УДК 669.14: 621.787+621.926.3

В.С.БОЧКОВ, *студент, vovabochkov@mail.ru*
В.И.БОЛОБОВ, *д-р техн. наук, профессор, Boloboff@mail.ru*
А.П.БАТАЛОВ, *канд. техн. наук, доцент, 328-86-32*
Ю.П.БОЙЦОВ, *канд. техн. наук, доцент, 328-86-32*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

V.S.BOCHKOV, *student, vovabochkov@mail.ru*
V.I.BOLOBOV, *Dr. in eng. sc., professor, Boloboff@mail.ru*
A.P.BATALOV, *PhD in eng. sc., associate professor, 328-86-32*
Yu.P.BOYTSOV, *PhD in eng. sc., associate professor, 328-86-32*
Saint Petersburg State Mining University

О ВОЗМОЖНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО НАКЛЕПА СТАЛИ ГАДФИЛЬДА В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ БРОНИ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ

На примере углеразмольной шаровой мельницы ШБМ 400/800 показано, что при работе мельницы без породы бомбардировка мелющими телами непосредственно брони из стали 110Г13Л способна повысить ее твердость с 200 до 320 НВ при глубине наклепанного слоя до 6,7 мм, что увеличит ее стойкость к истиранию примерно в 2 раза. Время, необходимое для осуществления эффективной бомбардировки, составляет ~ 11 мин, период между упрочняющими наклепами ~ 25 суток.

***Ключевые слова*:** броня шаровой мельницы, сталь Гадфильда, наклеп, твердость, износостойкость.

CONCERNING THE POSSIBILITY OF AN EFFECTIVE HADFIELD'S STEEL COLD-WORK HARDENING IN THE WORKING CONDITIONS OF THE LINING OF SPHERICAL MILLS

Taking a grinding of coal ball mill (type: BTM 400/800) operating without rocks as an example it is shown that a bombardment of the armour by grinding bodies made of steel 110G13L directly is capable to raise its hardness from 200 to 320HB at the depth of the cold-hardened layer up to 6,7 mm that will approximately 2 times increase its firmness to an abrasion. The time needed for the realization of an effective bombardment is 11 minutes, the period between strengthening cold – work hardenings is 25 days.

***Key words*:** lining of a ball mill, Hadfield's steel, cold hardening, hardness, wear resistance.

Высокомарганцевая сталь 110Г13Л, известная по имени автора как сталь Гадфильда, широко используется в качестве конструкционного материала деталей горнорудного оборудования, работающих в условиях интенсивного абразивного износа («броня» шаровых мельниц, «щеки» дробилок, «зубья» ковшей экскаваторов). Вместе с тем известно, что эта сталь обладает высокой эрозионной стойкостью только при интенсивном наклепе, имеющем место при работе детали в условиях значительных напряжений и динамических нагрузок. Так, при изготовлении из стали Гадфильда нижнего и верхнего днищ центробежных дробилок, днища выдерживают размол до 2000-4000 т твердого гранита, а щеки щековых дробилок при работе по таким же твердым породам, наклепываются до твердости 500 НВ. При их отсутствии каким-либо заметным преиму-

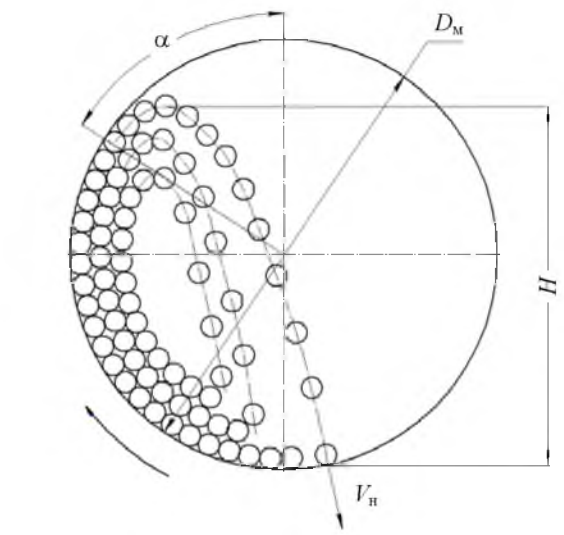


Рис.1. Траектория движения шаров в мельнице для наиболее эффективного наклепа брони

