

*В.А. Быстров*

Сибирский государственный индустриальный университет

## УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗНОСА ЗАСЫПНОГО УСТРОЙСТВА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Аннотация.** Рассмотрены условия эксплуатации и высокотемпературного газоабразивного износа засыпного устройства доменной печи. Установлено, что основным видом износа является образование продувов на контактной поверхности большого конуса и чаши, которые приводят к остановке на ремонт всей доменной печи на 72 ч. Указаны мероприятия повышения срока службы засыпных устройств доменных печей.

**Ключевые слова:** засыпной аппарат доменной печи, газоабразивный износ, давление под колошником, продувы контактной поверхности.

## OPERATING CONDITIONS AND HIGH-TEMPERATURE WEAR OF CHARGING DEVICE OF BLAST FURNACE

**Abstract.** Operating conditions and high-temperature gas-and-abrasive wear of charging device of blast furnace are observed. It is established, that a principal view of the wear is the formation of holes on a contact surface of a big cone and a bowl, which lead to a stoppage on repair of all the blast furnace for 72 hours. The measures of increase of service life of charging devices of blast furnaces are set.

**Keywords:** charging equipment of blast furnace, gas-and-abrasive wear, pressure under the throat, holes of contact surface.

Многие детали металлургического оборудования работают в тяжелых условиях высокотемпературного абразивного и газоабразивного износа. К их числу можно отнести детали агломерационных машин, детали засыпного устройства доменных печей (ЗУДП), валки прокатных станов горячего металла и многие другие. Диапазон рабочих температур перечисленных деталей весьма широк. Так например, детали ЗУДП, соприкасаясь с раскаленным ( $350 \div 550$  °С) колошниковым газом, могут нагреваться до 250 °С, а контактирующая поверхность в микрообъеме до 450 °С [1 – 3].

Срок службы деталей двухконусного засыпного устройства доменной печи на различных металлургических комбинатах России колеблется в широких пределах: от 8 до 18 месяцев. Затраты на их замену в зависимости от мощности доменной печи составляют от 2 до 6 млн. руб. Длительность замены ЗУДП (капитальный ремонт 3-го разряда) доходит до 72 ч. Следовательно, каждая доменная печь ежегодно недопроизводит порядка 8600 т чугуна и теряет до 160 млн. руб. [4]. Поэтому работе ЗУДП всегда уделялось пристальное внимание.

Проблемы износа и упрочнения деталей ЗУДП изучали многие специалисты. Результаты их исследований представлены в работах [3 – 7], а также в диссертационной работе В.А. Быстрова<sup>1</sup>. Выводы большинства авторов работ сходятся в том, что определяющим срок

службы ЗУДП является состояние контактной поверхности большого конуса и чаши, а также малого конуса и воронки. Износ контактных поверхностей (газоабразивный износ) находится в прямой зависимости от количества пыли, содержащейся в колошниковом газе, скорости истечения газа и его температуры, твердости абразивных частиц и в обратной – от твердости материала контактной поверхности. Повышению выноса пыли способствуют снижение давления под колошником, неровный ход доменной печи, загрузка мелких фракций шихты, прочность агломерата и кокса, форма и твердость абразивных частиц.

Основными усредненными условиями эксплуатации ЗУДП России и стран СНГ (по результатам анализа работы доменных печей) являются [4, 7]:

– давление под колошником – 1,5 – 2,5 ати; на современных крупных доменных печах – 2,5 – 3,0 ати; на проектируемых – до 3,5 ати;

– температура колошникового газа – 280 – 360 °С, но при нарушении хода доменной печи необходимо предусматривать возможный рост до 800 °С;

– вынос колошниковой пыли, который в среднем составляет 25 – 50 кг/т чугуна, но при повышенном содержании мелочи в шихте может доходить до 150 кг/т;

– перепад температур по периметру ЗУДП, составляющий в среднем 60 – 80 °С, но при нарушении хода доменной печи может доходить до 250 °С;

– состав загружаемой шихты и ее состояние, например, агломерат может быть горячим, холодным и мокрым;

<sup>1</sup> Быстров В.А. Основы электрошлаковых технологий упрочнения композиционными сплавами деталей, работающих при высокотемпературном износе. Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Барнаул, 2003. – 34 с.

