли	6,04
горячебрикетированного железа	5,98	Газов	2,56
металла предыдущей плавки	5,06		
Электродов	0,14		
Шлака предыдущей плавки	3,85		
Извести	4,05		
Доломита	0,41		
Газообразного кислорода	4,29		
Воздуха	0,33		
Итого:	113,07	Итого:	113,07

Таблица 2

Тепловые балансы плавки в современных ДСП вместимостью от 50 до 180 т

Наименование	ДСП-50 ООО «Электросталь»	ДСП-100 № 3 ОАО «Белорусский МЗ»	ДСП-120 Consteel ОАО «Ашинский МЗ» [6]
Статьи прихода тепла	%		
Электрическая энергия	35–50	40–50	54
Тепло экзотермических реакций, в том числе:	30–45	30–40	37
окисление железа	20–30	15–20	нет данных
Тепло, поступающее от газокислородных горелок	5–10	5–10	3
Тепло, вносимое материалами	10–15	5–20	6
Статьи расхода тепла	%		
Плавление и нагрев металла и шлака	50–60	60–65	60
Потери с охлаждающей водой	15–20	15–20	7
Тепло, уносимое с дымом и газами	10–15	10–15	31
Другие потери (электрической сети, тепловые (при открытом своде, через рабочее окно и др.))	5–25	5–10	2
Статьи прихода тепла	%		
Электрическая энергия	38	50–55	37–40
Тепло экзотермических реакций, в том числе:	31	25–30	30–50
окисление железа	20	15–20	нет данных
Тепло, поступающее от газокислородных горелок	11	5–10	3–6
Тепло, вносимое материалами	20	10–15	10–24
Статьи расхода тепла	%		
Плавление и нагрев металла и шлака	51	65–75	63–65
Потери с охлаждающей водой	20	5–10	24–25
Тепло, уносимое с дымом и газами	10	7–9	9–10
Другие потери (электрической сети, тепловые (при открытом своде, через рабочее окно и др.))	19	13–16	1–3

а стоимость железа ниже, чем электроэнергии. В то же время повышение требований к качеству стали влечет за собой непрерывное повышение цен на качественный (прежде всего по содержанию примесей цветных металлов) металлолом.

Значительный угар металлошихты повышает стоимость выплавляемой стали в печах любой вместимости, а также является одним из основных сдерживающих факторов для дальнейшей интенсификации плавки.

Проанализируем факторы, влияющие на угар металла.

На первом этапе ведения плавки в ДСП малой и средней вместимости прорезаются колодцы в шихте. При этом интенсивно выделяется бурый дым – сублимация твердой шихты в пары металла. Количество сублимированного металла определяется скоростью прорезаемого колодца, которая зависит от способа ввода максимальной мощности, насыпной плотности шихты и способа укладки ее в корзине. Коэффициент теплопроводности шихты ($\lambda_{\text{шихты}}$) зависит от насыпной плотности, но всегда меньше коэффициента теплопроводности жидкого металла ($\lambda_{\text{ж}}$), так как между частицами шихты всегда есть воздушный зазор. Выделение бурого дыма подтверждает соотношение $\lambda_{\text{ж}} > \lambda_{\text{шихты}}$. Следовательно, максимальный угар металла в процессе прорезания колодцев связан с завалкой неподготовленной стружки (минимальный коэффициент теплопроводности), минимальный – при использовании тяжелой шихты. При работе на жидком чугуна появляется возможность использовать большую часть легковесного лома и стружки в нижней части корзины.

После прорезания колодца дуга устойчиво горит между торцом электрода и поверхностью ванны. Температура поверхности образовавшейся ванны, ограниченная охватывающей электроды окружностью, равна температуре кипения металла, что вызывает его интенсивное испарение, так как только небольшая часть теплоты, получаемая ванной, усваивается массой металла, обладающего низкой теплоемкостью ($c = 1,0-1,75$ кДж/кг·К) и теплопроводностью ($\lambda = 20-27$ Вт/м·К). Такое положение сохраняется до отключения печи на выпуск металла [8].

