

Л.Г.Тубольцев, В.П.Корченко, В.С.Лучкин, Н.И.Падун,
А.М.Шевченко

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПЕРЕДЕЛА ПО ФОРМИРОВАНИЮ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ

Исследовано влияние технологических параметров металлургических агрегатов на формирование химического состава стали. С позиций системного анализа установлены взаимосвязи технологических параметров и химического состава стали по 5 основным элементам – С, Mn, Si, P, S. Установлено, что на конечных этапах кислородно–конвертерной плавки при массовом производстве возможно получение стали с содержанием углерода менее 0,01%.

кислородно–конвертерная плавка, технологические параметры, химический состав стали, формирование,

Состояние вопроса. В последние два десятилетия металлургия Украины все больше ориентируется на производство полуфабрикатов, сокращается размерный и марочный сортамент металлопродукции. Имея в прошлом передовые отечественные металлургические технологии, мы сегодня уже существенно отстаем от мирового уровня. Доминирующая в мировой практике тенденция на увеличение масштабов производства стали сменилась направлениями, предусматривающими как радикальное улучшение качества металлопродукции, в первую очередь ее служебных и эксплуатационных характеристик, так и резкое сокращение ресурсных и энергетических затрат. В мировой практике повышению качества стали уделяется большое значение, требуется сталь с содержанием углерода на уровне 0,002%, серы – до 0,002–0,005%. Такая сталь необходима для удовлетворения всевозрастающей потребности в автолистовом, трансформаторном, динамном и другом металле, а также для изготовления деталей из так называемой «чистой» стали, характеризующейся низким уровнем основных вредных и сопутствующих примесей [1].

Производство такой стали требует учета возможностей всех металлургических агрегатов комплекса «ДП–УДЧ–Конвертер–ВОС», т.е. реализации сквозной технологии производства стали (СТПС). Использование всех возможностей СТПС позволяет успешно решать вопросы повышения качества металла с помощью кислородных конвертеров с различными вариантами комбинированной продувки, а на этапе внепечной обработки – с использованием установок «Ковш–печь» [2].

Для реализации таких технологий на отечественных предприятиях необходимо совершенствование технологии и оборудования. Однако даже простое копирование зарубежных технологий невозможно, поскольку их технологическое и научное содержание не публикуется в открытой печати. Это, как показывает практика, даже в условиях закупки оборудования

и технологий за рубежом, потребует наличия необходимых данных для работы отечественных проектных институтов, информации технологического характера, не говоря уже о сведениях, необходимых для обоснованного выбора вариантов комбинированных процессов.

В настоящее время в мире более 90% конвертеров эксплуатируются с применением комбинированной продувки, а в Украине такая технология до сих пор не применяется. Тем не менее, есть все основания считать, что применение комбинированной продувки начнется буквально в ближайшие годы, без чего невозможно исключить отставание сталеплавильного производства от мирового уровня и обеспечить улучшение конкурентоспособности отечественной металлургии. Конвертеры, благодаря использованию высокой доли первородных материалов, в плане производства стали с низкой и ультранизкой концентрацией углерода всегда будут выигрывать по сравнению с постоянно совершенствующимися электродуговыми печами [3].

Постановка данного исследования вызвана необходимостью перспективного повышения научного уровня отечественного сталеплавильного производства с учетом тенденций развития мировой металлургии. При рассмотрении сквозных технологий сталеплавильного производства в данном исследовании первоначальное внимание было уделено анализу возможностей процессов производства стали в конвертерах. Вопросы, связанные с доменным производством, ковшевой десульфурацией чугуна и внепечной обработки стали, рассматриваются с учетом технологических возможностей кислородного конвертера по формированию химического состава стали с минимальным содержанием вредных примесей и минимальным разбросом содержания химических элементов.

Целью работы является исследование технологических параметров и возможностей современных технологических линий выплавки жидкой стали для обеспечения производства высококачественной металлопродукции.

Методика исследования. Исходя из перспективных задач в качестве объекта исследования выбрана сквозная технология производства стали, которая представлена рядом последовательно используемых металлургических агрегатов в комплексе «ДП–УДЧ–Конвертер–ВОС» (рис.1), в которых происходит формирование химического состава стали, что определяет конкурентоспособность металлопродукции и требуемый уровень стабильности химического состава [4].