ществом в эрозионной стойкости (по сравнению с обычной среднеуглеродистой сталью) сталь Гадфильда не обладает [3]. Например, била для размола извести и скрепки установки для помола песка из этой стали очень недолговечны [8]. Не происходит заметного наклепа футеровочных плит из стали 110Г13Л и при работе шаровых мельниц, когда мелющие тела воздействуют на броню только через слой породы [4].

Нами рассмотрена возможность эффективного наклепа брони из стали 110Г13Л в случае работы шаровой мельницы без породы и бомбардировки мелющими телами непосредственно футеровочной плиты. Устанавливаются рациональные параметры работы мельницы для осуществления эффективного наклепа.

Расчет производился на примере углеразмольной шаровой барабанной мельницы ШБМ 400/800 с диаметрами корпуса $D_м$ (4,0 м) и мелющих шаров D (0,04 м) при обычно используемой степени заполнения мельницы данного типа шарами $\varphi = 28$ % [2]. Барабан мельницы изнутри футерован броневыми плитами толщиной $h_б = 75{,}6$ мм из стали Гадфильда с исходной твердостью 200 НВ [8].

Формулы, связывающие диаметр (d) и глубину (h) сферической вмятины, образующейся на пластине в результате ударного воздействия шарообразного предмета, с параметрами шара (диаметром – D, плотностью материала – ρ, скоростью в момент удара – V) и пластины ($H_д$) имеют вид [9, 11]:

$$d = 2D\sqrt{\frac{\rho}{6}\frac{V^2}{H_д}}, \qquad (1)$$

$$h = DV\sqrt{\frac{\rho}{6}\frac{1}{H_д}}, \qquad (2)$$

где

$$H_д = P/(\pi d^2/4) \qquad (3)$$

– динамическая твердость материала пластины (коэффициент пропорциональности между усилием P, с которым по пластине наносится удар, и диаметром d получаемого отпечатка), не зависящая от величины энергии удара и диаметра шара.

В литературе не удалось обнаружить экспериментальных данных по динамической твердости стали Гадфильда. Поэтому значение $H_д$ устанавливали расчетным путем, исходя из твердости этого материала при статическом вдавливании шарика.

В соответствии с законом Майера, справедливого при вдавливании как для статических, так и для динамических испытаний [9, 11],

$$P = \frac{a_0 d^n}{D_ш^{n-2}}, \qquad (4)$$

где a_0, n – постоянные, характеризующие материал пластины.

Поскольку для динамических условий $n = 2$ [6], с учетом (3,4)

$$H_д = \frac{4a_{0\,дин}}{\pi}. \qquad (5)$$

Исходя из условий проведения замеров твердости материалов по методу Бринелля ($P = 30$ кН, $D_ш = 10$ мм), определяли (4) значения постоянной a_0 для стали Гадфильда с твердостью 200 НВ, соответствующей диаметру отпечатка $d = 4{,}26$ мм [11], для статических условий ($n = 2{,}2$) [7] $a_0 = 1960$ МПа.

Для перехода от статических к динамическим условиям воспользовались табличными данными [11] о соотношении $a_{0\,дин}$ и a_0 для сталей, в соответствии с которыми значение $a_{0\,дин}$ стали Гадфильда составило 2800 МПа, а величина $H_д$, рассчитанная по уравнению (5), равна 3567 МПа.

