
© В.И. Болобов, А.П. Баталов,
Ю.П. Бойцов, В.С. Бочков,
2014

УДК 669.14: 621.787+621.926.3

В.И. Болобов, А.П. Баталов, Ю.П. Бойцов, В.С. Бочков

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ФУТЕРОВКИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Рассмотрена возможность эффективного наклепа футеровки из стали 110Г13Л в случае работы шаровой мельницы без породы и бомбардировки мелюшими телами непосредственно футеровочной плиты. Установлены рациональные параметры работы мельницы для осуществления эффективного наклепа.

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

Введение

Высокомарганицевая сталь 110Г13Л, известная по имени автора как сталь Гадфильда, широко используется в качестве конструкционного материала деталей горнорудного оборудования, работающих в условиях интенсивного абразивного износа (футеровка шаровых мельниц, «щеки» дробилок, «зубья» ковшей экскаваторов). Вместе с тем известно, что эта сталь обладает высокой эрозионной стойкостью только при интенсивном наклете, 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, наклеваются до твердости 500 НВ. При их отсутствии каким-либо заметным преимуществом в эрозионной стойкости (по сравнению с обычной среднеуглеродистой сталью) сталь Гадфильда не обладает [1]. Например, была для размоля извести и скрепки установки для помола песка

из этой стали очень недолговечны [2]. Не происходит заметного наклепа футеровочных плит из стали 110Г13Л и при работе шаровых мельниц, когда мелющие тела воздействуют на футеровку только через слой породы [3].

Исходные данные

В статье авторы рассматривают возможность эффективного наклепа футеровки из стали 110Г13Л в случае работы шаровой мельницы без породы и бомбардировки мелюшими телами непосредственно футеровочной плиты. Устанавливаются рациональные параметры работы мельницы для осуществления эффективного наклепа.

Расчет производился на примере мельницы шаровой с центральной разгрузкой МШЦ-4500×6000 с диаметрами корпуса D_m (4,43 м) и мелюших шаров D (0,04 м) при обычно используемой степени заполнения мельницы данного типа шарами $\phi = 30\%$. Предложенная для расчета мельница широко используется на обогатительной фабрике ОАО «Карельский окатыш». Барабан мельницы изнутри футерован плитами, которые в разрезе имеют форму «вол-

ны». Максимальная толщина футеровочных плит составляет $h_B = 128$ мм, они изготовлены из стали Гадфильда с исходной твердостью 200 HB [2].

Определение динамической твердости H_d материала

Известны [4, 5] формулы (1, 2), 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_d):

$$d = 2 \cdot D \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho}{6} \cdot \frac{V^2}{H_d}}, \quad (1)$$

$$h = D \cdot V \cdot \sqrt{\frac{\rho}{6} \cdot \frac{1}{H_d}}, \quad (2)$$

где

$$H_d = \frac{P}{\pi d^2} \cdot \frac{4}{4} \quad (3)$$

- 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_d 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 [4, 5]

$$P = \frac{a_0 \cdot d^n}{D_{\text{ш}}^{n-2}}, \quad (4)$$

где a_0 , n — постоянные, характеризующие материал пластины.

Поскольку для динамических условий $n = 2$ [5] с учетом (3, 4)

$$H_d = \frac{4a_0 \text{дин}}{\pi} \quad (5)$$

Исходя из условий проведения измерений твердости материалов по методу Бринелля ($P = 30$ кН, $D_{\text{ш}} = 10$ мм), определяли (4) значения постоянной a_0 для стали Гадфильда с твердостью 200 HB, соответствующей диаметру отпечатка $d = 4,26$ мм [5], для статических условий, принимая $n = 2,2$ [4], которая оказалась равной 1960 МПа.

Для перехода от статических к динамическим условиям воспользовались табличными данными [5] о соотношении $a_0 \text{дин}$ и a_0 для сталей, в соответствии с которыми значение $a_0 \text{дин}$ стали Гадфильда было оценено в 2800 МПа, а величина H_d , рассчитанная по уравнению (5), оказалась равной 3567 МПа.

