

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,  
к.т.н. Куберский С. В.,  
Лупанов Д. В.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru),

Кумпан В. Н.

(Филиал № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» АМК, г. Алчевск, ЛНР)

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАТА У СТЕНОК СПЕКАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ВВЕДЕНИИ В СЛОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА

Экспериментально исследованы особенности спекания агломерата у стенок спекательных агрегатов при введении в шихту металлического железа (чугунной стружки). Установлено влияние количества вводимой стружки на температурные параметры процесса и качество агломерата.

**Ключевые слова:** чугунная стружка, агломерат, температура спекания, термограммы, максимальная температура в слое, качество, прочность.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Во многих работах, в том числе и работах авторов [1, 2], отмечается, что в прибортовой зоне агломерационных машин условия протекания всех физико-химических и тепловых процессов далеки от оптимальных. В результате спечённый агломерат прибортовой зоны имеет низкое качество.

В связи с этим возникает проблема: изменить условия спекания агломерата в прибортовой зоне агломашины или же перейти на новую технологию, позволяющую в существующих условиях получить качественный агломерат. Для решения этой проблемы в работе [2] нами предложено в прибортовую зону вводить металлическое железо, например, мелкую чугунную стружку. При этом дополнительное тепло, выделяющееся при окислении металлического железа, позволит повысить температуру в прибортовом слое шихты и в результате получить качественный агломерат.

Вместе с тем для внедрения предложенной технологии необходимо установить влияние на процесс спекания агломерата количества вводимого в шихту металла. При этом необходимо оценить изменения в теплообмене процесса, а также опре-

делить максимальные температуры в слое по ходу спекания.

**Постановка задачи.** В работе поставлена следующая задача: на основании опытных данных оценить изменение тепловых условий спекания агломерата в пристеночной зоне агломерационной установки при введении в шихту этой зоны чугунной стружки. Установить влияние количества стружки на максимальную температуру в зоне спекания.

**Изложение материала и его результаты.** Опытные спекания агломерата проведены в агломерационной лаборатории кафедры металлургии чёрных металлов (МЧМ) Донбасского государственного технического университета (ДонГТУ).

Спекания проводились в металлической лабораторной чаше диаметром 150 мм и высотой 400 мм. Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду чаша была теплоизолирована слоем асбеста и огнеупорной глины толщиной 10 мм.

Для измерения температур по высоте слоя шихты в чаше, начиная от колосниковой решётки, через 75 мм были сделаны отверстия диаметром 10 мм, в которые устанавливались платино-платинородиевые термопары в керамических наконечниках.

Термопары вводились в слой шихты таким образом, чтобы срез наконечника находился на заданном расстоянии от стенки чаши. Температуру фиксировали многоканальным электронным потенциометром.

Составленная шихта окомковывалась в конусном окомкователе, конструкция которого разработана сотрудниками кафедры МЧМ ДонГТУ. Отличительной особенностью окомкования шихты в этом барабане является рециркуляционный режим данного процесса. При этом поток мелкой шихты движется навстречу потоку из более крупной шихты, гранулы которой являются центрами окомкования. В результате качество получаемой окомкованной шихты повышается.

При проведении исследований с введением металлического железа (чугунной стружки) в прибортовую зону спекание шихты проводилось в узком кольце толщиной около 20 мм. При этом вначале в агломерационную чашу вставлялся тонкостенный полый цилиндр диаметром 110 мм. В образовавшееся пространство между цилиндром и стенкой чаши загружалась опытная шихта, а в цилиндр — концентрат.

Загрузка в центральную часть концентрата позволяла, во-первых, оценивать ход спекания агломерата только в пристеночной зоне аглоустановки, а во-вторых, после спекания отделить полученный спёк от концентрата и оценить качество полученного агломерата.

Опытная шихта состояла из концентрата, аглоруды, известняка, топлива и возврата. Расходы материалов на одно спекание и их химический состав приведены в таблице 1.

Соотношение между концентратом и рудой в железорудной части шихты было 80:20 % при основности шихты, равной 1,3. Доля возврата в шихте составляла 20 %, а содержание углерода — 4 %.

Всего было проведено 5 серий по пять спеканий. В первой серии спекали шихту без ввода в неё чугунной стружки (базовая шихта). В последующих сериях в шихту вводили стружку в количестве от 2,5 до 10 % (с шагом 2,5 %) от массы загруженной шихты.

