

Д.Н.Тогобицкая, А.Ф.Хамхотько, Н.А.Гладков, Н.Е.Ходотова

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АГРЕГАТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Целью настоящего исследования является разработка комплексного подхода для всесторонней оценки качества подготовленного железорудного сырья и анализ предложенного варианта разработки прогнозных моделей температур размягчения и плавления агломератов, окатышей и руд. С использованием данных, полученных по стандартной методике, выполнено аналитическое обобщение информации о фазовых превращениях железорудных материалов в исходном состоянии и восстановительных условиях доменной плавки. Предложенные физико-химические модели могут быть использованы для прогнозирования температур размягчения и плавления шихтовых материалов.

железородное сырье, оценка качества, прогнозные модели, доменная плавка, температуры размягчения и плавления

Целью настоящего исследования является разработка комплексного подхода для всесторонней оценки качества подготовленного железорудного сырья и анализ предложенного варианта разработки прогнозных моделей температур размягчения и плавления агломератов, окатышей и руд с использованием данных, полученных по стандартной методике.

Состояние вопроса. Сложившийся, в условиях нынешнего дефицита энергоресурсов, не стабильный уровень качества комбинированного дутья (концентрация восстановителей, температура, доля фурменного газа) обуславливает разную степень развития восстановительно-тепловых процессов в доменной печи, влияющих на характер агрегатных превращений железорудных материалов. Следствием этого является расширение температурных диапазонов жидкообразования, изменения соотношения в протяженностях зон существования материалов в твердом, размягченном и капельножидком состоянии. В результате этого заметно отклоняется от рационального распределение газов по сечению печи, возрастает сопротивление его движению (нижний перепад), нарушается теплообмен в зоне формирования расплавов, возрастает колеблемость состава продуктов плавки, снижается ровность хода печи и ее экономичность.

Исследованию, оценке состояния и прогнозированию поведения железорудных материалов при нагревании их в восстановительной среде уделялось в свое время большое значение в связи с развитием агломерации и появлению ряда подготовленных разноосновных материалов, в частности, агломерата и окатышей. Использовались при этом разные методики и подходы, применялись различного рода инструментальные устройства для определения особенностей агрегатных превращений железорудного сырья применительно к условиям доменной плавки. Некоторые из методических обобщений приведены в монографии [1] и периодиче-

ской печати. Интерес к исследованию поведения железорудных материалов от их загрузки в доменную печь (сухая зона) до перехода в зону размягчения – плавления и затем в зону капельно–жидкого состояния (коксовая насадка) существенно возрос после освещения результатов исследования затушенных доменных печей.

Постановка задачи. В ИЧМ с использованием специальных устройств для определения размягчения и расплавления железорудных материалов, высокотемпературных микроскопов и укрупненных (пилотных) установок, определения высокотемпературных свойств рудных образцов выполнены фундаментальные исследования, широко опубликованные в работах [2–4]. Разработан комплексный подход для всесторонней оценки качества подготовленного железорудного сырья, в частности позволяющий определять свойства материала, обеспечивающего рациональный характер жидкообразования, ровность хода процесса и его экономичность. Основой этого является созданная в ИЧМ база данных «Железорудные материалы», в которой сконцентрированы экспериментальные данные различных авторов об интервале размягчения – плавления различных агломератов, окатышей, руд, концентратов и их смесей [5].

Наполнение базы осуществлено данными, опубликованными в справочниках, монографиях, отраслевых сборниках и периодических изданиях с ретроспективой 40 лет. Кроме того, использована неопубликованная экспериментальная информация, полученная в ИЧМ по гостированным методикам. Согласно разработанному стандарту подготовлено свыше 120 паспортов и в базу введены данные о свойствах более 1200 составов различных видов железорудного сырья, включая гранулометрический состав, влажность, пористость, интервал размягчения и плавления, прочность в исходном состоянии и после восстановительно–тепловой обработки, степень восстановления и металлизации, газопроницаемость и теплофизические свойства. В том числе в базе содержится информация о размягчении и плавлении около 400 составов железорудных материалов.

Анализ накопленной информации свидетельствует, что данные о столь важных для шихтовых железорудных материалов теплофизических характеристиках, как температуры размягчения и плавления, несмотря на солидный объем, ограничены и, в ряде случаев, противоречивы [6]. Это обусловлено различием методики измерения, нечетким определением таких понятий, как «интервал размягчения», «интервал плавления» и др.

Отличия в методиках определения интервалов размягчения и плавления железорудных материалов затрудняют обобщение экспериментальных данных различных авторов в единую выборку для решения задач прогнозирования. Так, по данным [7] T_{nn} криворожской железной руды составляет 1281°C и $\Delta T = T_{kn} - T_{nn} = 249^{\circ}\text{C}$, а по данным [8] для этой же руды $T_{nn} = 1078^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T = T_p - T_{nn} = 463^{\circ}\text{C}$. В литературе зачастую не акцентируется внимание на таких факторах, как атмосфера, при которой

определялись температура начала размягчения $T_{нр}$, температура конца размягчения $T_{кр}$, температура начала плавления $T_{нп}$, температура расплавления (растекания) T_p , а также на четкой фиксации степени восстановления исследуемых материалов. Это также определяет противоречивость различных экспериментальных данных и невозможность их объединения для решения задач прогнозирования [5].

Немаловажное значение имеет факт чрезвычайно ограниченных данных об исследованиях свойств таких разных материалов, как агломераты, окатыши, руды и шихты на их основе в единых условиях.

Изложение основных материалов исследования. В настоящей работе приведены данные одного из вариантов разработки прогнозных моделей температур размягчения и плавления агломератов, окатышей, руд с использованием данных, полученных в работах [8–10], где характеристики размягчения получены по стандартной методике при нагреве материалов со скоростью 10 град/мин под нагрузкой 0,2 МПа. В работе принято, что начало усадки зернистой пробы материалов соответствует температуре начала размягчения ($T_{нр}$), усадка на 40% – конца размягчения ($T_{кр}$). Характеристики плавления получены с помощью высокотемпературного микроскопа в нейтральной атмосфере.

