

## Summary

A. Shevchenko, A. Narivskiy

Methods of nondestructive testing in the form of graphite products of pig iron

The contact method and the device for determination of form of graphite in cast-irons are presented.

## Анотація

А. І. Шевченко, А. В. Нарівський

Метод контролю форми графіту у виробках із чавуну, що не руйнує

Представлено контактний метод і прилад для визначення форми графіту у чавунах.

## Ключевые слова

Графит, чугун, структура, литой металл, теплопроводность, графитизация, термопреобразователь

УДК 622.788.36

С. В. Кривенко, А. А. Томаш, В. П. Русских (ПГТУ)

# Интенсификация процесса агломерации за счет увеличения скорости горения топлива в слое

Производительность агломерационного процесса определяется скоростью перемещения зоны горения топлива в слое и выходом годного агломерата и растет при увеличении значений этих параметров. Для ускорения перемещения зоны горения необходимо интенсифицировать горение топлива в ней.

Одним из наиболее распространенных способов интенсификации горения топлива является увеличение скорости доставки газообразного кислорода в слой. Обычно это реализуют улучшением газопроницаемости спекаемого слоя [1, 2]. Однако повышенный расход газов через слой способствует снижению температуры в зоне горения за счет уноса тепла отходящими газами. В результате снижается количество образующихся легкоплавких соединений и ухудшается структура агломерата. Поэтому улучшение газопроницаемости слоя должно сопровождаться увеличением высоты слоя для согласования скорости подогрева шихты отходящими газами из зоны горения со скоростью передвижения зоны горения. При одинаковых значениях этих скоростей получают агломерат

Представлены результаты спеканий агломерата с использованием предварительного подогрева шихты, обогащения кислородом воздуха, топлива с низкой температурой зажигания и связующего вещества. При совместном использовании этих факторов получена максимальная производительность аглопроцесса, намного превышающая сумму увеличений производительности для каждого из них отдельно, с хорошим качеством агломерата

высокого качества с максимальной производительностью процесса спекания [2].

Существует способ интенсификации горения топлива, в котором в слой всасывают воздух, обогащенный кислородом [3]. Увеличение содержания кислорода в воздухе позволяет существенно увеличить скорость горения топлива в слое без изменения его газопроницаемости. Но скорость спекания шихты ограничивается низкой скоростью перемещения зоны горения топлива из-за низкой скорости нагрева шихты до температуры зажигания топлива в зоне, расположенной непосредственно под зоной горения, а также значительных расходов тепла на подогрев шихты и испарение влаги из зоны переувлажнения. Поэтому при обогащении кислородом всасываемого воздуха рост скорости спекания не существенный, а значительно увеличивается содержание остаточного кислорода в

отходящих газах и температура в зоне горения. Из-за существенного повышения температуры в зоне горения топлива происходит излишнее оплавление шихты и ухудшение газопроницаемости спекаемого слоя и, как следствие, снижение роста производительности аглопроцесса. При этом содержание фракции менее 10 мм в агломерате уменьшается на 10-15 %<sub>отн.</sub> при повышении содержания кислорода в воздухе на 1 %. Уменьшить излишнее оплавление шихты можно снижением расхода топлива, что способствует снижению эффективности использования кислорода из-за уменьшения количества окисляемого углерода. Поэтому в данном способе при повышении содержания кислорода в воздухе на 1 % увеличение производительности аглопроцесса составляет всего 1-2 %.

Повысить скорость горения топлива в шихте также возможно за счет приближения температуры шихты к температуре его зажигания. Существует способ спекания окомкованной шихты, предварительно подогретой до температуры 60-80 °С, что устраняет зону переувлажнения. В результате увеличивается газопроницаемость слоя и скорость спекания [4]. При этом за счет дополнительного тепла шихты и уменьшения расхода тепла на испарение влаги шихты происходит ускорение подгрева шихты под зоной горения топлива до температуры его зажигания, но интенсивность горения топлива практически не изменяется. Так как топливо горит в направлении движения газов сквозь слой, то верхняя часть зоны горения получает больше кислорода, чем нижняя. При недостатке кислорода нижняя часть зоны горения топлива горит вяло, а верхняя часть, где кислорода избыток, при передвижении получает меньше недожженного топлива и охлаждается воздухом, который всасывается в слой с повышенным расходом. В результате зона горения топлива значительно расширяется. Кроме того, общая температура в зоне горения снижается за счет уноса тепла газами и неполного выгорания топлива. Расширение зоны горения топлива ограничивает повышение газопроницаемости спекаемого слоя, следовательно, и увеличение производительности аглопроцесса, а снижение температуры в зоне горения способствует повышению содержания мелких фракций (менее 10 мм) в агломерате. Поэтому шихту подогревают до температуры не более 60-80 °С, чтобы остаточная влага шихты ограничила скорость передвижения зоны горения и ее расширение в соответствии с интенсивностью горения топлива и уменьшают расход топлива на 3-5 %<sub>отн.</sub>, чтобы сузить зону горения. Таким образом ограничивают рост производительности процесса агломерации на 20-30 % для получения агломерата

