

E. Mousa, D. Senk, A. Babich // Steel Research International. – 2010. – V. 81. – № 9. – P. 706-715. (Ingl.)

11. Reduction of sinter and pellets with nut coke mixture / E. Mousa [et al] // Bulletin “Black Metallurgy”. – 2010. – V. 10. – P. 34-45. (Rus.)

Рецензент: В.П. Тарасов  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.11.2012

УДК 669.162.263.23.004.67

©Русских В.П.<sup>1</sup>, Липунов С.А.<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АГЛОМЕРАТА НА ЕГО ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИНТЕРВАЛ РАЗМЯГЧЕНИЯ

*В статье рассмотрены теоретические основы размягчения агломерата. Проведены исследования зависимости температурного интервала размягчения агломерата от степени его восстановления. Результаты работы отражают реальный процесс размягчения, который протекает в доменных печах.*

**Ключевые слова:** когезия, доменная печь, плавление, размягчение, порозность температура.

*Руських В.П., Липунов С.О. Дослідження впливу ступеня відновлення агломерату на його температурний інтервал розм'якшення. У статті розглянуто теоретичні основи розм'якшення агломерату. Проведені дослідження залежності температурного інтервалу розм'якшення агломерату від його ступеня відновлення. Результати роботи відображають реальний процес розм'якшення, який протікає в доменних печах.*

**Ключові слова:** когезія, доменна піч, плавлення, розм'якшення, порозність, температура.

*V.P. Russkih, S.O. Lipunov. Investigations of the influence of reduction of the sintered ore on the softening temperature range. The article describes the theoretical basis of the softening of the sintered ore. This investigations show that softening of the sintered ore depending on the degree of sintered ore recovery. The results show the real process of softening, which occurs in a blast furnace.*

**Keywords:** cohesion, blast furnace, melting, softening, porosity, temperature.

**Постановка проблемы.** Зона когезии – область в доменной печи, в которой материалы из твердого состояния начинают переходить в пластичное. Зона когезии определяет многие показатели доменной плавки, такие как характер опускания шихты, производительность доменной печи, удельный расход кокса и другие, однако как именно эта зона влияет на выше перечисленные показатели мало изучено [1, 2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Научно-практические исследования зоны когезии отображены во многих научных работах отечественных и зарубежных ученых. Особое место в изучении зоны когезии занимают Тарасов В.П., Маханек Н.Г., Никитин Г.М., Овчиников Ю.Н., Бабарыкин Н.Н., Яковлев Ю.В., Большаков В.И., Гладков Н.А., Белошапка Е.А., Онорин О.П., Dong X.F., Yu A.B., Burgess J.M., Pinson D., Chew S., Zulli P., Zhang S.J., Kiichi Narita, Masakata Shimizu, Kenichi Okimoto.

По мнению ученых, изучение зоны когезии включает следующие аспекты:

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

1. Влияние на производительность;
2. Влияние на удельный расход кокса;
3. Влияние зоны когезии на КПД доменных печей;
4. Влияние на газопроницаемость столба шихтовых материалов;
5. Возможность приближения конфигурации зоны когезии к оптимальной в соответствии с условиями работы доменных печей;
6. Выявление методов регулирования зоной когезии и отслеживания ее в доменной печи.

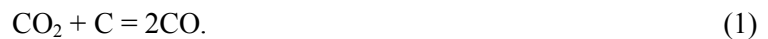
**Цель статьи** – определение влияния степени восстановления агломерата на его температурный интервал размягчения.

**Изложение основного материала.** Конфигурация зоны когезии зависит не только от распределения температур по сечению печи, но и от степени восстановления шихты и образования новых минералогических фаз.

Для проведения исследования на установке, которая представляет собой трубчатую печь, восстанавливали агломерат, произведенный на аглофабрике ММК им. Ильича. Химический состав агломерата: %Fe 51,55; %FeO 9,55; %SiO<sub>2</sub> 10,1; %CaO 13,65; %MgO 1,37; %Mn 0,16; %MnO 0,2; %Zn 0,035; %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,97; Осн 1,35.

Минералогический состав агломератов при различной основности описан в работе [1].

Восстановление проводили при температуре 800<sup>0</sup>С, газом восстановителем СО с расходом 4 л/мин. Для получения СО, газ СО<sub>2</sub> из баллона пропускали через трубчатую печь, рабочее пространство которой было заполнено углем. Температура в печи поддерживалась на уровне 1100<sup>0</sup>С. В результате взаимодействия СО<sub>2</sub> и С по реакции (1) образуется СО [2, 3, 4]



Для размягчения брали агломерат с различной степенью восстановления. Получали его посредством воздействия СО при температуре 800<sup>0</sup>С, на агломерат. В качестве базовой пробы брали агломерат, который не подвергался восстановлению. Размягчение проводилось в нагревательной печи (рис. 1). Схема установки для определения температур размягчения представлена на рис. 1.

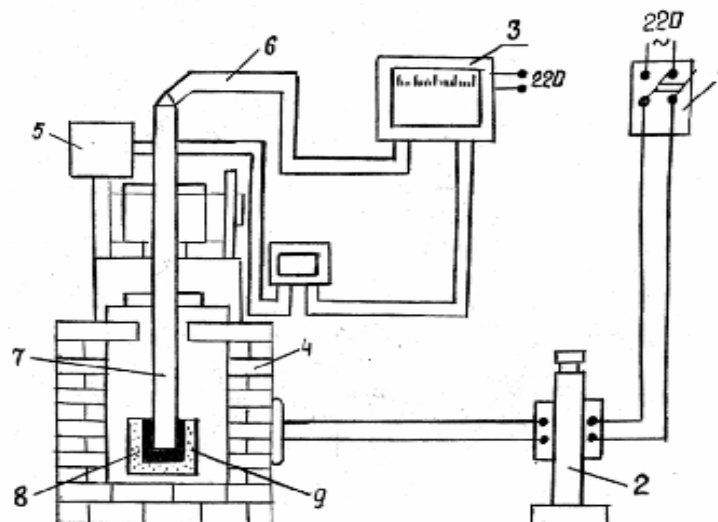


Рис. 1 – Схема установки для изучения процесса размягчения железосодержащих материалов: 1 – рубильник; 2 – автотрансформатор; 3 – регистрирующий электронный потенциометр; 4 – печь; 5 – датчик положения штока; 6 – электролиния от термопары к потенциометру; 7 – шток; 8 – стаканчик; 9 – материал

После восстановления агломерата в печи его взвешивали и определяли потерю массы. По потере массы определяли степень восстановления. Было предположено, что восстановление

происходит ступенчато от высших оксидов к низшим. В результате проведения опытов были получены образцы агломерата со степенью восстановления: 0%; 16,65%; 30,75%; 45,93%; 63%. Также кроме степени восстановления был рассчитан химический состав каждой пробы. Полученные данные показаны в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов по восстановлению агломерата

№	%Fe	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%FeO	%SiO <sub>2</sub>	%CaO	%MgO	%Mn	%MnO	%Zn	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%B
1	51,55	63	9,55	10,1	13,65	1,37	0,16	0,2	0,035	0,97	0
2	53,42	29	42,5	10,46	14,14	1,42	0,17	0,21	0,036	1	16,65
3	55,16	-	70,1	10,81	14,61	1,47	0,17	0,21	0,039	1,04	30,75
4	57,22	-	56,6	11,21	15,15	1,52	0,18	0,22	0,039	1,08	45,93
5	59,4	-	40,5	11,64	15,73	1,58	0,18	0,23	0,04	1,12	63

где B – степень восстановления, %

При проведении размягчения нагревали образцы агломерата с различной степенью восстановления в печи под нагрузкой по методике описанной в ГОСТе [5]. Во время постепенного нагрева отмечали величину усадки агломерата. В качестве проб для опытов брали агломерат со степенью восстановления 0%, 16,65%, 30,75%, 45,93%, 63% соответственно. Результаты размягчения агломерата показаны на рис. 2.

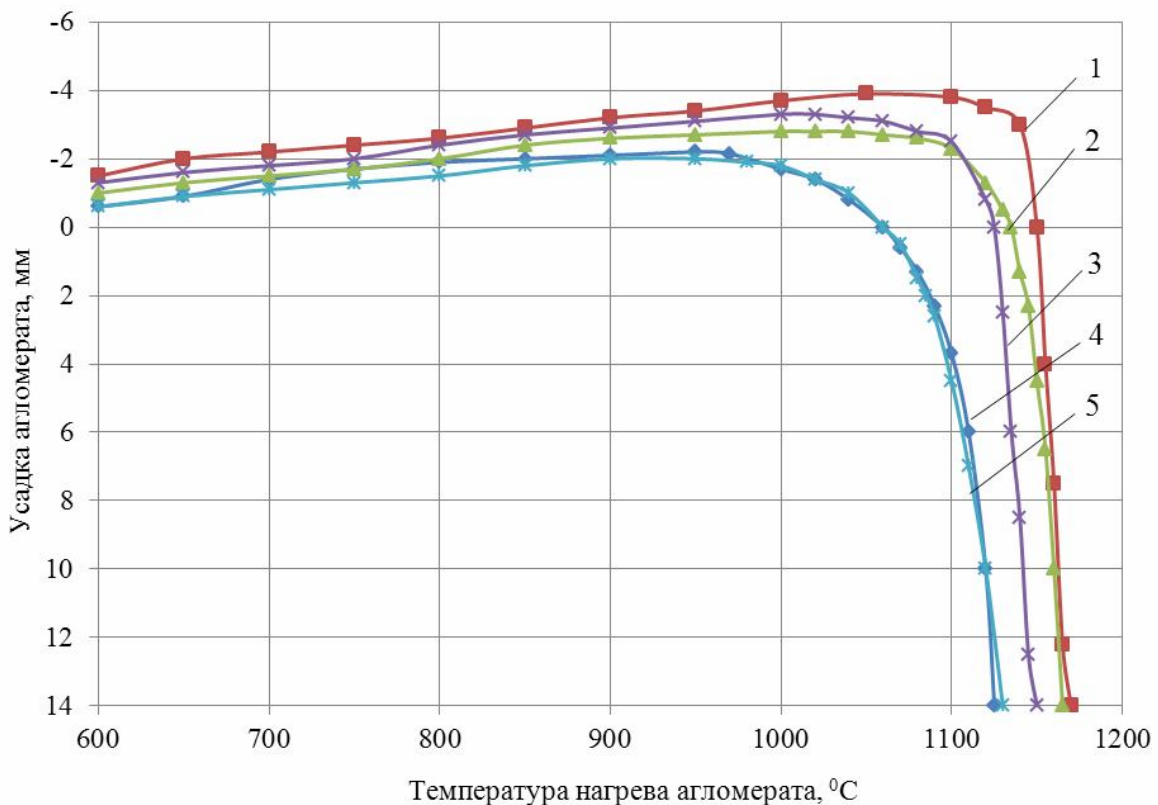


Рис. 2 – Ход размягчения агломерата в зависимости от температуры: 1 – агломерат с степенью восстановления 0%; 2 – агломерат с степенью восстановления 16,65%; 3 – агломерат с степенью восстановления 30,75%; 4 – агломерат с степенью восстановления 45,93%; 5 – агломерат с степенью восстановления 63%

На базе рис. 2 построена таблица 2 с расчетными данными, в которой показана зависимость интервала размягчения ( $\Delta t$ ), температуры начала размягчения ( $t_{нач}$ ), температуры конца размягчения ( $t_{кон}$ ) от степени восстановления (B).

Таблиця 2

Результаты экспериментов по размягчению агломерата

Степень восстановления, %	Интервал размягчения, °С	Температура начала размягчения, °С	Температура конца размягчения, °С
0	90	1080	1170
16,65	125	1040	1155
30,75	135	1020	1165
45,93	150	980	1130
63	160	970	1130

Из рис. 3 видно, что интервал размягчения увеличивается с ростом степени восстановления агломерата. Для кривой рисунка построена линия тренда и определено для нее уравнение:

$$\Delta t = 1,0634 \cdot B + 98,753. \quad (2)$$



Рис. 3 – График зависимости интервала размягчения агломерата от его степени восстановления

Увеличение интервала размягчения, безусловно, негативно сказывается на газодинамике низа печи. В результате увеличения интервала размягчения увеличивается зона пластичных масс по высоте печи с очень высокой вязкостью, что значительно снизит порозность слоя, а это в свою очередь снизит газопроницаемость. Как результат снижения газопроницаемости снизится максимально возможное количество дутья. Из этого следует, что восстановленный агломерат имеет показатели температурного интервала размягчения хуже, чем не восстановленный агломерат.

Из рис. 4 видно, что температура начала размягчения уменьшается с ростом степени восстановления агломерата. Для кривой рисунка построена линия тренда и определено для нее уравнение:

$$t_{нач} = -1,799 \cdot B + 1074,2. \quad (3)$$

Корреляция данных рассчитанных по уравнению (3) и экспериментальных данных составит 0,97.

Уменьшение температуры начала размягчения приведет к увеличению «мокрой» части шихты по высоте печи с низкой порозностью за счет появления пластичных масс, а затем и жидких продуктов плавки. Это значительно снизит количество вдуваемого дутья в печь.

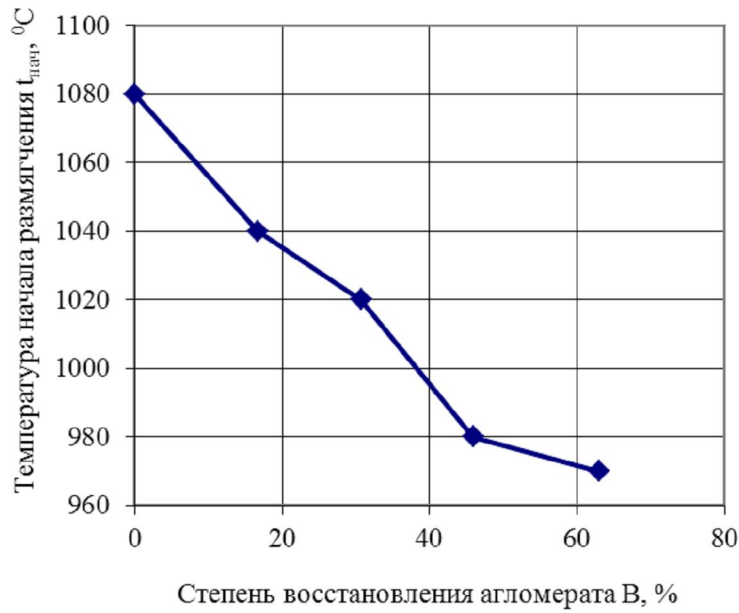


Рис. 4 – Графік залежності початку розм'ягчення агломерата від його ступеня відновлення

Из рис. 5 видно, что температура конца размягчения уменьшается с ростом степени восстановления агломерата. Для кривой рисунка построена линия тренда и определенно для нее уравнение:

$$t_{\text{кон}} = -0,801 \cdot B + 1174,1. \quad (4)$$

Корреляция данных, рассчитанных по уравнению (4) и экспериментальных данных составит 0,93.

Сравнив уравнения 4 и 3, можно сделать вывод, что температура начала размягчения понижается резче, чем температура конца размягчения именно этот факт и обуславливает расширение интервала размягчения. Следовательно, более слабое понижение температуры конца размягчения в сравнении с температурой начала размягчения является негативным явлением и ухудшает прохождение газов через эту зону.

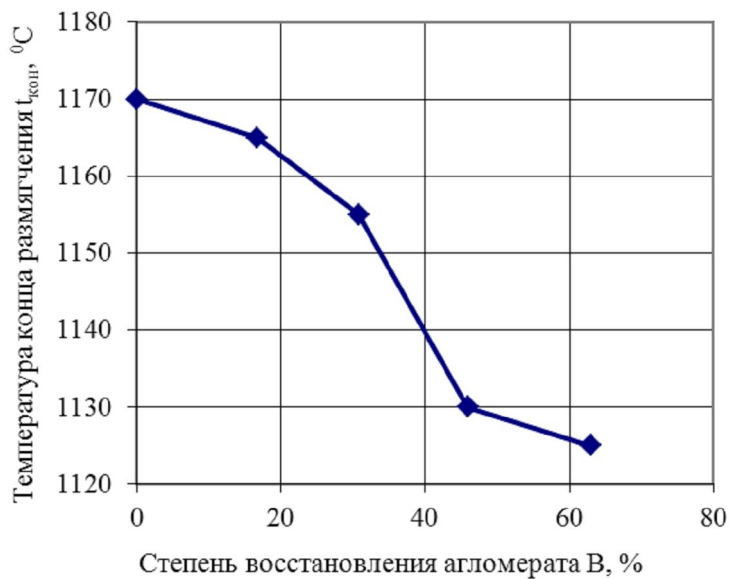


Рис. 5 – Графік залежності кінця розм'ягчення агломерата від його ступеня відновлення

**Выводы**

1. В ходе исследований максимальная степень восстановления, полученная в лабораторных условиях для агломерата произведенного на ММК им. Ильича, составила 63%, что соответствует степени восстановления железорудных материалов (60-67%) в зоне когезии доменной печи по данным И.Д. Балон.
2. По результатам исследований установлено, что по мере увеличения степени восстановления агломерата расширяется температурный интервал размягчения железорудного материала, что увеличивает высоту зоны когезии и ухудшает ее газопроницаемость. Данный факт негативно влияет на производительность доменной печи.
3. Снижение температуры начала размягчения агломерата в результате его частичного восстановления приводит к повышению уровня зоны когезии в доменной печи и увеличению степени непрямого восстановления ( $\gamma_d$ ), что влечет за собой увеличение расхода кокса.
4. Достичь экономии кокса возможно за счет снижения  $\gamma_d$  путем увеличения степени восстановления агломерата до момента его опускания в область температур размягчения. Однако при этом произойдет снижение производительности за счет увеличения зоны когезии, но учитывая конъюнктуру рынка, для доменщиков основной задачей является экономия кокса.
5. Повысить степень восстановления агломерата до момента достижения им области температур размягчения в доменной печи возможно за счет:
  - увеличения восстановимости агломерата;
  - снижения окисленности агломерата;
  - оптимизации газового потока в доменной печи.

**Список использованных источников:**

1. Фазовые превращения материалов при доменной плавке / И.Д. Балон, И.В. Буклан, В.Н. Муравьев, Ю.Ф. Никулин. – М. : Металлургия, 1984. – 152 с.
2. Тарасов В.П. Теория и технология доменного процесса / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов. – М. : Интернет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
3. Товаровский И.Г. Эволюция доменного процесса / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги, 2000. – 424 с.
4. Доменное производство : Справочное издание. В 2 томах. / Под ред. Е.Ф. Вегмана. - М. : Металлургия. 1989. – 496 с.
5. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения температуры начала размягчения и температурного интервала размягчения. ГОСТ 26517-85. – действителен от 1985 – 04 – 09. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам.

**Bibliography:**

1. Phase transformations in material in blast furnace / I.D. Balon, I.V. Buklan, V.N. Muravyov, Y.F. Nikulin. – M. : Metallurgy, 1984. – 152 p. (Rus.)
2. V.P. Tarasov Theory and technology of blast furnace / V.P. Tarasov, P.V. Tarasov. – M. : Internet Engineering, 2007. – 384 p. (Rus.)
3. I.G. Tovarovskiy The evolution of the blast furnace process / I.G. Tovarovskiy, V.P. Lyaluk. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2000. – 424 p. (Rus.)
4. Blast Furnace: Reference book. In two volumes. / Under red. E.F. Vegmana. – M. : Metallurgiya. 1989. – 496 p. (Rus.)
5. Iron ore, sinter and pellets. The method of determining the initial softening and softening temperature range. State standard 26517-85. - Valid from 1985 - 04 - 09. – Moscow : State Committee on Standards. (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.11.2012