

Д. Х. АЛТЫБАЕВА, С. М. ТЛЕУГАБУЛОВ*

*Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, Алматы, *didishka_88@mail.ru*

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА «РУДА – СТАЛЬ» ПУТЕМ ОГРАНИЧЕНИЯ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ МЕТАЛЛА

Двухстадийный процесс в металлургии железа и стали, основанный на редуccionной плавке чугуна, включая внедоменные плавки науглероженных металлов, и на окислительной плавке стали, является основой индустрии. Как первая, так и вторая стадии производства в современных условиях реализуются на базе сооружения огромных подразделений металлургического комплекса, что связано с высокими капитальными затратами и себестоимостью металлопродукции. Кроме того, вторая стадия - окислительная плавка стали по характеру процесса противоположна первой, так как наряду с окислением избытка углерода приводит к окислению всех полезных редуccionированных металлов. Проведены исследования по определению возможности снижения науглероживания металла на стадии редуccionной плавки и тем самым достижения результата прямого получения стали. Разработана методика исследования твердофазной редуccionии железа и сопутствующих металлов непосредственно твердым углеродом на основе нового диссоциационно-адсорбционного механизма. В отличие от существующего механизма восстановления железа горячим редуccionным газом она позволяет более точно рассчитывать и регулировать стехиометрический расход углерода без образования его избытка. Новый подход к организации процесса апробирован на лабораторных установках при переработке шихты, составленной на основе железа, марганца, хрома при стехиометрическом расходе твердого углерода на восстановление каждого металла. Представлены результаты расчетов и экспериментальных исследований твердофазной редуccionии металлов в интервале 600-1200 °С с последующей непрерывной плавкой шихты при 1550-1600 °С. Получены образцы металлических слитков при заданном интервале изменения состава шихты. Приведены химические составы полученных образцов слитков, которые соответствуют составу легированных марганцем и хромом сталей.

Ключевые слова: руда, сталь, железо, чугун, углерод, марганец, хром, восстановление, стехиометрический состав.

Введение. Мировая практика двухстадийного производства металла – первоначально восстановительного с получением чугуна и других науглероженных металлов, с последующей окислительной плавкой чугуна и всех науглероженных металлов достигла уже уровня производства более 1,5 млрд т/год. Вместе с тем огромные металлургические комплексы являются одними из основных источников выбросов отходов в атмосферу. Человечество сталкивается с мировой экологической катастрофой, признаки которой сегодня наблюдаются в некоторых регионах Земли. Принятое руководителями ведущих стран мира Киотское соглашение не дает ощутимых результатов. Здесь наблю-

дается противоречие между экономикой и экологией. Параллельное достижение высоких показателей в экономике и экологии может быть только при условии обновления существующего технологического комплекса на принципиально новых теоретических положениях. Сложившийся на практике порядок поэтапного производства металла основан на существующем теоретическом положении, рекомендуя горячий редуccionный газ (ГРГ) как универсальный и необходимый реагент для восстановления металлов. В связи с этим редуccionная плавка железорудного сырья основана на принципе организации противотока шихты и ГРГ. Шихта состоит из окучкованной рудной части и кокса.

При этом рудная нагрузка на кокс составляет $R_n = 3,3-3,5$ т/т. В условиях шахтной печи редуционные процессы на 60-65 % реализуются взаимодействием ГРГ с оксидами металлов. В зоне плавления углерод кокса участвует в реакциях прямой редукиции металла, и так как расплав фильтруется через слой коксовой насадки, одновременно происходит неизбежное науглероживание железа и образование расплава чугуна. Поскольку в зоне расплавления шихты в доменной печи температурно-тепловой режим соответствует уровню температурного режима в сталеплавильных агрегатах, ограничение процесса науглероживания могло бы привести к выплавке стали вместо чугуна. Решение такой проблемной задачи возможно, но оно затрагивает теоретическую основу редукиции металлов вообще и порядок организации процессов, в частности, на что и направлена настоящая работа.

Процесс науглероживания металла непосредственно связан с участием углерода в реакциях редукиции и карбидообразования металлов. Существующая теория рассматривает углерод как твердую частицу, взаимодействие которой с оксидами металлов ограничено контактно-диффузионным механизмом, поэтому развитие прямой редукиции металлов твердым углеродом принято рассматривать только через газовую фазу [1] с образованием исключительно СО.