Проведен анализ процесса угара расплавленного металла испарением и приняты во внимание следующие особенности. Известно, что плотность потока массы через межфазную поверхность жидкость–пар для стационарных условий определяется температурой этой границы раздела фаз и давлением паровой среды. Состав этой среды существенно влияет на интенсивность испарения. В рассматриваемой проблеме поступающий тепловой поток должен распределяться так, чтобы минимальная его часть расходовалась на испарение металла, а максимально возможная часть – на нагрев этого металла. Это требуемое сочетание может

быть достигнуто при вполне определенном давлении и составе паровой фазы. Следует отметить, что рассматриваемая паровая фаза – сложная среда, состоящая из атомов и кластеров металла и газов, частиц пыли и капель. Готовой методики для расчета интенсивности испарения металла в такую среду в настоящее время нет.

Решена модельная задача об испарении железа (основного компонента сталей) в среду собственного пара.

Для расчета интенсивности потока испарения в случае, когда давление паров железа вблизи и вдали от поверхности испарения практически совпадают или близки по значению, получена следующая зависимость:

$$j_P = \frac{5}{3} \frac{P_S - P_\infty}{(2\pi R_{Fe} T_S)^{1/2}}, \quad (1)$$

где j_P – интенсивность потока испарения, кг/(м²·с); P_S – давление насыщенного пара железа, Па; P_∞ – давление паров железа вдали от поверхности испарения, Па; R_{Fe} – газовая постоянная для железа, Дж/(кг·К); T_S – температура межфазной поверхности, К.

Расчет интенсивности потока испарения железа в среду собственного пара проведен для нескольких вариантов соотношения давления насыщенного пара железа вблизи и вдали от поверхности испарения:

$$1) P_\infty = 0,9P_S; 2) P_\infty = 0,95P_S; 3) P_\infty = 0,99P_S.$$

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

– с увеличением температуры поверхности ванны в зоне контакта с дугой увеличивается мощность потока полезного тепла, расходуемого на нагрев металла, но в то же время увеличивается интенсивность потока испарения для всех соотношений давления паров железа вблизи и вдали от поверхности испарения;

– при приближении давления паров железа вдали от поверхности испарения к давлению насыщения паров железа вблизи поверхности испарения величина интенсивности потока испарения уменьшается [9].

Разработана методика расчета испарения в среду, содержащую посторонний (неконденсируемый) компонент.

В литературе приводится подход к решению задачи на случай интенсивной конденсации при наличии неконденсируемого компонента и соответствующая формула для приближенного аналитического расчета. Имея в виду, что в исследуемых ситуациях скорости движения образовавшегося пара значительно меньше скорости звука при температуре расплава, можно считать в первом приближении асимметрию испарения и конденсации для таких условий незначительной. Это допущение позволяет использовать упомянутое соотношение для расчета интенсивности испарения

при наличии различных посторонних газов. В качестве посторонних газов при выплавке стали в ДСП были приняты: воздух, поскольку испарение металла происходит в атмосфере печи, основной газовой составляющей которой и является воздух, а также широко используемый в черной металлургии инертный газ – аргон.

С учетом вышесказанного, определена интенсивность потока испарения в среду, содержащую посторонний компонент:

$$j_P = -\frac{5 P_{1\infty} + 0,579 P_{2\infty} (M_2/M_1) - P_S}{3 (2\pi R_{Fe} T_S)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $P_{1\infty}$ – давление насыщения паров железа, Па; $P_{2\infty}$ – давление постороннего компонента, Па; M_1 – молярная масса железа, кг/кмоль; M_2 – молярная масса постороннего компонента, кг/кмоль.

Проведены расчеты интенсивности испарения железа в среду, содержащую посторонний компонент, при различных соотношениях давлений между парами железа и постороннего компонента (воздух, аргон) в зависимости от температуры межфазной поверхности.

Анализ результатов расчетов приводит к выводам:

– интенсивность потока испарения железа в среду, содержащую посторонний компонент (воздух, аргон), значительно меньше при том же значении температуры границы раздела фаз и давлении паров железа вдали от поверхности испарения, чем при испарении железа в среду собственного пара, причем применение аргона обеспечивает меньший угар железа;

– интенсивность потока теплоты, пошедшего на испарение, уменьшается при увеличении давления насыщения паров железа и давления воздуха при одинаковых температурах поверхности испарения [9].