– количество пропускаемой засыпным аппаратом шихты – 200 – 300 т/ч;

– количество открываний и закрываний конуса – в среднем 2 – 3 в минуту.

Исследованиями А.Ф. Терещенко и Ю.А. Юзвенко определена изнашивающая способность колошниковой пыли различных заводов [6]. Наиболее абразивной оказалась фракция 0,1 мм, с которой и проводили исследования. Установлено, что повышение температуры колошникового газа приводит к увеличению скорости газа, проходящего через щель, что повышает износ контактной поверхности конус – чаша, а увеличение температуры до 400 – 500 °С создает условия для развития процессов ползучести.

Установлены два вида износа ЗУДП: износ контактного пояса конуса и чаши; износ боковой рабочей поверхности (см. рисунок).

Контактный пояс сопряжения конус – чаша подвержен газоабразивному износу (газоабразивная эрозия запыленным колошниковым газом). Износ боковой поверхности происходит в результате абразивного износа под воздействием ссыпавшихся материалов шихты и зависит от количества шихтовых материалов, загружаемых в доменную печь, абразивных свойств этих материалов, скорости и траектории падения шихты, размеров отдельных кусков, а также от температуры нагрева конуса. Износ контактного пояса является наиболее распространенной причиной выхода из строя ЗУДП.

Для выхода из строя ЗУДП достаточно наличие небольших неплотностей в области сопряжения конуса и чаши, так как возникающие из-за разности давления запыленного колошникового газа газовые потоки, устремляясь в эти щели, прогрессивно увеличивают неплотности и очень быстро превращают их в продувы (поз. б на рисунке). В случае неплотного запирания между большим конусом и чашей образуется щель размерами  $a_1(a_2) \cdot b_1(b_2) \cdot L_1(L_2)$ , где индекс «1» характеризует вход, а индекс «2» – выход из щели. С учетом потерь давления газа, изменения скорости истечения газа и при наличии перепада давления в колошниковом и межконусном

пространства запыленный колошниковый газ устремляется в щель и совершает в этом месте продувы.

Износ контактной поверхности будет тем больше, чем выше будут скорость истечения газа, расход газа в единицу времени, его температура, запыленность, физико-механические свойства абразивных частиц колошниковой пыли.

Д.А. Сторожик и И.В. Крагельский в работах [3, 5] предложили качественные и количественные зависимости интенсивности износа ( $I_y$  и  $I_n$ ) и количества циклов ( $N_y$  и  $N_n$ ) воздействия абразивных частиц, вызывающих износ. При малых углах атаки касательная составляющая скорости газового потока будет велика, и резание не будет происходить не только при внедрении абразивной частицы в изнашиваемую поверхность, но и при выталкивании ее из металла упругими силами.

Расход газа  $G_r$ , кг/с, определяется по формуле

$$G_r = \sqrt{\frac{g\rho_r p_r \delta^2 b^2 (\tau^2 - 1)}{\frac{3}{4} + \ln \tau^2 + \varepsilon_r + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{1}{\delta} + \frac{1}{8 \operatorname{tg} \alpha} \right)}}, \quad (1)$$

где  $\rho_r$  – плотность газа ( $\rho_r = 1,3 \text{ кг/м}^3$  при  $T = 450 \text{ °С}$ );  $p_r = 2,5 - 3 \text{ ати}$  – давление газа;  $\tau = 20 \text{ мин}$  – время истечения газа (время между двумя открываниями);  $\lambda$  – коэффициент трения (является функцией числа Рейнольдса  $Re$ );  $\varepsilon_r$  – коэффициент сопротивления газа на выходе из щели;  $\delta$  – величина зазора щели мм;  $b$  – ширина щели мм;  $\alpha = 7^\circ$  – угол захода газа в щель.

Скорость соударения абразивной частицы ( $v_{\text{ч}}$ ) находится по формуле

$$v_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{\pi \eta \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_y}{\rho_{\text{а.ч}}} \left[ \frac{(\pi \eta \sigma_y)^2}{10} + \frac{3r_n^2}{4R^2} \right]}, \quad (2)$$

здесь  $\eta$  – упругая постоянная соприкасающихся тел, определяемая из соотношения  $\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}$ ;  $\mu_1, \mu_2$

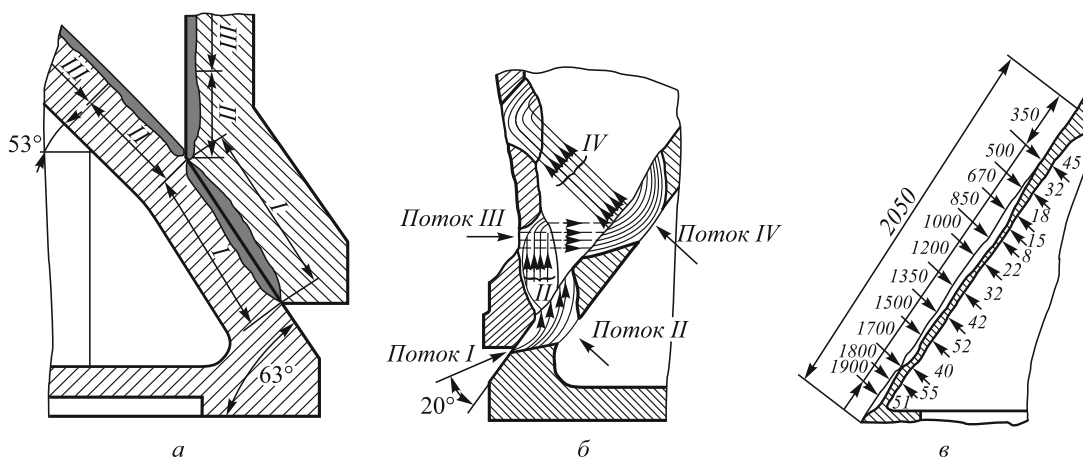


Схема наплавки (а), износа контактного пояса (б) и боковой поверхности (в) ЗУДП

и  $E_1, E_2$  – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости частицы (1) и детали (2);  $\rho_{a.ч}$  – плотность абразивной частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – радиус абразивной частицы, мм;  $r_n^2 = 2Rh_n$  – радиус пятна при соударении частицы с телом конуса;  $h_n$  – глубина внедрения частицы, мм;  $\sigma_y = (1 - 4,7)\sigma_T$  – параметр, соответствующий переходу твердого тела из упругого в пластическое состояние;  $\sigma_T$  – предел текучести максимально упрочненного материала.

Интенсивность изнашивания при упругом соударении ( $I_y$ ), выраженная потерей массы тела за единицу времени, находится по формуле

$$I_y = kG_r w \tau \frac{(v_{\text{ч}} \sin \alpha - v_{\text{кр}})^2}{2gK}, \quad (3)$$

где  $k$  – запыленность колошниковога газа (обычно  $k = 0,15 - 0,25$ );  $w$  – доля частиц, принимающих участие в соударении (при завихрении газа и упругом соударении  $w = 1$ );  $v_{\text{кр}}$  – критическая скорость соударения абразивных частиц, определяемая как

$$v_{\text{кр}} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{10}} \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{\rho_1} \eta^2}.$$

Интенсивность изнашивания при пластическом соударении ( $I_n$ ), когда твердость абразивных частиц выше твердости истираемого тела ( $H_a \geq H_m$ ) и эти частицы вызывают пластический и режущий износ, определяется по формуле

$$I_n = \frac{kG_r w}{2gf} \left[ v_r^2 \cos^2 \alpha - C (v_r \sin \alpha - v_{\text{кр}})^{3/2} \right]; \quad (4)$$

здесь  $C$  – постоянная, характеризующая упругопластические свойства материала,  $C = 0,262\pi\sigma_y^2 \eta^2 \sqrt{\frac{\sigma_y}{\rho_1}}$ ;

$f$  – коэффициент режущего износа, характеризующий сопротивление материала срезу и представляющий собой энергию, необходимую для среза единицы массы или объема металла.

