

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.162.211.4

Томаш А.А.¹, Тарасов В.П.², Семакова В.Б.\ Зотов А.В.⁴

ИЗМЕНЕНИЕ ПОРОЗНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДОМЕННОЙ ШИХТЫ ПРИ РАЗМЯГЧЕНИИ

*Предложен метод объективной оценки газопроницаемости доменной шихты при раз -
мягчении по изменению её порозности. Математическое описание изменения порозно -
сти трёхкомпонентных смесей доменной шихты при размягчении осуществлено на
основе анализа результатов экспериментов, проведенных в соответствии с симплекс
- решётчатыми планами Шеффе.*

Наибольшее сопротивление проходу газов в доменной печи оказывает зона когезии, в кото -
рой шихтовые материалы находятся в размягчённом состоянии. Для обеспечения ровного схода
шихты, высоких технико-экономических показателей доменной плавки необходимо сокращать её
протяженность. Конфигурацию и размеры вязко - пластической зоны во многом предопределяет
температурный интервал размягчения шихтовых материалов: разность температур перехода в
жидкое состояние и начала размягчения. Особенно важны исследования размягчаемости шихты
для МК «Азовсталь», где используется многокомпонентная доменная шихта. Обычно в доменные
печи этого комбината одновременно грузятся три железорудных материала: агломерат собствен -
ного производства, агломерат МК им. Ильича или ЮГОК и окатыши. В то же время разнообразие
шихтовых материалов, используемых на МК «Азовсталь», позволяет обобщать результаты иссле -
дований их физико-химических свойств.

Исследования размягчаемое™ шихтовых материалов проводились в шахтной электропечи.
На поверхность слоя исследуемых частиц, помещённых в металлическом стакане в печь, устанавли -
вался шток с грузом 2,5 кг, имитирующим вес вышележащих слоев шихты. В наконечнике што -
ка размещался спай термопары. По мере нагрева и размягчения шихты шток опускался. Опускание
штока из-за усадки свидетельствовало о степени размягчения агломерата или окатышей. Круп -
ность исследуемых частиц и скорость нагрева выбирались из условия равенства для доменной пе -
чи и лабораторной установки критерия Фурье

¹ ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

² ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

³ ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

⁴ МК «Азовсталь», зам. нач. ЦЛМК

$$F_0 = \alpha \tau / d^2 \quad (1)$$

где α - коэффициент температуропроводности рудного материала, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ - время нагрева, с;

d - диаметр частиц рудного материала, м.

При скорости нагрева электропечи $0,17^\circ\text{C}/\text{с}$ крупность частиц составила 5-7 мм. Каждый опыт проводился дважды. Результаты двух экспериментов усреднялись.

Усадка шихты под нагрузкой недостаточно объективно характеризует процесс размягчения. Момент начала размягчения выбирается условно, невозможно оценить изменение газопроницаемости шихты. В ходе исследований применялась более объективная характеристика состояния материалов - порозность ϵ . При определении порозности, принималось, что размягчённый материал состоит из твёрдых частиц и жидкости. Усадка происходит в результате плавления части твёрдых частиц и заполнения жидким шлаком межкусковых пустот. До начала размягчения при нагревании наблюдается расширение твёрдых частиц, в результате чего высота слоя в стакане H_t увеличивается

$$H_t = H_0 (1 + a \Delta t) \quad (2)$$

где H_0 - начальная высота слоя, м;

Δt - разность температур материала в печи и окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

a - коэффициент температурного расширения слоя, $^\circ\text{C}^{-1}$.