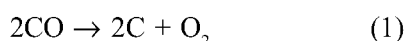
Однако возможность реализации редукиции металлов через газовую фазу ограничена химической прочностью оксидов [2] и редуционным потенциалом газа СО, поэтому в последние годы наблюдается повышенный интерес к использованию твердого углерода в виде угля и углеродсодержащих реагентов для производства металлов и металлизированных полупродуктов [3-6]. Все эти новые процессы при разнообразии организации процесса сходятся на одном конечном результате – получении науглероженного полупродукта. Практические действия, принимаемые сегодня по организации новых процессов с использованием твердого углерода, являются экономически вынужденным явлением и свидетельствуют об опережении практики по сравнению с теорией. Твердый углерод привлекателен не только его массовостью и доступностью, но и разнообразием свойств, которые еще недостаточно изучены. Его уникальные свойства открываются шаг за шагом в различных направлениях науки и техники.

Предложенные сегодня новые механизмы прямой редукиции железа твердым углеродом и новые теоретические положения [7, 8] доказывают, что восстановление углеродом реализуется не только с образованием СО, но и в значительной мере с образованием CO_2 . На редукицию железа с образованием CO_2 расход углерода в 2 раза ниже, чем при образовании СО. Поэтому расчет расхода углерода на редукицию железа по схеме с образованием исключительно СО заведомо создает избыток углерода, который и науглероживает металл. На основе нового механизма, учитывающего газификацию кислорода оксидов шихты твердым углеродом как в виде CO_2 , так и СО, базируется возможность исключения или ограничения науглероживания железа и, как следствие, получение стали, минуя стадию производства чугуна.

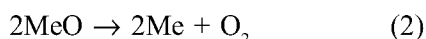
Теоретическое обоснование исследований. Углубленные исследования свойств твердого углерода и представление механизма его взаимодействия с оксидами металлов не на атомно-молекулярном уровне (существующее теоретическое положение), а на уровне электронно-ионного обмена между твердыми частицами открывают новые возможности организации и ограничения процесса науглероживания металлов. В управлении редуционным процессом еще не везде принят соответствующий механизм прямого взаимодействия углерода с оксидами металлов. Тем не менее можно констатировать, что углерод не только активный редуционный реагент, но и столь же активный карбидообразующий элемент. Карбидообразование следует за редукицией оксидов по мере образования и накопления металлической фазы. Отсюда очевидно, что процесс карбидообразования обусловлен, во-первых, возникновением в системе металлической фазы, во-вторых, избытком углерода в системе $\text{MeO} - \text{C} - \text{Me} - (\text{CO}, \text{CO}_2)$. Первоочередным процессом является редукиция металлов углеродом с образованием газов СО и CO_2 . По мере развития процесса доля металлической фазы увеличивается за счет уменьшения оксидной фазы. В конечном счете в системе остаются две фазы С-Ме. Тогда и происходит образование новой фазы – карбида металла Me_3C или раствора углерода в металле. Отсюда вытекает весьма важное заключение о том, что в основе науглероживания металла лежит избыток углерода в системе, и он приурочен к моменту завершения восстановле-

ния металла. Как видно, граничные условия науглероживания металла прямо связаны с определением стехиометрического расхода углерода и разработкой научно обоснованной методики расчета.

Взаимодействие твердого углерода с оксидами металлов может быть основано на ранее предложенном диссоциационно-адсорбционном механизме [9]. В данном механизме под термином адсорбция понимается не только газовый поток в слое, но и газовая фаза, выделяющаяся в процессе диссоциации сложных химических соединений (оксидов, карбонатов и т.д.). Само понятие диссоциация предполагает адсорбцию и хемосорбцию образующейся газовой фазы на поверхности твердых частиц. Начальной стадией механизма является диссоциация химических соединений как феноменологическое явление природы сложных веществ. Выделение новой газовой фазы на поверхности твердых частиц может происходить не иначе как через образование ближнего и дальнего покровного, соответственно хемосорбированного и адсорбированного слоев. Только из этих покровных слоев осуществляется массоперенос кислорода от оксидов к редуцирующим реагентам независимо от того, будь это газообразный или твердый углерод. В любом случае реакция взаимодействия газа СО реализуется постольку, поскольку упрugoсть диссоциации СО



значительно ниже, чем упрugoсть диссоциации MeO



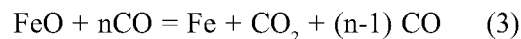
Сравнительный анализ изменения упрugoстей диссоциации оксидов металла и газа СО в зависимости от температуры [10] показывает возможность и пределы течения реакции их взаимодействия.