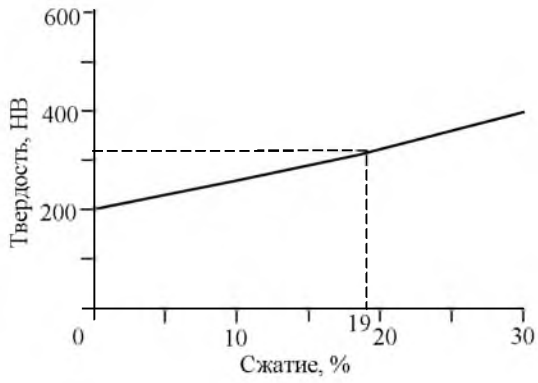


Рис.2. Зависимость твердости стали 110Г13Л от относительной деформации ε пластины при сжатии

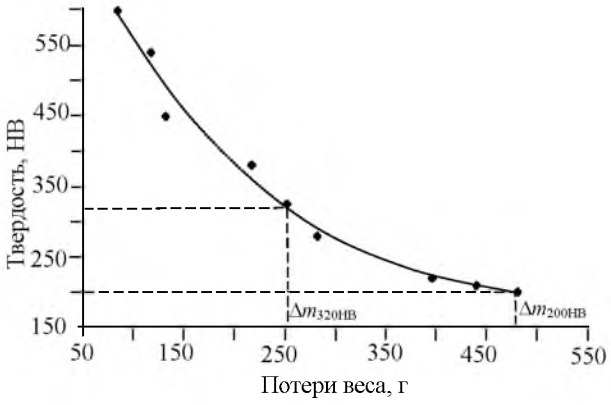


Рис.3. Зависимость потери веса стали от твердости при истирании отливок

Далее устанавливали траекторию движения шара, при которой его удар о броню будет наноситься нормально к поверхности, т. е. будет наиболее эффективным. В соответствии с [1] такая траектория имеет место при водопадном режиме движения шаров в мельнице при скорости вращения барабана $V_б = 0,75$, $V_{б\ крит} = 3,3$ м/с ($V_{б\ крит}$ – скорость вращения, соответствующая переходу параболической траектории движения шаров к круговой); при этом угол α отрыва шаров от корпуса барабана равен 55°44′. Скорость V шара в момент удара о броню рассчитывали из уравнения свободного падения шара, брошенного под углом к горизонту от наиболее высокой точки H траектории до места его соприкосновения с пластиной брони (рис.1):

$$H = 2,25D_м \sin^2\alpha\cos\alpha = 3,5\text{ м}, \qquad (6)$$

$$V = \sqrt{2gH} = 8,3\ \text{м/с}. \qquad (7)$$

После подстановки установленных значений $H_д$ и V в уравнения (1), (2) рассчитанные диаметр и глубина сферической вмятины на пластине из стали Гадфильда, полученной от единичного удара мелющего шара, составили $d = 5,7$ мм, $h = 0,2$ мм.

Поскольку при последующих ударах диаметр лунки увеличивается (как показывают опыты [7] до 15-20 ударов), влияние многократного удара учитывалось по формуле (7) из [7]

$$d_м = d\left(1,54 - HB10^{-3}\right) = 7,6\text{ мм}.$$

Соответственно глубина наклепанного слоя $h_{н.с}$ с учетом малой кривизны мелющих шаров ($h_{н.с} = 1,5d_м/m$, где $m = 1 + 0,0175D$ [7]) оказалась равной 6,7 мм.

Таким образом, при 20-кратном ударе мелющих шаров по стальной бронировке мельниц на броне способен образовываться наклепанный слой глубиной 6,7 мм с диаметром кратеров на поверхности ≈ 7,6 мм.

Исходя из величины относительной деформации ($\varepsilon = d_м/D = 7,6/40 = 0,19$), полученной в результате ударного сжимающего воздействия, твердость, приобретенная наклепанным слоем (рис.2) [8], составила в 320 НВ.