По данным [8] в процессе размягчения не восстановленных агломератов наблюдаются два этапа. На первом этапе начало усадки происходит при температурах 1135–1150 °С и составляет 1–3% до температур 1160–1180 °С. На втором этапе при дальнейшем нагреве скорость усадки быстро нарастает и достигает 40% при температуре 1210–1235 °С (конец размягчения), что соответствует интервалу размягчения $\approx 80^\circ\text{C}$.

Начало интенсивного увеличения усадки (температура перегиба на кривой «усадка – температура») соответствует значениям $T_{нп}$, полученным на высокотемпературном микроскопе. Это свидетельствует о том, что на первом этапе в агломерате происходит размягчение стекланной связки и уплотнение (пластическая деформация) кристаллической фазы, а на втором – появление начальных порций расплава.

При размягчении окатышей, содержащих 80 – 85% Fe_2O_3 и незначительное количество стекла, пластическая деформация не наблюдается. Усадка начинается при $T_{нп}$, то есть обусловлена появлением первых жидких фаз на поверхности материала, и достигалась 40% через $\approx 170^\circ\text{C}$. Аналогичный характер размягчения отмечен для железной руды при увеличенном интервале достижения 40% усадки $\approx 220^\circ\text{C}$. Часть результатов исследований приведено в табл.1. Температуры начала размягчения и начала плавления, определенные различными методами, близки по величине.

Таблица 1. Химический состав и температуры размягчения – плавления железорудных материалов по данным [8].

Материал	Содержание компонентов, мас. %								$T_{нр}$, °С	$T_{нп}$, °С	$T_{кр}$, °С	T_p , °С
	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO				
Агломерат ЮГОК	54,5	65,28	11,36	9,54	11,62	0,89	1,18	0,91	1135	1161	1210	1457
Агломерат НКГОК	50,9	60,3	11,24	8,81	11,96	1,14	1,67	2,65	1140	1164	1225	1450
Агломерат КМЗ	52,0	64,24	9,04	9,2	13,24	1,23	1,18	1,26	1150	1180	1235	1457
Окатыши ПГОК	61,6	85,2	2,25	9,0	1,5	1,0	0,9	0,08	1102	1102	1290	1513
Окатыши СевГОК	58,2	80,0	2,87	10,04	5,86	0,7	0,57	0,09	1113	1113	1295	1505
Окатыши ЦГОК	60,0	83,66	1,95	6,7	5,26	1,25	0,83	0,05	1146	1146	1305	1501
Окатыши ЦГОК	59,1	77,29	6,47	7,26	7,28	1,0	0,24	0,06	1146	1146	1305	1466
Криворожская железная руда	42,0	58,69	0,71	36,61	1,52	0,3	1,08	0,06	1078	1078	1300	1541

Температура конца размягчения, определенная методом усадки, оказывается существенно выше температуры начала плавления, определенной на высокотемпературном микроскопе, особенно для окатышей и руд.

Для оценки интервала размягчения – плавления целесообразно использовать величины $T_{нр}$, $T_{кр}$ и T_p , наиболее активно и полно характеризующие изменения в железорудных материалах при переходе из твердого в жидкое состояние в доменной печи. Как показано в работах [8–10], эти температуры обусловлены химическим и минералогическим составами железорудных материалов, подвергающихся структурным превращениям при восстановительно–тепловой обработке в доменной печи. Результаты этих исследований явились основой установления закономерностей изменения содержания металлического железа и его оксидов в железорудных материалах в процессе их восстановления. При восстановлении агломерата, окатышей и руды до некоторой «критической» величины происходит резкое уменьшение содержания в них тугоплавкого гематита (Fe₂O₃) и увеличение до оптимального значения содержания легкоплавкого вюстита (FeO) при отсутствии или незначительном количестве металлического железа (Fe_{мет}). Дальнейшее восстановление железорудных материалов приводит к снижению Fe₂O₃ практически до полного его исчезновения, сокращению FeO и существенному увеличению содержания Fe_{мет}, образующего тугоплавкий каркас в объеме минеральной составляющей.

Эти превращения сопровождаются изменениями интервала размягчения – плавления агломератов, окатышей и руды при восстановлении и обуславливают протяженность зон плавления и первичного шлакообразования при использовании в шихте различных железорудных материалов. Показательными, являются результаты, полученные при исследовании температур размягчения агломерата, восстановленного до различной степени, в работах [6, 11, 12] (табл.2 и 3).

Таблица 2. Зависимость температур начала и конца размягчения агломерата «Запорожстали» ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,23$) от степени восстановления [6].

Степень восстановления R , %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$T_{нр}$, °С	1115	1090	1075	1055	1040	1040	1035	1040	1050	1075
$T_{кр}$, °С	1230	1185	1170	1160	1165	1170	1180	1210	1240	1300
ΔT_p , °С	115	95	95	105	125	130	145	170	190	225

Данные табл.2 описываются уравнениями полиномов 2-й степени с коэффициентами корреляции $r = 0,99$:

$$T_{нр} = 1118 - 2,9678R + 0,02708R^2 \quad (1)$$

$$T_{кр} = 1225 - 3,62197R + 0,04886R^2 \quad (2)$$

или:

$$T_{нр} = 1118(1 - 0,0026548R + 0,0000242R^2) \quad (3)$$

$$T_{кр} = 1225(1 - 0,0029573R + 0,0000398R^2) \quad (4)$$

Таблица 3. Зависимость температур начала и конца размягчения опытного агломерата от степени восстановления по данным [11, 12].