Как видно из данных таблицы, упрugoсть диссоциации газа СО значительно ниже, чем у

Таблица 1 – Значения упрugoсти диссоциации оксидов в зависимости от температуры

Диссоциация реагентов	при температуре, К			
	1200	1300	1400	1500
$\text{FeO} \rightarrow \text{Fe} + 0,5 \text{O}_2$	-16	-14,4	-12,9	-11,6
$\text{CO} \rightarrow \text{C} + 0,5 \text{O}_2$	-20,3	-19,6	-18,9	-18,4
$\text{MnO} \rightarrow \text{Mn} + 0,5 \text{O}_2$	-30,6	-28,68	-26,73	-24,58

FeO, но существенно больше, чем у MnO. Поэтому редукция железа из FeO оксидом углерода успешно протекает по равновесной реакции и может быть завершена образованием металлического железа:



Коэффициент n показывает необходимый избыток газа СО для течения реакции слева направо. Равновесие реакции (3) характеризуется отношением

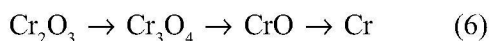
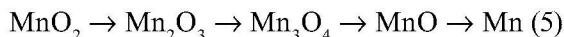
$$\eta_{\text{CO}} = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2}, \quad (4)$$

которое в области 1000-1100 К имеет значение на уровне $\eta_{\text{CO}} = 0,20-0,25$. Поскольку реакция протекает без изменения объема газа, можно записать, что $\eta_{\text{CO}} = \text{CO}_2 / (n \cdot \text{CO}) = 0,25$ и $n = \text{CO}_2 / 0,25 \cdot \text{CO} = 1/0,25 = 4,0$, т. е. из 4-х объемов СО в фактическую реакцию вступает один объем.

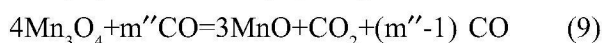
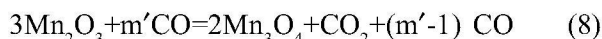
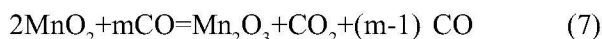
Что касается взаимодействия с MnO, то газ СО имеет упрugoсть диссоциации больше, чем MnO, поэтому по отношению к нему не имеет достаточного редуцирующего потенциала и не может быть использован как редуцирующий реагент. Восстановление металлов из более прочных оксидных соединений MnO, Cr_2O_3 , SiO_2 может быть реализовано не газом СО, а непосредственно твердым углеродом. Утверждение о том, что прямая редукция металлов твердым углеродом протекает исключительно через газовую фазу, является априорным представлением и не может быть доказано прямыми экспериментальными или теоретическими данными. Оксид MnO и более прочные оксиды взаимодействуют непосредственно с твердым углеродом по диссоциационно-адсорбционному механизму [10-12], который раскрывает возможности твердого углерода как универсального реагента, взаимодействующего как с высокопрочными, так и с менее прочными оксидами металлов без посредничества газа СО. Только в зависимости от прочности оксида металла твердый углерод взаимодействует по принципу последовательно-фазового превращения и образует газообразный продукт разного состава СО и CO_2 .

Твердый углерод может быть использован не только для восстановления железа, но и легирующих металлов Mn и Cr из их прочных оксид-

ных соединений. Оксиды марганца и хрома, так же как и железа, взаимодействуют с твердым углеродом по принципу последовательного фазового превращения:



Каждая фаза оксидов имеет индивидуальное значение упругости диссоциации. Максимальная упругость диссоциации соответствует высшим оксидам. По мере уменьшения атомного отношения О/Ме упругость диссоциации уменьшается. Поэтому только высшие оксиды Mn и Cr могут вступать во взаимодействие с газом CO, но равновесие реакции изменяется по мере понижения упругостей диссоциации оксидов, например



В этом ряду значения коэффициента m с изменением температуры постепенно повышаются в следующей последовательности: m = 1,22 при t = 500 °C; m' = 1,55 при t = 800 °C; m'' = 4,00 при t = 1000 °C.

Далее, как видно из таблицы 1, упругость диссоциации CO на всех температурных уровнях выше, чем упругость диссоциации MnO, т.е. газ CO не только приобретает кислород оксида, но и сам способен разложиться раньше, чем MnO. Поэтому для взаимодействия с MnO газ CO не имеет потенциальной возможности.