Традиционно для получения необходимого содержания углерода металл продувают газообразным кислородом под давлением 1000–1400 кПа. В ДСП большой и средней вместимости продувку осуществляют с помощью сверхзвуковых фурм, инжекторов, манипуляторов, которые вводят через рабочее окно или отверстия в своде и стенах печи. На печах малой вместимости металл продувают с помощью трубки, вводимой через рабочее окно вблизи границы раздела «металл – шлак». В зоне контакта струи кислорода с расплавленным металлом на поверхности ванны выделяется значительное количество теплоты за счет протекания экзотермических реакций окисления. Процесс теплоусвоения выделяющегося тепла определяется тепло- и массопереносом энергии, которые характеризуются теплоемкостью и теплопроводностью жидкого металла. Поскольку значения этих величин при температуре жидкой ванны относительно невелики, выделяющееся тепло не усваивается всей массой металла, тем более, что конвективная

составляющая теплообмена мала и массообмен в ванне металла недостаточен для выравнивания поля температур по всему объему жидкого металла. Поэтому тонкий слой металла на поверхности ванны в зоне контакта с кислородной струей кипит, пары металла окисляются и уносятся с отходящими газами. Общим недостатком традиционного способа ввода кислорода является продувка через ограниченный участок ванны. Следовательно, в объеме металла образуются локальные зоны, в которых температура металла близка к точке кипения. Это приводит к интенсивному угару металла за счет его окисления и испарения, так как значительное количество теплоты, получаемое при окислении элементов расплава, выделяется в ограниченном объеме ванны, и только часть теплоты усваивается массой металла. Причем тепловой баланс в зоне взаимодействия кислорода с жидким металлом не зависит от вместимости печи ввиду одинаково низкой теплоемкости и теплопроводности жидкого металла и равного количества теплоты, выделяющейся при окислении элементов расплава. Таким образом, часть кислорода расходуется бесполезно и ведет к уменьшению выхода годного, т. е. к увеличению угара металла. Угар металла в окислительный период плавки зависит не только от количества вдуваемого кислорода, но и от интенсивности продувки, т. е. рост скорости обезуглероживания напрямую связан с ростом угара металла.

Также на величину угара металла в большей степени влияет температура на выпуске, так как интенсивность испарения пропорциональна температуре.

Принудительный отсос газов из рабочего пространства печи сопровождается ростом угара, так как, во-первых, уносит из печи большое количество тепла с прокачиваемым через печь воздухом, которое дополнительно следует ввести, т. е. увеличить вводимую мощность, а, следовательно, и угар металла, во-вторых, снижается парциальное давление паров металла над поверхностью, что также повышает интенсивность испарения.

Угар также зависит от длительности плавки и особенно жидкого периода. Величина угара также связана с простоями печи, так как потери тепла во время простоя должны компенсироваться вводом дополнительной энергии, для чего требуется время, а, следовательно, увеличивается длительность плавки и растет угар металла.

С учетом проведенного анализа факторов, влияющих на угар металла, при выплавке легированной и высоколегированной стали в ДСП малой и средней вместимости для проведения плавки с минимальным угаром металла целесообразно:

– уложить шихту в корзину с учетом насыпной плотности ее составляющих (внизу часть стружки и легковеса, затем обрезь и шихта со средней насыпной плотностью и сверху неболь-

шую часть легковеса и стружки; при такой укладке обеспечивается быстрое погружение дуги в колодец, а при проплавлении шихты нижние слои легковеса будут покрываться жидким металлом);

– обеспечить подачу охладителя (окашши, шлакообразующие, мелкий лом и т. п.) в зоны горения дуг с момента образования жидкой ванны под электродами и в зоны продувки кислородом (постоянная подача охладителя позволяет снизить температуру поверхности ванны на указанной площади и интенсивность испарения металла);

– организовывать продувку ванны кислородом с рассредоточением зоны протекания реакций окисления элементов расплава в объеме ванны;

– проводить принудительное перемешивание металла;

– исключить «организационные» простои печи и снизить до минимума температуру металла на выпуске [8].