R, %	0	8,2	17,5	24,1	33,6	45,1
$T_{нр}$, °С	1112	1069	1073	1036	1044	1035
$T_{кр}$, °С	1202	1160	1158	1150	1152	1169
ΔT_p , °С	90	91	85	114	108	134
R, %	45,1	53,0	63,8	76,1	83,8	95,6
$T_{нр}$, °С	1035	1032	1019	1048	1025	1063
$T_{кр}$, °С	1169	1170	1184	1200	1231	1307
ΔT_p , °С	134	138	165	152	206	244

Соответственно данные табл.3 описываются уравнениями:

$$T_{нр} = 1103 - 2,64946R + 0,02292R^2 \quad r = 0,91 \quad (5)$$

$$T_{кр} = 1193 - 2,54289R + 0,03754R^2 \quad r = 0,97 \quad (6)$$

или:

$$T_{nr} = 1103(1 - 0,002403R + 0,0000207R^2) \quad (7)$$

$$T_{кр} = 1193(1 - 0,002132R + 0,0000314R^2) \quad (8)$$

Свободный член в уравнениях (1, 5) и (2, 6) является соответственно величиной T_{nr} и $T_{кр}$ не восстановленного агломерата. После преобразования этих уравнений в виде (3, 7) и (4, 8) выражение в скобках описывает закономерность изменения изученных температур от степени восстановления агломератов.

Ранее было показано противоречивое трактование влияния различных компонентов химического состава железорудных материалов (Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , FeO) и их соотношений (CaO/SiO_2) на температуры размягчения и плавления различными исследователями и предложена методика прогнозирования этих свойств при помощи интегральных критериев для «свертки» химического состава с учетом межатомного взаимодействия компонентов шлаковой связки: химического эквивалента Δe и стехиометрии ρ [5, 13]. Обработка исходных данных о температурах размягчения и плавления различных не восстановленных агломератов, окатышей и железной руды (табл. 1) позволила получить модели для прогнозирования этих свойств.

$$T_{nr}^o = 940,4 + 0,0802Fe_2O_3 - 2,5026FeO + 10,747\Delta e + 329,6238\rho \quad (9)$$

$$T_{кр}^o = 1370,9 + 0,29439Fe_2O_3 - 9,4722FeO + 16,5116\Delta e - 25,3877\rho \quad (10)$$

$$T_p^o = 1653,7 - 0,284Fe_2O_3 - 4,6211FeO - 1,0833\Delta e - 186,6902\rho \quad (11),$$

где: T_{nr}^o – температура начала размягчения; $T_{кр}^o$ – температура конца размягчения; T_p^o – температура расплавления (растекания).

Параметры Δe и ρ в формулах рассчитывают для шлакообразующей части материалов без Fe_2O_3 и FeO .

Формулы (9–11) предназначены для расчета температур T_i^o как отдельно для агломерата, окатышей и руды, так и для шихты в целом с любым соотношением этих компонентов и даже с добавкой других шихтовых компонентов, например, наиболее используемого в доменной плавке в качестве флюса конвертерного шлака. В последнем случае принимаем для конвертерного шлака по данным [8]:

$$T_{nr}^o = 1185^o C; \quad T_{кр}^o = 1275^o C; \quad T_p^o = 1380^o C.$$

Поскольку закономерности изменения температур размягчения и плавления от степени восстановления для агломератов, окатышей и руды существенно отличаются [8–10], уравнения для их описания получены для каждого компонента шихты (рис.1–3), уравнения (12–20).

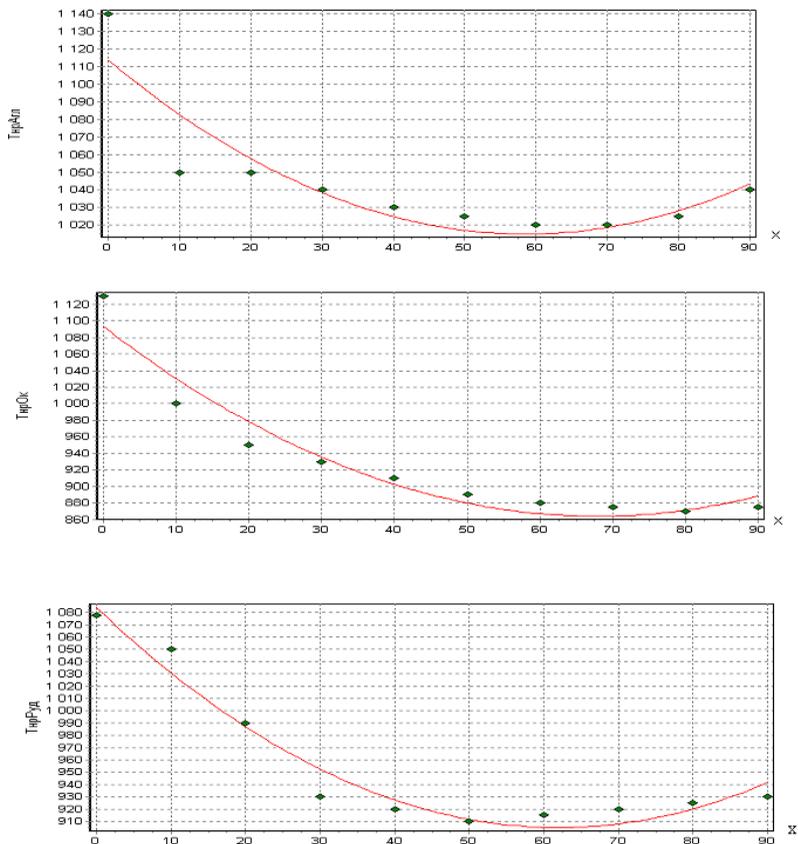


Рис.1. Зависимость температуры начала размягчения агломератов, окатышей и руды от степени восстановления. — — расчетные значения; ◆ — экспериментальные значения.

Температура начала размягчения:

для агломератов и конвертерного шлака

$$T_{nr}^R = T_{nr}^o \cdot (1 - 3,02832 \cdot 10^{-3} \cdot R + 2,58482 \cdot 10^{-5} \cdot R^2) \quad (12)$$

для окатышей

$$T_{nr}^R = T_{nr}^o \cdot (1 - 6,1806 \cdot 10^{-3} \cdot R + 4,55705 \cdot 10^{-5} \cdot R^2) \quad (13)$$

для руды

$$T_{nr}^R = T_{nr}^o \cdot (1 - 5,33764 \cdot 10^{-3} \cdot R + 4,30821 \cdot 10^{-5} \cdot R^2) \quad (14)$$

Температура конца размягчения

для агломератов и конвертерного шлака

$$T_{кр}^R = T_{кр}^o \cdot (1 - 3,50999 \cdot 10^{-3} \cdot R + 1,32473 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 1,7537 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 + 7,79653 \cdot 10^{-9} \cdot R^4); \quad (15)$$

для окатышей

$$T_{кр}^R = T_{кр}^o \cdot (1 - 6,23179 \cdot 10^{-3} \cdot R + 2,17476 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 2,58209 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 + 1,03136 \cdot 10^{-8} \cdot R^4); \quad (16)$$

для руды

$$T_{кр}^R = T_{кр}^o \cdot (1 - 12,5796 \cdot 10^{-3} \cdot R + 4,47984 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 5,508 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 + 2,32158 \cdot 10^{-8} \cdot R^4) \quad (17)$$

Температура расплавления

для агломератов и конвертерного шлака

$$T_p^R = T_p^o \cdot (1 - 14,9552 \cdot 10^{-3} \cdot R + 5,82338 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 7,60772 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 + 3,3172 \cdot 10^{-8} \cdot R^4); \quad (18)$$

для окатышей

$$T_p^R = T_p^o \cdot (1 - 6,76358 \cdot 10^{-3} \cdot R + 1,77133 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 1,10731 \cdot 10^{-6} \cdot R^3) \quad (19)$$

для руды

$$T_p^R = T_p^o \cdot (1 - 20,8597 \cdot 10^{-3} \cdot R + 5,05642 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 3,02042 \cdot 10^{-6} \cdot R^3) \quad (20)$$

где: R – степень восстановления.

После расчета $T_{кр}$, $T_{кр}$, T_p для каждого компонента шихты (агломерата, окатышей, руды) в отдельности как в исходном состоянии ($R=0$), так и при любой величине степени восстановления, рассчитывают средневзвешенные величины $T_{кр}$, $T_{кр}$, T_p шихты в целом по долям компонентов.

Аналогично разработаны приемы прогнозирования влияния щелочей на температуры размягчения и плавления железорудных материалов.

Разжижающее влияние оксидов щелочных металлов Na_2O и K_2O на компоненты доменной шихты (агломераты, окатыши, руду) очевидно. Так, по данным [14] минимальная температура размягчения соединений в системах $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{FeO}$ и $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ находится в пределах 1100–1250 °С. По данным [15] наиболее легкоплавкие шлаки в системе $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{FeO}$ имеют температуру плавления 1030–1000 °С. Для тех же систем, содержащих оксиды щелочных металлов, ряд соединений имеет следующую температуру плавления [14, 15]: $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 - 1089^\circ\text{C}$; $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 -$

967⁰C; Na₂O·2SiO₂ – 874⁰C; K₂O·2SiO₂ – 1045⁰C; Na₂O·Fe₂O₃·4SiO₂ – 955⁰C; K₂O·Fe₂O₃·4SiO₂ – 770⁰C; Na₂O·FeO·SiO₂ – 780⁰C; K₂O·3CaO·6SiO₂ – 1023⁰C; K₂O·2CaO·6SiO₂ – 1020⁰C; K₂O·FeO·3SiO₂ – 900⁰C; K₂O·FeO·5SiO₂ – 875⁰C.

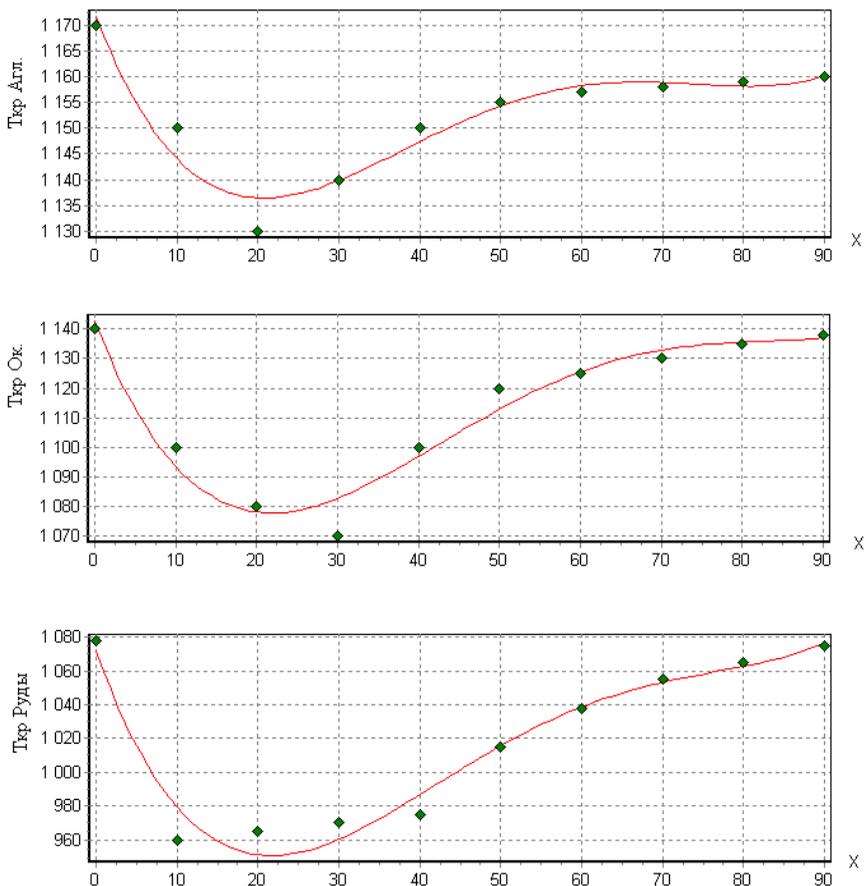


Рис.2. Зависимость температуры конца размягчения агломератов, окатышей и руды от степени восстановления. — — расчетные значения; ◆ — экспериментальные значения.

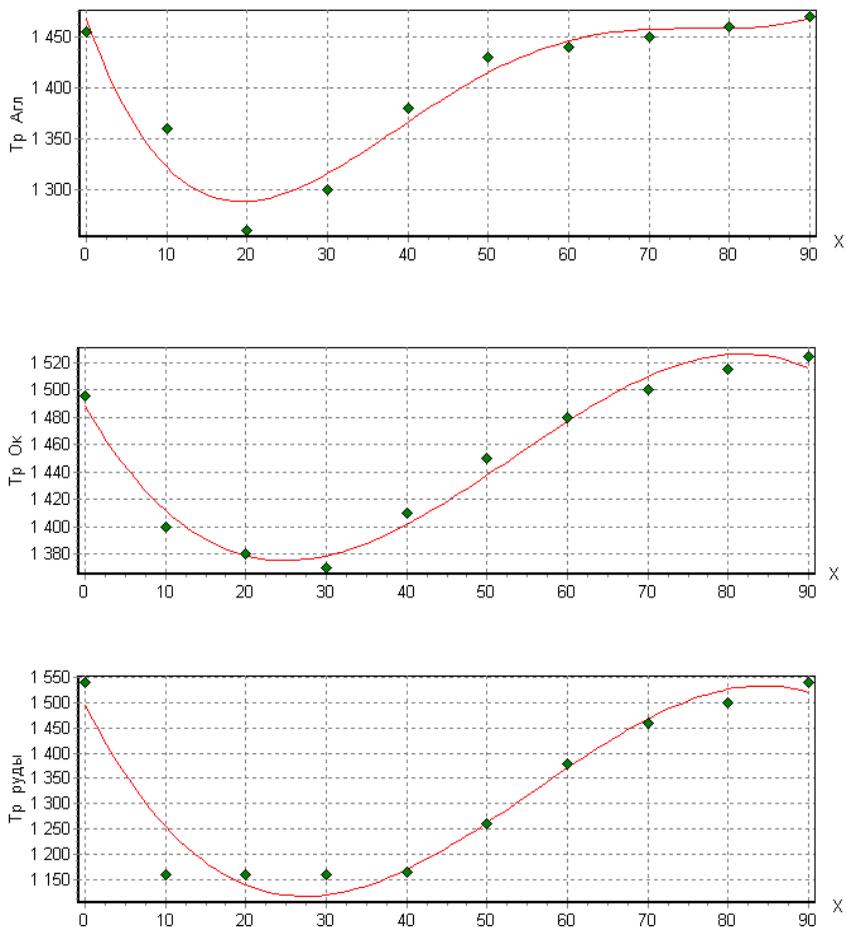


Рис.3. Зависимость температуры расплавления (растекания) агломератов, окатышей и руды от степени восстановления. — — расчетные значения; \blacklozenge — экспериментальные значения.

Показано, что содержание оксидов щелочных металлов в шихтовых материалах составляет:

Оксиды	K_2O	Na_2O	K_2O+Na_2O
Агломерат офлюсованный	0,25	0,33	0,58
Окатыши	0,15	0,45	0,60

Руда железная	0,32	0,58	0,90
Руда марганцевая	1,40	1,09	2,49
Известняк обычный	0,08	0,10	0,18
Известняк доломитизированный	0,10	0,15	0,25
Зола кокса	н.д	н.д	2,89

При этом установлено, что (рис.4) в первых шлаковых расплавах периферийной зоны (7-й горизонт) содержится 1,32% Na_2O и 2,9% K_2O , промежуточной (13-й горизонт) – 1,25% Na_2O и 1,68% K_2O , а в центральной зоне (19-й горизонт) 0,79% Na_2O и 0,29% K_2O .

По мере продвижения шлаковых расплавов вниз содержание в них Na_2O и K_2O быстро растет и достигает максимума: на 9-м горизонте периферийной зоны – 3,45% Na_2O и 4,98% K_2O , на 15-ом горизонте промежуточной зоны – 1,99% Na_2O и 3,9% K_2O и на 23-ем горизонте центральной зоны – 1,08% Na_2O и 1,59% K_2O . В дальнейшем содержание щелочных оксидов во всех зонах до оси воздушных фурм постепенно убывает, а ниже практически не меняется. Содержание Na_2O в шлаках горна колеблется в пределах 0,25–0,57%, а K_2O – 0,07–0,22%.

В свете изложенного актуальной является прогнозная оценка влияния щелочей на температуры размягчения и плавления компонентов доменной шихты. Ранее нами была выполнена оценка роли щелочей в формировании свойств доменных шлаков [16] и показано, что по разным экспериментальным данным при введении каждого процента Na_2O до 9% температура плавления доменных шлаков снижается от 0,7 до 1,5%. В первом приближении эту величину можно принять и для оценки влияния щелочей на температуру плавления железорудных материалов при отсутствии других данных.

Авторы работы [14] оценили значения температур начала и конца размягчения агломератов, содержащих 0,3; 0,4 и 0,5% Na_2O , в которые вводили от 0,15 до 0,545% NaCl (табл.4).

Таблица 4. Состав и свойства агломератов по данным [14].

№ п/п	Содержание компонентов, мас. %										$T_{нр}$, °C	$T_{кр}$, °C
	Fe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Na_2O	NaCl	$\text{Na}_2\text{O} + \text{NaCl}$	СГ		
1	55,36	21,37	9,25	11,04	0,46	2,75	0,3	0,182	0,482	0,11	984	1187
2	54,17	17,15	10,16	9,92	0,46	2,75	0,4	0,297	0,697	0,18	1018	1160
3	53,28	15,72	10,32	8,96	0,46	2,75	0,5	0,28	0,78	0,17	1003	1179
4	52,58	13,82	11,55	10,4	0,46	2,75	0,3	0,15	0,45	0,09	1015	1192
5	н.д	13,75	9,2	9,12	0,46	2,75	0,4	0,198	0,598	0,12	989	1169
6	н.д	11,5	н.д	н.д	0,46	2,75	0,5	0,314	0,814	0,19	979	1184
7	н.д	12,5	9,4	9,28	0,46	2,75	0,3	0,198	0,498	0,12	981	1194
8	н.д	11,25	н.д	н.д	н.д	2,73	0,4	0,314	0,714	0,19	999	1169
9	н.д	11,75	н.д	н.д	н.д	2,73	0,5	0,545	1,045	0,33	942	1163

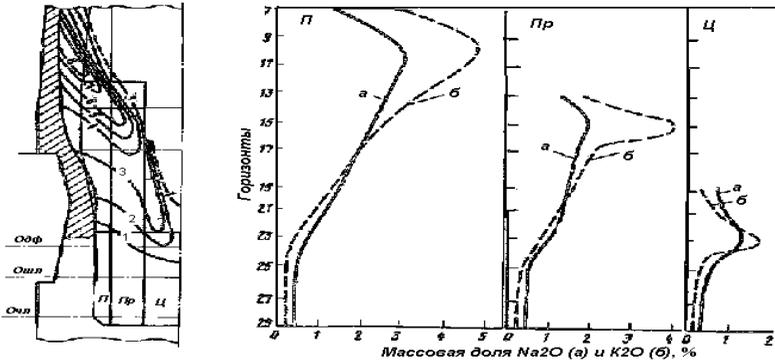


Рис. 4. Распределение окислов щелочных металлов по высоте периферийной (П), промежуточной (Пр) и центральной (Ц) зон и сечению печи по данным [15]. Цифры у кривых – содержание $\Sigma(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$, %

Как видно из приведенных данных, суммарное содержание $\text{Na}_2\text{O}+\text{NaCl}$ изменялось в пределах от 0,45% до 1,045%. При таком его увеличении температура начала размягчения снизилась на 73°C , а температура конца размягчения – на 29°C . Отсюда:

$$\text{Градиент } \Delta T_{\text{пр}} = \frac{(945-1015) \cdot 100}{1015 \cdot (1,045-0,45)} = -12,09 \text{ \%/\%} (\text{Na}_2\text{O} + \text{NaCl})$$

$$\text{Градиент } \Delta T_{\text{кр}} = \frac{(1163-1192) \cdot 100}{1192 \cdot (1,045-0,45)} = -4,09 \text{ \%/\%} (\text{Na}_2\text{O} + \text{NaCl})$$

Полученные величины градиентов свидетельствуют о более существенном разжижающем влиянии малых добавок $\text{Na}_2\text{O}+\text{NaCl}$ на агломерат по сравнению с влиянием Na_2O на доменный шлак по данным [16]. Это можно объяснить дополнительным воздействием ионов Cl^- , которые аналогично фтору выполняют роль плавня, замещая кислород в структуре оксидов.

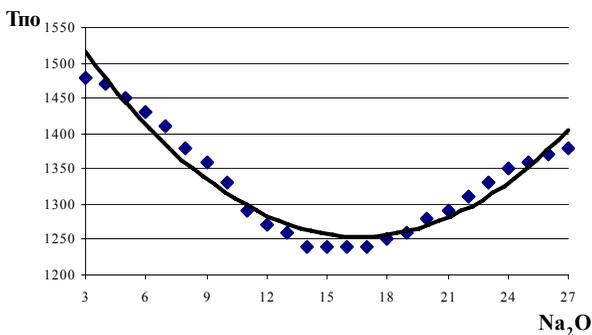
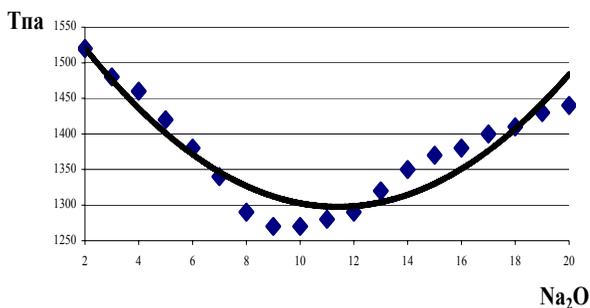
В работе [15] приведены наиболее заслуживающие внимания зависимости изменения температур плавления пустой породы железорудных материалов (агломерата, окатышей, железной руды) под воздействием Na_2O и K_2O в широком диапазоне изменения их концентраций. Показано, что влияние Na_2O на температуру плавления (T_n) пустой породы агломерата, окатышей и железной руды имеет экстремальный характер с минимумом $T_{na}=1270^\circ\text{C}$ для агломерата при 9–10% Na_2O , $T_{no}=1240^\circ\text{C}$ для окатышей – при 14–15% Na_2O и $T_{np}=770^\circ\text{C}$ для железной руды – при 23–25% Na_2O . Очевидно, что наибольшим изменениям под воздействием Na_2O подвержена кислая пустая порода железной руды, которая образует

первые шлаковые расплавы в доменной печи при температуре 800°C и ниже при содержании 23–25% Na_2O . Наиболее высокую температуру плавления при основности $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,2\text{--}1,4$ имеет пустая порода агломерата даже при условии содержания 9–10% Na_2O . Окатыши в этом смысле занимают промежуточное положение.

Влияние K_2O на температуру плавления агломерата и окатышей еще более существенно, чем Na_2O . Однако, минимум $T_{na} = 920^{\circ}\text{C}$ достигается при более высокой температуре концентрации $\text{K}_2\text{O} = 14\text{--}15\%$, а минимум $T_{no} = 800^{\circ}\text{C}$ – при $\text{K}_2\text{O} = 20\text{--}21\%$. На температуру плавления руды по данным [15] концентрация K_2O практически не влияет.

Математическая обработка данных, приведенных в [15], позволила получить уравнения зависимости температур плавления пустой породы агломерата (T_{na}), окатышей (T_{no}) и железной руды (T_{np}) от содержания в них Na_2O (21–23) и K_2O (24–25).

На рис.5 и 6 показаны графики изменения расчетных величин по уравнениям (21–25) в сравнении с экспериментальными данными.