Только при редукции металлов непосредственно твердым углеродом по принципу последовательно-фазового превращения его кислородный потенциал реализуется на уровне выше 1,0, т.е. на уровне 1,25-1,35 в зависимости от массовых соотношений оксидных фаз и температу-

ры системы. Действительный кислородный потенциал углерода можно определить в соответствии с изменением состава образующегося газа с учетом упругости диссоциации индивидуально по фазам. Только в этом случае может быть достаточно точно определен стехиометрический расход твердого углерода на редукцию металлов, что позволяет избежать избытка углерода на науглероживание металла.

Экспериментально-расчетная часть и обсуждение полученных результатов. Преодоление процесса науглероживания металла в редукционно-плавильном процессе является поворотным пунктом в организации высокой технологии производства качественного металла. Действительный стехиометрический расход углерода на редукцию железа может быть определен в зависимости от температуры и изменения состава газа (CO₂, CO) на соответствующих стадиях фазовых превращений.

Выдвинутые новые теоретические положения подтверждены результатами экспериментальных исследований по прямой редукции металлов твердым углеродом. Химические составы использованных компонентов шихты представлены в таблице 2.

На каждый металлооксидный компонент шихты был рассчитан удельный стехиометрический расход углерода на редукцию металлов: железа со степенью редукции = 0,98; марганца = 0,75; хрома = 0,80. По вышеприведенным уравнениям получены следующие результаты. На редукцию железа из 100 г прокатной окалины, железа и марганца из марганцевого концентрата, железа и хрома из хромитового концентрата получены следующие значения стехиометрического расхода углерода, соответственно: = 14,55 г; = 17,88 г; = 12,75 г.

Из перечисленных компонентов были составлены два варианта шихты:

Таблица 2 - Химический состав дисперсных компонентов шихты

Компонент шихты	Химический состав, %												
	Fe	FeO	MnO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	BaO	P	S	C
Марганцевый конц.	10,20	13,11	42,55	—	—	0,51	31,2	10,28	1,58	0,30	0,21	0,3	—
Хромитовый конц.	10,30	13,24	—	—	52,36	18,35	5,72	7,86	0,64	—	0,020	0,013	—
Прокатная окалина	66,72	32,21	—	0,44	—	—	0,51	—	—	—	0,03	0,017	—
Древесный уголь	—	—	—	—	—	—	0,48	0,12	—	—	—	0,30	98,0

Вариант I – из смеси 100 г прокатной окалины с добавками марганцевого концентрата в количествах 5,2; 7,0 и 8,2 г;

Вариант II – из смеси 100 г прокатной окалины с добавками хромитового концентрата в количествах 4,8; 6,0; 7,15 г.

В состав каждого варианта шихты вводили стехиометрическое количество древесного угля, рассчитанное на редукцию металлов Fe, Mn и Cr.

Подготовленные дисперсные компоненты шихты фракции <1,0 мм предварительно гранулировали органическим связующим. Далее осушенные углеродсодержащие гранулы загружали в герметичную огнеупорную ячейку и помещали в плавильную печь. Температуру системы повышали со скоростью 100 °С/мин до 600 °С, при которой наблюдали начало выделения газа. Далее температуру повышали со скоростью 20 °С/мин до 1200-1250 °С, при которой была выдержка в течение 20-30 мин. Выделение газа прекратилось, после чего температуру повысили до полного расплавления системы – 1550-1600 °С. При плавке шихты с марганцевыми добавками получены слитки металла весом 70,1; 70,4; 70,7 г. При плавке шихты с хромитовыми добавками получены слитки металла массой соответственно 70,6; 70,8; 71,0 г. Их химический анализ представлен в таблице 3.

Как видно из данных таблицы 3, в результате редукционной плавки получены образцы металлов, в которых содержание углерода находится в пределах 0,3-0,5 %, что соответствует составу стали и ограничивает науглероживание металла заданным стехиометрическим расходом углерода.

Оксид хрома Cr_2O_3 по сравнению с оксидами железа Fe_2O_3 и марганца Mn_2O_3 обладает более высокой химической прочностью и стабильно взаимодействует с углеродом. Поэтому его прямое восстановление углеродом до ме-

таллического состояния представляет интерес с точки зрения науглероживания металла.