Таблица 1  
Химический состав и расход материалов шихты

Материал	Расход, кг	Содержание, %		
		Fe <sub>общ</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>
Руда	0,70	61,43	0,47	6,50
Концентрат	2,82	65,10	0,20	1,60
Известняк	0,25	—	54,33	1,55
Топливо (зола)	0,23	12,00	3,30	52,80
Возврат	1,00	79,47	4,01	3,08
Всего	5,00	59,29	3,72	2,85

Чтобы исключить влияние колебаний ситового состава шихты и её химического состава на результаты спеканий, загрузку установки производили следующим образом.

Шихта в количестве, необходимом для 5-ти спеканий, окомковывалась в окомкователе одновременно. Окомкованная шихта рассеивалась на фракции < 5 мм, 5–10 мм, 10–15 мм и > 15 мм. Каждая из фракций делилась на 5 равных частей, из которых составлялась порция шихты для одного спекания. Для обеспечения равномерного распределения отдельных фракций в загруженном слое составление порции осуществлялось следующим образом. На лист плотной бумаги равномерно рассыпалась фракция, содержание которой в шихте было максимальным (фракция 5–10 мм). Затем на эту фракцию также равномерно укладывались следующие фракции в порядке убывания их содержания в шихте. В результате на листе образовывался равномерный по ситовому составу слой. Перед загрузкой в установку бумага с материалом сворачивалась в трубочку, и затем он равномерно загружался в установку.

Шихта загружалась в чашу слоем высотой 370 мм. Во время загрузки шихты в чашу по мере её наполнения в отверстия вставлялись чехлы для ввода термопар. После этого чаша ставилась на испытательный стенд и в чехлы устанавливались термопары, подключённые к потенциометру.

Зажигание шихты производилось газовой горелкой.

В первой серии экспериментов шихту спекали без ввода в неё чугунной стружки (базовая шихта). В последующих сериях в шихту вводили чугунную стружку в указанных выше количествах.

На рисунке 1 приведены термограммы изменения температуры в слое на исследовательских горизонтах при спекании исходной (базовой) шихты.

Спекание базовой шихты показало, что в слое температура на всех горизонтах на 200–250 °С ниже необходимой для спекания качественного агломерата. Как результат, выход годного агломерата крупностью более 10 мм составил менее 50 %.

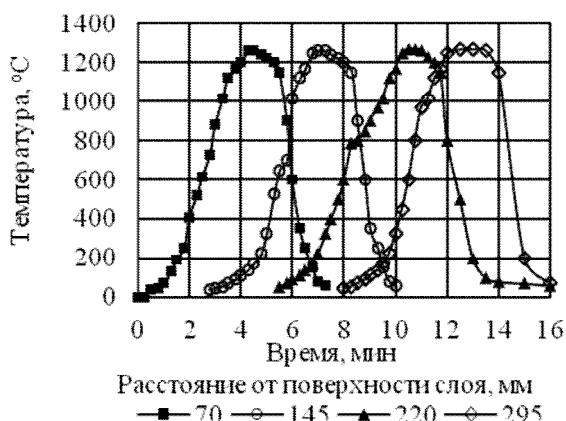
На рисунке 2 приведены изменения температуры по высоте слоя при спекании агломерата с вводом в шихту чугунной стружки.



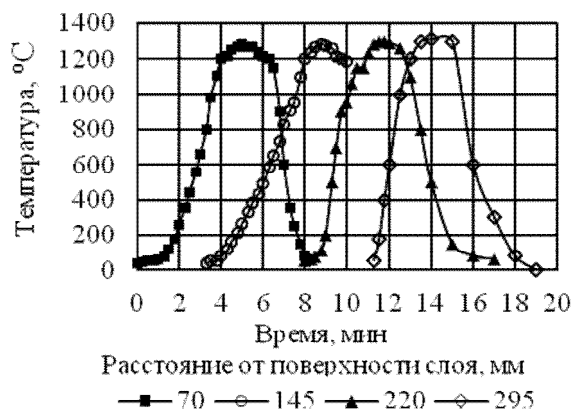
Рисунок 1 Изменение температуры слоя на исследованных горизонтах в базовых спеканиях



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 Изменение температуры по высоте слоя при спекании агломерата с вводом в пристеночную зону чугунной стружки в количестве: а — 2,5 %, б — 5 %, в — 7,5 %, г — 10 %

Введение в шихту чугуновой стружки за счёт тепла, которое выделяется при окислении составляющих её элементов (Fe, C, Si, Mn), позволяет увеличить температуру в слое на величину, пропорциональную количеству введённой стружки. Повышение максимальной температуры в проведённых экспериментах в расчёте на 1 % введённой в шихту чугуновой стружки составило 40–50 °С.