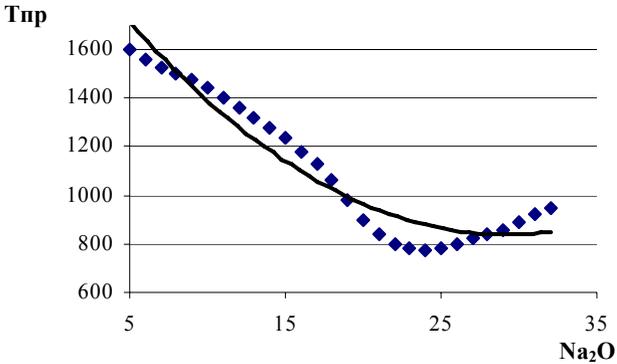


Рис.5. Зависимость температур плавления пустой породы агломератов (T_{na}), окатышей (T_{no}) и железной руды (T_{np}) от содержания Na_2O — — расчетные значения; \blacklozenge — экспериментальные значения.

Температура плавления агломератов.

$$T_{na(Na_2O)} = T_{na(o)} \cdot \left[1 - 0,035371 \cdot (Na_2O) + 0,0015503 \cdot (Na_2O)^2 \right] \quad (21)$$

Температура плавления окатышей.

$$T_{no(Na_2O)} = T_{no(o)} \cdot \left[1 - 0,028384 \cdot (Na_2O) + 0,0008533 \cdot (Na_2O)^2 \right] \quad (22)$$

Температура плавления руды.

$$T_{np(Na_2O)} = T_{np(o)} \cdot \left[1 - 0,041505 \cdot (Na_2O) + 0,0007131 \cdot (Na_2O)^2 \right] \quad (23)$$

Здесь $T_{na(o)}$; $T_{no(o)}$; $T_{np(o)}$ — температуры плавления соответственно агломерата, окатышей, руды без дополнительного введения Na_2O , то есть с тем содержанием Na_2O , которое присуще исходным материалам; (Na_2O) — содержание Na_2O в процентах в материале в любой зоне доменной печи в результате процессов возгонки и конденсации. Выражение в скобках описывает закономерность изменения температур плавления железорудных материалов от степени насыщения оксидом натрия.

Температура плавления агломератов.

$$T_{na(K_2O)} = T_{na(o)} \cdot \left[1 - 0,043425 \cdot (K_2O) + 0,000976 \cdot (K_2O)^2 \right] \quad (24)$$

Температура плавления окатышей.

$$T_{no(K_2O)} = T_{no(o)} \cdot \left[1 - 0,037931 \cdot (K_2O) + 0,0006252 \cdot (K_2O)^2 \right] \quad (25)$$

Как и в случае Na_2O , выражение в скобках в уравнениях (24) – (25) описывает закономерность изменения температур плавления агломератов и окатышей от степени насыщения их оксидом калия.

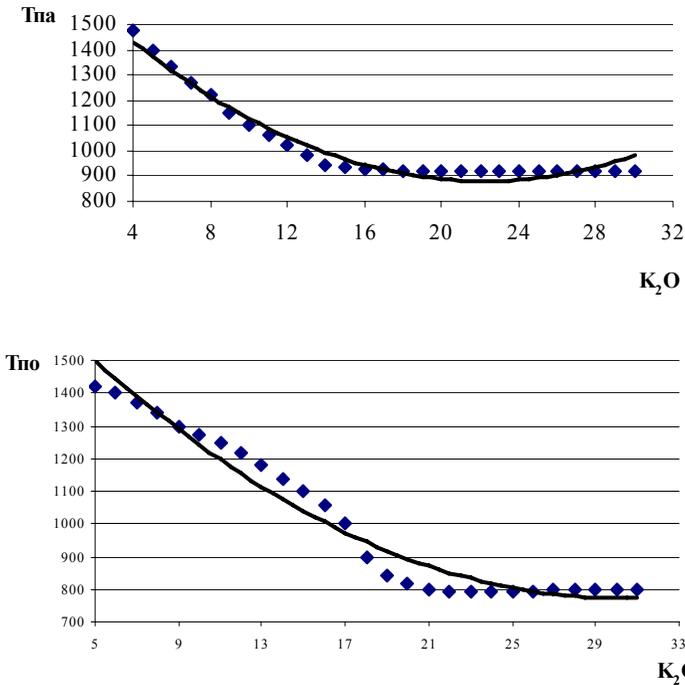


Рис.6. Зависимость температур плавления пустой породы агломератов (T_{na}) и окатышей (T_{no}) от содержания K_2O . — — расчетные значения; ◆ — экспериментальные значения.

Логично предположить, что аналогичным образом описываются закономерности влияния щелочей на температуры начала и конца размягчения железорудных материалов.

Установленные вышеприведенные закономерности изменения промежуточного состояния при переходе железорудных материалов из твердого в жидкое с учетом влияния щелочных компонентов и полезных отходов производства базируются на комплексе выполненных теоретических и экспериментальных исследований широкого диапазона свойств рудного сырья, определяющего развитие восстановительно-тепловых процессов в доменной печи, формирование рационального качества исходных и промежуточных расплавов, продуктов плавки, обуславливающих ее экономичность. Достоверность результатов выполненных вышеприведенных разработок основывается на комплексе глубоких исследований широкой гаммы составов разнообразных железорудных материалов на экспериментальных установках ИЧМ, следствием которых являлось создание физико-химических и технологических моде-

лей, наиболее полно характеризующих качество и поведение железорудных материалов в доменной плавке [5–6,17,18]. Настоящие разработки являются составной частью кардинальных разработок по прогнозированию и управлению высокотемпературными превращениями железорудных материалов в текущих и перспективных условиях плавки. Считаем необходимым подчеркнуть, что в таком комплексном подходе характер агрегатных превращений рудных компонентов шихты наряду с вышеописанными исчерпывающе характеризуются следующими показателями:

- температурой потери газопроницаемости нагреваемого, в режиме увеличения температуры в печи, предварительно восстановленного слоя железорудного материала (T_{45}). Разница $\Delta = T_{45} - T_{ин}$ температур T_{45} и начала расплавления материала ($T_{ин}$) отвечает протяженности (температурной и временной) нахождения материала с локальными очагами расплавления, переходящего в предразмягченное и тестообразное состояние;

- температурой начала образования и фильтрации жидких фаз через коксовую насадку ($T_{нф}$). При этом, величина $\Delta = T_{нф} - T_{45}$ характеризует состояние материала от его полной потери и газопроницаемости при T_{45} до начала активного увеличения порозности вследствие последовательного отделения от слоя фрагментов расплава, отвечающих росту температуры;

- температурой капельного течения расплава ($T_{кт}$). В пределах температур $T_{кт} - T_{нф}$ наблюдается разделение (сепарация) расплава на металл и оксидную фазу, которая также разделяется на более легкоплавкую и текучую, дренирующую через коксовую насадку при температуре близкой к предельной;

- предельной температурой ($T_{пр}$) эксперимента при которой на коксовой насадке остается вязкая масса не дренирующая (не проходящая через коксовую насадку) и с ней (в ее составе) поступающую в металлоприемник.