Исходный образец дисперсной шихты составлен из 100 г хромитового концентрата и стехиометрического расхода древесного угля – 13,45 г фракции <1,0 мм. Подготовленную смесь помещали в герметичную ячейку из кварцевой трубки и устанавливали в силитовую печь. Печь нагревали до 500 °С, и рабочее пространство реакционной трубки в течение 4-5 мин продували чистым аргоном. При нагреве системы до 850 °С наблюдали выделение газов, которые состояли из CO_2 и CO. По количеству и составу выделяющихся газов определяли количество (г) газифицированного кислорода шихты по уравнению.

$$\Delta O_r = 0,714 \cdot 10^{-2} \vartheta_r (\text{CO} + 2\text{CO}_2), \text{ г} \quad (10)$$

где ϑ_r – объем выделенного газа, дм^3 .

Степень редукции шихты определяли как безразмерную величину из соотношения величин по выражению:

$$\Delta R = \Delta O_r / O_{\text{ш}}, \quad (11)$$

где ΔO_r – суммарное количество газифицированного кислорода в виде CO_2 и CO за время опыта. Скорость редукции определяли по выражению:

$$\omega_{\text{ш}} = \Delta R / \Delta t, \text{ мин}^{-1}, \quad (12)$$

где Δt – продолжительность опыта, соответствующая изменению степени редукции $\Delta R = R_{i+1} - R_i$.

По результатам экспериментальных данных установлены зависимости степени и скорости редукции металлов из хромитового концентрата, которые представлены на рисунках 1, 2.

Как видно из полученных результатов, интенсивное выделение газа начинается при тем-

Таблица 3 – Содержание примесей в выплавленных образцах стали

№ п/п	Шихта с добавками	Расход, конц-та, г/ на 100 г окалины	Химический состав, %					
			[C]	[Si]	[Mn]	[Cr]	[S]	[P]
1	Mn концентрат	5,2	0,36	0,12	1,52	–	0,030	0,02
2		7,0	0,381	0,14	2,05	–	0,023	0,018
3		8,2	0,248	0,17	2,63	–	0,025	0,016
4	Cr концентрат	4,8	0,43	0,13	–	1,8	0,02	0,012
5		6,0	0,46	0,16	–	2,42	0,02	0,011
6		7,15	0,51	0,18	–	2,86	0,018	0,011

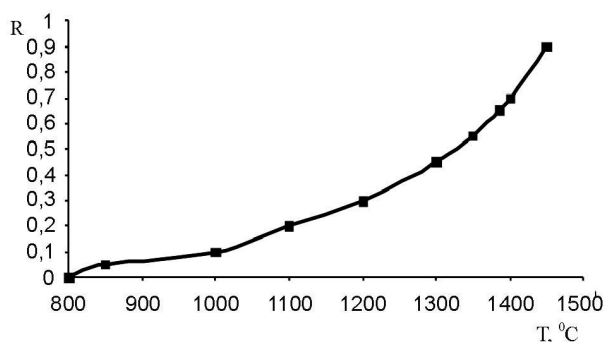


Рисунок 1 – Изменение степени редукции металлов из хромитовой руды в зависимости от температуры системы

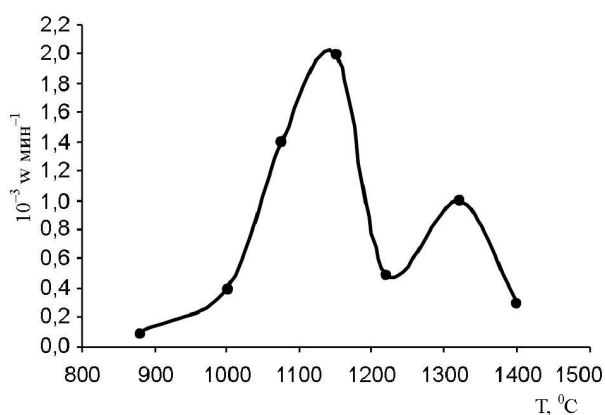
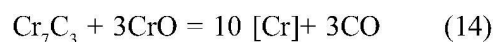
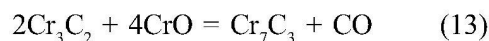