И.В. Крагельский [5] предложил следующие зависимости интенсивности износа ( $I_y$  и  $I_n$ ) и количества циклов ( $N_y$  и  $N_n$ ) воздействия абразивных частиц, вызывающих износ:

для числа циклов до разрушения при упругом соударении

$$N_y = \frac{3\pi\Theta\sigma_0}{(4kfRh_n)^{1/2}}; \quad (5)$$

для числа циклов пластического контакта при соударении

$$N_n = \left( e_0 0,5 \sqrt{\frac{1-kf}{1+kf}} \right)^t \left( \frac{R}{h_n} \right)^{t/2}; \quad (6)$$

для максимальной глубины внедрения частицы с радиусом  $R$

$$h_{\text{max}} = P(1,25\rho_r \Theta v_0^2 \sin 2\alpha_0)^{2/5}; \quad (7)$$

для интенсивности износа при упругом соударении абразивных частиц

$$I_y = K_T \rho_m \rho_{\text{ч}}^{1/5} (\text{ctg} \alpha_0 - f) (v_0 \sin \alpha_0)^{2+\frac{2}{5t}} \times \left( \frac{kf}{\sigma_0} \right)^t \left( \frac{4}{3} \pi \Theta \right)^{\frac{4}{5t-1}}; \quad (8)$$

для интенсивности износа при пластическом контакте

$$I_n = \left[ 1,75\rho_m \rho_{\text{ч}}^{3/4} \frac{1+kf}{e_0^2} (1-kf) \right] \times \left( \frac{v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{C\sigma_t}} \right)^{7/2} (\text{ctg} \alpha_0 - f); \quad (9)$$

здесь  $\rho_m$  и  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность изнашиваемого материала и абразивной частицы;  $e_0$  – относительная деформация;  $K_T$  – коэффициент твердости материала.

Расчеты, выполненные по формулам (5) – (9), показали, что число циклов упругих столкновений до разрушения зависит от твердости и межмолекулярного сцепления материала. Так например, при  $H_m$  до 10 ГПа имеем  $N_{\text{ц}} = 2 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^2$ , а при возрастании микротвердости материала до  $H_m = 15 - 18$  ГПа значение  $N_{\text{ц}}$  возрастает до  $3 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^5$ . Число циклов при пластическом контакте (при тех же изменениях твердости) изменяется от 5 – 10 до 600 – 4000 соответственно, т.е. при пластическом контакте число циклов до разрушения уменьшилось в 100 раз по сравнению с числом циклов при упругом столкновении, что еще раз подтверждает ведущую роль твердых частиц (см. сноску 1).

Анализ данных по условиям работы и стойкости ЗУДП, приведенных в исследованиях [2 – 6], позволил сделать следующие выводы:

- с повышением среднего избыточного давления газа под колошником вынос колошниковой пыли уменьшается; так например, при давлении 0,9 – 1,1 ати вынос пыли составил 70 – 100, а при 1,7 – 2,2 ати – 10 – 30 кг/т чугуна;

- с возрастанием среднего избыточного давления газа под колошником средняя температура колошниковога газа падает, например, при давлении 0,9 – 1,1 ати температура колошниковога газа составила 350 – 400 °С, а при давлении 1,7 – 2,2 ати – 240 – 300 °С;

- с ростом средней температуры колошниковога газа срок службы ЗУДП снижается; так, при 240 – 260 °С средний срок службы составляет 13 – 14 месяцев, а при 450 – 480 °С – 9 – 11 месяцев;

– с увеличением выноса колошниковой пыли срок службы ЗУДП уменьшается, например, при среднем выносе пыли 20 – 30 кг/т средний срок службы составлял 15 – 17 месяцев, а при 80 – 90 кг/т – 9 – 11 месяцев.

Современные требования к работе доменной печи заключаются в том, чтобы повысить температуру дутья, давление под колошником и полнее использовать мелкие фракции шихты, но при этом добиваться отсева слишком мелких фракций (до 2,5 мм). Соблюдение этих требований приведет к росту производительности доменных печей на 25 – 30 %, но при этом возможно снижение срока службы ЗУДП до 8 месяцев, что недопустимо.