Коэффициент a определяется при сравнении максимальной достигнутой при термическом расширении высоты слоя с начальной высотой. Принималось, что порозность ϵ_0 до начала размягчения при увеличении объёма слоя остаётся неизменной (рис. 1) В результате усадки при даль-

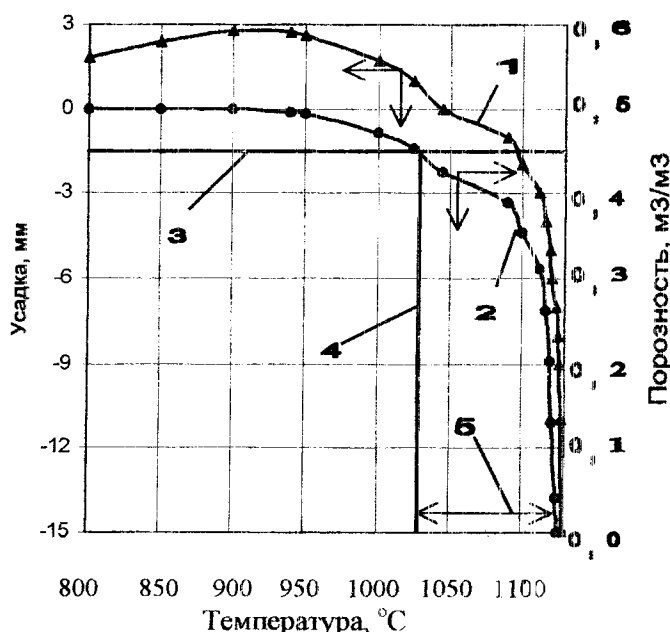


Рис. 1 - Определение порозности размягчённого материала и температурного интервала снижения газопроницаемости при размягчении смеси агломератов МК «Азовотал» ГОК.

1 - усадка размягчённого материала; 2 - порозность размягчённого материала; 3 - порозность, при которой газопроницаемость шихты снижается более чем в 1,5 раза.; 4 - температура начала а снижения газопроницаемости при размягчении, 1027°C ; 5 - температурный интервал снижения

газопроницаемости при размягчении $1027 - 1125^\circ\text{C}$.

нейшем увеличении температуры высота слоя H_y уменьшается. Объем образующейся жидкой фазы составляет

$$V_{ж} = [(1 + a\Delta t)H_0 - H_y]S(1 - \varepsilon_0)(\rho_s / \rho_{ж}), \quad (3)$$

где S - площадь горизонтального сечения внутреннего пространства стакана, m^2 ;

ρ_s и $\rho_{ж}$ - кажущаяся плотность частиц шихты и плотность жидкого шлака, kg/m^3 .

Остаточный объем пустот, не заполненных жидкостью:

$$V_n = H_y S \varepsilon_0 - [(1 + a\Delta t)H_0 - H_y]S(1 - \varepsilon_0)(\rho_s / \rho_{ж}) \quad (4)$$

Произведение $H_y S$ представляет собой объем слоя с учетом усадки $V_{сн}$. Порозность размягченного материала $\varepsilon = V_n / V_{сн}$; соответствующая различной высоте H_y и усадке слоя $H_0 - H_y$, определяется соотношением

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - [(1 + a\Delta t)H_0 / H_y - 1](1 - \varepsilon_0)(\rho_s / \rho_{ж}) \quad (5)$$

По мере усадки шихты её порозность снижается (рис. 1). На первом этапе уменьшение объема межкусковых пустот незначительно. Началом интервала снижения газопроницаемости шихты при размягчении принята температура, при которой порозность сокращается на 10 %. Сопротивление проходу газов при этом возрастает на 50 %. Концом интервала снижения газопроницаемости шихты при размягчении принята температура, при которой жидкая фаза заполняет все межкусковые пустоты, $\varepsilon = 0$, и высота слоя составляет

$$H_y = \frac{H_0(1 - \varepsilon_0)(\rho_s / \rho_{ж})}{1 + \varepsilon} \quad (6)$$

При последующем нагреве объем жидкого шлака превосходит объем межкусковых пустот. Расплав раздвигает частицы, и размягченный материал приобретает текучесть. В пользу такого выбора температуры конца размягчения свидетельствует то, что при увеличении температуры еще на 2-5 °C шток полностью опускается на дно стакана.