По нашим данным, интенсивность угара под дугами в ДСП-125 составляет ~ 30 кг/мин. При работе ДСП-125 под током в течение 33 мин угар составит ~ 1000 кг. Из величины общего угара 10 600 кг теряется за счет окисления и испарения металла в зоне продувки металла кислородом. При длительности продувки ванны кислородом равной 30 мин интенсивность угара металла составит ~ 350 кг/мин. Таким образом, для снижения суммарного угара металла за плавку в первую очередь необходимо уменьшить потери металла при продувке ванны кислородом.

В процессе окислительной продувки при эксплуатации ДСП-10 в ЭФЛЦ ОАО ММЗ «Серп и молот» нами опробовано непрерывное перемещение конца трубки, погруженной в металл, на 15–20° в каждую сторону в горизонтальной плоскости и по направлению к сталевыпускному отверстию. Опытные плавки показали, что продолжительность продувки металла кислородом сократилась на 8 мин (30 %), скорость обезуглероживания возросла в 1,35 раза, выход годного увеличился на 220 кг (2 %), уменьшился удельный расход кислорода на 30 % на одну плавку и повысилась производительность печи на 5 %. Ухудшение качества металла на опытных плавках не зафиксировано, а их результаты подтверждают эффективность данного способа ввода кислорода [10].

Эффективность традиционной продувки ванны металла кислородом через устройства, расположенные над зеркалом ванны, ниже, чем при продувке через расходомерную неохлаждаемую погружную трубку, так как, во-первых, часть струи отражается от поверхности ванны и уносится сходящими газами, и, во-вторых, кислород вводят в одну точку расплава, что приводит к повышенному угару металла из-за выделения теплоты в локальном объеме ванны расплава.

Для снижения угара металла необходимо расширить зоны контакта кислородной струи с

металлом. Одним из вариантов расширения зоны взаимодействия при продувке с введением трубки вблизи границы раздела «металл–шлак» является использование устройства, содержащего одну или несколько неохлаждаемых металлических трубок, введенных в ванну металла через отверстия в стенке печи. Кроме того, снижению температуры локальных объемов металла в зоне продувки будет способствовать перемещение погружной трубки по глубине расплава [11].

Другим вариантом решения указанной проблемы является продувка кислородом с погружением под зеркало металла сопел сводовой фурмы с непрерывным перемещением среза сопел по глубине ванны и вокруг вертикальной оси печи в течение всего периода продувки [12].

Существенный недостаток решений с расширением зоны взаимодействия кислородной струи с металлом заключается в следующем. При подаче кислорода в расплав у среза сопла образуется пузырь кислорода, который вырастает до размеров, обеспечивающих его отрыв от среза сопла и всплытие к поверхности раздела «металл–шлак». На этой поверхности пузырь рассыпается, и кислород частично поступает в шлак, а остальной кислород уносится с уходящими газами. Реакционная поверхность пузыря, на которой происходит окисление компонентов расплава, мала, поэтому эффективность использования кислорода является низкой, что увеличивает время продувки и, следовательно, угар металла.

Для снижения угара металла возможно несколько вариантов решений:

– продувка через фурму, введенную под зеркало ванны. Конструкция фурмы содержит внешнюю стальную перфорированную оболочку с отверстиями в горизонтальных сечениях фурмы [13];

– продувка через фурму, выполненную в виде гребенки или пучка труб, введенную под зеркало ванны с обеспечением непрерывного возвратно-поступательного перемещения сопел в течение всего периода продувки.

Использование предложенных способов ввода кислорода обеспечит расширение зоны контакта кислородной струи с металлом, уменьшение диаметра пузырей кислорода и, следовательно, увеличение площади реакционной зоны и времени всплытия пузырей, в течение которого протекают реакции окисления компонентов расплава. Все это приведет к уменьшению угара металла и повышению эффективности использования кислорода.