Для разработки и усовершенствования научно–технологических основ сквозных технологий в работе использованы методы моделирования металлургических процессов по данным аналитических и экспериментальных исследований. В основу исследований положен системный подход на базе математического аппарата гиперкомплексных динамических систем (ГДС) [4], который позволяет представить сквозную технологию произ-

водства стали в виде системы балансовых уравнений (1), в матричном виде (таблица) или в графо–аналитическом представлении (рис.2).

$$\begin{aligned} d\varphi_1 + d\varphi_2 \cdot y_{12} + d\varphi_3 \cdot y_{13} + \dots + d\varphi_n \cdot y_{1n} &= 0 \quad (\text{или} = I_n) \\ d\varphi_1 \cdot y_{21} + d\varphi_2 + d\varphi_3 \cdot y_{23} + \dots + d\varphi_n \cdot y_{2n} &= 0 \quad (\text{или} = I_n) \end{aligned} \quad (1)$$

...

$$d\varphi_1 \cdot y_{n1} + d\varphi_2 \cdot y_{n2} + d\varphi_3 \cdot y_{n3} + \dots + d\varphi_n = 0 \quad (\text{или} = I_n)$$

где φ – параметры элементов, составляющие сквозную технологию производства стали как систему.

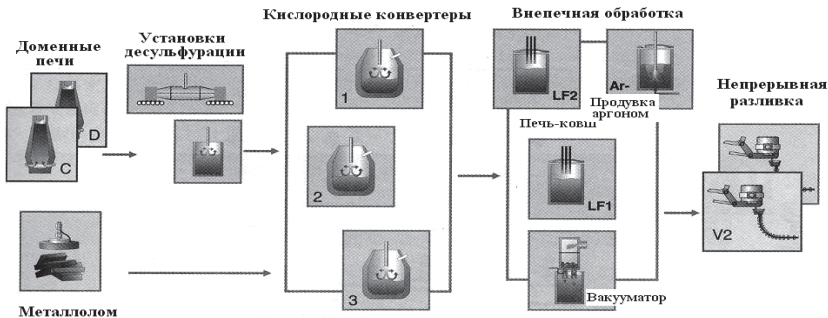


Рис.1. Схема сквозной технологии производства стали.

Таблица. Матричное представление элементов и взаимосвязей кислородно–конвертерной плавки (в упрощенном варианте)

Элементы системы		1	2	3	4	5	6
1	Жидкий чугун (φ_1)	1		y_{13}	y_{14}	y_{15}	
2	Кислород (φ_2)		1	y_{23}	y_{24}		y_{26}
3	Сталь (φ_3)	y_{31}	y_{32}	1	y_{34}		
4	Шлак (φ_4)	y_{41}	y_{42}	y_{43}	1		
5	Пыль (φ_5)	y_{51}				1	
6	Конвертерный газ (φ_6)		y_{62}				1

Такой подход позволяет исследовать изменение элементов химического состава стали в виде входных и выходных параметров и выявить их взаимосвязи с технологическими параметрами агрегатов сквозной технологии.

В процессе анализа проведены аналитические и экспериментальные исследования для изучения взаимосвязи технологических параметров металлургических агрегатов СПС и химического состава стали. Для обработки экспериментальных данных на базе Excel разработана программа автоматизированной обработки результатов экспериментов, что сократило трудоемкость их обработки.

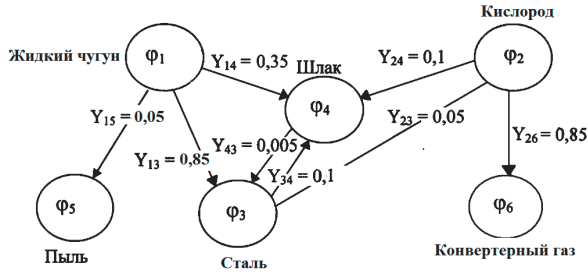


Рис 2. Графоаналитическая интерпретация упрощенного представления кислородно-конвертерного процесса для прямого расчета.