С увеличением основности железорудных материалов наблюдается уменьшение температурного интервала снижения газопроницаемости при размягчении к увеличению температуры его начала. Так самые низкие температуры размягчения 1037 - 1030 °C (интервал снижения газопроницаемости при размягчении 66 °C) у неокислованных лебедянских окатышей ($CaO/SiO_2 = 0,10$) Окатыши СевГ'ОК основностью 0,58 наибольшее сопротивление проходу газов оказывают при температурах 1079 - 1120 °C (температурный интервал снижения газопроницаемости 41 °C). Агломераты ЮГОК и МК им. Ильича, основность которых 1,16 и 1,18, переходят в вязко - пластическое состояние в интервалах температур 1094 - 1124 и 1088 - 1120 °C соответственно (температурный интервал - 30 - 32 °C). Высокоосновный агломерат МК «Азовсталь», $CaO/SiO_2 = 1,80$, теряет газопроницаемость при нагреве до 1106 - 1130 °C (24 °C). С достаточно высокой точностью при значениях коэффициента корреляции $|r|$ близких к 1, зависимости температуры начала снижения газопроницаемости при размягчении t_n и температурного интервала снижения газопроницаемости Δt_p от основности железорудных материалов в интервале значений CaO/SiO_2 от 0 до 2, С могут быть описаны уравнениями (рис.2)

$$t_n = 38(CaO / SiO_2) + 1044, \quad r = 0,93 \quad [7]$$

$$\Delta t_p = -23,8(CaO / SiO_2) + 61,5, \quad r = -0,93 \quad (8)$$

При совместной загрузке в доменную печь нескольких железорудных материалов интервал размягчения доменной шихты обычно определяют механическим совмещением интервалов размягчения отдельных компонентов. При этом не учитывается возможность взаимовлияния материалов и протекания твердофазных реакций. Уточнение: поведения железорудных смесей в ходе первичного шлакообразования потребовало дополнительных исследований. Для сокращения го-

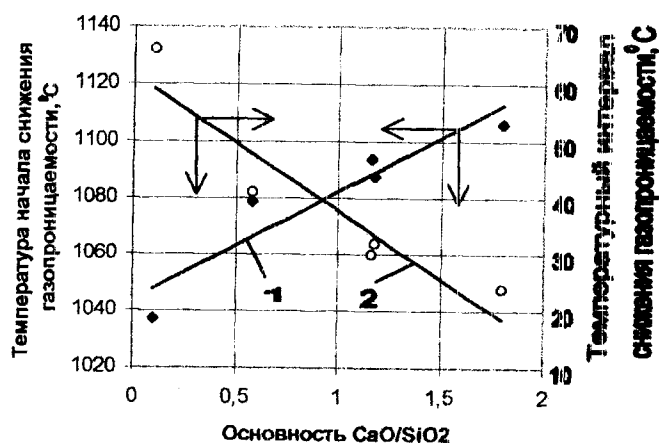


Рис. 2 Влияние основности железорудного материала на температуру начала (1) и температурный

интервал (2) снижения газопроницаемости при размягчении объема опыты проводили в соответствии с симплекс - решётчатыми: планами ППФе [1-3]. В таол. представлен план проведения экспериментов для определения коэффициентов уравнения квадратичной или неполной кубической модели, описывающей поведение системы «состав -- свойство»

для трёхкомпонентной системы

$$y = b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 (+b_{123} X_1 X_2 X_3) \quad (9)$$

Таблица - План проведения и средние результаты экспериментов для определения температурных

№ опы-та	Содержание компонента, д. ед.			$\Delta t_p, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$
	Окатыши СевГОК (X_1)	Агломерат МК им. Ильича (X_2)	Агломерат МК «Азовсталь» (X_3)		
1	1	0	0	$y_1 = 41$	$y_1 = 1079$
2	0	1	0	$y_2 = 32$	$y_2 = 1088$
3	0	0	1	$y_3 = 24$	$y_3 = 1106$
4	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$y_{12} = 43$	$y_{12} = 1090$
5	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$y_{13} = 23$	$y_{13} = 1097$
6	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$y_{23} = 31$	$y_{23} = 1105$
7	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$y_{123} = 24$	$y_{123} = 1099$

