

МЕТАЛУРГІЯ ЧАВУНУ

УДК 669.15:669.162.1

© Учитель А.Д.¹, Панченко А.Н.², Пополов Д.В.³**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОСТАЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕННУЮ
ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ КОЛОСНИКОВ ОБЖИГОВЫХ
И АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН**

Рассмотрены условия износа колосников конвейерных обжиговых и агломерационных машин в зависимости от принятых схем загрузки. Разработана упрощенная методика прогнозирования величины износа поверхности колосников. Установлена зависимость величины износа от работы сил трения и комплексного коэффициента износостойкости стали, который учитывает состав и свойства применяемой для колосников электростали и температуру на их поверхности.

Ключевые слова: электросталь, конвейерная машина, колосник, износ.

Учитель О.Д., Панченко Г.М., Пополов Д.В. Дослідження фізико-механічних властивостей електросталей, що забезпечують підвищену експлуатаційну стійкість колосників обпалювальних та агломераційних машин. Розглянуто умови зносу колосників конвеєрних обпалювальних і агломераційних машин залежно від прийнятих схем завантаження. Розроблено спрощену методіку прогнозування величини зносу поверхні колосників. Встановлено залежність величини зносу від роботи сил тертя і комплексного коефіцієнта зносостійкості сталі, який враховує склад і властивості електросталі, що застосовується для колосників, і температуру на їх поверхні.

Ключові слова: електросталь, конвеєрна машина, колосник, знос.

O.D. Uchitel, G.M. Panchenko, D.V. Popolov. Research of physical and mechanical properties of electric steel, providing for the grate bars of the roasting and sintering machines improved operational stability. The grate bars of the conveyor roasting and sintering machines work in severe, aggressive dust and gaseous medium, under cyclic modes «heating-cooling», as well as under the load of iron ore agglomerates what results in bending stress in the body of the grate bar. Consequently, electric steel grate bar must be resistant to chemical and erosion processes, high cyclically changing temperature and have high mechanical properties. The paper discusses the conditions of the grate bars of conveyor roasting and sintering machines wear, depending on the adopted loading schemes. The materials to be processed can be loaded directly from the hopper (direct download) or through the use of a feeder (drum-type feeder, roller, etc.). A simplified method to predict the grate bars surface wear on the strength of a number of assumptions has been developed: normal reaction of the pallet surface to the impact of the batch is assumed constant, equal to the maximum of its value when the pallet is in horizontal position; a layer of the batch moves as a rigid body; surface batch layer sliding velocity as related to the pallet surface is taken medium during the relative motion of the layer and equal to the linear velocity of the pallets; the side faces of the grate bars wear is related

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Криворозжский национальный университет», г. Кривой Рог, a.d.uchitel@yandex.ru

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворозжский национальный университет», г. Кривой Рог, an-echek@inbox.ru

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворозжский национальный университет», г. Кривой Рог, dmitrykr@ukr.net

to related to the surface wear by linear dependence. The dependence of the wear on the friction forces and the steel wear resistance coefficient has been found out.

Keywords: *electric steel, conveyor machine, grate bar, wear.*

Постановка проблеми. Колосники конвейерных машин для окускования железорудного концентрата работают в сложных агрессивных пылегазовых средах и циклических режимах «нагрев-охлаждение». Помимо вышеперечисленного, они испытывают нагрузки от окускованного железорудного концентрата, приводящие к возникновению механических напряжений изгиба в теле колосника. Поэтому материал колосников должен обеспечивать не только сопротивление химико-эрозионным процессам и высоким, циклически изменяющимся температурам, но и иметь достаточно высокие механические характеристики, обеспечивающие их (колосников) прочность.