В качестве экспериментального материала при анализе СТПС использованы материалы экспериментальных исследований, проведенных на лабораторных и промышленных металлургических агрегатах, в т.ч. на лабораторном 1,5-тонном конвертере, промышленном 160-тонном конвертере. Также использованы результаты исследований, относящихся к изучению структуры жидкой стали. Выполнен комплексный анализ полученных данных. Техничко-экономическая оценка эффективности вариантов сквозной технологии производства стали проводилась на базе усовершенствованной методики расчета себестоимости [5].

Изложение основных материалов исследования. Основными металлургическими агрегатами при производстве стали являются: ДП – УДЧ – сталеплавильный агрегат – КП (либо агрегаты комплексной обработки стали). Таким образом, сквозная технология производства стали (СТПС) представлена рядом последовательно расположенных металлургических агрегатов, в которых происходит формирование химического состава металла. Некоторые агрегаты предназначены для формирования состава стали по 1 элементу, например УДЧ корректирует состав стали по S, действие других агрегатов комплексное по многим элементам. Поэтому выбор состава агрегатов и глубины обработки металла определяет качественные и технико-экономические показатели СТПС.

В общей схеме получения металлургической продукции сталеплавильное производство занимает центральное место. Главной задачей сталеплавильного передела является выплавка металла заданного химического состава. Целью исследования являлось выявление возможности получения на этом переделе минимальных значений основных примесных элементов химического состава стали с использованием методики системного анализа гиперкомплексных динамических систем (ГДС) [4].

Исходя из анализа мирового уровня производства высококачественной, в т.ч. «чистой», стали различного назначения технология выплавки стали должна иметь возможность производить металл со следующими пределами основных химических элементов: С < 0,002–0,9%; Mn < 0,2–3%; Si – 0,01–4,8%; P – 0,0035–0,3%; S – 0,001–0,3%. При этом в пределах ка-

ждого марочного состава стали жестко должны выполняться требования по отклонению от заданного содержания элементов.

Для определения взаимосвязей между параметрами производства стали использовали методику системного анализа в матричной форме [4]. Разработана методика исследования, графоаналитическая интерпретация конвертерной плавки и взаимосвязи элементов, матричное представление упрощенной взаимосвязи элементов кислородно–конвертерной плавки и полная система уравнений ГДС. Показано, что затраты по переделу в каждом металлургическом агрегате зависят от глубины обработки, химического состава исходного материала и готовой стали.

Одной из задач исследования было определение элементов технологии, обеспечивающей получение как можно более низкого содержания углерода в металле. В принципе, динамика изменения химсостава металла по содержанию марганца, фосфора, серы по ходу кислородно–конвертерной плавки отражена в разной форме во многих статьях, монографиях, учебниках. Однако, для конечных этапов кислородно–конвертерной плавки, на которых достигаются наиболее низкие значения этих компонентов, требуемые для «чистой» стали, влияние входных параметров химического состава и технологических параметров плавки изучено недостаточно.

В результате системной обработки экспериментальных данных показано, что уровень достижения конечных показателей химического состава стали, что определяет возможность производства «чистой» стали и стали с регламентированным уровнем химического состава, зависит от следующих показателей: % содержания элемента в исходной шихте; вида агрегата; уровня и характера применяемой технологии.

При проведении работы использована принятая в металлургическом производстве методика расчета себестоимости по расходным коэффициентам и ценовым показателям сырья и энергоносителей [6], определены возможности сквозной технологии по формированию минимально возможных содержаний углерода [7], кремния [8], серы и фосфора в стали [9], а также условия максимально возможного сохранения в стали железа и марганца с целью увеличения выхода годного жидкой стали [10].

Исследовались технологии конвертерной плавки с комбинированной продувкой, которые включали следующую совокупность заключительных этапов [11,12]:

1. начало падения факела;
2. полное падение факела;
3. передув после полного падения факела;
4. продувка (промывка) металла нейтральным газом после передува;
5. продувка (промывка) металла нейтральным газом после полного падения факела.

По данным проведенных лабораторных плавок показано, что в рамках сквозной технологии возможно обеспечить содержания углерода (рис.3) и

кремния (рис.4) в металле на уровне менее 0,01%, серы и фосфора – порядка 0,0030–0,0035%, что является одним из основных требований к химическому составу большинства марок стали перспективного сортамента

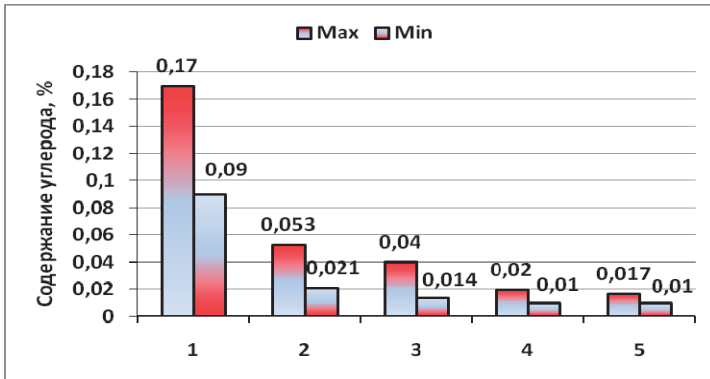


Рис.3. Изменение содержания углерода в металле на заключительных этапах плавки. Содержание углерода в чугуна – 3,55–4,32%.

Выявлены следующие параметры, обеспечивающие принципиальную возможность получения содержания углерода менее 0,010%:

содержание углерода в начале падения факела, при полном падении факела и после передувки, которое приближается к минимальным значениям анализируемой совокупности;

длительность продувки нейтральным газом после передувки – 2–3 мин;

длительность продувки нейтральным газом после полного падения факела – 3 мин, т.е. максимальные значения для исследованных вариантов.

Выявлено, что содержание кремния в чугуна является одним из важных параметров шихтовых условий сквозной технологии, определяющих технико-экономические показатели процессов. Установлено, что в комплексе «Доменная печь – Кислородный конвертер» уменьшение содержания кремния в чугуна с 0,9% до 0,15% способствует как сокращению затрат на кокс при доменной плавке на 4–8 долл/т чугуна, т.е. на 2–3% от цены чугуна, так и улучшению большинства показателей кислородно-конвертерной плавки. Реализация этих параметров в условиях промышленного производства требует комплексного их учета по таким показателям, как выход годного стали, стойкость футеровки, угар марганца, затраты на нейтральный газ и т.п.

Динамика окисления кремния подробно в литературе не отражалась. Отмечалось, что кремний, например, снижается практически до нуля в начале продувки. Однако, при проведении исследований установлено, что определенная концентрация кремния в металле сохраняется в течение всей продувки (рис.4). Вероятнее всего, что в период активного изучения

нового кислородно–конвертерного процесса низкие содержания кремния не имели практического значения. С развитием производства «чистой» стали внимание к обеспечению минимальной концентрации кремния (порядка 0,01%) возросло.

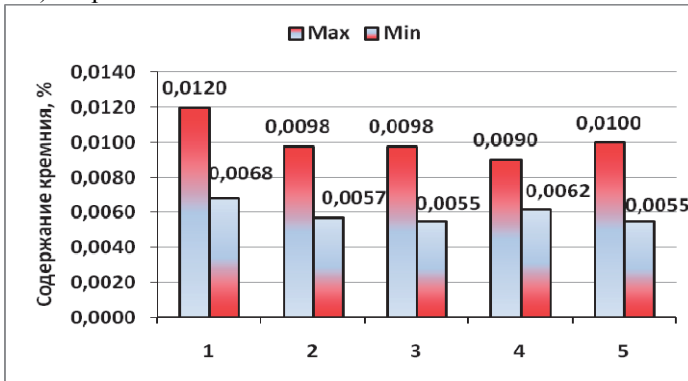


Рис.4. Изменение содержания кремния в металле на заключительных этапах плавки. Содержание кремния в чугуна – 0,48–0,83%.

Анализ качественно показал наличие взаимосвязей между входными и выходными значениями основных компонентов металла, среди которых углерод, кремний, марганец, фосфор и сера. Для количественной оценки взаимосвязей определили зависимости между значениями выходных величин от входных на конечных этапах кислородно–конвертерной плавки для следующих параметров химического состава: содержание в металле углерода, кремния, марганца, фосфора и серы. Как показывают полученные результаты, в основном, значения выходных величин на всех этапах плавки находятся в прямой зависимости от входных (рис.5). Связь между содержанием углерода на этапе полного падения факела от содержанием углерода в исходном чугуна проявляется слабее. Зависимости содержания углерода в металле на конечных этапах плавки представляют большой практический интерес, поскольку они раскрывают возможности получения металла с низким содержанием углерода.

В работе рассмотрены возможности удаления серы из жидкого металла и показано, что при производстве широкого сортамента марок стали наиболее целесообразно удалять серу в установках внепечной десульфурации чугуна [13]. При этом концентрация серы в чугуна может быть снижена практически до уровня 0,002–0,005%. В то же время, для обеспечения аналогичного уровня содержания серы в стали требуется либо использование особо чистого по сере металлора, а возможности этого мероприятия ограничены, либо дополнительная десульфурация в конвертере или агрегате «ковш–печь» (КП).

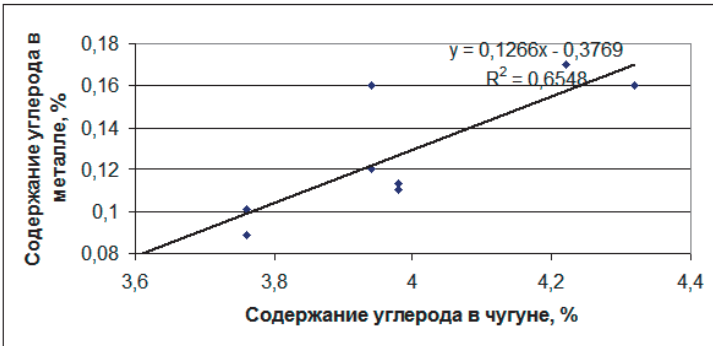


Рис.5. Зависимость содержания углерода в металле на этапе начала падения факела от содержания углерода в чугуна.

Изменение содержания серы в металле по этапам плавки в конвертере при переделе низкосернистого чугуна представлено на рис.6.

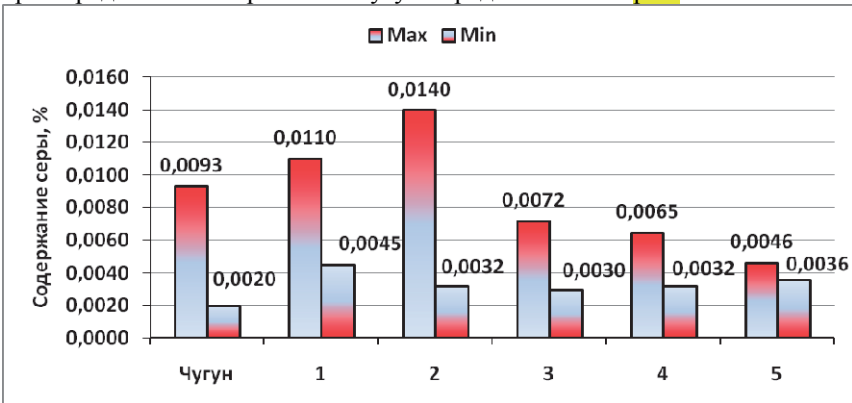


Рис.6. Изменение содержания серы в металле на заключительных этапах плавки.

Содержание серы в металле по окончании кислородно-конвертерной плавки определяется количеством ее, вносимым с шихтовыми материалами, и степенью обессеривания. По полученным результатам можно с достаточной достоверностью отметить, что для обеспечения содержания серы в металле порядка тысячных долей процента необходимо иметь содержание серы в чугуна примерно на таком же уровне. В противном случае достаточно четко проявляется негативное влияние содержания серы в металлоломе и извести. В целом, при одинаковой исходной концентрации серы в чугуна на этапе передувания достигаются более низкие содержания серы в металле и более высокие значения степени десульфурации, чем на этапе полного падения факела.

Исследовался вопрос распределения кислорода на окисление элементов чугуна по ходу кислородно–конвертерной плавки. Если взять за основу классификационного признака распределение вдуваемого кислорода на окисление железа и основных примесей чугуна (углерода, кремния, марганца), то определяются 3 периода продувки. В первый период в основном окисляется железо, кремний, марганец и в некоторой степени углерод. В первый период практически завершается окисление кремния.

Второй период характеризуется интенсивным окислением углерода.

В третьем периоде отмечается замедление окисления углерода и начало интенсивного окисления железа, на окисление которого расходуется основная часть вдуваемого кислорода. Периоды плавки достаточно чётко обозначаются на **рис.7**. Первый– до 20% длительности продувки, второй – 20–80%, третий – 80–100%.

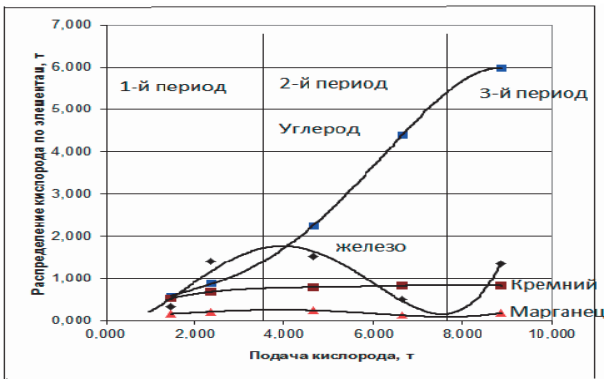


Рис.7. Распределение кислорода по элементам химического состава металла по ходу кислородно–конвертерной плавки.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований получено дополнительное обоснование существенного преимущества комбинированных процессов кислородно–конвертерной плавки. Показано, что использование комбинированных технологий позволяет:

- обеспечить удаление углерода до концентрации 0,01% и ниже;
- практически обеспечить сохранение уровня содержания серы в стали, достигнутого на установках десульфурации чугуна;
- сократить время обработки чугуна в конвертере и улучшить технико–экономические показатели процесса;

Таким образом, проведенными исследованиями показана центральная роль кислородного конвертера в СТПС. Установлен характер поведения 6–ти элементов расплава по ходу плавки. Для выявления механизма поведения углерода в ходе кислородно–конвертерной плавки сформулирована и использована гипотеза о влиянии структуры жидкого Fe–C сплава на характер удаления углерода в процессе продувки кислородом [14,15].

Предложена модель жидкого состояния Fe–C сплава с учетом близости структуры металла в твердом и жидком состоянии при наблюдаемых на практике величинах перегрева металлической ванны конвертера над линией ликвидуса Fe–C диаграммы ($50\text{--}250^{\circ}\text{C}$). Это позволило использовать принципы и положения кристаллографии и диаграмму Fe–C состояния для установления качественных и количественных характеристик жидкого расплава (рис.8) [16,17].

Необходимость внимания к учету структуры стали в жидком и твердом состоянии определяется еще и тем, что на заключительных этапах кислородно–конвертерной плавки обезуглероживание существенно замедляется и это приводит к ухудшению технико–экономических показателей плавки. Кроме того, в последние годы резко возрос интерес к созданию наноматериалов и уже созданы такие материалы на основе железо–углеродистых соединений. Поэтому поведение углерода в жидкой стали представляет несомненный научный и практический интерес.

На базе литературных и экспериментальных данных проанализирована возможность трансформации структуры жидкого железа в процессе плавления [18]. В качестве рабочей принята гипотеза, что структура жидкого железа состоит из различного вида частиц и межчастичных пространств. Гипотеза о наличии в металлическом расплаве частиц с дальним порядком позволяет объяснить механизм поведения железа, структурных группировок и сопутствующих элементов в процессе кислородно–конвертерной плавки. Основным отправным пунктом для развития такой гипотезы послужили данные о видах кристаллической решетки и о наличии в ней вакансий как возможности внедрения в нее атомов других элементов, в т.ч. и углерода.

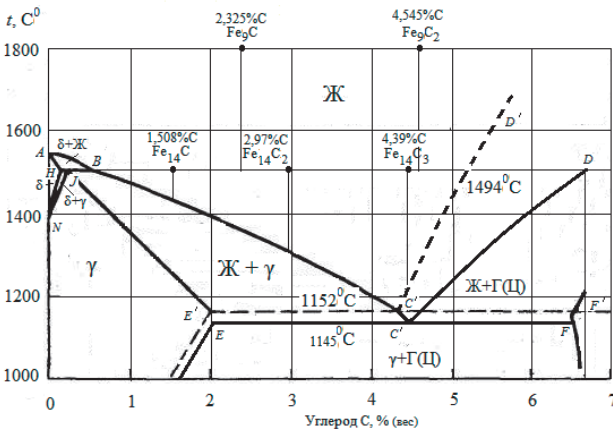


Рис.8. Совмещенная стабильная и метастабильная диаграмма Fe–C сплава.

В ходе кислородно–конвертерной плавки перегрев над точкой плавления составляет $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$ (рис.9), а при таких значениях металл может

иметь структуру кристаллической решетки аналогичную его структуре в твердом состоянии.

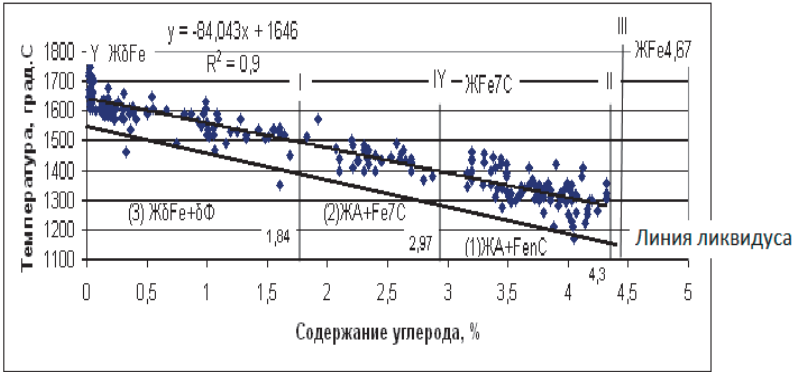


Рис.9. Взаимосвязь температуры и содержания углерода в металлической ванне конвертера.

На базе модели «жидкой» элементарной ячейки впервые проведены теоретические и в отдельных случаях сопровождаемые экспериментами исследования структурообразования в жидких Fe–C сплавах. Принято, что при температурах перегрева, характерных для металлургического производства, структура Fe–C расплавов может быть представлена различными видами частиц, которые в зависимости от концентрации углерода являются группировками из элементарных вещественных частиц в виде атомов железа и углерода, в виде молекул железа Fe_3C для ОЦК– δ -железа и $Fe_{14}C$ для ГЦК– γ -железа, а также в виде молекул промежуточных фаз с общей формулой Fe_nC . Принятая гипотеза позволяет предположить, что в жидком состоянии Fe–C сплав состоит из микрогруппировок низко- и высокоуглеродистой жидкостей, которые в свою очередь состоят из безуглеродистых (либо низкоуглеродистых) частиц и группировок Fe_nC вида с различным соотношением атомов Fe и C.

В результате проведенных исследований уточнена диаграмма Fe–C сплава в области жидкого состояния и на нее нанесены области существования различных группировок Fe_nC вида. Установлено, что характер поведения углерода в процессе кислородно-конвертерной плавки определяется качественным составом (структурным состоянием) и количественным соотношением высокоуглеродистой и низкоуглеродистой жидкости. Показано различие скорости удаления углерода из расплава для высокоуглеродистой и низкоуглеродистой жидкости. Использование полученных зависимостей позволило выявить взаимосвязь между содержанием углерода в металле кислородно-конвертерной плавки и величиной превышения температуры металла над точкой плавления. Предложенная модель

жидкого расплава позволяет объяснить механизм окисления основных элементов расплава, в т.ч. С, Mn, Si, P, S, Fe.

Заключение. Таким образом, в работе получены данные, которые могут быть непосредственно использованы в практике сталеплавильного производства.

- Исследованы и выявлены технологические параметры работы металлургических агрегатов в рамках сквозной технологии, которые непосредственно влияют на формирование и стабильность химического состава стали. С учетом реализации сквозной технологии в комплексе «Доменная печь–УДЧ–Конвертер–КП» определены параметры выплавки стали.

- Показано влияние параметров сквозной технологии и заключительных этапов кислородно–конвертерной плавки для получения содержания углерода в металле на уровне 0,01% и менее, и серы –0,0030–0,0035%.

- Показано, что комбинированная продувка обладает неоспоримыми преимуществами по сравнению с применяемой в Украине технологией с верхним дутьем для производства высококачественной стали.

- Получены качественные и количественные взаимосвязи технологических параметров производства и химического состава стали, что позволяет использовать их при разработке технологии, технологических инструкций и при рабочем проектировании новых конвертеров и совершенствовании технологии конвертирования расплава.

- Установлена принципиальная возможность учета структуры жидкого металла для выявления механизма обезуглероживания.

