

В.А. Быстров

Сибирский государственный индустриальный университет

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА РОТОРНОЙ ДРОБИЛКИ АГЛОМЕРАТА

Аннотация. Основным фактором высокотемпературного абразивного износа бил дробилки является геометрический, характеризуемый отношением глубины внедрения h_b к радиусу абразивной частицы r_a , т.е. h_b/r_a . Вторым фактором является физико-механический, характеризуемый отношением тангенциальной прочности τ_a молекулярной связи к пределу текучести σ_T материала била, т.е. τ_a/σ_T . Для достижения абразивного износа без микрорезания сумма этих отношений должна удовлетворять условию: $h_b/r_a + \tau_a/\sigma_T \leq 0,5$.

Ключевые слова: высокотемпературный абразивный износ, роторная дробилка агломерата, износостойкость.

BASIS OF DESIGN OF A HIGH-TEMPERATURE ABRASIVE WEAR OF A ROTARY CRUSHER OF AGGLOMERATE

Abstract. The main factor of a high-temperature abrasive wear of a rotary crusher is the geometrical one, which is characterized by the depth of penetration ratio h_b to the radius of an abrasive particle r_a , i.e. h_b/r_a . The second factor is the physical-mechanical one, which is characterized by the ratio of tangential strength of molecular bond τ_a to the material yield point σ_T , i.e., τ_a/σ_T . For the support of an abrasive wear without microcutting the sum of the ratio has to satisfy the following condition $h_b/r_a + \tau_a/\sigma_T \leq 0,5$.

Keywords: high-temperature abrasive wear, rotary crusher of agglomerate, wear resistance.

Эксплуатационные показатели работы металлургических агрегатов во многом зависят от способности материала деталей сопротивляться воздействию абразива и окислительной среды при высокотемпературном абразивном износе. Детали оборудования, ответственные за производительный процесс металлургических агрегатов, во время работы нагреваются, изнашиваются, теряют свои первоначальные свойства и с течением времени выходят из строя. Это приводит к дополнительным остановкам на ремонт металлургических агрегатов, снижению производительности, недополучению запланированного объема товарной продукции, а следовательно, к потере прибыли [1 – 3]. Диапазон рабочих температур таких деталей весьма широк. Так например, детали дробильного агломерационного оборудования, соприкасаясь с раскаленным агломератом, температура которого в центре аглоспека достигает $900 \div 1100$ °С, могут нагреваться до 600 °С, а контактирующая поверхность в микрообъеме до 800 °С [1, 2, 4, 5, см. также работы И.К. Борискина¹ и В.А. Быстрова²].

Работ в области изучения высокотемпературного абразивного износа деталей металлургического оборудования относительно немного. Условия эксплуатации

и износ агломерационного оборудования рассмотрены в диссертационных исследованиях упомянутых выше авторов, а также в работах [4, 5].

Как правило, износ деталей агломерационного оборудования происходит в результате истирания рабочих органов – бил роторных дробилок – раскаленным агломератом, обладающим высокими абразивными свойствами. Основным видом высокотемпературного износа бил является ударное действие горячего аглоспека, вызывающее упругий вид контакта абразивных частиц и износ истираемой поверхности в результате многократного удара, резания и наклепа, которые вызывают усталость поверхностного слоя металла и вырывание его в виде частичек. Износостойкость материала бил измеряется массой передробленного агломерата с определенной, принятой за эталон абразивностью, отнесенной к потерянной массе образца детали, износ которого получен в условиях, аналогичных для определения абразивности (см. сноски 1, 2).