Нельзя забывать также, что интенсивное охлаждение свода, стен, фурм, горелок и т. д. заставляет принимать все возможные меры для повышения производительности и исключения простоев печи, что в значительной мере определяется подготовкой металлошихты, организацией подачи, завалки и т. д., для чего необходимо современное оборудование (шредеры и т. п.). При малой на-

Физическая химия и физика металлургических систем

сыпной плотности шихты возможно использование ДСП с переменным объемом рабочего пространства с целью исключения или уменьшения числа подвалок шихты [14].

Другим подходом к ресурсосбережению и повышению эффективности выплавки стали в ДСП является разработка и внедрение рациональных энерготехнологических режимов выплавки стали в ДСП. В период с 2010 по 2014 гг. под руководством к.т.н. В.Л. Рабиновича (ООО «НПФ «Энерготехнология») с нашим непосредственным участием проведены работы по выбору рациональных энерготехнологических режимов выплавки стали в следующих ДСП: ДСП-30 ГУП «Литейно-прокатный завод» (ГУП «ЛПЗ») (Россия, г. Ярцево), ДСП-50 ООО «Электросталь» (Украина, г. Курахово), ДСП-100 ОАО «Белорусский металлургический завод» (ОАО «БМЗ») (Республика Беларусь, г. Жлобин), ДСП-120 ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод» (ОАО «НСММЗ») (Россия, г. Ревда), ДСП-120 ОАО «Первоуральский новотрубный завод» (ОАО «ПНТЗ») (Россия, г. Первоуральск), ДСП-120 ОАО «Ашинский металлургический завод» (ОАО «АМЗ») (Россия, г. Аша), ДСП-160 ЛПК ОАО «ОМК-Сталь» (Россия, г. Выкса).

При выполнении работ был реализован комплексный подход к выбору рациональных режимов ДСП, при котором режимы работы печи рассматриваются как совокупность электрических, тепловых и технологических режимов, которые оптимизируются по отдельности и в комплексе.

Особенностями разработанных и внедренных рациональных энерготехнологических режимов являются:

– увеличение вводимой электрической мощности на 5–7 % за счет оптимизации токового режима;

– сокращение времени работы газокислородных горелок до 40–50 % от времени расплавления завалки и подвалки с установлением соотношения кислород/природный газ, равного 2 : 1, обеспечивающее повышение эффективности нагрева металлошихты за счет получения максимальной температуры газокислородного факела;

– установление расходов природного газа и кислорода с учетом расположения устройств и тепловых условий в рабочем пространстве печи («горячие» и «холодные» зоны).

– синхронная работа всех газокислородных устройств сначала в режиме горелки, а затем в режиме инжектора кислорода;

– сбалансированный расход кислорода на плавление завалки и подвалок, обеспечивающий повышение выхода годного за счет снижения потерь металла вследствие его испарения, более эффективное использование кислорода, равномерное окисление углерода по ходу плавки и, как следствие, более стабильное протекание периода доводки металла;

– применение режима дожигания отходящих газов;

– интенсивная продувка кислородом при доплавлении завалки, подвалки и в период доводки металла;

– использование природного газа для организации факела вместо подачи продувочного воздуха в сопла газокислородного устройства;

– своевременное вдувание углеродосодержащего материала для вспенивания шлака.

В результате внедрения рациональных энерготехнологических режимов работы ДСП получены следующие результаты (табл. 3). Значения удельных расходов электрической энергии, кислорода и природного газа рассчитаны на одну тонну жидкого металла.

Таблица 3

Результаты внедрения рациональных энерготехнологических режимов работы ДСП

Объект	Время под током, мин	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Расход кислорода, м ³ /т	Расход природного газа, м ³ /т	Примечания
ДСП-30 ГУП «ЛПЗ» (Россия, г. Ярцево)	Действующий режим				–
	40	378	32,2	3,5	
	Рациональный режим				
	36	372	30,0	3,5	
	Эффект				
	4	6	2,2	–	
ДСП-50 ООО «Электросталь» (Украина, г. Курахово)	Действующий режим				–
	44	409	34,1	5,7	
	Рациональный режим				
	41,5	408	29,2	2,7	
	Эффект				
	2,5	1	4,9	3,0	
Достигнуто снижение угара металла на 1,1 %					