Заключение. Выявленные в рамках настоящей работы зависимости и их аналитические выражения предлагается использовать для освещения весьма важных процессов, лимитирующих развитие газодинамики и теплообмена вследствие неуправляемого изменения порозности коксовой насадки при переходе железорудных материалов в тестообразное состояние, а также совершенствования технологического режима доменной плавки в текущих условиях нестабильности поставок сырья при высокой колеблемости его состава, оптимизации режимов плавки при изменяющихся видах комбинированного дутья и пр.

Рассмотренные показатели с достаточной для практического использования точностью определяются расчетным путем по разработанным физико-химическим моделям и являются надежным средством рационального подбора состава и свойств железорудных материалов, определения особенностей их превращений в ходе доменного процесса, прогнозирования и реализации рациональной структуры столба материалов печи, установления взаимосочетающихся показателей свойств сырья и параметров плавки, обеспечивающих оптимальные направления ее развития.

1. *Методы* экспериментального исследования доменного процесса. / С.В.Базилевич, Б.А.Лазарев и др. //ГНТИ Ч и Ц Мет. –Свердловск. –1960. – 256 с.
2. *Barnaba P.* Influence of chemical characteristics on Softening and meltingdown properties of iron Sinter // Ironmaning and Steelmaking. –1986. –V.13. –№14. – P.169–175.
3. *Гладков Н.А., Нестеров А.С.* Процессы в слое железорудных материалов //Иzv. АН СССР. Металлы. –1987. –№3. –С.9–11.
4. *Гладков Н.А., Тогобицкая Д.Н.* Физико–химическое состояние железорудных материалов в различных зонах доменной печи и их высокотемпературные свойства // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. научн. тр. ИЧМ. –Вып. 3. –1999. –С.40–48.
5. *Приходько Э.В., Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н.* База данных и модели для прогнозирования плавкости железорудных материалов. // Сталь. – 1998. – №9. – С.7–9.
6. *Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии.* / В.М.Бабошин, Е.А.Кричевцов, В.М.Абзалов и др. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.
7. *Каплун Л.И.* Температура и энтальпия плавления шихтовых железорудных материалов. // Металлы. –1989. –№4. –С.5–10.
8. Об эффективности использования в доменной плавке различных железорудных материалов / Г.А.Воловик, Н.А.Гладков, В.Х.Кацман и др. // Сталь. – 1982. –№11. –С.7–10.
9. *Кацман В.Х., Емельянов В.А.* Улучшение металлургических свойств железорудных материалов доменной плавки // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1974. – №1. – С.2–4.
10. *Кацман В.Х., Емельянов В.А.* Изменение температур плавления железорудных материалов при восстановлении // Металлургия и коксохимия. – Вып. 75. – Киев: Техніка, 1982. –С.81–84.
11. Определение температуры размягчения восстановленного агломерата. / Ю.М.Потебня, С.А.Гаврилко, Р.Г.Рихтер и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1971. – №12. – С.27–29.
12. *Вегман Е.Ф.* Краткий справочник доменщика. – М.: Металлургия, 1981. –240 с.
13. *Роль химического состава железорудных материалов в формировании их металлургических свойств* / Э.В.Приходько, А.Ф.Хамхотько, Д.Н.Тогобицкая и др. // Ин–т «Черметинформация». (Обзорн. информ. Сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна. –Вып. 5. –М. –1987. – С.1–25).
14. *Горбенко Ю.Е., Ковалев Д.Н., Резняков А.А.* Температура размягчения агломератов с повышенным содержанием хлоридов натрия. // Сталь. –1983. –№11. – С.11–13.
15. *Фазовые превращения материалов при доменной плавке.* / И.Д.Балон, И.З.Буклан, В.Н.Муравьев и др. – М.: Металлургия, 1984. –152 с.
16. *Роль щелочей в формировании свойств доменных шлаков* / А.Ф.Хамхотько, Д.Н.Тогобицкая, П.И.Оторвин и др. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. научн. тр. ИЧМ. –Вып. 13. – 2006. –С.225–230.

17. *Цылев Л.М.* Восстановление и шлакообразование в доменном процессе. –М.: Наука, 1970. –158 с.
18. *Носовицкий Б.М., Новичкова Н.И.* Пути улучшения спекаемости аглошихт и качества агломерата южных аглофабрик. // *Металлургия и коксохимия.* – Вып.13. – Техніка. – 1968. – С.21–30.

*Статья рекомендована к печати:
Ответственный редактор
раздела «Доменное производство»:
академик НАН Украины В.И.Большаков
докт.техн.наук, проф. Э.В.Приходько*

Д.М.Тогобицька, О.Ф.Хамхотько, М.А.Гладков, Н.Є.Ходотова

Розробка моделей для прогнозування агрегатних перетворень залізорудних матеріалів у доменній печі

Метою дослідження є розробка комплексного підходу для всебічної оцінки якості підготовленої залізорудної сировини та аналіз запропонованого варіанту прогнозних моделей температур розм'якшення і плавлення агломератів, обкотишів і руди. З використанням даних, одержаних за стандартною методикою, виконано аналітичне узагальнення інформації щодо фазових перетворень залізорудних матеріалів в початковому стані та у відновлювальних умовах доменної плавки. Запропоновані фізико-хімічні моделі можуть бути використані для прогнозування температур розм'якшення і плавлення шихтових матеріалів.