удовлетворительного качества по крупности. При подгреве шихты до температуры более 80 °С зона горения перемещается слишком быстро и температура в ней еще больше снижается, в результате получают неудовлетворительное качество агломерата по крупности. При подгреве окомкованной шихты выше 100 °С осуществляется сушка гранул и их прочность значительно уменьшается. Из-за разрушения гранул во время спекания газопроницаемость спекаемого слоя существенно ухудшается. Вследствие этого производительность аглопроцесса и качество агломерата значительно снижаются.

Таким образом, для использования данного способа подобраны оптимальные условия спекания (температура подгрева шихты 60-80 °С и снижение расхода топлива на 3-5 %<sub>отн.</sub>), которые обеспечивают максимально достижимое увеличение производительности на 20-30 % при удовлетворительном качестве агломерата.

В каждом из рассмотренных способов спекания агломерата существуют недостатки, ограничивающие повышение производительности. Их возможно устранить одновременным применением используемых факторов, интенсифицирующих процесс горения топлива, а не суммированием этих показателей каждого из указанных известных способов, и в результате получить более существенное повышение производительности процесса агломерации со снижением расхода топлива без ухудшения качества агломерата.

Целью проведенных исследований является анализ показателей способа спекания агломерата из предварительно подогретой шихты с использованием воздуха, обогащенного кислородом.

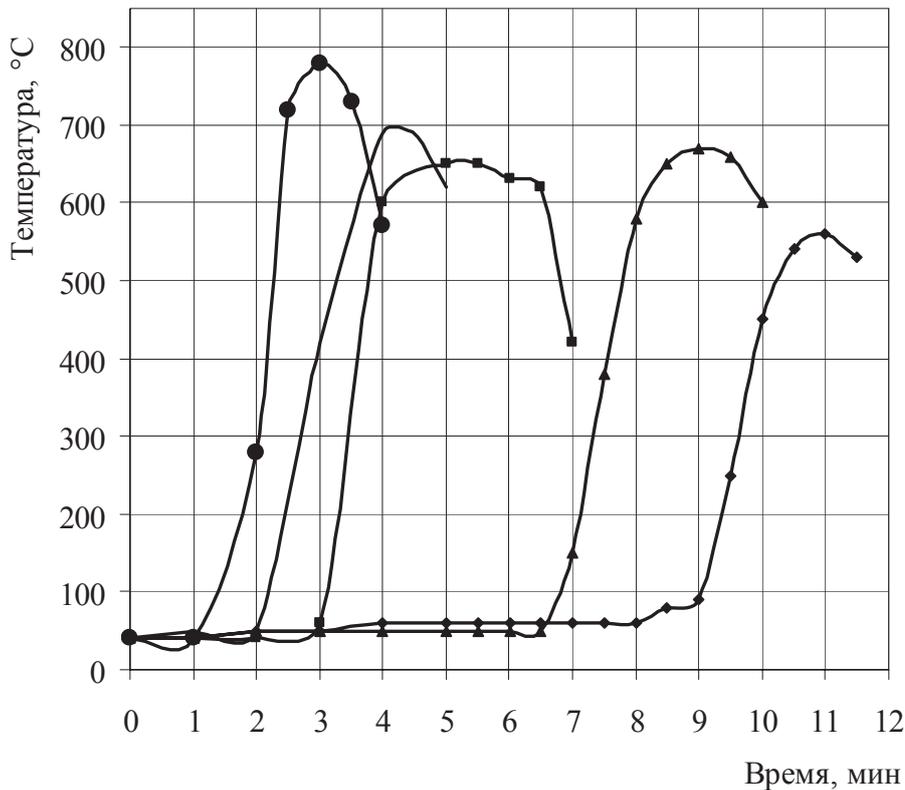
В лабораторных условиях были выполнены спекания агломерата при разных температурах окомкованной шихты и содержания кислорода в воздухе, результаты которых приведены в таблице. Высота слоя была постоянной – 180 мм. Максимальная температура подгрева шихты составила 120-125 °С и была ограничена возможностями лабораторного оборудования. Разрежение под слоем поддерживали на 10000 Па. Химический состав компонентов шихты и агломерата постоянен.

