

**РАЗВИТИЕ РАЗРАБОТОК НЕТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ИНСТИТУТЕ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Рассмотрены ретроспективы и перспективы развития нетрадиционных технологий выплавки чугуна в Институте черной металлургии. Показана высокая эффективность перестройки металлургии на малококсовую и бескоксовую доменную плавку.

Разработки нетрадиционных технологий выплавки чугуна в Институте черной металлургии всегда сопутствовали решению насущных проблем отрасли по совершенствованию традиционных технологий. Они охватывали широкий спектр проблем, включая применение новых видов сырья и кокса, вдувание заменителей кокса, а также интенсификацию плавки за счет обогащения дутья кислородом.

Ретроспектива. Наиболее обстоятельной и плодотворной была выполненная под руководством академика З.И.Некрасова разработка технологии доменной плавки на комбинированном дутье (природный газ и кислород), получившей дальнейшее развитие в отрасли и ставшей традиционной во всем мире [1,2]. Начатые под руководством академика З.И. Некрасова разработки технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ) [3] и коксового газа [4] также получили промышленное развитие. Первая после многочисленных испытаний стала традиционной во всех странах. Вторая продолжена сотрудниками Института черной металлургии и Макеевского меткомбината, реализована в промышленном масштабе и может использоваться на любом предприятии [5].

Ограничение использования природного газа по экономическим критериям определило приоритетность технологии вдувания пылеугольного топлива в большинстве стран мира. Однако количество угля, вдуваемого через фурмы, ограничено неполнотой его сжигания, а также размягчения и сжижения зольного остатка угля в дутьевом потоке и фурменном очаге. Последнее ограничивает также сортамент используемых углей, в частности – по зольности (до 10% золы).

Определяющей проблемой этой технологии является полнота газификации угля в фурменном очаге. В рамках существующего фурменного прибора возможно лишь частичное ее решение. Для полного решения проблемы необходимо вынести процесс газификации угля за пределы фурменного очага и существующего фурменного прибора с подачей в печь готовых восстановительных газов. При этом решается не только собственно проблема газификации, но появляется возможность повышения зольности вдуваемых углей и офлюсования золы.

Вдувание в доменную печь продуктов газификации углей. Работы в этом направлении, начатые нами в 70-х годах 20-го века и поддержанные академиком З.И. Некрасовым, нашли отражение и признание уже в начале 80-х годов [6]. Созданные предпосылки развития данного направления положили начало планомерному изучению процессов придоменной газификации углей и применения продуктов газификации для вдувания в доменную печь. В ходе изучения показана принципиальная возможность и экономическая целесообразность создания новой технологии с заменой природного газа и части кокса низкосортным углем [7].

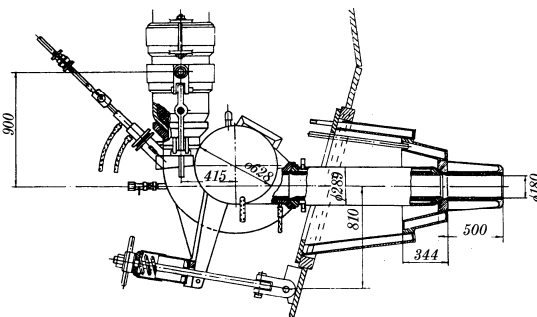
Комплекс совместных работ с Институтом высоких температур Академии наук СССР (ИВТАН) позволил создать и испытать на стенде в натурных условиях прифурменный газификатор пылеугольного топлива (на каждую фурму) для вдувания продуктов газификации в доменную печь [8], а совместные разработки с Днепропетровским металлургическим институтом (ныне НМетАУ) и Всесоюзным (ныне Всероссийским) теплотехническим институтом – разработать научные основы создания центрального высокопроизводительного газогенератора для доменной печи (в т. ч. на базе выводимой из эксплуатации доменной печи) [9–12].

Указанный комплекс работ с 1992 года продолжен в рамках тематики НАН Украины и при поддержке ГКНТ Украины. Из двух предложенных схем подачи продуктов газификации угля (ПГУ) в доменную печь – с установкой реактора – газификатора на каждом фурменном приборе и из центрального газогенератора, более продвинутой оказалась первая. В сотрудничестве с ИВТАН и АК «Тулачермет» удалось изготовить и частично испытать на одном фурменном приборе газификатор пылеугольного топлива, а также оценить ожидаемые результаты реализации новой технологии, которая квалифицируется как малококсовая [13].