Такое увеличение (рис.3) [8] твердости (с 200 до 320 НВ) должно повысить стойкость стали к истиранию ($\Delta m_{200НВ}$ / $\Delta m_{320НВ}$) примерно в 1,9 раза.

При расчете времени, необходимого для 20-кратной бомбардировки всей поверхности брони барабана, предполагали, что эффективные удары наносят лишь шары внешнего слоя, поскольку шары внутренних слоев соударяются с уже лежащими шарами. Количество шаров N во внешнем слое в поперечном сечении барабана мельницы

$$N = L / D,$$

где L – длина дуги окружности барабана, на которой находятся шары внешнего слоя в статическом положении.

Значение L, рассчитанное для степени заполнения барабана φ = 28 %, оказалась равным 5 м, а количество шаров N = 125 штук.

Тогда количество ударов по броне $N_{уд}$ в поперечном сечении барабана в единицу времени

$$N_{уд} = N / t_i,$$

где t_i – время между ударами по броне одного и того же шара.

При этом значение t_i рассчитывали как сумму времен движения шара по круговой и параболической траекториям по формуле

$$t_i = \frac{D_м}{V_б}\left(\frac{\pi(360-4\alpha)}{360} + 2\sin\alpha\cos\alpha\right).$$

Согласно расчетам, t_i = 2,6 с и N = 3125 ударов / мин.

Поскольку места ударов шаров распределены по длине окружности барабана равномерно и по каждой точке окружности для эффективного наклепа необходимо нанести 20 ударов, необходимое время бомбардировки

$$t_\Sigma = \frac{\pi D_м 20}{d_м N_{уд}} \approx 11 \text{ мин}.$$

При расчете допустимого времени эксплуатации мельницы между упрочняющими наклепами использовали экспериментальные данные [6] о скорости износа брони из стали Гадфильда с твердостью 200 НВ в условиях работы шаровых мельниц: $V_{изн\ 200НВ}$ = = 0,0054 мм/ч, что с учетом упрочняющей обработки составляет $V_{изн\ 320НВ} = V_{изн\ 200НВ} / 1{,}9$ = = 0,0028 мм/ч.

Учитывая, что максимальная твердость наклепанного слоя распространяется примерно на четверть его глубины [10], в качестве допустимой толщины наклепанного слоя, который может быть подвергнут истиранию, была принята величина

$$h_{доп} = 0{,}25 h_{н.с} = 1{,}7 \text{ мм}.$$

Отсюда время, в течение которого броня мельницы может изнашиваться на допустимую величину $h_{доп}$, совпадающее с периодом между проведениями упрочняющего наклепа, составляет

$$t_{м.у.н} = h_{доп} / V_{изн\ 320НВ} = 607 \text{ ч} \approx 25 \text{ сут}.$$

Таким образом, для повышения срока службы броневых плит из стали Гадфильда (в 1,9 раза) требуется проведение периодических (≈ 11 мин) упрочняющих обработок брони шарами с периодом между упрочняющими обработками ≈ 25 сут.

Поскольку броню мельницы ШБМ 400/800 меняют при ее износе до толщины 15-20 мм [2], срок службы плиты составит 827 сут, а количество упрочняющих обработок $N_{упр} \approx 33$.

Необходимо отметить, что предлагаемая работа мельницы без загрузки породы не противоречит нормативным документам по эксплуатации шаровых мельниц: при пуске мельниц после капитального или текущего ремонта ее проверяют на работоспособность без породы при загрузке шарами полной загрузочной массы в течение 20 мин [2, 5].

Выводы

1. На примере углеразмольной шаровой барабанной мельницы ШБМ 400/800 с броневой футеровкой из стали Гадфильда при степени заполнения мельницы шарами φ = 28 % показано, что при работе мельницы без породы бомбардировка мелющими телами непосредственно брони способна вызвать ее эффективный наклеп с повышением твердости с 200 до 320 НВ при глубине наклепанного слоя до 6,7 мм.

2. Для обеспечения эффективного наклепа шары должны циркулировать в водопадном режиме с направлением удара по броне нормально к поверхности, что обеспечивается при скорости вращения барабана мельницы $V_б$ = 0,75 м/с, $V_{б\ крит}$ = 3,3 м/с.

3. Указанное упрочнение стали способствует увеличению ее стойкости к истиранию мягкими породами примерно в 2 раза (с 0,0054 до 0,0028 мм/ч).

4. Для использованной степени заполнения шарами время, необходимое для осуществления эффективной бомбардировки, составляет ≈ 11 мин, период между упрочняющими наклепами ≈ 25 сут.

5. Количество упрочняющих обработок в течение срока службы ≈ 33.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев С.Е.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е.Андреев, В.В.Зверевич, В.А.Перов. М., 1966. 396 с.

2. *Горбачевский В.В.* Эксплуатация и ремонт шаровых барабанных мельниц. Киев, 1967. 40 с.

3. *Гуляев А.П.* Металловедение. М., 1986. 544 с.

4. *Давыдов Н.Г.* Высокомарганцевая сталь. М., 1979. 176 с.

5. *Егерман У.Ф.* Инструкция по ремонту углеразмольных шаровых барабанных мельниц. М., 1963. 32 с.

6. *Крюков Д.К.* Футеровки шаровых мельниц. М., 1965. 184 с.

7. *Кудрявцев И.В.* Влияние кривизны соприкасающихся поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом / И.В.Кудрявцев, Г.Е.Петушков // Повышение прочности деталей машин поверхностным деформированием: Материалы 2-й Научно-технической конференции. Пермский политехнический институт. Пермь, 1967. С 40-52.

8. Марганцовистая сталь: Пер. с англ. Б.А.Белоуса / Под ред. М.Е.Блантера. М., 1959. 94 с.

9. *Саверин М.М.* Дробеструйный наклеп. М., 1955. 312 с.

10. *Ткачев В.Н.* Методы повышения долговечности деталей машин / В.Н.Ткачев, Б.М.Фишгейн, В.Д.Власенко, В.А.Уланов. М., 1971. 272 с.

11. *Шапошников Н.А.* Механические испытания металлов. М.-Л., 1954. 443 с.

REFERENCES

1. *Andreev S.E.* Crushing, grinding and screening of mineral / S.E.Andreev, V.V.Zverevich, V.A.Perov. Publisher. Moscow: 1966. 396 p.

2. *Gorbachevskiy V.V.* Operation and maintenance of ball mill drum. Kiev, 1967. 40 p.

3. *Gulyaev A.P.* Metal science. Publisher. Moscow, 1986. 544 p.

4. *Davydov N.G.* High-manganese steel. Publisher. Moscow, 1979. 176 p.

5. *Egerman U.F.* Instructions for repair Coal rolling ball mill drum. Publisher. Moscow, 1963. 32 p.

6. *Kryukov D.K.* Linings of ball mills. Publisher. Moscow, 1965. 184 p.

7. *Kudryavtsev I.V.* The effect of curvature of surfaces come into contact at a depth of plastic deformation during hardening of surface hardening / I.V.Kudryavtsev, G.E.Petushkov // Increase the strength of machine parts by surface deformation: Materials II scientific conference. Perm, 1967. P.40-52.

8. Manganese steel: Translated from English B.A.Belous / Edited by M.E.Blanter. Moscow, 1959. 94 p.

9. *Saverin M.M.* Blaster work hardening. Publisher. Moscow, 1955. 312 p.

10. *Tkachev V.N.* Methods of increasing durability of machine parts / V.N.Tkachev, B.M.Fishteyn, V.D.Vlasenko, V.A.Ulanov. Publisher: «Engineering», Moscow, 1971. 272 p.

11. *Shaposhnikov N.A.* Mechanical testing of metals. Publisher. Moscow-Leningrad, 1954. 443 p.