Рисунок 2 – Зависимость скорости редукции металлов от температуры

пературе 850-885 °C и продолжает развиваться с повышением температуры. В интервале температур 1000-1100 °C установлено повышение содержания CO₂ в газе до 7-13 % и скорости редукции металла до 0,002 мин⁻¹. По мере истечения времени концентрация CO₂ уменьшалась. При 1200 °C она приближалась к нулю, в то время как концентрация CO повышалась, приближаясь к 100 %, что свидетельствует о снижении до нуля восстановительной работы CO. Второй максимум скорости редукции хрома при повышении температуры до 1300 °C происходил за счет непосредственного прямого взаимодействия углерода с нижним оксидом CrO. Дальнейшее снижение скорости редукции связано с завершением процесса металлизации. Вместе с тем хром является оксикарбидообразующим металлом, т.е. в металлизированном продукте одновременно содержатся карбид Cr₃C₂ и оксид CrO, которые обычно распределяются локально в объеме металлизированного

продукта. Они могут взаимодействовать по реакциям:



Реакции (13), (14) в твердофазной системе реализуются посредством диффузионного обмена, поэтому требуют продолжительной выдержки системы.

Анализ металлизированных полупродуктов показал практически полное восстановление железа и хрома на 90 %, а кремния – на 5-8 %. Образование карбидов хрома в системе может происходить при наличии незначительных оксидных включений CrO. Как показывает анализ выплавленных образцов металла (таблица 3), в процессе высокотемпературного нагрева и плавления оксикарбидное взаимодействие в системе протекает по реакции (14).

Избыток углерода и нижнего оксида CrO, т.е. образование оксикарбидов в металлизированном продукте является промежуточным состоянием металлопродукта в системе. Правильный и достаточно точный расчет стехиометрического расхода твердого углерода, состава шихты, несмотря на образование оксикарбидных соединений в промежуточном продукте при высокотемпературной плавке неизбежно приведет к взаимодействию карбидов с оксидами и ограничению процесса карбидообразования.

Выводы. Разработана методика исследования твердофазной редукции железа и сопутствующих металлов непосредственно твердым углеродом на основе нового диссоциационно-адсорбционного механизма, позволяющего более точно рассчитывать и регулировать стехиометрический расход углерода.

Предложен новый подход к организации процесса и проведена апробация на лабораторных установках при переработке шихты, составленной на основе железа, марганца, хрома при стехиометрическом расходе твердого углерода на редукцию каждого металла. Твердофазная редукция металлов осуществлена в интервале 600-1200 °C с последующей непрерывной плавкой шихты при 1550-1600 °C. Показано, что оксиды железа, марганца и хрома в дисперсной углеродсодержащей шихте активно взаимодействуют с твердым углеродом по последовательно фазовым превращениям. Температура начала реакции была зафиксирована при 600 °C для

высших оксидов железа и марганца и повышалась по мере перехода высших оксидов к низшим с последовательным и закономерным изменением состава газов CO_2 и CO . Науглероживание металла связано с накоплением металлической фазы и избытком углерода на стадии завершения редуционных процессов. Регулирование стехиометрического расхода углерода, исходя из взаимодействия оксидов с твердым углеродом в соответствии с изменением упругостей их диссоциации по фазам, позволило решить проблему науглероживания металла.

При более высокой температуре редуции и более высокой упругости диссоциации высших оксидов хрома Cr_2O_3 за счет увеличения концентрации CO_2 может быть создан избыток углерода, который приводит к карбидообразованию в отдельных зонах металлизированного продукта при локализации остаточной доли низшего оксида CrO . Дополнительный нагрев и поддержка оксикарбидной металлической системы позволяют реализовывать взаимодействие карбидов с остаточным оксидом CrO и тем самым ограничивать науглероживание металла.

Получены образцы слитков, которые по химическому составу соответствуют сталям, легированным марганцем и хромом.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Карабасов Ю.С., Чижилова В.М. Физико-химия восстановления железа из оксидов. – М.: Металлургия, 1986. – 200 с.
- 2 Елютин В.П., Павлов Ю.А., Поляков В.П., Шеболдаев С.Б. Взаимодействие окислов металлов с углеродом. – М.: Металлургия, 1976. – 360 с.
- 3 Midrex and Kobe develop new direct reduction process // *Iron and Steelmaker*. – 2002. – V. 29. – P. 38.
- 4 Усачев А.Б., Лехерзак В.Е., Баласанов А.В. Восстановление железа в процессе РОМЕЛТ // *Черные металлы*. – 2000. – № 12. – С. 14-21.
- 5 Пат. 2346056 РФ. Способ прямого производства стали и железосодержащих материалов. / Буровой И.А., Усачев А.Б.; опубл., 10.02.2009.
- 6 Процесс Ромелт. / Под ред. проф. В.А.Роменца. – М.: Руда и металлы, 2005. – 400 с.
- 7 Тлеугабулов С.М., Киекбаев Е., Койшина Г.М., Алдангаров Е.М. Прямая редуция металлов ведет к высокой технологии производства // *Сталь*. – 2010. – № 2. – С. 4-8.
- 8 Тлеугабулов С.М. Высокотехнологичный восстановительно-плавильный процесс производства стали // *Сталь*. – 2011. – № 4. – С. 14-19.
- 9 Тлеугабулов С.М. Диссоциационно-адсорбционный механизм и кинетика твердофазного вос-