Преждевременный выход из строя ЗУДП вследствие износа контактной поверхности конуса и чаши и образования продувов приводит к остановке всей доменной печи на ремонт 3-го разряда [1 – 4]. По данным некоторых металлургических комбинатов стоимость замены ЗУДП достигла 200 тыс. руб в 1991 г. (ориентировочно 12 млн. руб по ценам 2012 г.) В настоящее время намечены следующие пути повышения срока службы ЗУДП [8]:

- совершенствование конструкции по двум основным направлениям – снятие функций шлюзового затвора с большого конуса, которые будут выполнять специальные лотки, течки, клапаны; замены большого конуса другим исполнительным механизмом, в связи с чем шлюзование шихты производится за счет специальных устройств, а роль распределителя шихты выполняет поворотный лоток как это предусмотрено в конструкции засыпного аппарата фирмы «Пауль Вюрт» [8];

- улучшение технологического процесса доменной плавки (ровный ход доменной печи, повышение качества агломерата и других шихтовых материалов и т.п.);

- наплавка рабочих поверхностей конусов и чаш износостойкими сплавами, стойкими при интенсификации доменного процесса (дутье, давление).

При наплавке деталей ЗУДП исходят из определенных соображений: контактные поверхности конусов и чаш, подверженные высокотемпературному газообразующему износу колошниковым газом при избыточном давлении 3,5 атм, склонны к образованию продувов (см. поз. б рисунка) [8], следовательно, требуют более пристального внимания при выборе наплавленного металла.

При упрочнении конусов и чаш ЗУДП широко применяют автоматическую двухдуговую наплавку самозащитными порошковыми лентами. Контактные поверхности конусов и чаш наплавляют порошковой проволокой ПЛ-Нп-500Х40Н40С2РЦ (ПЛ-АН 111) с никелевой оболочкой. Применение этой порошковой ленты наряду с совершенствованием конструкции ЗУДП и улучшением технологии доменной плавки позволило повысить срок службы загрузочного устройства до 13 месяцев. Однако порошковая лента имеет нестабильные сварочно-технологические свойства и высокую стоимость (580 – 620 руб/кг). Существенный

ее недостаток – образование «рыхлостей» в наплавленном слое за счет выделения свободного углерода. Этим недостатком лишена, как считают авторы работ [4, 6], порошковая лента ПЛ-Нп-400Х20Б7М6Н5В2Ф (ПЛ-АН 179) с оболочкой из низкоуглеродистой стали. Для применяемых наплавочных лент период от начала устойчивого продува до полной замены ЗУДП следующий: для ленты ПЛ-АН 101 – 1,5 – 2 месяца; ПЛ-АН 111 – 2 – 3 месяца; ПЛ-АН 179 – 4 – 5 месяцев.

Боковую поверхность конусов и чаш наплавляют порошковой лентой ПЛ-Нп-120Х22Р3Г2С (ПЛ-АН 171). Промышленные испытания показали, что стойкость деталей ЗУДП, наплавленных порошковой лентой ПЛ-АН 171, в 1,5 – 2 раза выше, чем наплавленных лентой ПЛ-АН 101.

В работах [3 – 6] приведены сравнительные исследования двух вариантов технологии наплавки конусов и чаш ЗУДП, дана оценка однородности износа, внесены необходимые коррективы в принятый на заводе технологический процесс, что повысило газообразующую износостойкость сплава в 1,5 раза. Как показали металлографические исследования, наплавленный по откорректированной технологии металл имеет меньше графитных включений, а карбидная фаза более дисперсная. При сопоставлении данных металлографических исследований с топографией износа наплавленного слоя была замечена определенная взаимосвязь между размером, пространственной ориентацией кристаллитов, концентрацией износостойкой фазы (например, карбидов), содержанием свободного углерода и величиной износа. Особенно интенсифицирует износ графитизация сплава. Механизм графитизации никелькарбидохромового сплава, содержащего 5 – 6 % С; 30 – 35 % Cr; 30 – 35 % Ni; 0,2 % В; 2,0 % Si (ПЛ-АН 111), изучен недостаточно, однако замечено, что образование свободного углерода в виде прожилок графита происходит в большей мере при увеличении времени пребывания сварочной ванны в жидком состоянии, уменьшении скорости охлаждения при кристаллизации и степени растворения износостойких твердых частиц в жидком наплавленном металле.

Интенсивный газообразующий износ уплотняющих заслонок и клапанов ЗУДП удастся снизить за счет применения самозащитной порошковой проволоки с наплавленным металлом состава 5,5 % С; 0,7 % Si; 22 % Cr; 0,8 % Mn; 7,0 % Nb; 2,0 % W; 1,0 % V; остальное – Fe. По структуре наплавленный металл представляет собой заэвтектический высокохромистый чугун, относительная износостойкость оценивалась по следующему уравнению (см. сноску 1):

$$\epsilon_{\text{отн}} = \frac{W_{\text{м.э}} \rho_0}{W_{\text{м.о}} \rho_3}, \quad (10)$$

где  $W_{\text{м.э}}$  и  $W_{\text{м.о}}$  – потери массы эталона и образца;  $\rho_3$  и  $\rho_0$  – плотность эталона и образца.



Высокая стойкость против газоабразивного износа достигнута благодаря тому, что ниобий и молибден способствовали образованию мелких вторичных карбидов, которые выделялись рядом с первичными гексагональными карбидами типа  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  и  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  в аустенитной матрице, упрочненной элементами Cr, Mo, W и V. Таким образом, можно выделить следующие способы наплавки деталей ЗУДП [8]:

- кольцевая наплавка проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой под слоем флюса;
- порошковой лентой открытой дугой строчками;
- порошковой проволокой (плющенкой) открытой дугой строчками с дополнительными поперечными колебаниями электрода;
- печная наплавка композиционными сплавами на основе релита с мельхиоровой матрицей с использованием автовакуумного процесса;

– электрошлаковая наплавка плавящимися электродами с дозированной подачей твердых частиц в шлаковую ванну для образования композиционного сплава.

Из легированных сплавов наиболее перспективными представляются новые высокоизносостойкие материалы типа высокохромистых чугунов. Для расширения температурных интервалов, в которых сплавы проявляют свои износостойкие свойства, для повышения твердости при более высоких температурах требуется дополнительное легирование такими элементами, как Nb, Mo, V, способствующее образованию твердых растворов и карбидной эвтектики.

Таким образом, применение твердых материалов в виде композиционных сплавов, состоящих из спеченных твердых сплавов, микротвердость которых выше 20 – 25 ГПа, а также пластичной и износостойкой матрицы с микротвердостью  $H_{\mu} = 6,5$  ГПа, позволит повысить срок службы ЗУДП до 24 – 36 месяцев.

Спеченные твердые сплавы обладают рядом весьма ценных свойств: высокой твердостью – 86 – 92 HRA; высокой микротвердостью –  $H_{\mu} = 18,5 - 24,5$  ГПа; мо-

дуль упругости составляет 445 ГПа; высоким пределом прочности при сжатии – до  $\sigma_{сж} = 6,0$  ГПа, достаточной прочностью на изгиб ( $\sigma_{изг} = 1,2 - 2,5$  ГПа) и на растяжение ( $\sigma_{в} = 0,5\sigma_{изг}$ ). И самое благоприятное свойство среди известных карбидов – высокая ударная вязкость (0,8 – 1,2 МДж/м<sup>2</sup>). Способность спеченных твердых сплавов сохранять указанные свойства при повышенных температурах является чрезвычайно важной характеристикой при высокотемпературном абразивном износе.

**Выводы.** Разработанными композиционными сплавами и способами ЭШН на ряде металлургических комбинатов были наплавлены различные быстроизнашивающиеся детали. Срок службы наплавленных деталей увеличился в 3 – 4 раза.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энциклопедический словарь по металлургии. Т. 1. / Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 468 с.
2. Вегман Е.Ф. Краткий справочник доменщика. – М.: Металлургия, 1981. – 240 с.
3. Сторожик Д.А., Тылкин М.А., Гребенник В.М. Изготовление и эксплуатация ЗУДП. – М.: Металлургия, 1973. – 319 с.
4. Шимановский В.П., Ворончук А.П. – В кн.: Оборудование и материалы для наплавки. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1990. С. 71. – 73.
5. Крагельский Б.К., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А., Ворончук А.П. – В кн.: Теоретическая и технологическая основы наплавки. Наплавка деталей оборудования металлургии. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1980. С. 86 – 88.
7. Быстров В.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2001. № 10. С. 31 – 38.
8. Быстров В.А., Грекова Н.Ю., Трегубова О.Г. Инновации, качество и конкурентоспособность упрочнения металлургического оборудования / Под общ. ред. О.И. Кирикова. Кн. 12. – Воронеж: изд. ВГПУ, 2007. – 653 с.

© 2013 г. В.А. Быстров  
Поступила 21 мая 2013 г.