Абразивность агломерата определяется состоянием аглоспека, его текстурой, минеральным составом и микротвердостью H_{μ} минеральных включений агломерата. Текстурные исследования агломерата показали, что в его состав могут входить до 1 – 2 % зерна гранита с $H_{\mu} = 6 – 8$ ГПа; до 12 % стекла с $H_{\mu} = 7 – 10$ ГПа; возможно образование незначительного количества (до 0,5 – 0,8 %) карбидов кремния с $H_{\mu} = 28 – 30$ ГПа при восстановлении коксом кварцевого песка; основой являются магнетит (до 50 %) с $H_{\mu} = 1,3$ ГПа и ге-

¹ Борискин И.К. Разработка основ технологии и внедрения комплекса интенсивных способов и устройств получения стабилизированного агломерата. Автореф. дис. д.т.н. М., 1987. – 41 с.

² Быстров В.А. Основы электрошлаковых технологий упрочнения композиционными сплавами деталей, работающих при высокотемпературном износе. Автореф. дис. д.т.н. Барнаул, 2003. – 47 с.

матит (до 12 %) с $H_{\mu} = 1,2 - 1,4$ ГПа, а также цементит и карбиды марганца (до 0,5 - 1,2 %) с $H_{\mu} = 7,7$ ГПа (см. сноски 1, 2).

Роторная дробилка горячего агломерата предназначена для его разрушения ударным способом и получения кусков нужной фракции (рис. 1, а). Дробилка состоит из ротора с жестко закрепленными на нем билами таврового сечения серповидной формы, отражательного экрана, способствующего додроблению крупных кусков агломерата и окончательной стабилизации по фракциям и механической прочности [4, 5]. Оптимальными параметрами дробилки являются угол наклона срезающего ножа к горизонтали $\varphi_6 = 60 - 70^\circ$, соответствующий углу наклона лотка φ_n , по которому подается плита горячего аглоспека, высота зуба (била), равная 350 мм; диаметр ротора $D_p = 1300$ мм [5]. Ротор представляет собой вал, вращающийся со скоростью 250 - 300 об/мин, на котором закреплены 21 четырехзубовых звездочек массой 485 кг, изготовленных, например, из стали 70ХЛ, либо из стали 110Г13Л.

Процесс разрушения при этом следующий: внешние силы удара вызывают накопление внутренней энергии упругих деформаций, которые, достигнув критической величины в каком-либо дефектном месте куска, либо имеющихся термических напряжений, превысят предел прочности, начнется развитие трещины, сопровождающееся перераспределением энергии упругих деформаций. Часть этой энергии превращается в энергию вновь образованного объема (полезную энергию дробления), остальная часть уходит на упругие деформации сжатия, вызывая разупрочнение поверхностного макрослоя била, переходит в энергию движения и трения абразивных частиц, рассеивается в виде тепла, а также расходуется на другие виды энергии [см. сноски 1, 2 и работы 4, 5]. Серповидная форма бил таврового сечения нужна для концентрации ударных нагрузок на определенной части аглоспека. Удар по агломерату наносится верхней частью била - «клювом», чтобы отделить часть аглоспека и тавровым сечением била разделить этот

кусок как минимум на 4 части, что дает возможность первоначально получать куски агломерата сечением 40×30 мм. По мере износа таврового сечения (рис. 1, б) рабочая часть била становится равновыпуклой и разделения отсеченного куска аглоспека уже не происходит, что приводит к нарушению стабилизации гранулометрического состава агломерата.

При уменьшении коэффициента закругленности K_3 носка бил (износ происходит за 28 суток, рис. 1, б) до $K_3 = 1 - 7,9\rho$, где $\rho = r_6/D_p$ (здесь $r_6 = 60$ мм - радиус закругления носка била), происходит снижение производительности агломашины. При начальном значении $K_3 = 0,64$ износ била на 50 мм приведет к уменьшению значения K_3 до 0,60. Экспериментально установлено [5], что уменьшение коэффициента закругленности на 0,01 вызывает снижение производительности агломашины на 10 %; таким образом, при износе била на 50 мм производительность дробления может снизиться на 40 %.

Но, как считает автор разработанной роторной дробилки [см. сноску 1], снижение эффективности дробления от максимальной величины на 40 % при тех же числах оборотов ротора не грозит значительным снижением производительности агломашины, хотя качество дробления будет падать, так как уменьшается ударный импульс и увеличивается выход фракции более 80 мм на 35 % [5].