становления железа углеродом // *Сталь*. – 1991. – № 1. – С. 15-18.

10 Доменное производство: справочник. Т. 1. – М.: ГосНТИ, 1963. – С. 400-437.

11 Tleugabulov S.M., Tolukpayev B.Z., Kiyekbayev Y.Y., Koishyna G.M. Dissociation-adsorption mechanism as a theoretical basis of high technology for steel's reduction melting // *Journal of Materials Science and Engineering*. – 2012. – P. 281-288.

12 Тлеугабулов С.М., Алтыбаева Д.Х., Асабаев Н.Б., Мырзахметов Н.Е. Комплексная переработка железорудного сырья на основе технологии прямого восстановления металлов // *Сатпаевские чтения: сб. тр. Междунар. конф.* – Алматы, 2014. – С. 460-463.

REFERENCES

- 1 Karabasov Yu.S., Chizhikova V.M. *Fiziko-khimiya vosstanovleniya zheleza iz oksidov* (Physics-chemistry of iron recovery from oxides). Moscow: Metallurgy, 1986. 200 (in Russ.).
- 2 Ehlyutin V.P., Pavlov Yu.A., Polyakov V.P., Shebol-daeв S.B. *Vzaimodejstvie okislov metallov s uglerodom* (Interaction of metal oxides with carbon). Moscow: Metallurgy. 1976. 360 (in Russ.).
- 3 Midrex and Kobe develop new direct reduction process. *Iron and Steelmaker*. 2002. 29, 38 (in Eng.).
- 4 Usachev A.B., Lekherzak V.E., Balasanov A.B. *Vosstanovlenie zheleza v protsesse ROMELT* (Iron recovery in ROMELT process). *Chernye metally=Ferrous metals*. 2000. 12. 14-21. (in Russ.).
- 5 Pat. 2346056 RU. *Sposob pryamogo proizvodstva stali i zhelezosoderzhashchikh materialov* (Method of straight production of steel and iron bearing materials). Burovoj I.A., Usachev A.B. Opubl. 10.02.2009 (in Russ.).
- 6 *Process Romelt*. Under the editorship of prof. V.A. Roments. Moscow: Ore and Metals. 2005, 400 (in Russ.).
- 7 Tleugabulov S.M., Kiekbayev E., Koishyna G.M., Aldangarov E.M. *Pryamaya reduktsiya metallov vedet k vysokoj tekhnologii proizvodstva* (Straight reduction of metals lead to high technology production). *Stal'=Steel*. 2010, 2, 4-8 (in Russ.).
- 8 Tleugabulov S.M. *Vysokotekhnologichnyj vosstanovitel'no-plavil'nyj protsess proizvodstva stali* (High technology reduction-melting process of steel production). *Stal'=Steel*. 2011, 4, 14-19 (in Russ.).
- 9 Tleugabulov S.M. *Dissotsiatsionno-adsorbtsionnyj mekhanizm i kinetika tverdogaznogo vosstanovleniya zheleza uglerodom* (Dissociation-adsorptive mechanism and kinetics of hardphase reduction of iron by carbon). *Stal'=Steel*. 1991, 1, 15-18 (in Russ.).
- 10 *Domennoe proizvodstvo* (Blast-furnace production). Reference book. Vol. 1. Moscow: GosNTI. 1963, 400-437 (in Russ.).
- 11 Tleugabulov S.M., Tolukpayev B.Z., Kiyekbayev Y.Y., Koishyna G.M. *Dissociation-adsorption mechanism as a theoretical basis of high technology for steel's reduction melting*. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2012. 281-288 (in Eng.).