Увеличение производительности процесса агломерации рассчитывали по формуле

$$\Delta\Pi = \left( \frac{\tau_0^{\text{сн}} \text{ВГ}}{\tau^{\text{сн}} \text{ВГ}_0} - 1 \right) \cdot 100, \quad \% \quad (1)$$

где  $\tau^{\text{сн}}$ ,  $\tau_0^{\text{сн}}$  – время спекания с интенсификацией и без, соответственно, мин; ВГ, ВГ<sub>0</sub> – выход годного агломерата с интенсификацией и без, %.

Из таблицы видно, что самая низкая производительность аглопроцесса соответствует спеканию, которое осуществлено без использования



**Рис.** Изменение температуры отходящих газов во время спекания:  
 —●— базовое спекание;  
 —■— спекание подогретой до 80 °С шихты;  
 —▲— спекание на обогащенном кислородом воздухе;  
 —◆— спекание подогретой до 80 °С шихты на обогащенном кислородом воздухе;  
 —●— спекание подогретой до 120 °С шихты на обогащенном кислородом воздухе и с добавкой бентонита

процесс агломерации было осуществлено спекание подогретой до 80 °С шихты. При этом время спекания шихты сократилось в 2 раза, но из-за значительного ухудшения качества агломерата увеличение производительности процесса агломерации составило лишь  $\Delta\Pi = 47,5\%$ . Так, выход годного (фракции +10 мм в агломерате) уменьшился с 80,1 % до 59,1. Это объясняется значительным расширением зоны горения топлива и снижением температуры в ней. Это происходит в связи с недостатком тепла для прогрева шихты из-за вялого горения топлива. Максимальная температура газов  $t_r$  при приближении зоны горения к низу слоя для подогретой шихты ( $t_r = 660\text{ }^\circ\text{C}$ ) выше, чем для неподогретой ( $t_r = 560\text{ }^\circ\text{C}$ ) в связи с тем, что тепло газов не расходуется на испарение влаги из зоны перувлажнения (рисунок). Вялость горения топлива шихты также подтверждается повышением остаточного углерода в агломерате с базового  $C_{\text{ост}} = 0,10\%$  до  $C_{\text{ост}} = 0,16\%$  при одинаковом содержании (%) FeO = 16,5-16,8 (таблица).

какого-либо фактора, интенсифицирующего горение топлива в слое. Это спекание принято за базовое и отвечает существующей технологии производства агломерата на большинстве металлургических предприятий СНГ.

При подогреве окомкованной шихты до  $t_{\text{ш}} = 120\text{ }^\circ\text{C}$  процесс спекания вообще не прошел из-за недостаточной газопроницаемости слоя, которую

Для исследования влияния подогрева шихты на

**Таблица**  
**Результаты спеканий агломерата**

Температура окомкованной шихты $t_{\text{ш}},\text{ }^\circ\text{C}$	Обогащение кислородом воздуха	Расход топлива, %	Добавка		Показатель спекания				Содержание компонента в агломерате, %					
			бентонит	торф	$t_{\text{сп}},\text{ мин}$	ВГ, %	барабанная проба, %	$\Delta\Pi, \%$	$C_{\text{ост}}$	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
20	-	5,02	-	-	11,0	80,1	69,6	0,0	0,10	10,60	11,23	54,50	16,80	59,30
20	-	5,02	-	+	7,5	82,7	73,9	42,1	-	-	-	-	-	-
80	-	5,02	-	-	5,5	59,1	71,0	47,5	0,16	10,90	12,03	53,80	16,50	58,60
80	-	5,02	-	+	5,5	72,3	74,2	121,6	-	-	-	-	-	-
120	-	5,02	-	-	не спекся									
120	-	5,02	+	-	2,6	51,7	53,5	173,2	-	-	-	-	-	-
120	-	5,02	+	+	4,5	67,0	76,3	192,2	-	-	-	-	-	-
20	+	5,02	-	-	9,0	85,2	81,9	29,9	0,07	11,20	10,45	54,40	18,60	57,10
80	+	5,02	-	-	4,3	77,2	70,2	149,5	0,09	11,10	11,43	53,50	16,60	58,00
120	+	5,02	+	-	3,0	65,1	72,8	198,2	0,82	11,40	11,57	53,30	24,70	48,90
120	+	4,02	+	-	3,5	70,1	68,8	174,9	-	-	-	-	-	-
120	+	4,02	+	+	4,0	66,8	75,2	129,4	-	-	-	-	-	-
120	+	3,02	+	+	3,5	77,8	77,3	205,3	-	-	-	-	-	-