Окончание табл. 3

Объект	Время под током, мин	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Расход кислорода, м ³ /т	Расход природного газа, м ³ /т	Примечания
ДСП-100 РУП «БМЗ» (Республика Беларусь, г. Жлобин)	Действующий режим				Использование в шихте твердого чугуна и горячебрикетированного железа
	38	416	37,3	5,3	
	Рациональный режим				
	36,5	408	36,7	4,3	
	Эффект				
	1,5	8	0,6	1,0	
Достигнуто снижение угара металла на 1 %					
ДСП-120 ОАО «НСММЗ» (Россия, г. Ревда)	Действующий режим (30 т скрапа)				Использование в шихте до 60 т скрапа
	51	419	40,0	7,5	
	Рациональный режим (30 т скрапа)				
	48,5	417	39,5	5,7	
Эффект					
	2,5	2	0,5	1,8	
ДСП-120 ОАО «ПНТЗ» (Россия, г. Первоуральск)	Действующий режим				-
	36,5	425	29,9	2,8	
	Рациональный режим				
	34,5	411	29,9	2,8	
Эффект					
	2	14	-	-	
ДСП-120 ОАО «АМЗ» (Россия, г. Аша)	Действующий режим				Непрерывная загрузка металлошихты по технологии Consteel
	51	469	35,0	0,7	
	Рациональный режим				
	47	455	34,0	1,6	
Эффект					
	4	14	1,0	-0,9	Использование в шихте до 50 т скрапа
ДСП-160 ЛПК ОАО «ОМК-Сталь» (Россия, г. Выкса)	Действующий режим				Использование в шихте твердого чугуна и горячебрикетированного железа
	42	441	42,2	6,1	
	Рациональный режим				
	40	433	37,3	4,1	
Эффект					
	2	8	4,9	2,0	

Работы по разработке и внедрению ресурсосберегающих технологий в современных электросталеплавильных цехах отмечены золотой медалью лауреата XVIII Международной промышленной выставки Металл-Экспо' 2012.

Таким образом, современная ДСП представляет собой агрегат по выплавке полупродукта для дальнейшей доводки методами внепечной обработки. Значительная доля вводимой в печь мощности приходится на тепло экзотермических реакций, т. е. сжигание металла в кислороде.

Известно, что в настоящее время большая доля металла, получаемого в России, экспортируется. Энергетические затраты на производство стали в России пока выше, чем в развитых странах. Наша конкурентоспособность поддерживается за счет меньших затрат на энергию, заработную плату и защиту окружающей среды. В ближайшее время стоимость энергоресурсов будет увеличиваться, что может снизить конкурентоспособность нашей стали.

В этих условиях необходимо искать резервы в повышении эффективности использования ДСП за счет организационных мероприятий (подготовка шихты, исключение простоев, что особенно важно при использовании водоохлаждаемых стен и свода, производство водоохлаждаемых панелей стен и сводов на отечественных предприятиях) и приведенных выше технических решений.

Литература

1. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: учеб. для вузов / В.А. Кудрин. – М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с.
2. Еланский, Д.Г. Свет и тени российской развивающейся электрометаллургии / Д.Г. Еланский // Электрометаллургия. – 2007. – № 8. – С. 2–9.
3. Сосонкин, О.М. Водоохлаждаемый свод электродуговой печи / О.М. Сосонкин, В.А. Кудрин. – М.: Металлургия, 1985. – 144 с.
4. Сосонкин, О.М. Особенности теплообмена

в дуговой сталеплавильной печи / О.М. Сосонкин, М.В. Шишимиров // *Сталь*. – 2004. – № 8. – С. 34–36.

5. О повышении эффективности производства стали в ДСП / В.А. Кудрин, В.А. Шишимиров, О.М. Сосонкин, М.В. Шишимиров // *Электрометаллургия*. – 2010. – № 10. – С. 24–29.

6. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе / В.Г. Евстратов, А.Д. Киселев, И.Ю. Зинуров и др. // *Электрометаллургия*. – 2012. – № 8. – С. 2–6.

