

УДК 669.162.2

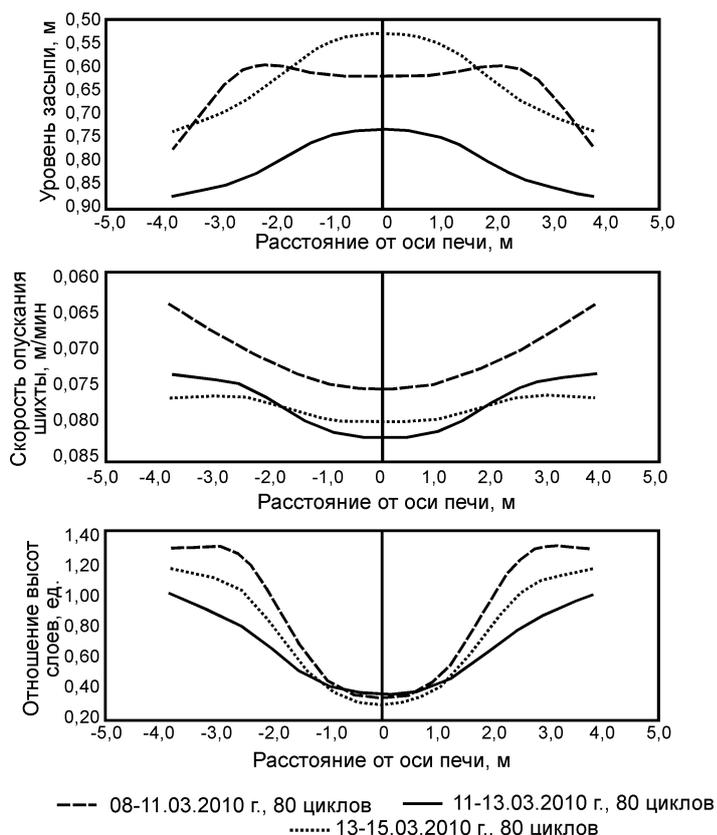
И. Г. МУРАВЬЕВА, д.т.н., *irinamuravyova@gmail.com*; Д. Н. ТОГОБИЦКАЯ, д.т.н.;  
Ю. С. СЕМЕНОВ, к.т.н.; Е. И. ШУМЕЛЬЧИК, Е. А. БЕЛОШАПКА (Институт черной  
металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины)

### ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ПОЛОЖЕНИЕ ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Для подтверждения достоверности полученных результатов по определению положения пластичной зоны в доменной печи с помощью предложенного и приведенного в работе [1] метода выполнен анализ факторной структуры показателей, характеризующих опускание поверхности шихтовых материалов в печи, а также сопоставление расчетов формы и положения пластичной зоны с технологическими показателями и параметрами доменной плавки.

На первом этапе исследований для анализируемых периодов, приведенных в работе [1], полученные результаты определения положения пластичной зоны в доменной печи с помощью предложенного метода были сопоставлены с характером изменения показателя распределения шихтовых материалов, в качестве которого принято отношение высот железосодержащих материалов и кокса, рассчитываемых на основе информации профилемера (в качестве примера на рис. 1 приведены результаты для трех исследуемых периодов). Сопоставительный анализ показал, что для ряда периодов (II, V, VII и VIII) подтверждаются известные положения о том, что изменение распределения рудных нагрузок приводит к изменению формы пластичной зоны. Как следует из приведенных в статье японских авторов результатов исследований, выполненных на двумерной физической модели [2], при плавном возрастании отношения высот слоев (показатель распределения шихтовых материалов) от оси к стенке печи пластичная зона приобретает Λ-образную форму (рис. 2). При низкой рудной нагрузке на участке от оси до середины радиуса с резким ее возрастанием у стенки пластичная зона имеет форму перевернутой буквы U. Из сопоставления рис. 1 и 2 следует, что характер изменения показателя распределения — отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса — для программ II и VIII перио-

дов близок к варианту на рис. 2, в, для которого характерно формирование пластичной зоны в виде перевернутой буквы U, а для программ V и VII периодов — варианту на рис. 2, а, с характерной Λ-образной формой пластичной зоны. Таким образом, полученная в результате расчетов с помощью предложенного метода форма пластичной зоны для II, V, VII и VIII периодов согласуется в достаточной степени с известными из литературных источников положениями.