ухудшает разрушение высушенных гранул. Потому для исключения разрушения гранул к исходной шихте было добавлено 2 % бентонита. При этом производительность возросла на  $\Delta\Pi = 173,2\%$ , но качество агломерата еще больше ухудшилось. Таким образом, предварительный подогрев агломерационной шихты позволяет повысить производительность процесса агломерации лишь за счет роста скорости передвижения зоны горения, но из-за недостаточно интенсивного горения топлива качество агломерата значительно ухудшается.

Для исследования влияния на показатели процесса агломерации содержания кислорода в воздухе, который всасывается в слой были осуществлены спекания на воздухе, обогащенном кислородом до 25 %.

Спекание предварительно не подогретой шихты показало, что в сравнении с базовым спеканием получено наименьшее увеличение производительности  $\Delta\Pi = 29,9\%$ , но качество агломерата значительно улучшилось. Согласно рисунка температура в зоне горения топлива значительно возросла. Это также подтверждается уменьшением содержания в агломерате  $C_{\text{ост}} = 0,07\%$  и ростом содержания FeO до 18,60 %. Малое увеличение производительности объясняется тем, что передвижение зоны горения топлива сдерживается охлаждением шихты при испарении влаги из зоны переувлажнения. Таким образом, спекание отдельно подогретой шихты или отдельно со всасыванием воздуха, обогащенного кислородом, не дают максимального результата по производительности и качеству агломерата.

Одно из наибольших увеличений производительности процесса агломерации с хорошим качеством агломерата наблюдалось при спекании подогретой более чем до 80 °C шихты совместно со всасыванием в слой воздуха, обогащенного кислородом. Так, при спекании агломерата из шихты, подогретой до температуры  $t_{\text{ш}} = 80\text{ °C}$ , и с одновременным всасыванием в слой воздуха, обогащенного кислородом до 25 %, за счет интенсификации кислородом горения топлива в шихте увеличение производительности составило  $\Delta\Pi = 149,5\%$  по сравнению с базовым спеканием, что на  $(149,5 - 47,5) = 102,4\%$  больше, чем для спекания шихты, подогретой до температуры  $t_{\text{ш}} = 80\text{ °C}$ , и со всасыванием в слой воздуха, не обогащенного кислородом, – на  $(149,5 - 29,9) = 119,6\%$ . Однако качество спеченного агломерата практически одинаково по сравнению с базовым спеканием. При этом, согласно таблицы, приблизительно одинаковое содержание  $C_{\text{ост}}$  и FeO в спеченном агломерате в сравнении с агломератом, спеченным без интенсификации, свидетельствует о том, что скорость сгорания топлива в шихте

выросла в  $11,0/4,25 = 2,57$  раза и в сравнении с агломератом, спеченным из не подогретой шихты на обогащенном кислородом воздухе, – в  $9,0/4,25 = 2,12$  раза. Таким образом, спекание агломерата с одновременным использованием предварительного подогрева шихты и обогащения воздуха кислородом позволяет сузить зону горения топлива и повысить температуру в ней за счет повышения скорости горения топлива без ухудшения газопроницаемости слоя, что позволяет значительно повысить производительность процесса агломерации и снизить потери топлива без ухудшения качества агломерата.

Увеличение производительности аглопроцесса только при предварительном подогреве шихты до 80 °C составило 47,5 % с ухудшением выхода годного агломерата. При обогащении всасываемого воздуха кислородом до 25 % без предварительного подогрева шихты увеличение производительности составило 29,9 %. Сумма увеличения производительности под воздействием каждого фактора отдельно составляет  $47,5 + 29,9 = 77,4\%$ . В то же время при одновременном использовании просасываемого воздуха, обогащенного кислородом до 25 %, и предварительного подогрева шихты до 80 % увеличение производительности аглопроцесса составило 149,9 %. Таким образом, за счет взаимодействия обоих интенсифицирующих факторов дополнительное увеличение производительности составило  $149,9 - 77,4 = 72,5\%$ . Совместное влияние обоих факторов почти в 2 раза выше, чем сумма отдельных влияний.