7. Особенности материального и теплового балансов ДСП-180 ОАО «ММК» / В.А. Бигеев, А.В. Малофеев, А.В. Пантелеев и др. // *Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIII Междунар. конф. Ч. 2.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 207–211.

8. Сосонкин, О.М. Анализ факторов, влияющих на угар металла в дуговой сталеплавильной печи / О.М. Сосонкин, М.В. Шишимиров // *Электрометаллургия*. – 2002. – № 12. – С. 12–15.

9. Шишимиров, М.В. Снижение угара металла при плавке стали в дуговой сталеплавильной печи за счет уменьшения интенсивности испарения / М.В. Шишимиров, А.П. Крюков, О.М. Сосонкин // *Материалы 2-й международной научно-*

практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М., 2002. – С. 350–352.

10. Исследование возможности повышения производительности дуговой сталеплавильной печи за счет рациональной продувки металла кислородом / М.В. Шишимиров, М.П. Галкин, В.И. Савченко и др. // *Сталь*. – 2006. – № 1. – С. 31–32.

11. Пат. 2309182 Российская Федерация. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления / О.М. Сосонкин, С.И. Герцык, М.В. Шишимиров // *Б.И.* – 2007. – № 30.

12. Пат. 2364631 Российская Федерация. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления / О.М. Сосонкин, С.И. Герцык, М.В. Шишимиров // *Б.И.* – 2009. – № 23.

13. Пат. 2343205 Российская Федерация. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления / О.М. Сосонкин, С.И. Герцык, М.В. Шишимиров // *Б.И.* – 2009. – № 1.

14. А.с. 287238 СССР. Электродуговая сталеплавильная печь / А.И. Ващенко, В.А. Кудрин, М.Ф. Сидоренко, О.М. Сосонкин // *Б.И.* – 1970. – № 35.

Шишимиров Матвей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела обеспечения работы научно-технического совета и учёного совета, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, г. Москва; smatvej@yandex.ru.

Сосонкин Олег Михайлович, д-р техн. наук, профессор, Московский государственный вечерний металлургический институт, г. Москва; oleg.m.sosonkin@gmail.com.

Поступила в редакцию 23 апреля 2015 г.

RESOURCE SAVING AND RESERVES OF INCREASING EFFICIENCY OF STEELMAKING IN ELECTRIC ARC FURNACES

M.V. Shishimirov, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation, smatvej@yandex.ru,

O.M. Sosonkin, Moscow State Evening Metallurgical Institute, Moscow, Russian Federation, oleg.m.sosonkin@gmail.com

The work presents the results of analysis of heat operation of various steelmaking arc furnaces. The ways of increasing efficiency of steelmaking in EAF by special measures decreasing the waste of metal and rational energy and technological regimes of melting are considered. Waste of metal can be reduced by placing the charge in the basket with account for apparent density of components; supplying the coolant (pellets, slag-formers, fine scrap etc.) to arc burning zone from the moment of formation of liquid bath under the electrodes and to oxygen blowing zones; blowing the bath with oxygen providing distribution of the zone of reactions of melt element oxidation throughout the bath; forced stirring of the metal; decreasing the metal temperature at tapping. Rationalization of operating regimes of the furnace includes increasing the introduced electric power; optimizing current mode; reducing the working time of gas-oxygen burners to 40–50 % of the melting time with oxygen/natural gas ratio maintained 2 : 1, which provides the maximum flame temperature; establishing gas

and oxygen consumption taking into account the thermal conditions in the working chamber; synchronized operation of all gas-oxygen devices; balanced consumption of oxygen during melting in order to decrease metal evaporation; application of the regime of afterburning of waste gases; timely injection of carbon-bearing material for sponging the slag, etc.

Keywords: furnace; material balance; heat balance; waste of metal; blowing with oxygen; energy and technological regime.

