

УДК 669.187.2

АДАПТАЦИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ К НЕТРАДИЦИОННЫМ СЫРЬЕВЫМ МАТЕРИАЛАМ

© Грант Майкл¹; Блоштейн Филипп¹; Бут Светлана Николаевна²; Кауфман Коуди³

¹ Air Liquide S.A. Франция, Париж

² Air Liquide Россия. Москва. E-mail: info.moscow@airliquide.com

³ Подразделение ACI, Air Liquide Advanced Technologies США, LLC

Статья поступила 24.10.2013 г.

Рассмотрено несколько проблем, связанных с использованием нетрадиционных шихтовых материалов при выплавке стали в электродуговых печах. Показаны результаты внедрения технологии Air Liquide ACI (American Combustion Inc. – дочерняя компания Группы Air Liquide) в этой области. Обсуждены специфические аспекты, связанные с использованием железа прямого восстановления и чугуна в чушках, а также с использованием жидкого чугуна в электродуговых печах.

Ключевые слова: электродуговая печь (ДСП); жидкий металл; жидкий чугун; железо прямого восстановления; горячебрикетированное железо; производство стали с продувкой кислородом; боковые горелки.

Ожидается, что общий объем производства стали в России увеличится с 74,4 млн т в 2013 г. до 79,3 млн т в 2015 г. [1]. Весь этот рост будет почти полностью обеспечиваться за счет роста в секторе стали, выплавляемой в электродуговых печах (EAF – ДСП). Это соответствует мировой тенденции роста производства электростали. Более того, ожидается, что объем сталеплавильного производства в странах СНГ к 2030 г. увеличится на 69 млн т, из них 44 млн т будет приходиться на производство стали в электродуговых печах [2]. Сооружение ДСП является менее капиталоемким, и на производство 1 т стали в них требуется меньше трудозатрат. Сейчас в России на разных стадиях строительства и запуска находятся 14 проектов сооружения ДСП [1].

Традиционным шихтовым материалом для ДСП является лом черных металлов. Однако количество имеющегося в России металлолома постепенно уменьшалось таким образом, что из крупнейшего в мире экспортера металлолома в 2005 г. Россия к 2012 г. превратилась в наименее значительного [1, 2]. Россия имеет крупнейшие в мире достоверные запасы природного газа, которые делают привлекательным производство железа прямого восстановления (DRI) [2]. Эти тенденции были осознаны рынком давно, и в России уже имеются действующие предприятия, производящие и продающие DRI и чушковый чугун [1, 3]. Таким образом, на российский рынок поступает около 2,5 млн т/год DRI (горячебрикетированного железа – НБИ) [3] и 2,1 млн т/год чу-

гуна в чушках. Использование чушкового чугуна и железа прямого восстановления в ДСП имеет несколько технических преимуществ:

- возможность растворения остаточных случайных элементов, присутствующих в скрапе, что позволяет повысить чистоту стали и обеспечить производство более качественной стали;

- гибкость в использовании более дешевого скрапа более низкого качества для обеспечения наиболее низких расходов на производство стали равноценных марок;

- содержание в чушковом чугуне более 4% углерода обеспечивает дополнительную химическую энергию для производства стали. Хотя производимое в настоящее время железо прямого восстановления содержит более 3% углерода, присутствующие в нем оксиды железа требуют при плавке дополнительной энергии на восстановление. Чугун в чушках не содержит значительного количества оксидов железа в случае правильного хранения до использования.

Производство стали в электропечах с использованием в большом количестве железа прямого восстановления и чушкового чугуна отличается от производства стали в ДСП с завалкой традиционного скрапа. Соответственно отличается использование кислорода при этих технологиях. В России имеются предприятия, производящие железо прямого восстановления и использующие его для получения стали в ДСП, на других заводах производится завалка чушкового чугуна со скрапом. Среди предприятий, на которых произ-

водится завалка в печи значительной доли железа прямого восстановления, можно найти примеры излишнего использования кислорода, что приводит к резкому сокращению выхода годного металла. Поэтому в эксплуатационных параметрах необходимо учитывать химический состав железа прямого восстановления, используемого в качестве сырья. Чушковый чугун и железо прямого восстановления, если их доля в шихте превышает 30%, требуют при завалке особого внимания.

Процессы с использованием жидкого металла и чушкового чугуна. Чушковый чугун в большинстве стран считается основным сырьем для ДСП. В нем очень мало или вообще отсутствуют нежелательные случайные элементы при содержании более 4% углерода для выделения химической энергии. Благодаря высокой плотности не возникают проблемы с его погружением в расплав. Однако по сравнению с большинством лучших сортов скрапа он более дорогостоящ. Для осуществления технологии выплавки стали с использованием жидкого металла (жидкого чугуна) необходимо, чтобы ДСП находилась вблизи доменной печи. Использование жидкого чугуна имеет преимущества перед применением чушкового, в том числе очень важное – высокое теплосодержание (его температура при загрузке находится в пределах 1200–1400 °С). Это, естественно, дает экономию электроэнергии и обеспечивает повышение производительности. По наблюдениям авторов, за пределами Индии и Китая жидкий металл в ДСП обычно не используется, но его применение заслуживает внимания, так как многие эксплуатационные проблемы одинаковы при использовании как жидкого металла, так и чушкового чугуна (после его расплавления).