**Рис. 1.** Изменение профиля поверхности засыпки, скорости опускания шихты и отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса для V, VI, VII периодов работы печи (08–11.03.2010 г., 11–13.03.2010 г. и 13–15.03.2010 г. соответственно)

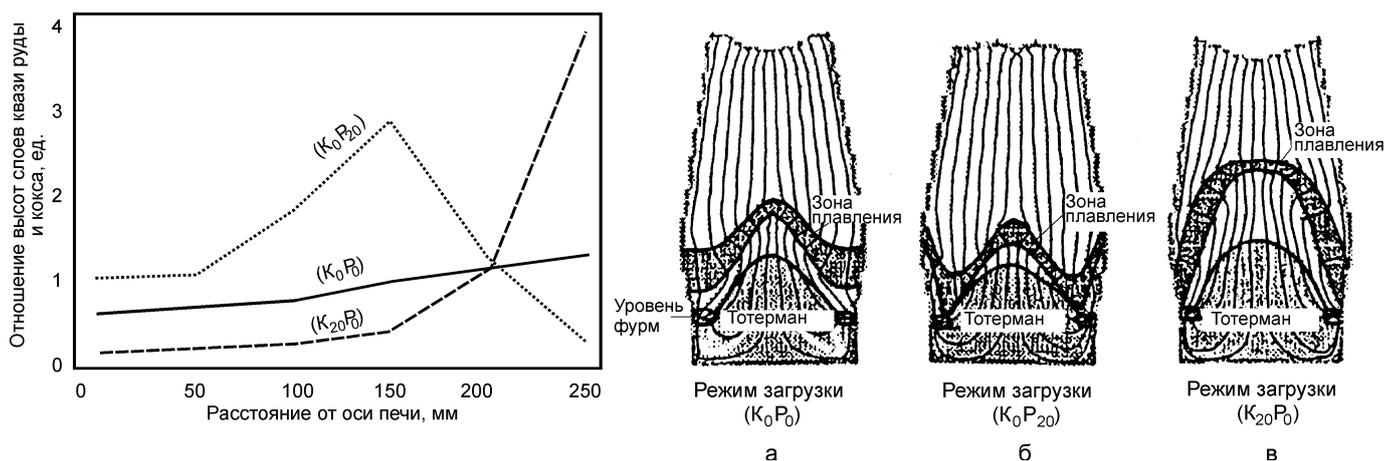


Рис. 2. Радиальное распределение квазирудных нагрузок на двухмерной физической модели доменной печи при различных режимах загрузки и соответствующая им схема образования расплавов

Для остальных исследуемых периодов работы печи зависимость изменения распределения рудных нагрузок с формой пластичной зоны не установлена, что связано с тем, что расстояние до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи превышает значение, полученное для примыкающей к ней промежуточной (2П) зоне. Следовательно, существуют факторы, не позволяющие для ряда периодов установить прямые связи рудных нагрузок с положением и формой пластичной зоны. К числу таких факторов относятся скорость опускания шихтовых материалов в осевой зоне печи и профиль поверхности засыпи, образованный в результате выгрузки 80 циклов загрузки шихты.

Как следует из представленных на рис. 1 графиков, в VI периоде (аналогичный характер изменения скоростей и в I, III, IV, IX и X периодах) скорость опускания шихты в осевой зоне печи на уровне колошника превышает скорость опускания шихты во второй промежуточной зоне (2П) на 18–34 %. Для сравнения следует отметить, что для II, V, VII и VIII периодов превышение скорости в осевой зоне по сравнению с ее значением в зоне 2П изменяется от 4 до 7 %. Исключение составляет II период, где это превышение достигает 15 %, но для него характерным является значительная глубина воронки (0,3 м), что также оказывает влияние на формирование пластичной зоны в осевой части печи.

Второй этап исследований, направленных на подтверждение достоверности определения положения пластичной зоны в доменной печи с помощью предложенного оперативного метода, основанного на информации профилемера, заключался в выполнении факторного анализа показателей технологических условий и положе-

ния пластичной зоны в доменной печи. Поскольку исследование влияния на положение пластичной зоны в печи различных условий плавки, характеризующихся соответствующими технологическими параметрами, является многофакторной задачей, для выявления самых информативных и значимых показателей был использован многомерный сравнительный анализ [3].