Анализ последних исследований и публикаций. В последнее время, при исследовании процессов деформации и разрушения материалов [1] все больше внимания уделяется влиянию компонентов сплава на его сопротивляемость внешним воздействиям среды, то есть структурным аспектам деформации твердых тел. В работе [2] подчеркивается, что синтез материалов для применения их в узлах и деталях механизмов, работающих в агрессивных средах, невозможен без привлечения методов и моделей механики деформируемого твердого тела. Постоянно возрастающие требования к новым материалам стимулируют не только развитие новых технологий, но и создание новых концепций описания их структуры и свойств. Одной из таких концепций является многоуровневый подход к проблемам прочности [3]. Так, предложена общая классификация иерархических степеней деформации материалов, которая, в общем случае, включает в себя следующие последовательные уровни: механический, иерархический (упругое поведение материала без каких-либо структурных изменений); уровни дефектов трансляционного и ротационного типов; локальных нарушений сплошности (образование микро- и мезоповреждений, таких как поры, трещины и т.д.); уровень глобального нарушения сплошности, связанный с формированием магистральной трещины и разрушением образца [3]. Таким образом, разработка новых материалов, на сегодняшний день, невозможна без понимания многоуровневой природы процессов деформации и разрушения [1].

Целью данной работы является разработка инженерной методики, позволяющей с достаточной степенью точности прогнозировать величину износа поверхности колосников в зависимости от свойств применяемых для их изготовления электросталей.

Изложение основного материала. В случае обжига окатышей и спекания агломерата, напряженное состояние тела колосника возникает при его нагреве с одновременным снижением модуля упругости материала, возникновением пластичности, потерей сопротивляемости износу и изгибу и, в предельном случае, глобальным нарушением целостности.

Особенностью функционирования колосников обжиговых и агломерационных машин является то, что изъятие колосника из эксплуатации происходит задолго до нарушения его целостности, в частности, износ стенок, формирующих щель между колосниками, снижает производительность конвейерной машины в связи с потерей части сырых и обожженных окатышей, аглошихты и готового агломерата.

Одновременно, снижение высоты и ширины колосников приводит к уменьшению момента сопротивления его сечения. Динамика изменения размеров колосников и поперечного размера щели (зазора) между двумя смежными колосниками показана на рис. 1, что соответствует данным, представленным в таблице 1.

Нарушение целостности колосников или группы смежных колосников, образование «провала» на поверхности колосникового поля практически не происходит, поскольку необходимость в замене наступает до их разрушения. График, характеризующий общие потери (Q , %) сырых и обожженных окатышей, аглошихты и агломерата на конвейерных машинах при увеличении размера щели (зазора) показан на рис. 2.

Потеря годных окатышей и агломерата (+5 мм) приводит не только к снижению производительности конвейерной машины, но и к интенсивному износу газовоздушных трактов и мультициклонов.

На современных обжиговых и агломерационных фабриках имеется практика замены смежных колосников, ширина щели между которыми превышает 9...12 мм; замену производят,

несмотря на то, что ресурс колосников по потере их прочности далеко не исчерпан. Согласно производственным данным, при увеличении ширины щелей (зазоров) до 12...14 мм, потери материала в подпаллетное пространство возрастают более чем в 10 раз (см. рис. 2), при этом крупность частиц в потерях увеличивается от загрузочной части машины к разгрузочной.

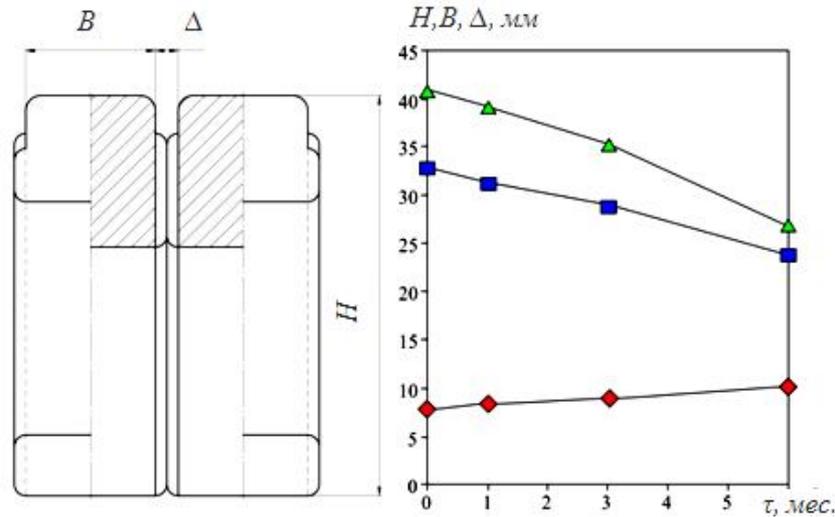


Рис. 1 – Изменение размеров колосника машины Лурги-552 при обжиге железорудных окатышей (диаметр 12...15 мм) со щелочным бентонитом ($t_{\text{обжига}} = 1280\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{колосника}} = 900\text{...}920\text{ }^{\circ}\text{C}$): —◆— Δ – изменение величины зазора между колосниками, —■— B – изменение ширины колосника без технологических выступов, —▲— H – изменение высоты колосника