Практические аспекты использования жидкого чугуна в электродуговых печах. Использование жидкого чугуна в электродуговых печах имеет как преимущества, так и недостатки. Как уже было сказано выше, наиболее значительное преимущество – его высокое теплосодержание. Жидкий чугун содержит также около 4,5% углерода, что обеспечивает дополнительную энергию за счет обезуглероживания [4].

В то же время использование жидкого чугуна в ДСП имеет два основных недостатка:

- вследствие реакции между жидким чугуном с высоким содержанием углерода и сильно окисленным шлаком, остающимся в печи, во время загрузки жидкого металла могут иметь место бурные всплески;

- электропечи предназначены для расплавления скрапа, а не для смешивания в ванне. Во время рафинирования в ванне могут возникнуть градиенты концентрации углерода, что может приводить к бурным реакциям, при которых металл и шлак вытесняются из печи через шлаковую дверцу.

Проблемы производительности. Производительность ДСП при использовании жидкого металла зависит от мощности кислородных фурм и боковых горелок. Потребление электроэнергии снижается с ростом количества загружаемого в печь жидкого чугуна (рис. 1), что приводит к увеличению производительности печи. Более того, реальная производительность печи (см. рис. 1) была выше определенной теоретическими расчетами, которые сделаны в предположении, что температура жидкого металла составляет 1200 °С. На практике температура жидкого металла превышала 1200 °С, что привело к более низкому энергопотреблению по сравнению с расчетным (см. рис. 1).

При загрузке в печь больших количеств жидкого металла (а до этого использовался только скрап) ее производительность первоначально повышается. Когда содержание жидкого металла превышает пороговое значение, производительность снижается, так как действует ограничение, связанное с возможностями системы подачи кислорода. На рис. 2 показано снижение производительности печи после того, как доля жидкого металла в шихте превысила 40%.

Печь была оснащена боковыми горелками PyreJet™, каждая с возможностью подачи в ванну кислорода со сверхзвуковой скоростью (2000 м³/ч). Она была также оборудована двумя кислородно-топливными горелками Ругох™ для расплавления лома с непрогретыми участками [5]. Система PyreJet™ (включающая в себя клапанный механизм

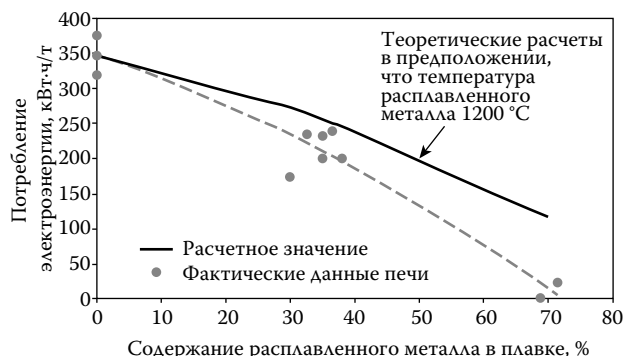


Рис. 1. Потребление электроэнергии в зависимости от доли загружаемого жидкого чугуна

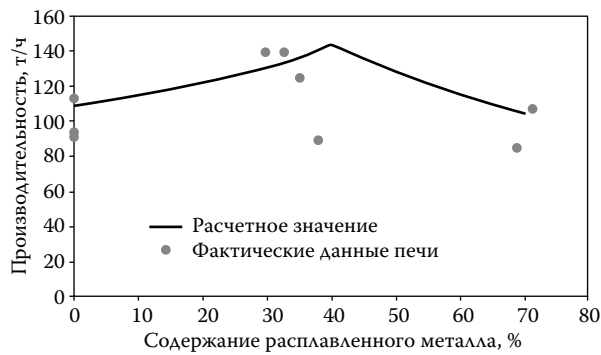


Рис. 2. Производительность печи в зависимости от доли жидкого чугуна в шихте при расходе кислорода 10 000 м³/ч

и горелки) была спроектирована для эффективного обезуглероживания расплава в ванне с целью повышения производительности и снижения потребления энергии при ведении плавки с использованием в шихте до 20% чушкового чугуна. Результаты работы печи до и после установки PyreJet™ показаны в табл. 1. При увеличении доли жидкого металла появилась необходимость в использовании загрузочного окна фурмы (4000 м³/ч), чтобы увеличить

возможность подачи кислорода до 10 000 м³/ч. На рис. 2 показана производительность печи при расходе кислорода 10 000 м³/ч.