Для определения максимального усилия в момент удара била звездочки о плиту аглоспека используют уравнение импульса силы (см. сноску 2):

$$P\Delta t = m_6 V_6^2 - m_a V_a^2, \quad (1)$$

где P - максимальное усилие при ударе била ротора, необходимое для скалывания куска горячего аглоспека; Δt - время соударения (контактирования) била с плитой аглоспека; $m_6 = 90$ кг и $V_6 = 15 - 25$ м/с - соответственно масса била и линейная скорость его вращения; $m_a = 198$ кг и $V_a = 5 \div 7$ м/с - соответственно масса, приходящаяся на одну звездочку, и скорость движения горячего аглоспека до удара.

Для случая упругого соударения сферического била ротора с плоской плитой аглоспека время соударения Δt может быть выражено так (см. сноску 1):

$$\Delta t = 4,53 \left[\frac{(\delta_6 - \delta_a) m_a}{\sqrt{R_6 V_6}} \right]^{2/5}; \quad (2)$$

где $\delta = (1 - \mu^2)/E$ - постоянная материала по теории контакта Герца; индексы «а» и «б» относятся к горячему агломерату и материалу била; $\mu_a = 0,38$ и $E_a = 11,4 \cdot 10^4$ МПа - коэффициент Пуассона и модуль упругости для горячего агломерата.

Расчеты по формуле (2) [5] показали, что при скалывании куска горячего аглоспека высотой $h_a = 0,45$ м ($m_a = 198$ кг, $V_6 = 15$ м/с) для материала била, например

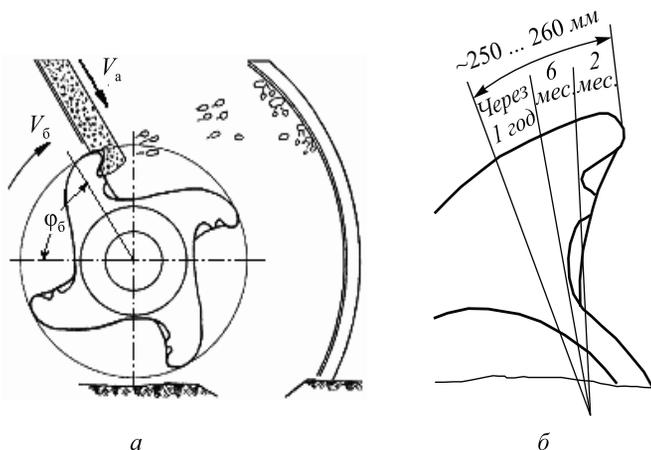


Рис. 1. Схема работы ротора дробилки (а) и износа била ротора (б)

стали 70ХЛ ($\mu_6 = 0,25$, $E_6 = 21,5 \cdot 10^4$ МПа), и для материала била, упрочненного твердым сплавом, например ТН 20 ($\mu_6 = 0,212$, $E_6 = 41,5 \cdot 10^4$ МПа), время соударения составит: $\Delta t_{70ХЛ} = 0,034$ с и $\Delta t_{ТН 20} = 0,019$ с.

Следовательно, за счет разницы физико-механических свойств материалов била время соударения аглоспека с биллом, армированным твердым сплавом ТН 20 на основе карбида титана, почти в два раза меньше времени соударения с биллом из стали 70ХЛ.