Для построения модели оптимальной структуры использована методика факторного анализа [4], позволяющая не только снизить размерность исходного факторного пространства, но и вскрыть оптимальную группировку переменных  $\{X^j\}^k$  для их интегральной «свертки»  $F^k$ , т. е. все зависимые между собой переменные объединяются в один фактор. В этом случае они имеют максимальную нагрузку на общий для них фактор. Основная модель факторного анализа имеет вид

$$Z_{ij} = A_{jk} F_{ki}, \quad (1)$$

где  $Z_{ij}$  — матрица стандартизованных исходных переменных;  $A_{jk}$  — факторные нагрузки переменной  $j$  на фактор  $k$ ;  $F_{ki}$  — значения фактора  $F_k$  для  $i$ -го наблюдения.

Факторная модель (1) внешне сходна с регрессионной, но в отличие от последней она отражает внутреннее состояние объекта с помощью факторов состояния или обобщенных структур, полученных в результате «свертки» взаимосвязанных параметров.

Приняты два варианта представления исследуемых данных, характеризующих технологические особенности работы печи, в соответствии с которыми сформированы шесть выборок исследуемых данных. Принятие двух вариантов представления исследуемых данных вызвано необ-

ходимостью обеспечения корректности входных данных факторного анализа. Каждая из выборок содержит информацию о параметрах, характеризующих положение пластичной зоны в печи: расстояниях от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз, рассчитанных для каждой из трех контролируемых профилемером зон; показателях распределения шихтовых материалов и скоростях их опускания в контролируемых профилемером зонах, а также информацию о технологических параметрах плавки. К этим шести матрицам был применен факторный анализ с целью выявления наиболее значимых факторов, оказывающих определяющее влияние, т. е. имеющих наибольшие факторные нагрузки на общий фактор с показателем положения пластичной зоны в печи — расстоянием от уровня засыпи до точки начала образования жидких фаз.

В первом варианте анализа были сформированы три выборки (1–3), представляющие собой технологические параметры и показатели доменной плавки в исследуемые периоды работы ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», а также рассчитываемые на основе информации профилемера с помощью предложенного метода параметры, характеризующие положение пла-

стичной зоны в печи, соответственно в трех зонах (1П, 2П и Ц). В качестве технологических параметров и показателей плавки для факторного анализа использованы: производство чугуна ( $\text{Пр}$ , т); расход кокса ( $K$ , кг/т чугуна); содержание кремния в чугуне ( $[\text{Si}]$ , %); степень использования монооксида углерода ( $\eta_{\text{CO}}$ , ед.). В качестве параметров, рассчитываемых на основе информации профилемера, для оценки положения пластичной зоны в зонах 1П, 2П и Ц анализировались: расстояния от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз (пластичной зоны) ( $S_{1\text{П}}, S_{2\text{П}}, S_{\text{Ц}}$ , м); отношение высот слоев железосодержащих материалов и кокса ( $H_{\text{жс}}/H_{\text{к}}$ , ед.); толщина слоя железосодержащих компонентов ( $H_{\text{жс}}$ , м); скорость опускания шихтовых материалов ( $V_{\text{ш1П}}, V_{\text{ш2П}}, V_{\text{шЦ}}$ , м/мин). В результате расчетно-аналитических определений для зон 1П и 2П получены матрицы нагрузок отдельных показателей и обобщенных «свернутых» их значений на три генеральных фактора, отражающих весь исследуемый массив данных. Для зоны Ц характерным явилось получение матрицы нагрузок на два генеральных фактора. Графическая интерпретация выявленных связей представлена на рис. 3.