Расчет скорости падения шара в момент удара о футеровку

Далее, устанавливали траекторию движения шара, при которой его удар о футеровку будет наноситься нормально к поверхности, т.е. будет наиболее эффективным. В соответствии с [7] такая траектория имеет место при водопадном режиме движения шаров в мельнице при скорости вращения барабана $V_b = 0,75 \cdot V_{b \text{ крит}} = 3,5$ м/с ($V_{b \text{ крит}}$ — скорость вращения, соответствующая переходу параболической траектории движения шаров к круговой); при этом угол α отрыва шаров от корпуса барабана равен $55^{\circ}44'$. Скорость V шара в момент удара о футеровку рассчитывали из уравнения свободного падения

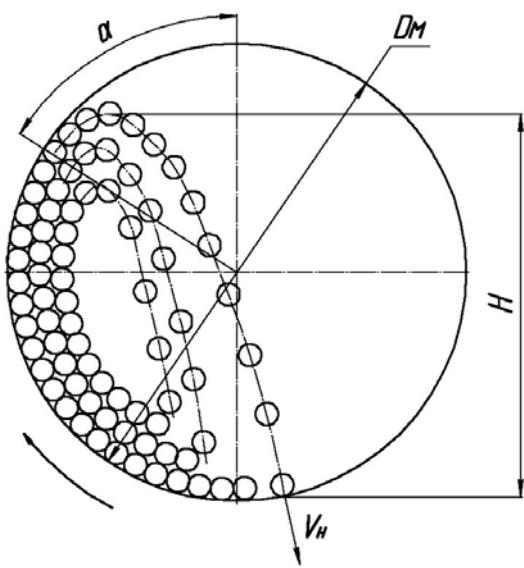


Рис. 1. Предлагаемая траектория движения шаров в мельнице для наиболее эффективного наклена брони

шара, брошенного под углом к горизонту от наиболее высокой точки H траектории до места его соприкосновения с сегментом футеровки (рис. 1).

$$H = 2,25 \cdot D_m \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha = 3,8 \text{ м} \quad (6)$$

$$V = \sqrt{2gH} = 8,6 \text{ м/с} \quad (7)$$

Определение твердости и износостойкости стали

После подстановки установленных значений H_d и V в уравнения (1, 2) рассчитанные диаметр и глубина сферической вмятины на сегменте из стали Гадфильда, полученной от единично го удара мелюшего шара, оказались равными $d = 5,8 \text{ мм}$, $h = 0,2 \text{ мм}$.

Поскольку при последующих ударах диаметр лунки увеличивается (как показывают опыты [6] до 15—20 ударов), влияние многократного удара учитывалось по формуле (7) из [6]

$$d_c = d \cdot (1,54 - HB \cdot 10^{-3}) = \\ = 7,8 \text{ мм} \quad (8)$$

Соответственно, глубина наклепанного слоя $h_{n.c}$ с учетом малой кривизны мелюшых шаров ($h_{n.c} = 1,5 \cdot d_m / m$, где $m = 1 + 0,0175 \cdot D$ [6]) оказалась равной $\sim 7 \text{ мм}$.

Таким образом, при 20 кратном ударе мелюшых шаров по стальной футеровке мельниц на футеровке способен образовываться наклепанный слой глубиной 7 мм с диаметром кратеров на поверхности $\sim 7,8 \text{ мм}$.

Исходя из величины относительной деформации ($\varepsilon = d_m / D = 7,8 / 40 = 0,2$), полученной материалом в результате ударного сжимающего воздействия, твердость, приобретенная наклепанным слоем, в соответствии с рис. 2 [2] была оценена в $325 HB$.

Как можно заключить из графика рис. 3 [2], такое увеличение твердости (с 200 до $325 HB$) должно повысить стойкость стали к истиранию ($\Delta t_{200HB} / \Delta t_{325HB}$) примерно в 1,9 раза.

Расчет времени упрочняющей обработки футеровки шаровой мельницы

При расчете времени, необходимого для 20 кратной бомбардировки всей поверхности футеровки 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 рассчитывали по формуле

$$N = L / D, \quad (9)$$

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

Значение L , рассчитанное для степени заполнения барабана $\phi = 30\%$, оказалось равным 5,5 м, а количество шаров $N = 138$ штук.