Таблица 1

Изменение размеров колосника машины Лурги-552 в процессе эксплуатации при обжиге железорудных окатышей со щелочным бентонитом

Параметры колосника	Изменение размеров колосника в процессе эксплуатации, мм			
	Исходный	1 мес.	3 мес.	6 мес.
Ширина без технологических выступов (B)	33,0	31,5	29,0	24,0
Высота (H)	41,0	39,2	35,4	27,0
Зазор между парой колосников (Δ)	8,0	8,5	9,0	10,0

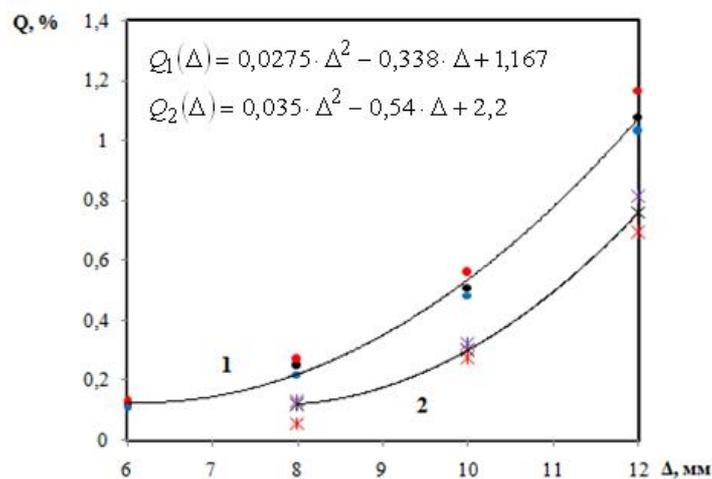


Рис. 2 – Потеря массы (Q) агломерата (1) и окатышей (2) в зависимости от ширины зазора между колосниками

Износ поверхности колосников агломерационных и обжиговых машин происходит в две стадии: под воздействием удара и проскальзывания загружаемых шихтовых материалов и только при скольжении спеченного агломерата и термоупрочненных окатышей при их разгрузке с паллет конвейерных машин. Условия наступления обоих видов износа и некоторые его закономерности рассмотрены нами на основе гипотезы о пропорциональности величины износа поверхности и боковых граней колосников при работе сил сухого трения.

Рассмотрена упрощенная методика прогнозирования величины износа поверхности колосников, разработанная на основе ряда допущений:

- нормальная реакция поверхности паллеты (N_n) на воздействие слоя шихты принимается постоянной, равной максимальному её значению при горизонтальном положении паллеты;
- слой шихты движется как твердое тело;
- скорость скольжения слоя шихты относительно поверхности паллеты принимается средней за время относительного движения слоя и равной линейной скорости паллеты;
- нормальная реакция боковых поверхностей колосников на воздействие слоя шихты (N_6) связана с нормальной реакцией поверхности паллеты линейной зависимостью вида

$$N_6 = K \cdot N_n \cdot H, \quad (1)$$

где K – коэффициент неравномерности износа колосника, $K < 1,0$.

При таких допущениях, удельная нормальная реакция паллеты на силу тяжести слоя:

$$N_n = \rho \cdot g \cdot h_{cl}, \quad \text{Н/м}^2, \quad (2)$$

где ρ – насыпная плотность слоя шихты, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h_{cl} – высота слоя, которая определяется по формуле:

$$h_{cl} = \frac{Q}{3600 \cdot B_n \cdot V_n \cdot \rho}, \quad \text{м}, \quad (3)$$

где Q – производительность конвейерной машины, (кг/ч);

B_n, V_n – ширина и линейная скорость движения паллет, (м; м/с).