Вместе с тем введение стружки приводит и к другим изменениям теплового режима процесса спекания.

Прежде всего, температура зажигания агломерационного топлива (около 800 °С) достигается в слое с небольшим запаздыванием по сравнению с базовым спеканием. Особенно это наблюдается на нижних горизонтах слоя. По-видимому, это вызвано тем, что в верхней ступени теплообмена на окисление металлического железа расходуется кислород воздуха, и в результате интенсивность горения топлива снижается.

Уравнение теплового баланса элементарного слоя в упрощённом виде при наличии в слое металлического железа имеет вид

$$Q_{вн} + Q_T + Q_{ок} = Q_{вс} + Q_{сл} + Q_{нс}, \quad (1)$$

где  $Q_{вн}$  — приход тепла от внешнего источника;  $Q_T$  — тепло, выделенное при сгорании топлива, содержащегося во всех вышележащих слоях;  $Q_{ок}$  — тепло от окисления металлического железа, содержащегося во всех вышележащих слоях;  $Q_{вс}$  — тепло, задержанное в верхней ступени теплообмена;  $Q_{сл}$  — тепло, усвоенное материалом данного слоя;  $Q_{нс}$  — тепло, переданное нижележащим слоям.

Так как  $Q_{сл} = m \cdot c \cdot t_{\max}$ , то значение максимальной температуры будет определяться зависимостью

$$t_{\max} = \frac{Q_{вн} + Q_T + Q_{ок} - Q_{вс} - Q_{нс}}{m \cdot c}. \quad (2)$$

Расчёт максимальной температуры по формуле (2) практически невозможен, так как при этом необходимо учесть нестационарность процессов, протекающих в трёх зонах во времени и по высоте слоя — зонах охлаждения агломерата, горения и нагрева шихты. Вместе с тем это уравнение позволяет провести качественную оценку влияния ввода в шихту металлического железа на максимальную температуру в слое.

Учитывая, что теплота внешнего нагрева (зажигания) расходуется в поверхностном слое, толщина которого равна примерно 50–60 мм, уже на первом исследовательском горизонте (70 мм) тепловой уровень процесса будет определяться главным образом величинами  $Q_T$  и  $Q_{ок}$ , то есть двумя источниками тепла.

Как известно, при агломерации с просасыванием воздуха наблюдаются фронтальные перемещения тепловой волны (фронт теплопередачи) и зоны горения топлива (фронт пламени). Считается, что для нормального протекания процесса спекания фронт пламени должен следовать непосредственно за фронтом теплопередачи.

Введённое в шихту металлическое железо, как показано в работе [3], окисляется дважды. Первоначально оно окисляется в зоне интенсивного подогрева шихты до  $Fe_3O_4$ , а затем, после восстановления в зоне горения до  $FeO$ , повторно окисляется в зоне охлаждения аглоспёка и подогрева воздуха до  $Fe_3O_4$  и  $Fe_2O_3$ .

Очевидно, что если за время, прошедшее от начала спекания до достижения максимальной температуры на данном горизонте, металлическое железо в верхних слоях окислится полностью, значение  $Q_{ок}$  будет максимальным. Следовательно, на данном горизонте значение температуры достигнет максимально возможных значений. Такое возможно, когда фронтальные перемещения тепловой волны (сюда входит и тепло от окисления металлического железа) и зоны горения топлива одинаковы.

В действительности фронт пламени опережает фронт теплопередачи. В результате элементарный слой получает меньше тепла, чем он получил бы при полном окислении железа. К тому же, как

сказано выше, соотношение скоростей перемещения тепловых волн от горения топлива и окисления железа определяет максимальную температуру слоя на горизонте.

В соответствии с принципом суперпозиции (наложения) тепловых волн итоговая температура определяется как сумма температур тепловых волн.

На рисунке 3 показано движение тепловых волн от двух тепловых источников.

Как видно из рисунка, первый максимум температуры от первого более мощного источника наблюдается при 30 с, а второй — при 90 с.

Из-за несовпадения скоростей первой и второй волн максимальная температура в первом случае достигнута на 5 с раньше, а во втором — на 5 с позже.

Показанные графики иллюстрируют принцип суперпозиции волн и хорошо объясняют распределение температур по высоте слоя, представленное на рисунке 2.

При увеличении количества металлического железа (стружки) в слое ход тепловой волны изменяется. Во-первых, повышается температура, во-вторых, волна расширяется. При этом соотношение между  $Q_T$  и  $Q_{OK}$  изменяется, что приводит не только к росту максимальной температуры, но и к смещению её максимума во времени.

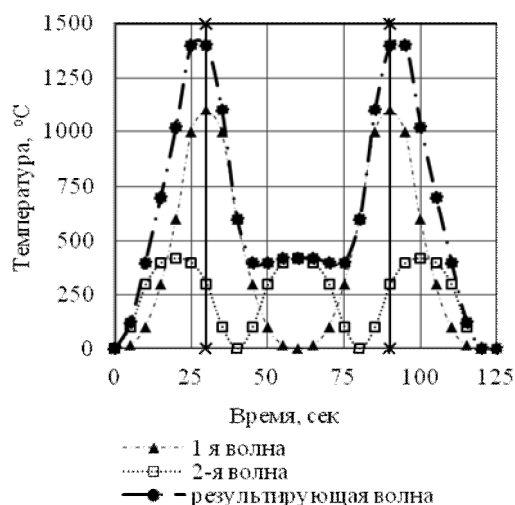


Рисунок 3 Движение тепловых волн от двух тепловых источников

В таблице 2 приведены данные о времени достижения максимальной температуры ( $\tau_{t \max}$ ) на горизонтах снятия термограмм.

Анализ этих данных показывает, что на всех горизонтах максимальная температура при увеличении количества введенной в шихту стружки достигалась с разницей 0,4–0,6 мин в расчёте на 1 % роста расхода стружки в шихту.

Учитывая принцип суперпозиции тепловых волн, описанный выше, можно утверждать, что при вводе в шихту металлического железа температурный максимум не всегда совпадает с максимумом, получаемым от горения топлива. Известное определение скорости спекания как скорости перемещения тепловой волны от горения топлива в случае спекания шихты, в состав которой входит металлическое железо, является не совсем корректным.

Как показали результаты обработки термограмм, помимо описанных выше изменений теплового режима, ввод в слой металлического железа приводит к увеличению времени пребывания материалов в зоне высоких температур. Это увеличение связано с тем, что процесс окисления железа при агломерации растянут во времени и проходит в два этапа, описанных выше. В верхней ступени теплообмена с увеличением количества стружки в шихте рост температур начинается раньше, чем в слое из обычной шихты.

Время пребывания материалов в зоне высоких температур ( $\tau_{t \max}$ ) с увеличением количества вводимого в шихту металла увеличивается (табл. 3).

Таблица 2

Влияние содержания стружки на время достижения слоем максимальной температуры

Горизонт, мм	$\tau_{t \max}$ (мин) при различном содержании стружки в шихте (%)				
	0	2,5	5,0	7,5	10
70	2,2	2,5	4,3	5,0	5,8
145	4,8	5,8	7,3	8,5	10,0
220	7,8	8,8	10,5	11,5	14,0
295	10,2	10,7	12,5	14,0	16,0

Таблица 3  
Влияние содержания стружки на время пребывания материалов в зоне высоких температур

Горизонт, мм	$\tau_{\max t}$ (мин) при различном содержании стружки в шихте (%)				
	0	2,5	5,0	7,5	10
70	1,5	1,4	2,8	3,3	3,7
145	1,0	2,0	2,5	3,0	4,2
220	1,0	2,0	3,0	3,8	4,0
295	1,0	2,3	3,0	4,0	4,0

Приведённые выше изменения теплового уровня процесса спекания шихты при введении в её состав чугуновой стружки положительно сказались на технико-экономических показателях процесса агломерации. Прежде всего, это касается выхода годного агломерата, который при введении в шихту стружки в количестве 2,5 % возрос почти на 20 %. При последующем увеличении содержания стружки в шихте на 1 % выход годного агломерата увеличивался практически на аналогичную величину.