Тогда, количество ударов по футеровке $N_{уд}$ в поперечном сечении барабана в единицу времени равно

$$N_{уд} = N / t_i, \quad (10)$$

где t_i — время между ударами по футеровке одного и того же шара.

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

$$t_i = \frac{D_m}{V_6} \left(\frac{\pi(360 - 4\alpha)}{360} + 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right) \quad (11)$$

В соответствии с расчетом значения t_i и N оказались равными 2,7 с и 3067 ударов / мин соответственно.

В предположении, что места ударов шаров распределены по длине окружности барабана равномерно и по каждой точке окружности для эффективного наклена необходимо нанести 20 ударов необходимое время бомбардировки t_Σ составляет

$$t_\Sigma = \frac{\pi \cdot D_m \cdot 20}{d_m \cdot N_{уд}} \approx 12 \text{ минут} \quad (12)$$

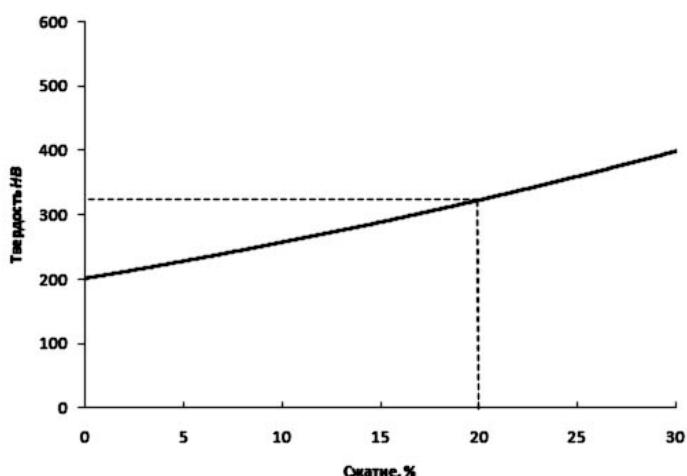


Рис. 2. Зависимость твердости стали 110Г13Л от величины относительной деформации ε пластины при сжатии

Время эксплуатации шаровой мельницы между упрочняющими наклепами

Расчет допустимого времени эксплуатации мельницы между упрочняющими наклепами проводили с использованием экспериментальных данных [8] о скорости износа футеровки из стали Гадфильда с твердостью 200 HB в условиях работы шаровых мельниц: $V_{изн\ 200HB} = 0,0054 \text{ мм/ч}$ (данная экспериментальная скорость износа оказалась сопоставима с эксплуатационной скоростью износа шаровой мельницы МШЦ-4500×6000), что с учетом упрочняющей обработки составляет $V_{изн\ 325HB} = V_{изн\ 200HB}/1,9 = 0,0028 \text{ мм/ч}$.

Исходя из того, что максимальная твердость наклепанного слоя распространяется примерно на четверть его глубины [9], в качестве допустимой толщины наклепанного слоя, который может быть подвергнут истиранию, была принята величина

$$h_{доп} = 0,25 \cdot h_{H.C} = 1,8 \text{ мм} \quad (13)$$

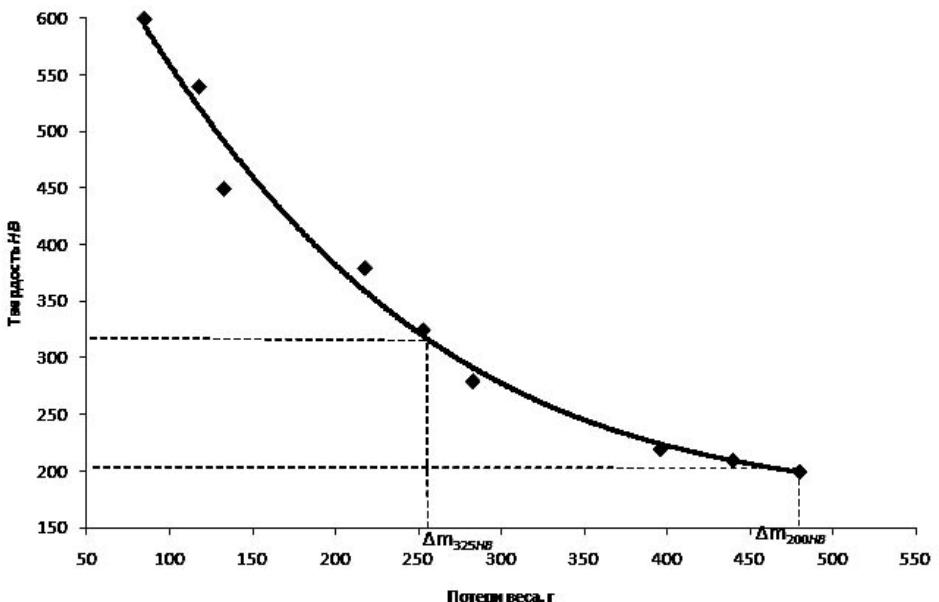


Рис. 3. Зависимость потери веса сталей от их твердости при истирании отливок

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

$$t_{\text{м.у.н.}} = h_{\text{доп}} / V_{\text{изн 325HB}} = 643 \text{ ч} \approx 27 \text{ суток} \quad (14)$$

Таким образом, для повышения срока службы футеровочных плит из стали Гадфильда (в 1,9 раза) требуется проведение периодических (в течение ~ 12 минут) упрочняющих обработок футеровки шарами с периодом между упрочняющими обработками ≈ 27 суток.

Исходя из того, что футеровку мельницы МШЦ-4500×6000 меняют при полном износе гребня «волны» (т.е. когда поверхность футеровки становится абсолютно гладкой) до толщины в 81—87 мм, срок службы плиты составит порядка 700 суток, а количество упрочняющих обработок $N_{\text{упр}} \sim 28$.

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 минут [10, 11].

Выводы

- На примере мельницы шаровой с центральной разгрузкой МШЦ-4500×6000 с футеровкой из стали Гадфильда при степени заполнения мельницы шарами $\phi = 30\%$ показано, что при работе мельницы без породы бомбардировка мелюшими телами непосредственно футеровки способна вызвать ее эффективный наклеп с повышением твердости с 200 до 325 HB при глубине наклепанного слоя до 7 мм.

- Для обеспечения эффективного наклена шары должны циркулировать в водопадном режиме с на-

правлением удара по футеровке нормально к поверхности, что обеспечивается при скорости вращения барабана мельницы

$$V_B = 0,75 V_{B \text{ крит}} = 3,5 \text{ м/с.}$$

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 ф шарами время, необходимое для осуществления эффективной бомбардировки, составляет ~ 12 минут, период между упрочняющими наклепами ~ 27 суток.

5. Количество упрочняющих обработок в течении срока службы футеровки составляет ~ 28.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
2. Марганцовистая сталь. Пер. с англ. Б.А. Белоуса под ред. М.Е. Блантера. М.: Металлургиздат, 1959. 94 с.
3. Давыдов Н.Г. Высокомарганцевая сталь. М.: «Металлургия», 1979. 176 с.
4. Саверин М.М. Дробеструйный наклеп. М.: Машгиз, 1955. 312 с.
5. Шапошников Н.А. Механические испытания металлов. М.-Л.: Машгиз, 1954. 443 с.
6. Кудрявцев И.В. Влияние кривизны соприкасающихся поверхностей на глубину пластической деформации при упрочнении деталей поверхностным наклепом / И.В. Кудрявцев, Г.Е. Петушкиов // Повышение прочности деталей машин поверхностным деформированием: материалы II научно-технической конференции. Пермский политехнический институт. Пермь, 1967. С. 40–52.
7. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е.Андреев, В.В.Зверевич, В.А.Перов. М.: Недра, 1966. 396 с.
8. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. М.: Машиностроение, 1965. 184 с.
9. Ткачев В.Н. Методы повышения долговечности деталей машин. / В.Н.Ткачев, Б.М. Фиштейн, В.Д. Власенко, В.А. Уланов. М.: Машиностроение, 1971. 272 с.
10. Горбачевский В.В. Эксплуатация и ремонт шаровых барабанных мельниц. – Киев, 1967. 40 с.
11. Егерман У.Ф. Инструкция по ремонту углеразмольных шаровых барабанных мельниц. М., «Госэнергоиздат», 1963. 32 с.

ГЛАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Болов Виктор Иванович – профессор, доктор технических наук, кафедра конструирования горных машин и технологии машиностроения, e-mail: Boloboff@mail.ru,
Баталов Андрей Петрович – доцент, кандидат технических наук, кафедра конструирования горных машин и технологии машиностроения,
Бойцов Юрий Петрович – доцент, кандидат технических наук, кафедра конструирования горных машин и технологии машиностроения,
Бочков Владимир Сергеевич – студент, горно-электромеханический факультет, e-mail: vovabochkov@mail.ru, ..

Национальный минерально-сырьевый университет «Горный».



UDC 669.14: 621.787+621.926.3

CONCERNING THE POSSIBILITY OF INCREASING DURABILITY LININGS OF BALL MILLS

Bolobov V.I. , Eng., Prof., Doctor of Technical Sciences, e-mail: Boloboff@mail.ru,
Batalov A.P. , Eng., Prof., Doctor of Technical Sciences,
Boytssov Yu.P. , Eng., Prof., Doctor of Technical Sciences,
Bochkov V.S. , student, e-mail: vovabochkov@mail.ru,
National University of mineral resource "Mining."

High-manganese steel 110G13L, or the Hadfield steel, is widely used in manufacture of mining equipment parts meant for operation in the severe abrasive wear conditions (inner lining of ball mills, jaws of jaw mills, teeth of shovel buckets).

The article considers quality of cold work hardening of 110G13L steel inner lining of a ball mill without rock feed, when grinding bodies attack directly the lining plate. The rational parameters of mill operation for the cold work hardening to be efficient are found. The dynamic hardness H_d of steel is calculated based on the steel hardness under static impression of a ball.

The calculation of ball fall velocity at the time of the lining collision, V , uses the equation of free fall of a ball thrown at an angle relative to horizon, from the highest point of the ball trajectory, H , up to the ball and lining collision point. The time of the coal work hardening of the ball mill inner lining is calculated, too.

The calculation of time for the 20-fold attack of the total inner lining surface supposes that only the outward layer balls deliver effective blows, and inward layer balls collide with the lying balls.

The ball mill life period between the coal work hardening stages is evaluated. It is proved that for the increased life (1.9 times) of the Hadfield steel inner lining plates, it is required to carry out cyclic strengthening treatment (during 12 min) of inner lining by balls with the strengthening cycle duration for 27 days.

Taking a ball mill with a central discharge (type: MBC-4500×6000) operating without rocks as an example it is shown that a bombardment of the lining by grinding bodies made of steel 110G13L directly is capable to raise its hardness from 200 to 325HB at the depth of the cold-hardened layer up to 7 mm that will approximately 2 times increase its firmness to an abrasion .The time needed for the realization of an effective bombardment is 12 minutes, the period between strengthening cold - work hardenings is 27 days.

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

REFERENCES

1. Gulyaev A.P., 1986. General Metallurgy. Moscow: Metallurgiya, P. 544.
2. Mangalloy [Russian translation], 1954. Moscow: Metallurgizdat, P. 94.
3. Davydov N.G., 1979. High-Manganese Steel. Moscow: Metallurgia, P. 176.
4. Saverin M.M., 1955. Cold Work Hardening by Shot Blasting. Moscow: Mashgiz, P. 312.
5. Shaposhnikov N.A., 1954. Mechanical Testing of Metals. Moscow-Leningrad: Mashgiz, P. 443.
6. Kudryavtsev I.V., 1967. Effect of curvature of contact surfaces on the plastic deformation depth in cold work hardening of parts, Proc. 2nd Sci. Conf. Strengthening of Machine Parts by Surface Deformation. Perm: Perm Polytechnical Institute, pp. 40–52.
7. Andreev S.E. et al., 1966. Mineral Crushing, Grinding and Screening. Moscow: Nedra, P. 396.
8. Kryukov D.K., 1965. Inner Lining of Ball Mills. Moscow: Mashinostroenie, P. 184.
9. Tkachev V.N. et al., 1971. Machine Parts Life Improvement Methods. Moscow: Mashinostroenie, P. 272.
10. Gorbachevsky V.V., 1967. Operation and Repair of Ball Drum Mills. Kiev. P. 40.
11. Egerman U.F., 1963. Operation Guidelines on Coal Ball Drum Mills. Moscow: Gosenergoizdat, P. 32.