Работа печи при загрузке более 35% жидкого чугуна. Доля жидкого чугуна (см. рис. 1 и рис. 2), загружаемого в эту печь, достигла 70%, при этом в большинстве плавки использовали около 50% жидкого металла. Вследствие высоких цен на газообразное топливо, а также из-за высокого содержания жидкого металла, на этом заводе перешли с горелок PyreJet™ на фурмы специальной конструкции ALARC™-Jet – дувание со сверхзвуковой скоростью без защиты от пламени (рис. 3).

Фурма ALARC™-Jet предназначена для ДСП, в которых для предварительного нагрева и расплавления скрапа не требуется газообразное топливо, особенно когда используется жидкий чугун или в печах, которые почти полностью работают в условиях жидкой ванны (непрерывная

Таблица 1. Улучшение показателей по производству стали специальных марок на заводе JianYin Xingcheng после установки системы горелок PyreJet™ [5]

Параметр	До установки PyreJet™ – 100% лома	После установки PyreJet™	
		100% лома	20% жидкого металла
Завалка лома (за исключением чушкового чугуна), кг/т	738,1	743,8	712,4
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т заготовок	346	324	285
Выход годного, % (жидкий металл/скрап)	91,5	91,5	92,1
Доля %: чушкового чугуна в шихте	32,5	29,4	15,0
жидкого чугуна, заливаемого в печь	0	2,6	19,4
Расход: смеси (пропан/бутан), м ³ /т		1,25	0,95
кислорода, м ³ /т	46,8	51,9	46,9
электродов, кг/т	1,04	0,99	0,95
углерода, кг/т	7,6	6,4	5,4

Таблица 2. Сравнение производительности печи при использовании ALARC™-Jet и PyreJet™ при работе с высокой долей жидкого чугуна в завалке

Параметры плавки в печи DC EBT	Горелка PyreJet™	Фурма ALARC™-Jet	ALARC™-Jet с поправкой на долю жидкого чугуна до 23,3%
Первая завалка, т	61,8	61,7	61,7
Жидкий чугун, т	28,4	23,6	27,8
Вторая завалка, т	31,0	34,0	29,8
Доля жидкого чугуна, %	23,3	19,7	23,3
Электроэнергия, кВт·ч/т	261	269	260
Дувание O ₂ через окно загрузочной фурмы, м ³ /т	24,5	25,6	–
Дувание O ₂ через фурмы, м ³ /т	19,7	20,9	–
Время под током, мин	33	33	32
Время от выпуска до выпуска плавки, мин	57	51	50

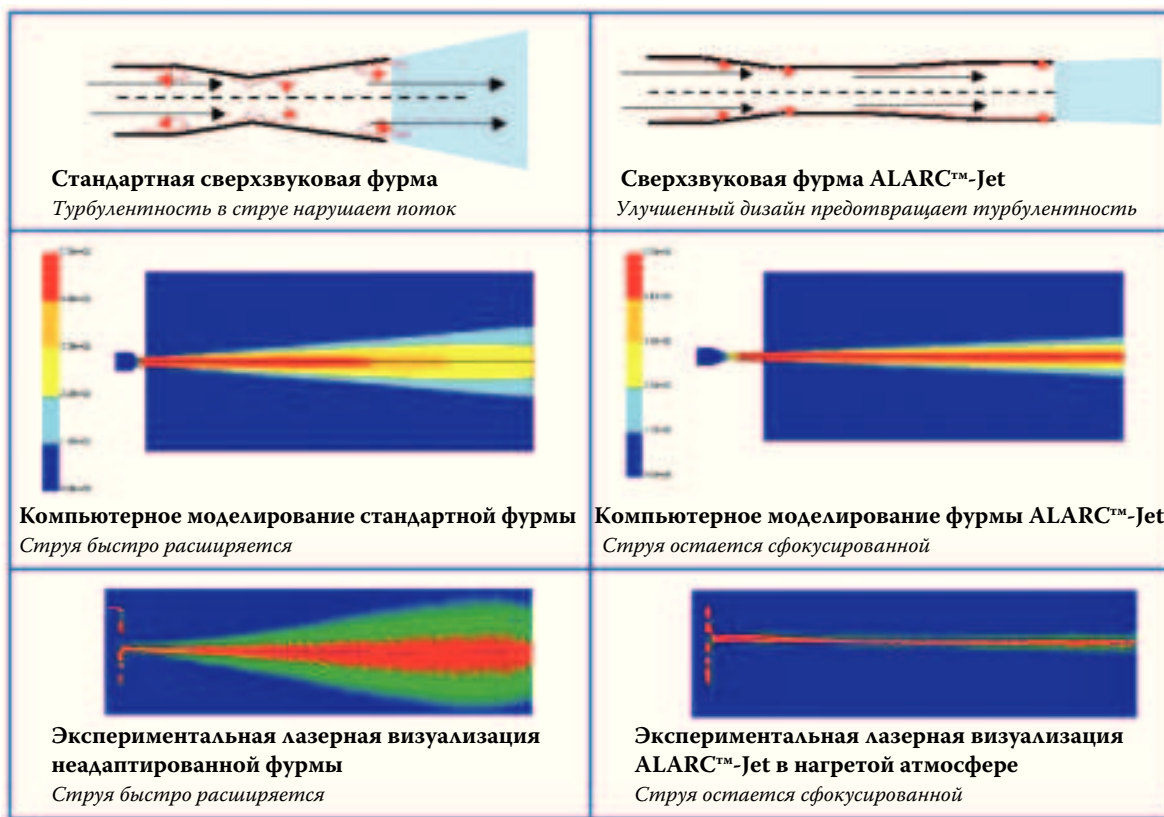


Рис. 3. Техническое описание боковой сверхзвуковой кислородной фурмы ALARC™-Jet

подача DRI). Оптимизированное сверхзвуковое сопло этой фурмы при высокой температуре предотвращает затягивание окружающей газовой среды в струю и обеспечивает сильно сфокусированный сверхзвуковой поток кислорода, не требующий защитной оболочки пламени.

В табл. 2 приведены сравнительные средние показатели работы печи при использовании горелки PureJet™ и после установки фурм ALARC™-Jet. Из этих данных видно, что газообразное топливо, используемое при работе печи, не дает никакой дополнительной энергии, даже когда доля жидкого чугуна в шихте всего 23%. ALARC™-Jet устанавливается на панели BASILISK™ B-400 или B-1000, которая дает возможность разместить ALARC™-Jet в положении, позволяющем оптимально подавать в ванну как углерод для вспенивания шлака, так и кислород при сведении к минимуму износа огнеупоров (рис. 4).

Вдувание углерода. Правильное регулирование вдувания углерода более важно при использовании нетрадиционных сырьевых материалов, чем при работе с использованием скрапа: в частности, при работе печи с большой долей жидкого чугуна, чушкового чугуна и особенно DRI возникают проблемы безопасности, связанные с неудовлетворительными условиями смешива-

ния в ДСП. Этот фактор усугубляется еще больше при загрузке железа прямого восстановления, которое из-за более низкой плотности остается вблизи верхней части ванны. В ДСП естественная конвекция очень незначительна, так как вся энергия (электрическая и химическая) поступает в верхнюю часть ванны, а более тяжелый холодный жидкий металл с высоким содержанием углерода остается в нижней части ванны. По мере увеличения температуры в верхней части ванны перемешивание расплава становится менее интенсивным.

В процессе рафинирования в ванне формируются градиенты концентрации углерода при относительно низкой его концентрации вблизи мест вдувания кислорода. Шлак в этих местах содержит значительное количество FeO. Загрузка железа прямого восстановления (содержащего FeO) через свод печи способствует более высокому содержанию FeO в шлаке. В результате при внезапном перемешивании ванны (вызванном обрушениями скрапа или наклоном печи) может произойти перемешивание высокоуглеродистой стали (на дне) с участками расплава с высоким кислородным потенциалом. В результате происходит следующая реакция:





Рис. 4. Панели BASILISK™ для монтажа фурмы ALARC™-Jet

При выделении газа в ходе этой реакции возникает взрывоопасность, может произойти выброс шлака и иногда стали из шлаковывпускного отверстия, а в экстремальных ситуациях – попадание струи на электрододержатели. Такая реакция всегда сопровождается значительным снижением температуры ванны (более чем на 20 °С) вследствие эндотермического характера такого «кипения». Если это случается в конце плавки (как обычно и происходит), то вскрытие лётки откладывается, так как для нагрева ванны до температуры кипения необходимо определенное время. Вдувание углерода в этих местах приводит к снижению количества FeO в шлаке по следующей реакции:



Для регулирования содержания FeO в шлаке углерод должен вдуваться автоматически с возможностью регулирования скорости. Идеальная скорость вдувания углерода определяется путем

расчета баланса массы с последующими испытаниями и адаптацией к профилю углеродного потока.

Вдувание углерода должно начинаться в момент или вскоре после начала сверхзвукового вдувания кислорода в ванну и продолжаться в течение всего процесса рафинирования. Для регулирования содержания FeO в шлаке необходимо автоматическое управление системой вдувания углерода, в том числе с возможностью использования при этом переменной скорости, для поддержания идеальной скорости вдувания углерода в течение всей плавки и процесса рафинирования. В ДСП для всех систем ACI PyreJet™ и ALARC™-Jet необходимо использовать регулируемый способ вдувания углерода, по меньшей мере

через две позиции в печи с тем, чтобы углерод присутствовал в местах, где может образоваться высокий кислородный потенциал. В идеале углерод следует вдувать в местах вдувания кислорода, что дает возможность индивидуального регулирования скорости вдувания углерода в каждом из этих мест. В этом случае для каждой сверхзвуковой фурмы нужен специальный инжектор.

Характеристики работы PyreJet™ и ALARC™-Jet в печах с загрузкой большой доли жидкого металла. В табл. 3 приведены характеристики работы некоторых печей с загрузкой жидкого чугуна на предприятиях, где используется технология Air Liquide ACI. Улучшение рабочих характеристик частично происходит вследствие увеличения потребления кислорода, но более важным является тот факт, что системы PyreJet™ /ALARC™-Jet были спроектированы для подачи кислорода со скоростью, позволяющей закончить рафинирование при достижении ста-

Таблица 3. Улучшение показателей работы систем PyreJet™ (PJ) и ALARC™-Jet (AJ) в печах с загрузкой жидкого чугуна

Параметр	Печь 1, PJ		Печь 2, PJ		Печь 3, AJ		Печь 4, PJ		Печь 5, PJ	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
Масса плавки, т	50	75	125	125	40	40	105	105	95	95
Потребление энергии, кВт·ч/т	363	293	346	285	280	143	349	288	294	238
Время под током, мин	51	39	54	45	70	36	38,4	32,5	31,2	24,5
Мощность трансформатора, МВА	45	65	90	90	15	15	100	100	70	70
Расход смеси пропан/бутан/природный газ, м³/т	0	1,7	0	1,2	0	0	0	2,2	0	4
Расход кислорода, м³/т	40	36,5	46,8	46,9	47	56	20	25,2	42	49
Доля жидкого металла в шихте, %	0	13	0	20	30–50	50	20	20	32,7	40,2

люю температуры выпуска плавки. Ранее почти во всех случаях применения PureJet™ рафинирование стали с использованием кислорода было стадией, ограничивающей скорость процесса. Вдувание кислорода и углерода осуществлялось с учетом того, что в ванне должно оставаться достаточно растворенного углерода, который должен использоваться как источник энергии для перегрева расплава без чрезмерного окисления шлака до самого окончания процесса.

Практические недостатки использования чушкового чугуна в электродуговых печах. Чугун в чушках обычно поставляют заводам, имеющим ДСП, которые стремятся к производству продукции более высокого качества, или заводам, которым нужно повысить производительность. Чугун в чушках очень плотный материал, он обладает всеми достоинствами жидкого чугуна за исключением того, что он не приносит дополнительного тепла в процесс. После того, как чушковый чугун расплавляется вместе со скрапом шихты, большое количество углерода из него, растворяющееся в ванне жидкой стали, удаляется кислородом. При сгорании растворенного углерода выделяется тепло, необходимое для процесса, что снижает потребление электроэнергии, тем самым увеличивая производительность.

Чугун поставляется в виде небольших чушек (слитков) массой около 10 кг [6]. Часто чугун в чушках производится из избыточного жидкого чугуна, выпускаемого на предприятии с полным металлургическим циклом в периоды, когда, например, кислородный конвертер не работает. Это дает возможность продолжать эксплуатацию доменной печи при оптимальном уровне производительности. В России имеется одна компания, производящая чугун в чушках для оптового рынка, т.е. 100% производимого ею чугуна поставляется для переплава электросталеплавильным и литейным цехам.

Считается, что существует максимальное количество чушкового чугуна (20–30% от завадки лома), которое благодаря физическим свойствам чугуна может загружаться в электродуговую печь из корзины со скрапом. Высокая плотность чушкового чугуна позволяет легко загружать его из корзины, но необходимо

тщательно следить за тем, чтобы чугунные чушки не слипались друг с другом (не образовывали комков). Чугун в чушках расплавляется при более низкой температуре, чем скрап, в связи с чем чушки начинают слипаться друг с другом при более низкой температуре, чем остальной скрап. Их необходимо загружать в корзину тонкими слоями между слоями скрапа, чтобы свести к минимуму скопление чушек в процессе плавки. Кроме того, слои чугуна в чушках следует располагать посередине 2/3 корзины, чтобы предотвратить прилипание чугуна к стенкам печи [7], а также воспрепятствовать погружению слоев чушкового чугуна в оставшийся после вскрытия лётки расплав, где он образует крупные скопления. Из-за его высокой плотности для расплавления необходимо больше времени, чем для расплавления скрапа. Поэтому при подготовке корзины со скрапом следует стремиться к тому, чтобы производить завадку чугуна в чушках в печь в то время, когда она будет подвергаться воздействию интенсивной энергии дуги, тогда он будет расплавляться до или одновременно со скрапом.

Если отсутствует установленная система загрузки чугуна в чушках в корзину, то при некоторых плавках в печи будут образовываться его крупные скопления, в то время как в других плавках чугун в чушках будет расплавляться быстро и эффективно. Это приводит к большим колебаниям в работе печи. На рис. 5 приведен пример работы китайской ДСП, отражающий колебания энергопотребления в завалках, со-

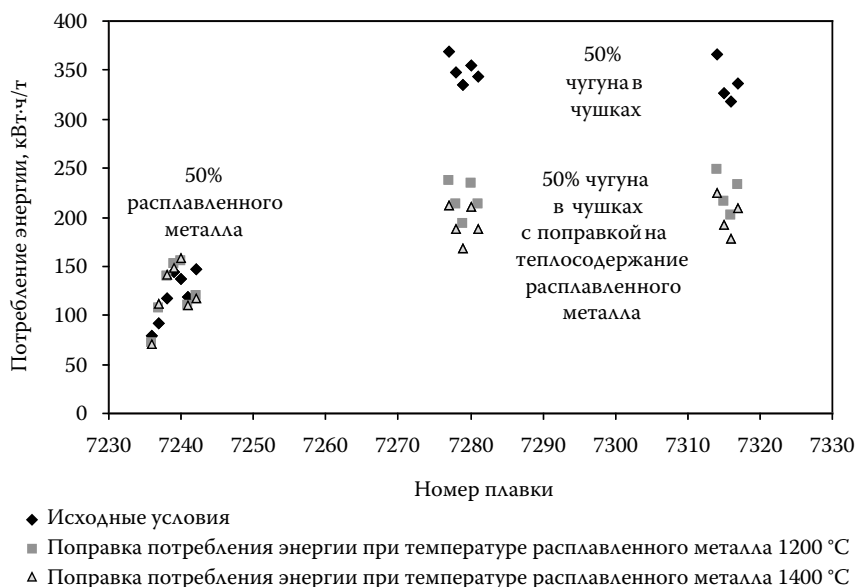


Рис. 5. Сравнение энергопотребления при использовании в завалке 50% жидкого чугуна и 50% чугуна в чушках с поправкой на теплосодержание жидкого чугуна

стоящих из 50% жидкого чугуна (+50% скрап) и 50% чугуна в чушках (+50% скрап) в течение трех дней. Несмотря на описанные выше проблемы с использованием жидкого чугуна, он является очень хорошим шихтовым материалом. Однообразие его химических свойств обуславливает заметное преимущество при рафинировании стали. Чугун в чушках должен иметь такие же химические свойства (после расплавления), как жидкий чугун, но применение энергии (электрической и химической) для плавки с чушковым чугуном намного менее эффективно из-за проблем с его расплавлением. Таким образом, если чугун в чушках плавится очень эффективно, то потребление энергии после теоретической поправки на теплосодержание должно быть очень близким к потреблению энергии в плавках с использованием жидкого чугуна. Из рис. 5 видно, что потребление электроэнергии, скорректированное с учетом теплосодержания жидкого чугуна, было на 74–99 кВт·ч/т выше в случае загрузки 50% чугуна в чушках по сравнению с потреблением при плавках с загрузкой 50% жидкого металла.

Наблюдения за состоянием печи после вскрытия лётки показали, что на поде часто оставались крупные скопления чушек, выступающих из расплавленного металла и напоминающих островки на озере. Часто эти «островки» располагались вдали от мест подачи кислорода, что было вызвано использованием слишком большого количества чугуна в чушках и неправильным расположением его в загрузочной корзине. Это также создает угрозу безопасности: нерасплавленный чугун содержит большое количество углерода, который в случае внезапного расплавления может вступить в бурную реакцию с окисленным шлаком.

Работа печи при большой доле железа прямого восстановления в шихте. Использование железа прямого восстановления в ДСП дает определенные преимущества, одним из которых является потенциальное улучшение качества стали. Так как железо прямого восстановления (особенно железо, полученное с применением газификации угля) содержит намного меньше примесей, чем низкосортный скрап, оно отвечает гораздо более строгим требованиям по качеству. Если даже с целью снижения затрат в состав шихты включается некоторое количество низкокачественного лома, то необходимые требования все еще выполняются. В печах, в которые в небольшом количестве загружается железо прямого

восстановления (DRI) или горячебрикетированное железо (HBI), загрузка может производиться с использованием корзины для скрапа. Однако, если доля DRI (HBI), загружаемого в ДСП, превышает 20–25%, его необходимо загружать непрерывно (обычно через свод), чтобы предотвратить скопление частиц DRI (HBI). В случае завалки более 60% DRI (HBI) в печи после вскрытия лётки должно оставаться значительное количество «болота» жидкой стали, и завалка DRI (HBI) должна производиться непрерывно при включенном электропитании.