References

1. Kudrin V.A. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali* [Theory and Technology of Steelmaking]. Moscow, Mir Publ.; AST Publ., 2003. 528 p.
2. Elanskii D.G. Light and Shade of Developing Russian Electrometallurgy. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, no. 8, pp. 717–723. doi: 10.1134/S0036029507080162.
3. Sosonkin O.M., Kudrin V.A. *Vodookhlazhdaemyy svod elektrodugovoy pechi* [Water-Cooled Roof of Electric Arc Furnace]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 144 p.
4. Sosonkin O.M., Shishimirov M.V. Heat Transfer in Steel-Smelting Arc Furnaces. *Steel in Translation*, 2004, vol. 34, no. 8, pp. 17–20.
5. Kudrin V.A., Shishimirov V.A., Sosonkin O.M., Shishimirov M.V. [On Increasing Efficiency of Steelmaking in EAF]. *Elektrometallurgiya*, 2010, no. 10, pp. 24–29. (in Russ.)
6. Evstratov V.G., Kiselev A.D., Zinurov I.Yu., Shakirov Z.Kh., Mamenko Yu.F., Shumakov A.M., Gindullin M.T. Thermal Operation of the DSP-120 Consteel Furnace in the Ashinsk Metallurgical Works. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2013, no. 6, pp. 402–405. doi: 10.1134/S0036029513060050.
7. Bigeev V.A., Malofeev A.V., Pantelev A.V., Ivin Yu.A., Valiakhmetov A.Kh. [Features of Material and Heat Balance of DSP-180 Electric Arc Furnace at JSC “MMK”]. *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali: Materialy XIII Mezhdunarodnoy konferentsii. Ch. 2* [Modern Problems of Electrometallurgy of Steel: Materials of XIII International Conference. Pt. 2]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2007, pp. 207–211. (in Russ.)
8. Sosonkin O.M., Shishimirov M.V. [Analysis of Factors Affecting Waste of Metal in Steelmaking Electric Arc Furnace]. *Elektrometallurgiya*, 2002, no. 12, pp. 12–15. (in Russ.)
9. Shishimirov M.V., Kryukov A.P., Sosonkin O.M. [Decreasing Waste of Metal in Electric Arc Furnace Steel Melting by Means of Decreasing Evaporation Intensity]. *Materialy 2-y mezhhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Avtomatizirovannye pechnye agregaty i energosberegayushchie tekhnologii v metallurgii”* [Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference “Automated Furnace Units and Energy Saving Technologies in Metallurgy”]. Moscow, 2002, pp. 350–352. (in Russ.)
10. Shishimirov M.V., Galkin M.P., Savchenko V.I., Rybin V.N., Sosonkin O.M. Improving the productivity of an arc smelting furnace by rational oxygen injection. *Steel in Translation*, 2006, vol. 36, no. 1, pp. 26–28.
11. Sosonkin O.M., Gertsyk S.I., Shishimirov M.V. *Sposob vyplavki stali v dugovoy staleplavil'noy pechi i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of Steel Smelting in Arc Furnace and a Apparatus for Implementation Thereof]. Patent RF, no. 2309182, 2007.
12. Sosonkin O.M., Gertsyk S.I., Shishimirov M.V. *Sposob vyplavki stali v dugovoy staleplavil'noy pechi i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of Steel Smelting in Arc Furnace and a Apparatus for Implementation Thereof]. Patent RF, no. 2364631, 2009.
13. Sosonkin O.M., Gertsyk S.I., Shishimirov M.V. *Sposob vyplavki stali v dugovoy staleplavil'noy pechi i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of Steel Smelting in Arc Furnace and a Apparatus for Implementation Thereof]. Patent RF, no. 2343205, 2009.
14. Vashchenko A.I., Kudrin V.A., Sidorenko M.F., Sosonkin O.M. *Elektrodugovaya staleplavil'naya pech'* [Electric Arc Steelmaking Furnace]. Patent USSR, no. 287238, 1970.

Received 23 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шишимиров, М.В. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП / М.В. Шишимиров, О.М. Сосонкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 70–79.

FOR CITATION

Shishimirov M.V., Sosonkin O.M. Resource Saving and Reserves of Increasing Efficiency of Steelmaking in Electric Arc Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 70–79. (in Russ.)