Первые шесть слагаемых уравнения (9) и опыты № 1 - 6 относятся как к квадратичной, так и к кубической модели. Опыт № 7 и последнее слагаемое формулы (9), взятое в скобки, применяются

только в неполной кубической модели

$$b_i = \frac{2y_i - 2y_j - 2y_k}{y_i + y_j + y_k - 3y_{ijk}}; \quad b_{123} = \frac{27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3)}{y_i + y_j + y_k - 3y_{ijk}} \quad (10)$$

При загрузке в доменную печь смеси окатышей Сев ГОК, агломератов МК им. Ильича и МК «Азовсталь» в различных соотношениях изменение температуры начала снижения газопроницаемости при размягчении

только в неполной кубической модели

описывается уравнениями

$$1079X_1 + 1088X_2 + 1106X_3 + 26X_1X_2 + 18X_1X_3 - 32X_2X_3 \quad (11)$$

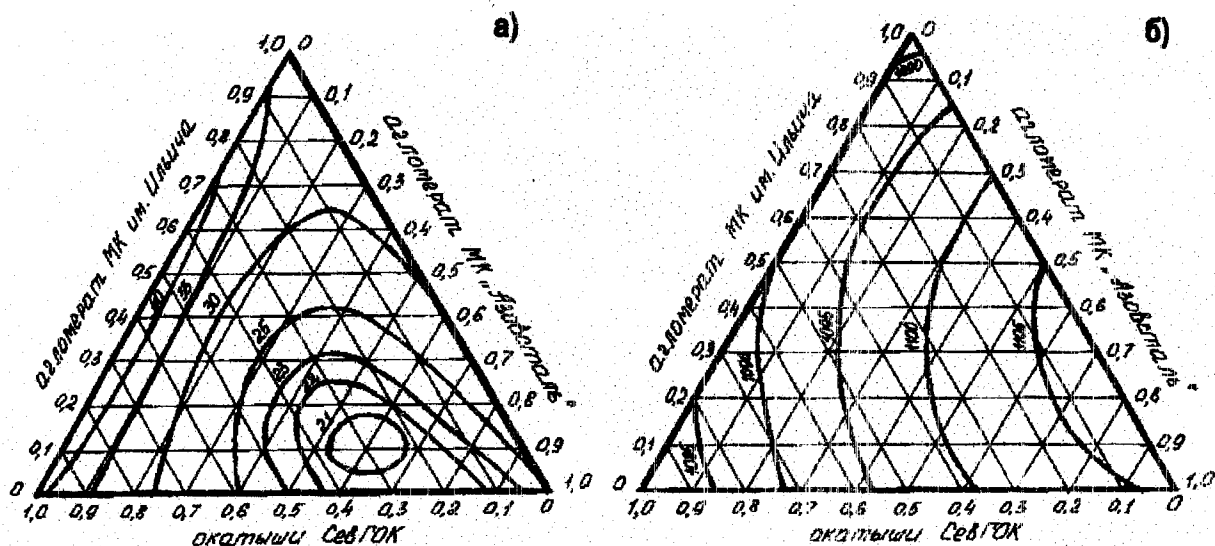


Рис. 3 - Температурные интервалы (а) и температуры начала снижения газопроницаемости (б) при

размягчении трёхкомпонентных смесей доменной шихты

$$\Delta t_p = 41X_1 + 32X_2 + 24X_3 + 26X_1X_2 - 38X_1X_3 + 12X_2X_3 - 225X_1X_2X_3 \quad [12]$$

Аналогичные уравнения получены для смеси окатышей СевГОК, агломератов ЮГОК (X_2) и МК

$$t_n = 1079X_1 + 1094X_2 + 1106X_3 + 6X_1X_2 + 18X_1X_3 - 204X_2X_3 - 1242X_1X_2X_3 \quad (13)$$

«Азовсталь»

$$\Delta t_p = 41X_1 + 30X_2 + 24X_3 + 34X_1X_2 - 38X_1X_3 + 268X_2X_3 + 999X_1X_2X_3 \quad (14)$$