Таким образом, расчеты показывают, что для уменьшения величины Δt материал била должен быть как можно более жестким, т.е. с минимальным значением δ_6 , а агломерат – с максимальным δ_a . Поэтому разрушение ведут с горячей стороны аглоспека, причем лицевую сторону била, контактирующую с раскаленным аглоспекком, необходимо армировать спеченным твердым сплавом на основе карбидов титана типа ТН 20. Для определения площади поверхности била ротора, армированной твердым сплавом, рассмотрим, какая часть h_6 била проникает в раскаленный аглоспек, подлежащий скалыванию (рабочая зона била звездочки ротора), используя выражение (см. сноску 1, 2):

$$h_6 = \frac{V_a}{V_6} \left(\frac{\pi D_p}{z} - b_3 - h_a \right); V_a = \sqrt{2gh_n(1 - f_a \operatorname{tg} \varphi_n)}, \quad (3)$$

где $z = 4$ – число бил звездочки ротора; g – ускорение свободного падения; $b_3 = 0,02$ м – величина зазора между биллом и плоскостью аглоспека за счет неровности агломерата; $h_n = 5$ м – высота падения аглоспека по вертикали; $f_a = 0,45 - 0,55$ – коэффициент трения агломерата по стали.

Из расчетов по выражениям (3) следует, что если $h_a = 0,45$ м, $V_6 = 15$ м/с, $V_a = 7$ м/с, то $h_6 = 0,26$ м.

Число N_c соударений била с плитой горячего аглоспека до полного размалывания аглопирога рассчитывается из выражения (см. сноску 1, 2)

$$N_c = \frac{l_{п.а} z V_6}{\pi D_p V_a}, \quad (4)$$

где $l_{п.а} = 1,5 - 2,2$ м – длина пирога горячего аглоспека в зависимости от конструкции агломашины.

Выполненные расчеты по этой формуле [5], показали, что если $h_a = 0,45$ м, $V_6 = 15$ м/с, $V_a = 7$ м/с, $l_{п.а} = 1,5$ м, то $N_c = 3,15$ ударов на пирог аглоспека.

Анализ формул (2) – (4) показывает, что по мере износа била ротора диаметр последнего уменьшается, а это приводит к увеличению времени контактирования била с раскаленным аглоспекком и росту числа их соударений при размалывании. Таким образом, уменьшение диаметра ротора ввиду износа била провоцирует еще больший его износ.

Авторы работ [3 – 5] считают, что применительно к агломерационному оборудованию основным является

высокотемпературный абразивный износ, при котором изнашивающее воздействие производят минералы: твердость их выше, чем у металла, поэтому износ происходит в виде царапания и резания последнего. Проведенные исследования показали, что в спекаемом агломерате возможно образование карбидов кремния SiC за счет восстановления и образования карбида кремния из оксида SiO₂ (см. сноски 1 и 2). По данным В.А. Быстрова (см. сноску 2) микротвердость SiC составляет 28,8 – 33,4 ГПа, а при температуре 800 °С – 14,8 – 16,2 ГПа, следовательно, несмотря на малое содержание SiC в аглоспекке (порядка 0,5 – 0,8 %) карбид кремния может интенсивно изнашивать практически любой материал при высоких температурах.

Как отмечают авторы работ [3 – 5], при этом могут происходить процессы пластической и упругой деформации, скалывание или отрыв частиц металла, растрескивание поверхности, изменение микро- и субмикроструктуры, диффузионные и окислительные процессы, приводящие под воздействием значительных давлений к молекулярному сцеплению частиц трущихся поверхностей. При соударении била с аглоспекком, состоящего в основном из минеральных абразивных частиц, абразивное тело прорезает в материале била канавку глубиной, пропорциональной твердости абразива и обратно пропорциональной твердости материала била. Натолкнувшись на карбид материала била, режущая часть абразива, внедряющаяся в матрицу, разрушается, оставшаяся часть абразива, продолжая двигаться, оставляет лишь неглубокий след на поверхности материала после встречи с карбидом. Затем, испытывая внешнюю нагрузку, абразив вновь внедряется в тело матрицы до встречи с новым карбидом, пока полностью не разрушится. Участки металла, не защищенные карбидами, интенсивно изнашиваются. Крупные карбиды, лежащие на пути движения абразива, если не вырываются из матрицы при столкновении с абразивом, то одновременно с разрушением абразивных частиц сами накапливают энергию для разрушения. В них зарождаются микротрещины; и чем хрупче карбиды, тем быстрее они разрушаются.

Характер абразивного износа поверхностного слоя била зависит от ряда факторов: геометрического, механических, физических и химических величин, характеризующих материал била. Одним из главных факторов является геометрический, характеризуемый отношением h_b/r_a , вторым физико-механический, характеризуемый отношением τ_a/σ_T . Для достижения абразивного износа без микрорезания сумма этих отношений должна удовлетворять условию $h_b/r_a + \tau_a/\sigma_T \leq 0,5$ [3]. Так, например, $\tau_{a70ХЛ} = 0,5\sigma_T$, $\tau_{aТН 20} = 0,2\sigma_T$; для стали 70ХЛ эта сумма равна $0,5/2,5 + 0,5\sigma_T/\sigma_T = 0,7$; для твердого сплава ТН 20 – $(0,1/2,5 + 0,2\sigma_T/\sigma_T = 0,24)$. Чем меньше эта сумма, тем ниже интенсивность изнашивания. Ранее выполненные расчеты показали, что интенсивность изнашивания для стали составляет $I_{h70ХЛ} = 6,83$, для твердого сплава – $I_{hТН 20} = 0,0059$, что в 1000 раз меньше.

Число циклов, приводящих к разрушению материала била при упругом контакте, рассчитывается по следующему выражению:

$$N_{\varepsilon} = \left(\frac{3\pi(1 - \delta_6^{1/t})\sigma_6}{4k_6 f_6} \sqrt{\frac{r_k}{R_{\max} \varepsilon_c}} \right)^{t_6 - t_a}, \quad (5)$$

где k_6 – коэффициент, обусловленный напряженным состоянием поверхности материала била; f_6 – коэффициент трения материала била по агломерату; $r_k = 0,1$ мм – радиус закругления контактирующих вершин неровностей; $R_{\max} = 2,5$ мм – максимальный радиус абразивных частиц; ε_c – величина сближения контактирующих тел под действием внешних нагрузок, мм; t – показатель жесткости материала – чем выше жесткость, тем меньше показатель: $t_a = 6 - 8$ для горячего агломерата, $t_6 = 2 - 3$ для твердых сплавов.

Расчеты, выполненные по формуле (5), показали, что если

$k_{70ХЛ} = 2,6; f_{70ХЛ} = 0,41; \varepsilon_{c70ХЛ} = 0,7; \sigma_{70ХЛ} = 500$ МПа, то $N_{\varepsilon} = 406\ 676$ циклов;

$k_{ТН20} = 2,68; f_{ТН20} = 0,27; \varepsilon_{cТН20} = 0,4; \sigma_{ТН20} = 880$ МПа, то $N_{\varepsilon} = 122\ 106$ циклов.

Число циклов, приводящих к разрушению материала била, упрочненного твердым сплавом ТН 20, в 300 раз выше, чем стали 70ХЛ.

При скорости движения ленты агломашины в среднем $V_{a.m} = 260$ м/ч, числе соударений била ротора на одну плиту аглоспека $N_c = 3,15$, ширине плиты аглоспека $l_{п.а} = 1,5 - 2,2$ м и при величине допустимого износа била $0,06$ м длительность кампании ротора агломашины $T_{к.р}$ (сутки) составит

$$T_{к.р} = \frac{N_{\varepsilon} l_{п.а} l_{изн.б}}{N_c V_{a.m} 24}. \quad (6)$$

По произведенным по формуле (6) расчетам можно сказать, что для била звездочки ротора из стали 70ХЛ $T_{к.р} = 80$ суток, для била звездочки ротора, упрочненного твердыми частицами ТН 20, $T_{к.р} = 1248$ суток, т.е. в 16 раз выше.

Спеченные твердые сплавы на основе карбида титана типа ТН 20 обладают рядом весьма ценных свойств: высокой твердостью – $86 \div 92$ HRA; высокой микротвердостью – $H_{\mu} = 19,5 \div 22,0$ ГПа; модуль упругости составляет 445 ГПа; высоким пределом прочности при сжатии до $-\sigma_{сж} = 6,0$ ГПа, достаточной прочностью на изгиб $\sigma_{изг} = 1,2 \div 2,5$ ГПа и на растяжение $\sigma_{в} = 0,5\sigma_{изг}$. И самое благоприятное свойство среди известных карбидов – высокая ударная вязкость – $0,8 \div 1,2$ МДж/м². Способность спеченных твердых сплавов сохранять в значительной степени указанные свойства при повышенных температурах является чрезвычайно важной характеристикой при высокотемпературном абразивном износе. Спеченные твердые сплавы весьма устойчивы

против окисления на воздухе даже при температурах $600 \div 800$ °С, что весьма ценно при высокотемпературных способах наплавки.

Для качественной оценки закономерности высокотемпературного абразивного износа била ротора необходимо знать температуру поверхности била при контактировании с раскаленным аглоспексом ($T_{п}$), время контактирования била ротора с аглоспексом (Δt_6) и глубину проникновения аглоспека под срезающий нож била ротора, чтобы проанализировать механизм высокотемпературного абразивного износа. Температура $T_{п}$, ранее рассчитанная по теории теплопроводности (см. сноску 2), составила $750 - 800$ °С.

Таким образом, механизм высокотемпературного абразивного износа била ротора определяется механическими свойствами материала била и агломерата и оценивается соотношением значений твердости материала била $H_{м}$ и твердости абразива $H_{а}$. Имеются два критических значения отношения $H_{м}:H_{а}$. Выше первого критического значения $H_{м}:H_{а} \geq 0,91 - 1,4$ износ практически отсутствует. Этому условию соответствуют твердые сплавы, например карбиды металлов. Износ в этом случае зависит от условий эксплуатации: способности карбидов поглощать энергию без разрушения, наличия динамических нагрузок (ударов), температурного режима, окислительности атмосферы, прочности сцепления закрепленного абразива и т.д. Ниже второго критического значения, когда $H_{м}:H_{а} \leq 0,6 - 0,8$, износ протекает, в основном, за счет микрорезания и пластических деформаций материала била, что соответствует матрице сплава. Физически естественна связь между относительной износостойкостью материала била (ε) и силами связи кристаллической решетки, обычно характеризующиеся модулем упругости $E_{м}$ по следующей зависимости (см. сноску 2):

$$\varepsilon = 0,49 \cdot 10^{-4} E_{м}^{1,3}.$$

Учитывая хрупкий характер разрушения карбидов, можно ожидать, что при прочих равных условиях износостойкость будет тем выше, чем ниже хрупкость карбидов материала била. Микротвердость агломерата подчас выше микротвердости материала била дробилки. С изменением температуры твердость металлов хорошо описывается формулой Ито-Шишокина $H_{\mu} = H_{\mu 0} e^{-\alpha T}$. Однако следует иметь в виду, что кривая этой зависимости для металлов имеет перелом при $T = 0,5 T_{пл}$. Для первой ветви кривой $\alpha = 0,002$, для второй – $\alpha = 0,008$ [1 и сноска 2]. Изменение твердости агломерата не подчиняется этому закону и до определенной температуры (так называемой температуры «течения») твердость агломерата сохраняется почти как при комнатной температуре, затем она начинает резко падать. Температура перегиба зависит, по всей видимости, от состава агломерата и по нашим наблюдениям

составила $0,6 - 0,7 T_{пл}$. Измерения микротвердости основной массы агломерата при повышенных температурах проводились на специально приготовленных образцах по методике, описанной в работе М.Г. Лозинского (см. сноску 2) на установке ИМАШ-5С-69. Результаты измерений приведены ниже:

Компонент	Микротвердость, МПа, при различных температурах, °С					
	20	100	300	500	700	800
Агломерат (твердая основа)	1650	1635	1590	1480	1320	880
Включения агломерата	22 700	22 560	20 890	18 950	14 780	6940
Сплав ТН 20	21 980	20 430	17 840	16 650	15 920	12 240
Сталь 70ХЛ	3800	2920	2400	2130	890	480

При ударе била о горячий аглоспек возникает как абразивное изнашивание (микрорезание металла), так и усталостное разрушение металла била в результате упругого многократного соударения. При этом немаловажное значение приобретает упрочняющий материал для била ротора.

Исследования по упрочнению звездочек дробилок агломерата описаны в работе [6]. Анализируя материалы для наплавки дробильно-размольного оборудования, И.Н. Шеенко и В.Д. Орешкин пришли к выводу, что для деталей, эксплуатирующихся при температурах выше $500 - 600$ °С, перспективными являются сплавы У30Х23С2Р2ТГ и У20Х5Н3ФЗР с карбидоборидным упрочнением. Срок службы деталей, наплавленных разработанными сплавами, увеличился в 1,5 раза.

Под руководством А.В. Быстрова для упрочнения деталей, работающих при высокотемпературном абразивном износе, были получены композиционные материалы на основе спеченных карбидов титана типа ТН. Для получения сплава ТН 20 использовали брак и технологические отходы производства твердых сплавов, которых на соответствующих заводах ежегодно скапливается несколько тонн. Подготовленные пластины нанизывались на стальной стержень и вставлялись в кокиль при электрошлаковой наплавке (ЭШН) в местах интенсивного износа (см. рис. 2). Повышение удельной поверхности, облицованной пластинами из сплава ТН 20 при упрочнении детали методом ЭШН, достигается тем, что площадь твердосплавных пластин составляет $60 \div 80$ % от истираемой поверхности детали.

Разработанными способами ЭШН на аглофабриках ряда металлургических комбинатов были наплавлены била роторной дробилки агломерата по схеме, показанной на рис. 2. Предлагаемый способ позволяет улучшить

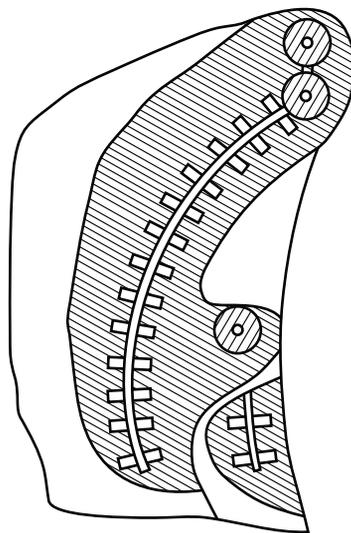


Рис. 2. Упрочнение била ротора пластинами ТН 20 методом ЭШН

качество изделий за счет обеспечения свободного доступа расплава матрицы к твердым пластинкам. Износостойкость упрочненного ротора дробилки агломерата повысилась в $8 \div 12$ раз за счет увеличения до $70 - 75$ % поверхности детали, облицованной твердосплавными пластинками, по отношению к общей площади истираемой поверхности детали.

Выводы. Для предотвращения износа ротора дробилки необходимо упрочнение бил ротора электрошлаковой наплавкой композиционными сплавами на основе твердых сплавов типа ТН 20, что позволит увеличить срок службы роторной дробилки в 12 раз, повысить производительность агломашин на $2 - 3$ %, обеспечить экономию текущих материалов [7].

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. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
4. Пилюшенко В.Л., Шаповалов Ю.С. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 6. С. 108, 109.
5. Быстров В.А., Борискин И.К., Верёвкин В.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1994. № 4. С. 6 – 9.
6. Шехтер С.Я., Пьянков В.В. – В кн.: Наплавка. Опыт и эффективность применения. – Киев: изд. ИЭС им. Е.О. Патона, 1985. С. 3 – 9.
7. Быстров В.А., Новиков Н.И., Лубяной Д.А. Экономическая эффективность инноваций, направленных на повышение долговечности сменного металлургического оборудования // Современное предпринимательство: монография / Под общ. ред. О.И. Кирикова. Кн. 18. – Воронеж: изд. ВГПУ, 2007. – 320 с.