Формирование высоты слоя h_{cl} на паллетах обжиговой и агломерационной машин зависит от способа их загрузки. На рис. 3 показаны основные способы загрузки конвейерных машин (обжиговых и агломерационных), а также зоны силовых взаимодействий шихты (гранулированной или окомкованной) с паллетами конвейерной машины.

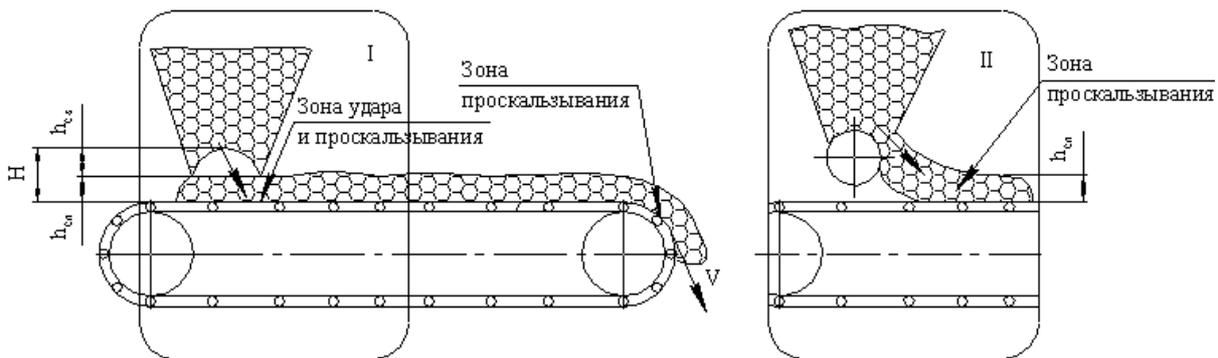


Рис. 3 – Способы загрузки конвейерных машин: I – прямая загрузка окатышей постели на обжиговой машине Лурги-552; II – загрузка шихты барабанным питателем на агломерационной машине АК-62,5; H – высота сброса материала на паллеты конвейерной машины; h_{cl} – высота слоя материала на паллете; h_{cv} – высота свода расхода при пульсирующем истечении шихты

При прямой загрузке конвейерной машины из накопительного бункера возможны два вида взаимодействий шихты с паллетами:

- если выполняется соотношение $D_r \geq 5d_{cp}$, характер истечения шихты гидравлический, износ паллет происходит силами сухого трения $F_\tau = 0,5 \cdot f \cdot \rho \cdot V_{ист}^2$ (Н/м²), где f – коэффициент

трения шихты о поверхность паллеты; $V_{ист}$ – скорость истечения, м/с; D_r – гидравлический диаметр отверстия бункера; d_{cp} – средний размер частиц шихты, м;

- если $D_r < 5d_{cp}$, истечение шихты пульсирующее с частотой, равной частоте разрушения свода расхода, на паллету оказывает силовое воздействие ударный импульс, величина которого равна $m \cdot V_{соуд}$, где m – масса порции материала, потерявшая контакт с материалом, находящимся в бункере в связи с образованием свода расхода, $V_{соуд}$ – скорость соударения массы m с поверхностью паллеты, м/с.

В первом случае удельная работа износа сил трения:

$$A_{\tau u} = F_{\tau} \cdot V_{ск} \cdot t_{ск}, \text{ Дж/м}^2, \quad (4)$$

где F_{τ} – удельная сила сухого трения, Н/м²;

$V_{ск}$ – скорость скольжения материала по паллете, принимается равной скорости паллеты, м/с;

$t_{ск}$ – время, в течение которого слой материала скользит по паллетам (за один период работы машины), это время установлено в процессе промышленного эксперимента как часть периода работы машины, с:

$$t_{ск} = k_t \cdot T_m, \text{ с}, \quad (5)$$

где k_t – часть времени, в течение которого слой материала скользит по поверхности паллет за один период работы машины;

T_m – период, за который приводной барабан машины делает один оборот, с.

Для обжиговой машины Лурги-552: $k_t = 0,30 \cdot 10^{-2}$; $T_m = 3840$ с.

Для агломерационной машины ОК-62,5: $k_t = 0,32 \cdot 10^{-2}$; $T_m = 2800$ с.