Адекватность уравнений (10 - 14) проверяли путём сравнения разности расчётного и фактического значений функции при произвольном соотношении компонентов смеси с погрешностью эксперимента с помощью критерия Стьюдента [3]. На рис. 3 представлены тройные диаграммы изменения t_n и Δt_p при смешивании окатышей, агломератов МК им. Ильича и МК «Азовсталь» в соответствии с (11, 12). Минимальный интервал снижения газопроницаемости при размягчении и, соответственно, наименьшее сопротивление проходу газов оказывает смесь 60 % агломерата МК «Азовсталь», 30 % окатышей СевГОК и 10 % агломерата МК им. Ильича. Практически такую же газопроницаемость при размягчении обеспечивает бинарная смесь агломерата МК «Азовсталь» и окатышей, если доля последних составляет 5 -- 50 %. При увеличении доли агломерата МК им. Ильича в шихте до 25 - 30 % высокую газопроницаемость зоны когезии можно сохранить, придерживаясь содержания окатышей 20 - 40 %. Увеличение доли агломерата МК им. Ильича и окатышей СевГОК в шихте выше указанных пределов приводит к снижению её газопроницаемости. Температура начала размягчения монотонно возрастает с увеличением доли агломерата МК «Азовсталь» в смеси. Доменная шихта, содержащая наряду с окатышами и азовстальским сырьём агломерат ЮГОК, оказывает значительно большее сопротивление проходу газов. Негативно сказывается на протяжённости вязкопластической зоны совместная загрузка агломератов ЮГОК и МК «Азовсталь». Наибольшая протяжённость интервала снижения газопроницаемости шихты, более 100 °С, и самая низкая температура начала размягчения, менее 1030 °С, соответствует смеси 40 % агломерат МК «Азовсталь», 40 % ЮГОК, 20 % окатыши.

Выводы

1. Объективной характеристикой газопроницаемости размягчённой доменной шихты является изменение её порозности.
2. С повышением основности железорудных материалов наблюдается увеличение температуры начала снижения газопроницаемости при размягчении и уменьшение температурного интервала снижения газопроницаемости.
3. Применение симплекс - решетчатых планов при проведении экспериментов позволяет сократить их объём и исследовать изменение порозности при размягчении для любых соотношений компонентов доменной шихты.
4. Смесь агломератов МК им. Ильича, МК «Азовсталь» и окатышей СевГОК оказывает меньшее сопротивление проходу газов, чем шихта состоящая из агломератов ЮГОК, МК «Азовсталь» и окатышей СевГОК

Перечень ссылок

1. Scheffe H. Experiments with mixtures. - J. Roy. Stat. Soc., B, 1958, v. 20, P. 344 - 360.
2. Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем. - М.: Металлургия, 1974. - 176 с.
3. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента - Киев-Донецк: Вища школа, 1982.-120 с.

Томаш Александр Анатольевич. Канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии чугуна, окончил Мариупольский металлургический институт в 1987 году. Основные направления научных исследований - совершенствование агломерационного и доменного процессов и снижение энергетических затрат на выплавку чугуна; изучение закономерностей движения зернистых материалов и газов в противоточных реакторах.

Тарасов Владимир Петрович. Д-р техн. наук, профессор кафедры металлургии чугуна, окончил Московский институт стали и сплавов в 1954 году. Основные направления научных исследований - совершенствование агломерационного и доменного процессов и снижение энергетических затрат на выплавку чугуна; изучение закономерностей движения зернистых материалов и газов в противоточных реакторах.

Семакова Виктория Борисовна. Канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии чугуна, окончила Мариупольский металлургический институт в 1985 году. Основные направления научных исследований - совершенствование агломерационного и доменного процессов и снижение энергетических затрат на выплавку чугуна; процессы восстановления в доменной печи.

Зотов Алексей Владимирович. Заместитель начальника ЦЛМК «Азовсталь», окотил Мариупольский металлургический институт в 1975 году. Основные направления научных исследований - шлакообразование и десульфурация чугуна.