Один из наибольших ростов производительности процесса агломерации  $\Delta\Pi = 198,2\%$  при хорошем качестве агломерата наблюдался при спекании подогретой до температуры  $t_{\text{ш}} = 120\text{ °C}$  шихты с добавлением бентонита и использованием кислорода для обогащения воздуха, всасываемого в слой. Для этого спекания в агломерате повышенное содержание  $C_{\text{ост}}$  и FeO, указывает на возможность уменьшения содержания топлива в шихте. Было проведено спекание с содержанием топлива в шихте, уменьшенным с 5,02 до 4,02 % (на 19,9 %<sub>отн</sub>). При этом увеличение производительности процесса агломерации уменьшилось с  $\Delta\Pi = 198,2\%$  до  $\Delta\Pi = 174,9\%$  при постоянном (приблизительно) качестве агломерата. Таким образом, при использовании обогащенного кислородом воздуха чем больше температура подогрева шихты, тем значительнее увеличение производительности процесса агломерации при меньшем расходе топлива шихты.

Для выявления возможности повышения скорости спекания шихты за счет более раннего зажигания топлива под зоной горения были проведены спекания шихты с добавлением к ней

топлива с более низкой температурой зажигания, чем у основного топлива шихты. Основным топливом шихты агломерации является дробленый кокс. При нормальных условиях температура его зажигания составляет 600-750 °С. В качестве дополнительного топлива использован активированный торф, которым обычно обезвоживают шламы [5]. Температура зажигания торфа равна 250-300 °С. Его содержание в агломерационной шихте составило 3 %.

При спекании не подогретой шихты  $t_{\text{ш}} = 20$  °С с добавлением 3 % активированного торфа увеличение производительности аглопроцесса составило  $\Delta\Pi = 42,1$  % без ухудшения качества агломерата. Повышение производительности состоялось из-за интенсификации горения топлива за счет его более раннего зажигания и ускорения роста температуры шихты непосредственно под зоной горения, которое способствует ускорению испарения влаги из зоны переувлажнения шихты и ее перемещению вниз. Улучшение качества агломерата состоялось за счет дополнительного тепла сгорания углерода активированного торфа при неизменном содержании основного топлива. Полученное увеличение производительности больше, чем при спекании такой же не подогретой шихты со всасыванием воздуха, обогащенного кислородом, на  $(42,1 - 29,9) = 12,2$  %. Это указывает на большое влияние температуры зажигания топлива шихты на скорость процесса спекания.

Были проведены спекания подогретой до  $t_{\text{ш}} = 80$  °С шихты с добавлением активированного торфа. Полученное увеличение производительности составило  $\Delta\Pi = 121,6$  % с удовлетворительным качеством агломерата. В сравнении с производительностью спекания одинаково подогретой шихты без добавления активированного торфа разница составляет  $(121,6 - 47,5) = 74,1$  % при одинаковом времени спекания  $\tau = 5,5$  мин. Повышение производительности состоялось лишь за счет улучшения качества агломерата. Таким образом, при отсутствии зоны переувлажнения во время спекания топливо с низкой температурой зажигания способствует повышению температуры в зоне спекания за счет внесения дополнительного тепла без расширения зоны горения топлива и, соответственно, без ухудшения газопроницаемости слоя.

При спекании подогретой шихты до температуры  $t_{\text{ш}} = 120$  °С с добавлением к ней топлива (с меньшей температурой зажигания, чем основное топливо шихты), 2 % бентонита и всасыванием в слой воздуха, обогащенного кислородом до 25 %, получили увеличение производительности аглопроцесса, которое составило  $\Delta\Pi = 129,4$  % при ухудшении качества агломерата. В сравнении со

спеканием без торфа и таким же содержанием основного топлива получена более низкая производительность аглопроцесса на  $(174,9 - 129,4) = 45,5$  %. Это произошло из-за значительного перерасхода топлива и ухудшения газопроницаемости слоя шихты при оплавлении агломерата.

Для устранения излишнего оплавления аглошихты в ней было снижено содержание основного топлива (коксовой мелочи) до 3,02 %, то есть на 39,8 % относительно содержания топлива в аглошихте, спеченной без предварительного подогрева и без обогащения кислородом воздуха. В результате спекания аглошихты с добавками (%) 2 – бентонита и 3 – активированного торфа, предварительно подогретой до 120 °С, со всасыванием в слой воздуха, обогащенного кислородом до 25 %, но со сниженным содержанием основного топлива получено максимальное увеличение производительности аглопроцесса ( $\Delta\Pi = 205,3$  %) при хорошем качестве агломерата.