На рис.1 приведена схема фурменного прибора – газификатора, а в табл.1 – результаты расчетной оценки использования новой технологии

применительно к условиям МК «Запорожсталь».

Рис. 1. Реактор-газификатор



Расход кокса снижается на 41–46%, а производительность агрегата возрастает в 1,53–1,56 раза. Снижение себестоимости составляет в разных вариантах 9–12 УДЕ/т, а окупаемость затрат во всех вариантах – менее 1 года. Уменьшение выбросов:

Уменьшение выбросов:

пыли – на 420–700 т/год; газов – на 970–1800 млн м³/год; вредных веществ – на 960–1100 т/год.

Таблица 1. Показатели доменной плавки при замене природного газа продуктами газификации угля (ПГУ)

Показатель	Базовый период	ПГУ с		
		$t_d = 1000^{\circ}\text{C}$	$t_d = 1200^{\circ}\text{C}$	
Удельная производительность ДП, т/м ³ сут.	1,32	2,03	2,06	
Расходы: кокса, кг/т	565	334	305	
природного газа, м ³ /т	71	–	–	
угля, кг/т	–38	290	300	
кислорода, м ³ /т	1630	180	150	
дутья, м ³ /т		675	700	
Температура дутья, ⁰ С	1011	1000	1200	
Теоретическая температура горения, ⁰ С	2025	2030	2020	
Количество ПГУ, м ³ /т	–	990	1020	
Состав ПГУ, %	СО	–	32,5	32,5
	СО ₂	–	0,5	0,5
	Н ₂	–	12,4	12,4
	Н ₂ О	–	0,5	0,5
	Н ₂	–	54,1	54,1
	$C_{\text{ТВ}}, \text{г/м}^3$	–	19,7	19,7
Температура ПГУ, ⁰ С	–	1540	1650	
Степень прямого восстановления, %	38	30	32	
Количество влажн. колошникового газа, м ³ /т	2290	1490	1465	
Теплотворность колошникового газа, кДж/м ³	3520	4770	4600	

По сравнению с вдуванием в доменную печь сырого ПУТ разрабатываемая технология имеет следующие преимущества:

1. Вовлечение в топливный баланс низкосортных углей при увеличении количества вдуваемых углей и соответственно заменяемого кокса.

2. Упрощение схемы подготовки и подачи угля в ДП за счет возможности вдувания зернистого угля (0–3 мм) вместо порошкового (50–60 мкм).

3. Полный вывод из процесса природного газа при одновременной возможности увеличения температуры дутья до максимального по условиям службы оборудования уровня, а также интенсификация плавки путем подачи кислорода.

Рассматриваемая нетрадиционная технология с заменой части кокса низкосортным углем может квалифицироваться как новый этап реформации доменной плавки на пути сокращения расхода кокса до минимально возможных величин. Предполагается замена на первой стадии более по-

ловины кокса некоксующимся углем (в пределе – снижение расхода кокса до 180–200 кг/т [14]), а на второй – создание новой технологии бескоксового получения первичного металла.

Бескоксовая доменная плавка. Энергетически возможна полная замена кокса продуктами газификации угля, однако необходимость функционирования коксовой насадки в зоне размягчения и плавления материалов требует сохранения части кокса. Задача перехода к бескоксовой технологии решается путем радикальной перестройки технологии и агрегата с использованием идей Д.К.Чернова [15].

Предлагается перестройка доменной плавки на бескоксовую технологию путем реконструкции традиционной доменной печи (рис.2) с подачей горячих восстановительных газов через установленные по окружности горна прифурменные реакторы – газификаторы (ПРГ) измельченного угля–10 и разделением печного пространства на зону твердофазного восстановления (шахту)–1 и плавильно – восстановительный горн–3 со сводом–4, который для шахты является днищем. Перегруз материалов из шахты в горн осуществляется шнеками–5 через тчки–6, а газ из горна в шахту поступает через газоотводы – 7 после охлаждения до 900⁰С.