Кроме того, полученный агломерат имел повышенную прочность. Этому способствовало увеличение времени пребывания агломерата при высоких температурах. Спёк медленнее охлаждался, что приводило к завершению всех процессов кристаллизации расплава. В результате агломерат имел металлический блеск, его куски были хорошо оплавлены и имели повышенную пористость.

### Библиографический список

1. Русанов, И. Ф. Оценка условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек [Текст] / И. Ф. Русанов, С. В. Куберский, Д. В. Лупанов // Сборник науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — № 13 (56). — С. 49–54.
2. Петрушов, С. Н. Спекание агломерата с вводом в прибортовой слой чугуновой стружки [Текст] / С. Н. Петрушов, И. Ф. Русанов, С. В. Куберский, Д. В. Лупанов // Сборник науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. 34. — С. 99–105.

Вместе с тем при введении в шихту пристеночной области металлического железа следует обратить внимание на тот факт, что время спекания агломерата увеличивается пропорционально количеству введённого металла. Поэтому количество вводимого металла должно быть таким, чтобы скорость спекания в пристеночной зоне и в остальной части спекательной машины совпадали.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** При вводе в агломерационную шихту, располагающуюся у стен агломерационного агрегата, чугуновой стружки условия спекания агломерата существенно изменяются, что обусловлено повышением температуры слоя и увеличением времени пребывания материалов в зоне высоких температур.

В результате изменений условий спекания шихты увеличивается выход годного агломерата из пристеночной зоны и повышается его прочность. Причём увеличение выхода годного агломерата непропорционально содержанию металлического железа в шихте.

Время спекания агломерата при введении металлического железа увеличивается, что необходимо учитывать при использовании его для улучшения условий спекания агломерата в прибортовой зоне спекательных тележек агломерационных машин.

В ходе дальнейших исследований предполагается проведение опытных спеканий в условиях действующего производства для подтверждения результатов, полученных в лабораторных условиях.

- © Русанов И. Ф.  
© Куберский С. В.  
© Лупанов Д. В.  
© Кумпан В. Н.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТУ Должиковым В. В.,  
начальником ЦЛ филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» АМК Сбитневым С. А.*

*Статья поступила в редакцию 05.06.19.*

**к.т.н. Русанов І. Ф., к.т.н. Куберський С. В., Лупанов Д. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР),  
Кумпан В. М. (Філія № 12 ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВИС» АМК, м. Алчевськ, ЛНР)**

**ОСОБЛИВОСТІ СПІКАННЯ АГЛОМЕРАТУ БІЛЯ СТІНОК СПІКАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ  
ПРИ ВВЕДЕННІ В ШАР МЕТАЛЕВОГО ЗАЛІЗА**

*Експериментально досліджено особливості спікання агломерату біля стінок спікальних агрегатів при введенні в шихту металевого заліза (чавунної стружки). Встановлено вплив кількості стружки, що вводиться, на температурні параметри процесу і якість агломерату.*

**Ключові слова:** чавунна стружка, агломерат, температура спікання, термограми, максимальна температура шару, якість, міцність.

**PhD in Engineering Rusanov I. F., PhD in Engineering Kuberskiy S. V., Lupanov D. V. (DonSTU,  
Alchevsk, LPR), Kumpan V. N. (Branch № 12 ZAO «VNESHTORGSERVIS» AISW (Closed Joint-  
Stock Company), Alchevsk, LPR)**

**FEATURES OF SINTERING AT THE WALLS OF SINTERING UNITS WHILE  
INTRODUCING INTO THE LAYER OF METALLIC IRON**

*Experimentally investigated the characteristics of sintering at the walls of sintering units while introducing into the burden the metallic iron (cast-iron shavings). There has been determined the influence of the amount of introduced shavings on the temperature process parameters and the quality of the sinter.*

**Key words:** cast-iron shavings, sinter, sintering temperature, thermograms, maximum temperature in the layer, quality, strength.