Для исследования влияния кислорода на процесс спекания подогретой до 120 °С шихты было проведено дополнительное спекание. К исходной шихте добавили активированный торф и бентонит, потом окомковывали и подогревали до 120 °С, но спекали со всасыванием в слой обычного воздуха. Увеличение производительности относительно базового спекания составило  $\Delta\Pi = 192,2$  %. В сравнении со спеканием такой же шихты без добавления активированного торфа – то это на  $(192,2 - 173,2) = 19,0$  % выше. Однако производительность выросла лишь за счет улучшения качества агломерата, так как время спекания значительно увеличилось:  $\Delta\tau = (4,5 - 2,6) = 1,9$  мин. Таким образом, добавление активированного торфа в состав шихты внесло дополнительное тепло для повышения качества агломерата, но интенсивность горения топлива нужно увеличивать для получения еще большей производительности без ухудшения качества агломерата.

## Выводы

1. Для существующей на большинстве металлургических комбинатах технологии спекания агломерата без предварительного подогрева и использования кислорода для обогащения воздуха получена самая низкая производительность аглопроцесса с хорошим качеством агломерата (выход годного ВГ = 80,1 %).

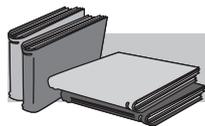
2. Для применяемой технологии производства агломерата с использованием предварительного подогрева аглошихты теплом горячего возврата получен прирост производительности на  $\Delta\Pi = 47,5$  % при существенном снижении выхода годного на 21 %<sub>абс.</sub> При использовании такого агломерата при выплавке чугуна суммарный

экономический эффект может снизиться за счет ухудшения газодинамики доменной печи.

3. При спекании подогретой до температуры 80 °С шихты без использования кислорода для обогащения воздуха целесообразно к исходной шихте добавлять  $\approx 3\%$  топлива с низкой температурой зажигания, которое позволяет существенно повысить качество агломерата  $ВГ = 72,3\%$  и производительность аглопроцесса – на  $\Delta П = 121,6\%$ . При подогреве шихты до более высоких температур топливо с низкой температурой зажигания играет

роль лишь дополнительного источника тепла без расширения зоны горения и на производительность влияет слабо.

4. При одновременном использовании предварительного подогрева шихты более 100 °С, обогащения кислородом воздуха и снижения температуры зажигания топлива с сохранением прочности гранул связывающим веществом получены наилучшие результаты по производительности аглопроцесса:  $\Delta П = 205,3\%$  с хорошим качеством агломерата  $ВГ = 77,8\%$ .



## ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация параметров работы окомкователя аглошихты в промышленных условиях // С. В. Кривенко, А. А. Томаш, В. И. Левченко и др. / *Металлургическая и горнорудная пром-сть*. – 2009. – № 9. – С. 101-105.
2. Современный агломерационный процесс: Монография / С. Н. Петрушов. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 360 с.
3. Краткий справочник доменщика // Е. Ф. Вегман. – М.: Metallurgia, 1981. – 240 с.
4. Теоретические основы окомкования железорудных материалов // В. И. Коротич – М.: Metallurgia, 1966. – 152 с.
5. Пат. № 7470 України. Спосіб обезводнення сталеплавильних шламів.

### Summary

S. Krivenko, A. Tomash, V. Ruskih

#### Intensification of Agglomerations Process Due to Multiplying Speed of Burning of Fuel in a Layer

Results of sintering of agglomerate with the use of the preliminary warming up of mix, enriching oxygen of air, fuels with the low temperature of lighting and connective matter are presented. The burst performance of sintering process, far exceeding the sum of multiplying the productivity for each of them separately, is got at sharing of these factors, with the good value of agglomerate.

### Анотація

С. В. Кривенко, О. А. Томаш, В. П. Руських

#### Інтенсифікація процесу агломерації за рахунок збільшення швидкості горіння палива в шарі

Представлено результати спікань агломерату з використанням попереднього підігріву шихти, збагачення киснем повітря, палива з низькою температурою запалювання і в'язучої речовини. При спільному використанні цих факторів отримана максимальна продуктивність аглопроцесса, яка набагато перевищує суму збільшень продуктивності для кожного з них окремо, із кращою якістю агломерату.

### Ключевые слова

Агломерация, подогрев шихты, кислород, производительность, торф, бентонит