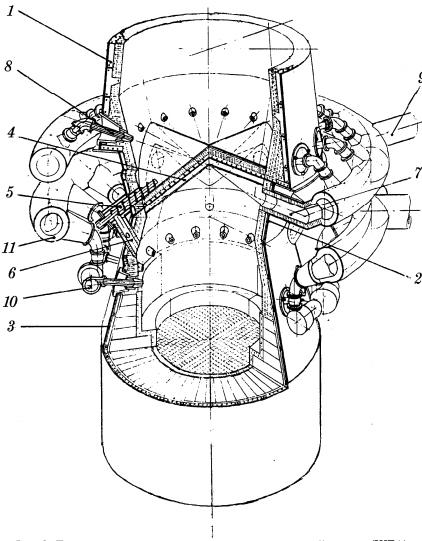


Рис. 2. Доменная печь, перестроенная в шахтно–горновой агрегат (ШГА)

При опускании в шахте и заплечиках происходит восстановление оксидов железа вдуваемым в шахту восстановительным газом до степени металлизации 75–85% . В каждый из ПРГ поступает горячее, обогащенное кислородом дутье и измельченный уголь. В объеме ПРГ происходит газификация угля с ожигением золы. Продукты газификации угля (ПГУ) с температурой 2200 – 2500⁰С поступают в

слой металлизированных материалов, загружаемых на поверхность расплава в горне. В слое происходит плавление материалов, довосстановление оксидов и частичное науглероживание металла за счет избыточного твердого углерода, содержащегося в ПГУ. В цилиндрической части горна происходит разделение расплава на металл и шлак с периодическим выпуском их через летки.

Горячий восстановительный газ (ГВГ), поднимаясь в сводовую часть горна, смешивается с холодным восстановительным газом (ХВГ), вдуваемым в эту область для получения температуры не более начала размягчения материалов – 900⁰С. Полученный газ поступает в коллектор, а из коллектора – в фурмы шахты и частично в газопровод на охлаждение для получения ХВГ.

Ожидаемые показатели плавки рассчитаны по методике ИЧМ применительно к условиям комбината «Запорожсталь». Взамен кокса (517 кг/т, сух.) и природного газа (97 м³/т) в новой технологии используется концентрат тощих углей (658 кг/т, сух.). Это позволит сократить себестоимость чугуна примерно на 20% при сокращении общего расхода энерго-ресурсов (на 7,5%) и значительном уменьшении выбросов в окружающую среду (вредных веществ на 2,43 кг/т, пыли на 1,44 кг/т). Срок окупаемости затрат не превысит 1 года. Предполагается также возможность регулирования состава металла от чугуна до стали, что положительно повлияет на последующий передел. Дополнительным преимуществом технологии является возможность получения металла с регулируемым содержанием углерода (вплоть до стали).

Являясь продуктом естественной эволюции доменной плавки, бескоксая технология в ШГА может быть организована на действующих предприятиях в ходе реконструкции доменных печей в периоды очередных капитальных ремонтов. При этом используется существующая инфраструктура производства и основная часть оборудования. Такой подход к перестройке металлургии на новую технологию бесконфликтно решает основные социально–структурные проблемы отрасли и предприятий, что является не менее весомым положительным фактором, чем все другие. Укргипрометом по заказу комбината «Запорожсталь» разработаны проектные предложения по перестройке доменной печи №1 на новую технологию [16].

Многофункциональная энерготехнология и альтернативы развития. Доменная плавка – одна из немногих промышленных технологий, включая процессы и агрегат, сохранивших свою сущность и значимость при всех технических революциях. Этот феномен заслуживает особого рассмотрения с позиций его специфики и системных свойств, обеспечивающих устойчивость в динамичной промышленной среде. В силу этого, доменная плавка и печь остается определяющим технологическим модулем черной металлургии, развитие которого будет формировать облик всего металлургического комплекса. Дальнейшая эволюция доменной плавки связана с перестройкой на бескоксое получение металла при полной замене кокса продуктами газификации низкосортных углей, которое настолько укрепляет ее определяющие позиции в металлургии, что в обозримой перспективе альтернативных путей не предвидится [17].

Эволюция основного производства – выплавки перепельного чугуна идет по пути сокращения расхода топлива и степени его использования в

печи, в соответствии с чем уменьшается количество и теплотворность колошникового газа. Одновременно увеличивается производительность агрегатов, что приводит к высвобождению мощностей. В этих условиях использование доменных печей для выполнения других функций, в первую очередь энергетической, становится естественным направлением развития металлургии и видится в двух направлениях:

- автономизация технологии производства восстановительного и отопительного газов путем перевода отдельных доменных печей в режим газогенераторов на основе некоксуемых углей;
- организация производства ферросплавов и специальных шлаков в доменных печах, при котором энергетическая составляющая технологии возрастает за счет увеличения теплотворности и количества газа на единицу сплава.

Развиваемая в ИЧМ концепция развития энергетических функций доменной плавки основана на том, что на многих предприятиях при наличии резервных мощностей возможно их использование для генерации высоко-теплотворного газа, замена которым коксового газа позволит подать последний в доменные печи для полного высвобождения природного газа. Технология замены природного газа коксовым в доменных печах с получением дополнительного эффекта в виде экономии кокса, является освоенной [5].

Особенностью использования доменной печи в качестве газогенератора является необходимость поддержания температуры колошникового газа на уровне не выше $400\text{--}450^{\circ}\text{C}$, требуемом по условиям службы оборудования загрузки, при высокой температуре отходящих из столба шихты газов ($700\text{--}800^{\circ}\text{C}$). Для решения задачи по разрабатываемой ИЧМ технологии предложено применить двухступенчатое охлаждение газа: в столбе шихты – твердыми «охлаждителями» и при выходе из столба – рециркулирующим газом [18]. В качестве «охлаждителей» используются металлургические шлаки – конвертерный, сварочный, ферромарганцевый, силикомарганцевый с извлечением полезных компонентов в расплав. Таким способом, наряду с энергетическими, решаются экономические и экологические проблемы предприятия и отрасли. Использование металлургических шлаков в качестве «охлаждителей» газа решается важная технологическая задача: поскольку они не содержат легковосстановимых оксидов, отдающих кислород в шахте «косвенным» путем, отходящий газ не пополняется газообразными продуктами восстановления (CO_2 и H_2O), которые уменьшают его теплотворность, а поглощение тепла при прямом восстановлении оксидов увеличивает «охлаждительные» свойства шлаковых добавок.

Одной из острых проблем предприятий является накопление большого количества железосодержащих отходов в виде шламов и пылей, утилизация которых в основном металлургическом цикле вызывает осложнения, связанные с циркуляцией щелочных соединений и оксидов цинка.

Решение этой проблемы намечается путем использования нетрадиционной технологии жидкофазного восстановления в варианте, разрабатываемом ИЧМ и НМетАУ совместно с МК «Криворожсталь» [19].

Перспективы. Необходимость производства конкурентоспособной на мировом рынке металлургической продукции в условиях отсутствия в Украине капиталовложений для решения этой задачи традиционным способом стимулирует необходимость «прорыва» в область нетрадиционных технологий [20]. Институтом черной металлургии сформирована концепция такого «прорыва» на основе выполняемых разработок нетрадиционных технологий выплавки чугуна:

- перестройка доменной плавки на малококсовое и бескоксовое получение металла на основе вдувания продуктов газификации некоксуемых углей – как генеральное направление.
- утилизация металлосодержащих отходов с получением чугуна на основе процесса жидкофазного восстановления при использовании в качестве топлива низкосортных углей.
- перевод отдельных доменных печей в режим газификации углей с утилизацией металлосодержащих отходов для замены природного газа продуктами газификации углей.

1. *Некрасов З.И.* Первые итоги применения природного газа в доменных печах СССР // Сб. «Опыт применения природного газа в доменном производстве», М.: Металлургиздат.–1959.– С. 3–6.
2. *Некрасов З.И.* Опыт применения природного газа в доменном производстве // Бюллетень ЦИИН ЧМ. Москва.–1963.– №8.– С. 1–7.
3. *Освоение* технологии плавки с вдуванием пылевидного топлива совместно с применением природного газа и обогащенного кислородом дутья на доменной печи завода «Запорожсталь» / З.И.Некрасов, Л.Д.Юпко, В.Л.Покрышкин и др. // Металлургия чугуна: Тематический отраслевой сборник. – М.: Металлургия. – 1973. – №1. – С. 98–110.
4. *Опытная* доменная плавка с применением смеси коксового и природного газов / З.И.Некрасов, Л.Д.Юпко, Я.М.Ободан и др. // Металлургия чугуна: Тематический отраслевой сборник МЧМ СССР (ИЧМ). – 1973. – № 6.– С. 69–83.
5. *Доменная* плавка с вдуванием коксового газа / В.Ф.Пашинский, И.Г.Товаровский, П.Е.Коваленко, Н.Г.Бойков. – Киев: Техника, 1991. – 104 с.
6. *Эффективность* использования продуктов газификации твердого топлива в качестве дутьевых добавок в доменной печи / И.Г.Товаровский, В.Н.Хомич, Г.П.Боярковская // Сталь. – 1982. – № 6. – С.5–11.
7. *Перспективы* снижения расхода кокса в доменных печах путем совершенствования дутьевых параметров / И.Г.Товаровский, А.П.Пухов, Ю.С.Юсфин и др.// Сталь.– 1989.– №8.– С. 8–15.
8. *Получение* и применение продуктов газификации угля в доменной плавке / И.Г. Товаровский, И.И. Солодкий, И.Я. Толмачев и др. – М.: Черметинформация, 1992. – 101 с.
9. *Математическое* моделирование процессов сжигания–газификации пылеугольного топлива в дисперсных потоках / В.П.Пацков, Н.В.Чернавский, А.Н.Веденьев, И.Г.Товаровский и др. // Проблемы энергосбережения: Респуб-

- ликанский межведомственный сборник. – Киев: Наукова думка. – 1990. – № 3. – С.42–50.
10. *Выбор* параметров горячих восстановительных газов для вдувания в доменную печь / И.Г.Товаровский, Б.Б.Потапов, Г.И.Товаровская // *Сталь*. – 1994. – № 4. – С.6–11.
 11. *Патент* РФ №1770362, М. Кл. С 21 В 7/00. Шахтная печь / И.Г.Товаровский, С.И.Сучков, В.И.Бабий и др. // *БИ*. – 1999. – №39. – С.78.
 12. *А.С.* №1812206. СССР, М. Кл.С10j 3/48. Циклонный газификатор /Б.Б.Потапов, А.Н.Веденьев, И.Г. Товаровский и др. // *БИ*.–1993.–№16.–С.97.
 13. *Проблемы* перехода к малококсовой плавке путем вдувания продуктов газификации низкосортных углей / И.Г.Товаровский, А.П.Пухов, В.С.Шведов и др. // *Сталь*. – 1997. – №7. – С.1–4.
 14. *Товаровский И.Г.* Предельный расход кокса в доменной плавке // *Сталь*. – 2002.– № 3.– С. 46 – 48
 15. *Чернов Д.К.* О прямом получении литого железа и стали в доменной печи // Д.К.Чернов и наука о металлах. Сб. трудов. – М.–Л.: ГосНТИ по черной и цветной металлургии, 1950. – С.307–327.
 16. *Проблемы* перестройки доменной плавки на бескоксовую технологию / И.Г.Товаровский, И.И.Дышлевич, Г.В.Горлов и др. // *Сталь*.–1999.–№ 7.– С.10–17.
 17. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы // Днепропетровск: «Пороги».– 2003.– 596 с.
 18. *Перестройка* доменной печи в газогенератор кускового угля / И.Г.Товаровский, А.Е.Меркулов // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. начн. трудов ИЧМ. Выпуск 6.– Днепропетровск.– 2004.–С. 41– 45.
 19. *Возможности* эффективной выплавки чугуна из отвальных смесей шламов и замасленной окалины / В.А.Шеремет, А.В.Кекух, А.К.Тараканов, И.Г.Товаровский, В.П.Лялюк // *Теория и практика производства чугуна*. Труды международной научно–технической конференции, посвященной 70–летию КГГМК «Криворожсталь».– Днепропетровск: «Пороги».– 2004.– С. 568–572.
 20. *Товаровский И.Г.* Пути развития выплавки чугуна в Украине // *Сталь*.–2003.– №7.– С.5–9.

*Статья рекомендована к печати чл.-корр.НАН Украины,
В.И.Большаковым*