Зависимость величины износа от работы сил трения может быть записана в виде:

$$I_i = K_T \cdot A_{\tau}, \quad (6)$$

где K_T – комплексный коэффициент износостойкости стали, учитывающий износостойкость при температуре 293 К и её снижение при увеличении температуры поверхности колосника:

$$K_T = \left(K_N \cdot \frac{T}{293} \right)^n,$$

где K_N – коэффициент, характеризующий износостойкость стали (потери объема под воздействием работы износа); T – температура на поверхности колосников, К; n – показатель степени, полученный экспериментально в результате математической обработки производственных данных.

K_N и n установлены экспериментально для традиционных марок сталей 75X28H2СЛ и 40X24H12СЛ, применяемых для изготовления колосников обжиговых и агломерационных машин, а также стали 30X14Г8Ю2Л, микролегированной титаном и азотом, как альтернативной безникелевой экономнолегированной стали взамен дорогостоящих хромоникелевых:

75X28H2СЛ	$n = 1,23$	$K_N = 1,28 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Дж}$
40X24H12СЛ	$n = 1,21$	$K_N = 1,22 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Дж}$
30X14Г8Ю2Л (Ti, N)	$n = 1,18$	$K_N = 1,12 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Дж}$

Для второго случая, при пульсирующей подаче материала, интенсивный износ паллеты во времени работы машины (τ) происходит в случае, если энергия соударения превосходит некоторую критическую величину. Здесь можно допустить, что работа сил, возникающих при соударении, пропорциональна величине части энергии соударения, расходуемой на износ:

$$A_{\tau y} = \frac{K_a \cdot \rho \cdot Y \cdot H}{2} \cdot (V_{соуд}^2 - V_{кр}^2) \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \cdot \tau, \text{ Дж/м}^2, \quad (7)$$

где K_a – коэффициент, учитывающий абразивность материала шихты: для сырых окатышей $K_a = 1,1 \dots 1,2$; для аглошихты $K_a = 1,15 \dots 1,3$;

H – высота сброса материала на паллеты конвейерной машины, м;

ω – угловая скорость барабана конвейерной машины, с⁻¹;

τ – текущий период работы колосников, с;

$V_{соуд}$ – скорость соударения частиц материала с поверхности паллет определяется,

из физических представлений, как

$$V_{\text{суд}} = (2 \cdot g \cdot H)^{1/2}, \quad (8)$$

где H – расстояние от вершины свода расхода загрузочного бункера до поверхности паллеты по нормали к плоскости паллеты от точки, вертикальная составляющая скорости которой равна 0:

$$H = D_z \cdot \text{tg} \phi + h_{\text{сл}}, \text{ м}, \quad (9)$$

где D_z – гидравлический диаметр выпускного отверстия загрузочного бункера, м; ϕ – угол внутреннего трения шихты, град; $V_{\text{кр}}$ – критическая скорость соударения, то есть скорость, до достижения которой износ практически не происходит, м/с⁻¹. Критическая скорость может быть определена на основе классической теории упругости:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot \sigma_{\text{макс}}^{2.5}}{2 \cdot \sqrt{10}} \cdot \left(\frac{1}{\rho_m} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right), \text{ м/с}, \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{макс}}$ – предел допустимых напряжений окатышей или отдельных кусков шихты, МПа; ρ_m – плотность материала колосника, кг/м³; E_1, E_2 – модули упругости первого рода материала (окатышей, кусковой части шихты, паллеты), МПа; ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона материала (окатышей, агломерата, кусковой части шихты и паллеты).

Износ поверхности паллеты от сил ударного взаимодействия со слоем материала:

$$I_t = K_y \cdot A_{\tau y}, \text{ м}^3, \quad (11)$$

где K_y – коэффициент износа от ударных воздействий для стали. Коэффициент K_y установлен экспериментально и приведен в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициент износа стали от ударных воздействий сырых окатышей и аглошихты на машинах конвейерного типа

Сыпучий материал	Коэффициент $K_y \cdot 10^{-12}$, м ³ /Дж для колосников из стали		
	75X28H2СЛ	40X24H12СЛ	30X14Г8Ю2Л, микролегированная Ti и N
Окатыши	-	0,35...0,5	0,28...0,5
Аглошихта	0,65...0,8	-	0,36...0,38

Выводы

1. На основании проведенных теоретических исследований разработана инженерная методика расчета износа поверхности колосников, учитывающая особенности протекания технологического процесса, позволяющая с достаточной степенью точности прогнозировать необходимое время вывода спекательной (обжиговой) машины на планово-предупредительный ремонт с целью замены колосникового поля для предотвращения потерь шихтовых материалов и готового продукта в просыпь.