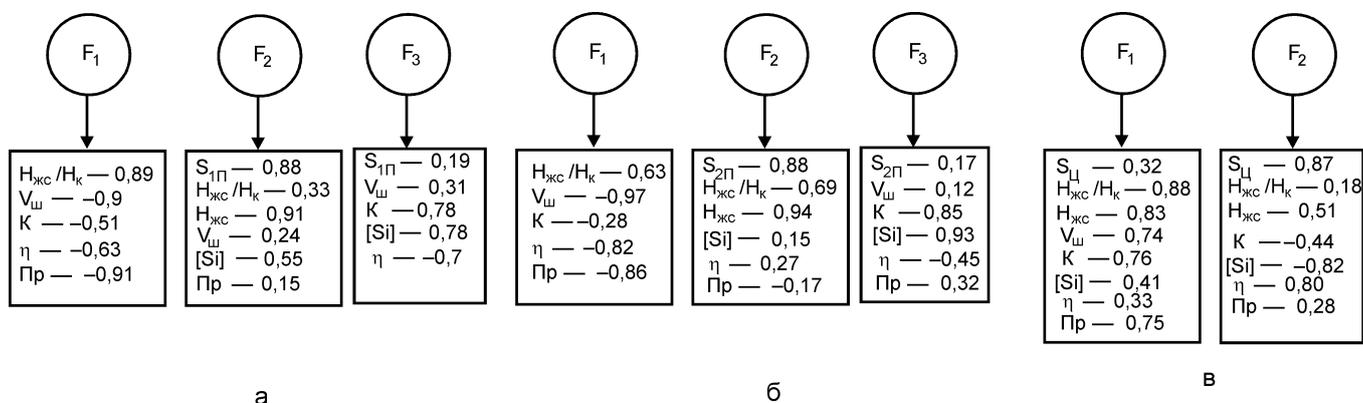


Рис. 3. Факторный анализ показателей плавки (10 периодов): а — 1П (матрица 1); б — 2П (матрица 2); в — Ц (матрица 3)

Анализ влияния переменных на показатель положения пластичной зоны в печи — расстояние от уровня засыпи до точки начала образования жидких фаз — в трех зонах печи показал следующее. Для зоны 1П, факторная структура исследуемых показателей которой показана на рис. 3, а, и для зоны 2П (см. рис. 3, б) показатель положения пластичной зоны в печи отличается значимой нагрузкой на второй фактор. Для зоны Ц (см. рис. 3, в) нагрузки показателя положения пластичной зоны в осевой зоне печи распреде-

лились на оба фактора, причем более значимую роль при этом они играют во втором факторе, увязывая показатели, рассчитанные по информации профилемера, с технологическими параметрами плавки.

Во втором варианте анализа были сформированы три выборки (4–6), представляющие собой технологические параметры и показатели доменной плавки в исследуемые периоды работы ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», а также рассчитываемые на основе информации

профилемера с помощью предложенного метода параметры, характеризующие положение пластичной зоны в печи соответственно в трех зонах (1П, 2П и Ц). В качестве технологических параметров и показателей плавки для факторного анализа использованы: содержание кремния в чугуне ( $[Si]$ , %); степень использования монооксида углерода ( $\eta_{CO}$ , ед.); содержание окатышей в шихте ( $O_k$ , кг/т чугуна); температура кладки

шахты ( $T_{кл.ш}$ , °C). В результате расчетно-аналитических определений для зон 1П и Ц получены матрицы нагрузок отдельных показателей и обобщенных “свернутых” их значений на два генеральных фактора, отражающих весь исследуемый массив данных. Для зоны 2П характерным явилось получение матрицы нагрузок на три генеральных фактора (рис. 4).

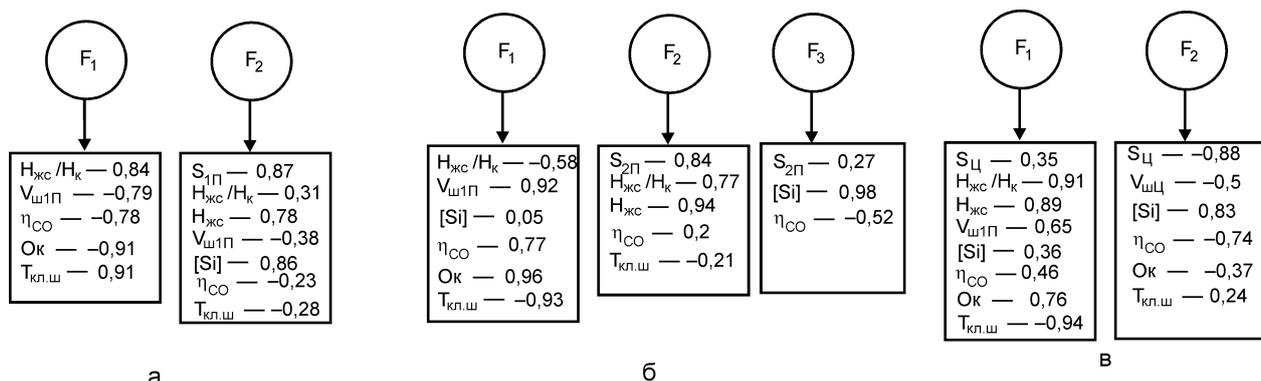


Рис. 4. Факторный анализ показателей плавки (10 периодов): а — 1П (матрица 4); б — 2П (матрица 5); в — Ц (матрица 6)

Анализ влияния переменных на показатель положения пластичной зоны в печи (расстояние от уровня засыпи до точки начала образования жидких фаз в трех зонах печи) показал следующее. Для зоны 1П, факторная структура исследуемых показателей которой показана на рис. 4, а, и для зоны 2П (см. рис. 4, б) показатель положения пластичной зоны в печи отличается значимой нагрузкой на второй фактор. Для зоны Ц (см. рис. 4, в), как следует из факторного анализа, нагрузки расстояния от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи распределились на оба фактора, причем более значимую роль при этом они играют во втором факторе, увязывая показатели, рассчитанные по информации профилемера, с технологическими параметрами плавки.