1. Демина Е.Г., Тубольцев Л.Г., Левченко Г.В., Воробей С.А. Современные способы повышения качества металлопродукции //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.18. – 2008. – С.275–286.
2. Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Семькина Т.И., Шевченко А.М. Исследование вариантов технологии выплавки в конвертерах с комбинированной продувкой низко– и сверхнизкоуглеродистой стали // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.10. – 2005. – С.124–134.
3. Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Шевченко А.М. Исследование особенностей технологий выплавки в конвертерах с комбинированной продувкой низкоуглеродистой стали //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.17. – 2008. – С.147–152.
4. Тубольцев Л.Г., Корченко В.П., Падун Н.И., Шевченко А.М. Использование системного подхода к оптимизации сквозных технологий производства стали //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.20. – 2009. – С.148–161.
5. Большаков В.И., Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Шевченко А.М. Использование системного анализа для расчета экономической эффективности технологических процессов // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.8. – 2004. – С.389–400.

6. *Тубольцев Л.Г., Беланов В.П., Падун Н.И.* Методика определения экономической эффективности инновационных мероприятий в черной металлургии // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.11. – 2005. – С.319–328.
7. *Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Динамика рафинирования металла и окисления железа по ходу кислородно–конвертерной плавки // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №7. – С. 47–49.
8. *Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Закономерности окисления кремния и марганца на заключительных этапах кислородно–конвертерной плавки с комбинированной продувкой //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.20. – 2009. – С.125–133.
9. *Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Закономерности дефосфорации и десульфурации на заключительных этапах кислородно–конвертерной плавки с комбинированной продувкой //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.19. – 2009. – С.144–151.
10. *Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Лучкин В.С., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Динамика удаления примесей чугуна и окисления железа по ходу кислородно–конвертерной плавки //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.21. – 2010. – С.138–148.
11. *Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Поляков В.Ф., Вергун А.С., Падун Н.И., Лындя П.С., Семькина Т.И.* Исследование особенностей окисления примесей металла на конечных этапах кислородно–конвертерной плавки // Металлургическая и горнорудная промышленность. – №7. – 2006. – С.45–48.
12. *Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Исследование различных вариантов кислородно–конвертерной плавки в условиях увеличенной доли лома в металлошихте. //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.14. – 2007. – С.154–162.
13. *Вергун А.С., Кисляков В.Г., Поляков В.Ф., Корченко В.П., Тубольцев Л.Г., Шевченко А.Ф., Падун Н.И., Семькина Т.С.* Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–Конвертер» //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.14. – 2007. – С.112–119.
14. *Лучкин В.С., Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Корченко В.П., Шевченко А.М.* Структурные признаки наследственности жидких чугунов и сталей //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.18. – 2008. – С.122–137.
15. *Лучкин В.С., Тубольцев Л.Г., Корченко В.П., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Металлургическая наследственность в жидкой стали // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.15. – 2007. – С.130–140.
16. *Лучкин В.С., Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Диаграмма состояния и структура жидких Fe–C сплавов //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.19. – 2009. – С.265–282.
17. *Лучкин В.С., Тубольцев Л.Г., Корченко В.П., Поляков В.Ф., Падун Н.И., Шевченко А.М.* Fe–C диаграмма и структуры жидких метастабильных и стабильных сплавов // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.22. – 2010. – С.199–212.

18. Лучкин В.С., Тубольцев Л.Г., Корченко В.П., Поляков В.Ф., Семькин С.И., Падун Н.И., Шевченко А.М. Структура жидкого железа и свободный углерод в Fe–C сплавах // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.21. – 2010. – С.256–265.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. В.Ф.Поляковым*

***Л.Г.Тубольцев, В.П.Корченко, В.С.Лучкин, Н.И.Падун,
А.М.Шевченко.***

Технологічні можливості наскрізних технологій сталеплавильного переділу з формування хімічного складу сталі

Досліджено вплив технологічних параметрів металургійних агрегатів на формування хімічного складу сталі. З позицій системного аналізу встановлено взаємозв'язки технологічних параметрів і хімічного складу сталі за 5 основними елементами – С, Mn, Si, P, S. Встановлено, що на кінцевих етапах киснево–конвертерної плавки при масовому виробництві є можливість отримання сталі з вмістом вуглецю менше 0,01%.