Степень металлизации железа прямого восстановления определяется количеством остающегося в нем FeO. Многие производители DRI по технологии с применением газификации угля пытаются выпускать DRI с достаточным содержанием углерода, чтобы сбалансировать содержание в нем FeO. Это невозможно при процессе прямого восстановления железа во вращающейся печи. В табл. 4 приведены типичные характеристики DRI, которое получили при использовании газификации угля и во вращающейся печи [8]. Высокое содержание пустой породы в железе прямого восстановления требует загрузки большего количества извести для получения шлака, по качеству сравнимого с тем, который формируется при работе ДСП с использованием только металлического скрапа. В табл. 4 показано типичное V-соотношение компонентов пустой породы (основность от 0,06 до 0,6) в DRI по технологии газификации угля. Для разжижения этих компонентов и для получения шлака с основностью $V_4 \approx 2,5-3,0$ необходимо добавлять известь, для чего требуется дополнительная энергия. FeO в DRI должен восстанавливаться по реакциям (1) или (2), характеризующимся высокой степенью эндотермии, что требует гораздо больше энергии (на 1 т стали), чем при работе ДСП с использованием 100% металлического скрапа.

Предприятия отмечают снижение выхода годного металла при использовании DRI, так как при этом учитывается частично или вообще не учитывается процедура дувания кислорода. Высокое содержание FeO в DRI – основная причина более низкого выхода металла, так как в процессе плавки используется слишком много кислорода или вдувается недостаточное количество углерода.

При проектировании и внедрении системы ACI PureJet™ на Оскольском электрометаллургическом комбинате в России все эти аспекты были учтены [9]. Печь на ОЭМК вместимостью

Таблица 4. Типичные характеристики DRI / HBI, полученных в печах, работающих на газовом топливе, и во вращающихся печах [8]

Характеристика	Печь с газификацией угля	Вращающаяся печь, работающая на твердом угле
Общее содержание железа, %	87–94	90
Металлическое железо, %	83–88	80
Степень металлизации, %	91–95	88
FeO, %	6–11	13–14
Углерод, %	0–4,5	0,25
Фосфор, %	0,01–0,080	0,08
Сера, %	0,003–0,15	0,05
Кремний, %	1,0–4,5	Кремний + глинозем 5,5% макс.
Глинозем, %	0,3–2,0	
CaO, %	0,2–1,5	CaO + MgO 1,0% макс.
MgO, %	0,1–0,6	
Основность $B_4 = (CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)$	0,06–0,6	–
Неметаллические включения (чаще всего обуглившиеся частицы), %	–	Макс. 1
Размер		3–20 мм для окатышей DRI, 0–4 мм для мелких частиц DRI
Объемная плотность		1,8 г/см ³ для окатышей DRI, 1,75 г/см ³ для мелких частиц DRI

Таблица 5. Результаты работы PyreJet™ в печи с большой долей DRI в шихте [9]

Параметр	До установки PyreJet™ (3 мес.)	После установки PyreJet™	Δ	Δ, %
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	610	553	–57	–9,3
Время под током, мин	96	88	–8	–8,3
Расход: кислорода, м ³ /т	14	27	+13	+92,9
природного газа, м ³ /т	0	2,7	+2,7	–
электродов, кг/т	2,4	2,3	–0,1	–4,2

150 т жидкой стали оснащена трансформатором мощностью 90 МВА. При ее эксплуатации в шихте используется более 50% DRI. Была поставлена задача увеличить скорость расплавления DRI с помощью горелок PyreJet™. Основанием для установки системы PyreJet™ послужила экономия электроэнергии – 30 кВт·ч/т. Для достижения поставленной цели потребление кислорода необходимо было увеличить на 13–15 м³/т с одновременным вдуванием значительного дополнительного количества углерода для уравновешивания излишнего кислорода. Результаты изменений при использовании PyreJet™ показаны в табл. 5 [9]. Вдувание углерода в месте вдувания кислорода (на каждой PyreJet™) привело к улучшению состава вспененного шлака. Это дало возможность увеличить подводимую мощность, что способствовало снижению энер-

гетических потерь при осуществлении процесса.

Работа печи при больших количествах DRI и жидкого металла. Оригинальная практика загрузки в ДСП большой доли DRI и жидкого металла из доменной печи распространена в основном только в Индии. Однако в будущем ее более широкое использование может стать необходимым, поэтому имеет смысл кратко рассмотреть опыт эксплуатации печи

с использованием такой шихты. Сочетание этих двух сырьевых материалов ставит множество задач. Первая проблема – это опасность смешивания жидкого чугуна (насыщенного углеродом) с DRI (в Индии обычно используют вращающуюся печь, работающую на угле). Как видно из табл. 4, вследствие более низкой степени металлизации DRI из вращающейся печи, работающей на угольном топливе, содержит 13–14% FeO.