Обобщающий анализ результатов полученных факторных нагрузок по обоим вариантам представления исходных данных позволил установить следующее.

1. Из особенностей распределения нагрузок показателя, определяющего расстояние от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в осевой зоне печи (матрицы 3 и 6) следует, что расположение границ пластичной зоны вблизи оси печи ближе к верху шахты объясняется меньшей скоростью опускания шихты в осевой зоне. Расположение границ пластичной

зоны вблизи оси печи ближе к верху шахты обуславливает большее значение содержания кремния в чугуне. Такой характер изменения положения пластичной зоны согласуется с результатами выполненных ранее исследований по прогнозированию содержания кремния в чугуне, по изменению скорости в осевой зоне печи [5].

2. Второй фактор матрицы 6 позволил установить влияние содержания окатышей в шихте на положение пластичной зоны в осевой части печи. Установлено, что большое содержание окатышей вызывает формирование более высокой пластичной зоны. Известно, что окатыши имеют более низкие значения температур плавления, что приводит к увеличению высоты пластичной зоны.

3. Из анализа факторов матриц 3 и 6 следует, что при увеличении объема сухой зоны, что характеризуется уменьшением расстояния до пластичной зоны в осевой части печи, степень использования монооксида углерода  $\eta_{CO}$  возрастает.

4. Показатели второго фактора в матрицах 1, 2, 4 и 5 позволили установить определяющее влияние толщины слоев железосодержащих материалов на положение пластичной зоны, оцениваемое по расстоянию от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в зонах 1П и 2П. Именно эта величина, согласно

предлагаемому методу, определяет в значительной степени изменение положения пластичной зоны.

Если обобщить полученные результаты с точки зрения влияния технологических параметров на положение пластичной зоны в печи, определяемое расстояниями от технологического нуля до точки начала образования жидких фаз в трех зонах сечения печи, то можно заключить, что связь этих расстояний с технологическими параметрами, характеризуемая полученными факторными нагрузками  $f_{ii}$ , подтверждает достоверность определения положения пластичной зоны в доменной печи с помощью предложенного метода.

Полученные результаты по определению положения пластичной зоны подтверждаются также анализом показаний стационарных термомпар, установленных в шахте и на периферии ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Установлено, что показания стационарных термомпар, расположенных в кладке шахты печи на отметке 26,6 м, возрастают, а температура периферии убывает, и наоборот. Это связано с перераспределением газового потока в радиальном направлении, на которое оказывает влияние изменение конфигурации пластичной зоны в пределах отметок 26–29 м.

### Заключение

Выполненный факторный анализ влияния технологических условий плавки, а также характера изменения показателя распределения шихтовых материалов, в качестве которого принято отношение высот железосодержащих материалов и кокса, рассчитываемых на основе информации профилемера, на установленные с помо-

щью предложенного метода форму и положение пластичной зоны позволил подтвердить достоверность полученных значений расстояний от уровня засыпи до точки начала образования жидких фаз, характеризующих положение пластичной зоны в доменной печи.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Метод оперативного контроля положения пластичной зоны в доменной печи / И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов, Н. А. Гладков, Е. А. Белошапка, А. В. Наследов // *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2011. № 8. С. 38–44
2. Influence of ore to coke ratio distribution on descending and melting behavior of burden in the blast furnace / M. Ichida, K. Nishihara, K. Tamura, M. Sugata, H. Ono // *Tetsu-to-Hagane = Journal of The Iron and Steel Institute of Japan*. 1991. V. 77. №. 10. P. 79–86.
3. Многомерный статистический анализ и вероятностное моделирование реальных процессов / Под ред. С. А. Айвазяна. — М.: Наука. 1990. — 296 с.
4. Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. В. М. Ивановой. — М.: Статистика. 1980. — 399 с.
5. Пат. на изобретение Украины, UA 82305 С2. Способ прогнозирования содержания кремния в чугуна / В. И. Большаков, С. Т. Шулико, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов, С. М. Жучков; опубл. 25.03.08. Бюл. 2008 г. № 6.