12. Tleugabulov S.M., Altybaeva D.Kh., Asabaev N.B., Myrzakhetov N.E. *Kompleksnaya pererabotka zhelezorudnogo syr'ya na osnove tekhnologii pryamogo vosstanovleniya metallov* (Complex processing of iron-

ore raw material on basis of technology of metals straight reduction). *Satpaevskie chteniya: sb. trudov mezhdunar. conf.* (Satpaev readings: proceedings of Intern. conference). Almaty, **2014**. 460-463 (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Шойынды редукциялық балқытуға, соның ішінде көміртектенген металдарды домна сыртында балқытуға және болатты тотықтыра балқытуға негізделген темір мен болат металлургиясындағы екі сатылы үрдіс индустрияның негізі болып табылады. Өндірістің бірінші, екінші сатылары да қазіргі кездегі жағдайларда металлургиялық кешеннің орасан зор бөлімшелерін салу арқылы жүзеге асырылады, бұл өте көп күрделі шығындарды және өзіндік құны жоғары металл өнімдерін қажет етеді. Бұдан басқа, болатты тотықтыра балқытатын – екінші саты, үрдістің түрі (сипаты) бойынша бірінші сатыға қарама қарсы болады, себебі артық көміртектің тотығуымен қатар, барлық редукцияланған пайдалы металдар да тотығады. Осыған байланысты редукциялық балқыту кезеңінде металдың көміртектенуін азайту мүмкіндіктерін анықтау және осы арқылы болатты бірден алуға қол жеткізу бойынша зерттеулер жүргізілді. Жаңа диссоциациялық-адсорбциялық механизм негізінде тікелей қатты көміртегімен темір және ілеспелі металдардың қатты фазалық редукциясын зерттеу методикасы жасалды. Бұрыннан қолданылып келген темірді ыстық редукциялық газбен редукциялау механизмінен бұл механизмнің айырмашылығы, мұнда көміртектің артық мөлшерін түздірмей оның стехиометриялық шығынын есептеуге және реттеуге мүмкіндік туады. Үрдісті ұйымдастырудың бұл жаңа тәсілі зертханалық қондырғыларда темірдің, марганецтің, хромның негізінде құрастырылған шикіқұрамды өңдеу кезінде, әрбір металдың редукциясына қатты көміртектің стехиометриялық шығынын есептеу арқылы апробациядан өткізілді. Металдардың қатты фазалық редукциясы 600-1200 °C аралығында, ары қарай 1550-1600 °C шикіқұрамды үздіксіз балқыту арқылы жүргізілген тәжірибелік зерттеулер мен есептеулердің нәтижелері көлтірілді. Шикіқұрам құрамының белгіленген өзгеру аралығында металл құймаларының (кесектерінің) үлгілері алынды, олар марганецпен және хроммен қосындыланған (легіріленген) болаттың құрамына сәйкес келеді.

Түйінді сөздер: кен, болат, темір, шойын, көміртек, марганец, хром, тотықсыздану, стехиометриялық құрам.

SUMMARY

Two-phase process in metallurgy of iron and steel, based on cast-iron reducing smelting, including blast-furnace out melting of carbonized metals, and on oxidizing melting of steel is a basis of the industry. Now both the first and the second stage of production are realized on the basis of construction of huge units of a metallurgical complex that leads to high capital expenses and cost price of metal products. Besides the second stage – oxidizing smelting of steel is opposite to the first one by character of process and along with oxidation of carbon excess leads to oxidation of all useful reduced metals. So, researches on determining possibility for decrease of metal carbonization at reductive smelting stage and as result direct steel getting are carried out. The technique for research of iron and accompanying metals solid-phase reduction directly by solid carbon is developed on the basis of new dissociation - adsorptive mechanism. Unlike the existing mechanism of iron reduction by hot reducing gas, it allows to count and adjust more precisely stoichiometrical consumption of carbon, without formation of its excess. The new approach to the organization of process is approved on laboratory installations at processing of furnace charge consisted on the basis of iron, manganese, chromium at stoichiometrical consumption of solid carbon for reduction of each metal. Results of calculations and experimental researches of solid-phase reduction of metals in an interval of 600-1200 °C with the subsequent continuous melting of charge at 1550-1600 °C are presented. Samples of metal ingots are obtained at the given interval of charge composition change. Chemical compositions of the obtained samples of ingots which correspond to structure of steels alloyed by manganese and chrome are presented.

Key words: ore, steel, iron, pig-iron, carbon, manganese, chromium, reduction, stoichiometrical composition.

Поступила 07.10.2015