FeO вступает в бурную реакцию с углеродом из жидкого металла, что часто вызывает выбросы, отличающиеся высокой эндотермией и значительно снижающие температуру ванны. Поэтому расплавление DRI должно обязательно происходить в тот момент, когда оно поступает в расплав, чтобы избежать скоплений, которые могут внезапно расплавиться, вызвав в ванне интенсивное кипение. Скопления DRI предотвращаются

Таблица 6. Показатели работы ДСП при загрузке 46% жидкого металла, 45% DRI и 9% скрапа после внедрения системы ALARC™-Jet

Параметр	За 3 мес до установки ALARC™-Jet	После установки ALARC™-Jet	Снижение
Потребление энергии, кВт·ч/т	398,3	335,6	62,7
Время под током, мин	58,7	36,5	22,2

благодаря подводу максимальной энергии при регулировании скорости их подачи до уровня, препятствующего накоплению в ванне твердых окатышей.

Вдувание кислорода и углерода должно начинаться до подачи DRI и производиться автоматически. Реакции между углеродом в жидком металле и кислородом обеспечивают необходимую энергию для доведения температуры ванны до температуры подачи DRI (обычно около 1540–1560 °С). Плавки в ДСП, произведенные только из жидкого металла и DRI, наиболее подходят для рафинирования расплава с использованием ALARC™-Jet. В табл. 6 приведены данные по усовершенствованию процесса эксплуатации, произведенные после оснащения ДСП в Индии системой ALARC™-Jet.

Заключение. Вследствие различных ограничений, связанных с доступностью и стоимостью сырьевых материалов, при производстве стали в электродуговых печах могут применяться нетрадиционные процессы. Скрап, чушковый чугун, железо прямого восстановления (получаемое в печах, работающих на газовом или угольном топливе) различного качества и жидкий металл могут применяться в самых разных пропорциях. Это особенно актуально для некоторых стран мира, в том числе для России, которая является одним из мировых лидеров в производстве чушкового чугуна и железа прямого восстановления.

Способы вдувания кислорода должны быть адаптированы к различным вариантам производства стали. В компании Air Liquide разработаны технологические решения для нескольких

вариантов работы ДСП, которые могут считаться нетрадиционными. Некоторые из таких технологий еще находятся на стадии разработки, и как только технологические

новшества пройдут соответствующие этапы разработки, Air Liquide адаптирует их к новым потребностям рынка.

Библиографический список

1. **Frolov S.** Koks Group's Success Strategy: Leadership in Niche Markets and Vertical Integration: Presented at the Moscow Steel Summit (Moscow, Russia. 4–5 June, 2013).
2. **Sengupta S.** DRI Production: Where are the New Hubs: Presented at World DRI & Pellet Congress (Abu Dhabi, 29–30 April 2013).
3. **Mishin Y.** Overview of DRI/HBI Market Developments: Presented at World DRI & Pellet Congress (Abu Dhabi, 29–30 April 2013).
4. **Grant M., Kaiser K., Cantacuzène S.** Optimisation of Oxygen Steelmaking in Non-Conventional EAF Operations: AISTech'2005.
5. **Qian Gang, Li Wenshuang, Xu Xiaohong et al** ACI PyreJet™ PyreJet Technology: A Key Step in JYXC's Strategy Towards World Class Specialty Steel Production: ISS Tech (Indianapolis, USA. April 27–30, 2003).
6. http://en.wikipedia.org/wiki/Pig_iron
7. **Jones J.A.T** Considerations for the Feeding and use of Alternate Iron Materials in the EAF: Proc. 58th Electric Furnace Conf. and 17th Process Technology Conf.: Iron and Steel Society (Orlando, Florida. November 12–15, 2000.).
8. **Scarnati T.M., Alvarez L., Sammt F.** Use of DRI in Steelmaking. "Direct Reduced Iron: Technology and Economics of Production and Use", Chap. 9 / Ed. by Je.Feinman and D.R.MacRay. Copyright 1999 by the Iron and Steel Society, Warrendale, PA.
9. **Shlyahov N.A., Gontaruk E.I., Sidorov V.P. et al.** Implementation of PyreJet Technology in DRI Based Electric Arc Furnace Process at OEMK (Russia): AISTech'2004 (Nashville, USA. September 2004).

ADAPTATION OF EAF OPERATIONS FOR UNCONVENTIONAL RAW MATERIALS

© **Grant M.; Blostein Ph.; But S.; Kaufman C.**

This paper illustrates several issues associated with using unconventional raw materials in EAF. It includes industrial results of Air Liquide ACI technology in these operations. Special considerations that are required for using DRI and pig iron are discussed as well as the use of liquid hot metal in EAF.

Keywords: Electric Arc Furnace (EAF); Hot Metal; Liquid Iron; DRI; HBI; Oxygen Steelmaking; Sidewall Burners.