2. Определен коэффициент износа различных марок стали в условиях обжига окатышей и агломерата. Установлено, что коэффициент износа безникелевой экономнолегированной стали 30X14Г8Ю2Л, микролегированной титаном и азотом, ниже, чем в традиционно применяемых для изготовления колосников сталей 75X28H2СЛ и 40X24H12СЛ.

3. По результатам проведенных исследований, можно рекомендовать для изготовления колосников обжиговых и агломерационных машин сталь 30X14Г8Ю2Л, микролегированную титаном и азотом, взамен дорогостоящих хромоникелевых сталей.

Список использованных источников:

1. Панин В.Е. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, С.Г. Псахье // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, ч. 1. – С. 25-40.
2. Псахье С.Г. Многоуровневый подход к моделированию процессов деформации и разруше-

- ния / С.Г. Псахье // Вестник Российской академии наук. – 2013. – Т. 83. – № 5. – С. 398-406.
3. Панин В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. – Новосибирск : Наука, 1985. – 254 с.

Bibliography:

1. Panin V.E. Physical mesomechanics: achievements over two decades of development, problems and prospects / V.E. Panin, Y.V. Grinyayev, S.G. Psakhie // Physical mesomechanics. – 2004. – Vol. 7, h. 1. – P. 25-40. (Rus.)
2. Psakhie S.G. A layered approach to modeling of deformation and fracture / S.G. Psakhie // Bulletin of the Russian academy of sciences. – 2013. – Vol. 83. – № 5. – P. 398-406. (Rus.)
3. Panin V.E. Structural levels of deformation of solids / V.E. Panin, V.A. Likhachev, Y.V. Grinyayev. – Novosibirsk : Nauka, 1985. – 254 p. (Rus.)

Рецензент: В.И. Засельский
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «КНУ»

Статья поступила 22.10.2015

УДК 622.788:669.162

© Чупринов Е.В.¹, Лялюк В.П.², Журавлев Ф.М.³,
Ляхова И.А.⁴, Кассим Д.А.⁵

**РЕЖИМЫ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ АТМОСФЕРЕ
ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОБОЖЖЕННЫХ ОКАТЫШЕЙ
С ОСТАТОЧНЫМ УГЛЕРОДОМ ДЛЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

Опробована технологія получения обожженных окатышей с остаточным углеродом в готовом железорудном продукте. Показана эффективность использования более высокой скорости нагрева высушенных окатышей (500°С/мин. вместо 100°С/мин.) и скорости охлаждения обожженных окатышей (600°С/мин. вместо 100°С/мин.) в окислительной атмосфере.

Ключевые слова: железорудный продукт, окатыши, остаточный углерод, термоупрочнение, окислительная среда.

Чупринов Є.В., Лялюк В.П., Журавлев Ф.М., Ляхова І.А., Кассим Д.А. Режими термозміцнення в окисній атмосфері при одержанні обпалених обкотишів із залишковим вуглецем для доменної плавки. Випробувана технологія отримання обпалених обкотишів із залишковим вуглецем в готовому залізорудному продукті. Показана ефективність використання більш високої швидкості нагріву висушених обкотишів (500°С/хв. замість 100°С/хв.) і швидкості охолодження обпалених обкотишів (600°С/хв. замість 100°С/хв.) в окислювальній атмосфері.

Ключові слова: залізорудний продукт, обкотиші, залишковий вуглець, термозміцнення, окисна середина.

E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, F.M. Zhuravlev, I.A. Lyakhova, D.A. Kassim. Thermo-hardening modes in the oxidizing atmosphere of burnt pellets with residual carbon

¹ ассистент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, itchupa@gmail.com

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, lyalyuk.vitalij@mail.ru

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, zhfm@ukr.net

⁴ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог

⁵ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог