

УДК 669.14.018.29.004.62/.63

В.И.БОЛОБОВ, д-р техн. наук, профессор, *Boloboff@mail.ru*

А.П.БАТАЛОВ, канд. техн. наук, доцент, *valotab@rambler.ru*

В.С.БОЧКОВ, аспирант, *vovabochkov@spmi.ru*

С.А.ЧУПИН, аспирант, *Staseq-88@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевый университет «Горный», Санкт-Петербург

V.I.BOLOBOV, Dr. in eng. sc., professor, *Boloboff@mail.ru*

A.P.BATALOV, Phd in eng. sc., associate professor, *valotab@rambler.ru*

V.S.BOCHKOV, post-graduate student, *vovabochkov@spmi.ru*

S.A.CHUPIN, post-graduate student, *Staseq-88@mail.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 110Г13Л В РАЗЛИЧНЫХ АБРАЗИВНЫХ СРЕДАХ

Рассмотрены закономерности абразивного износа стали 110Г13Л при значительных нагрузках на образец и ударном воздействии. Обнаружено, что повышение нагрузки до значений, при которых напряжения на поверхности образца достигают истинного разрушающего напряжения материала, не приводит к повышению износостойкости стали. Ударное воздействие и, как следствие, наклеп не оказывают существенного влияния на скорость износа стали при ее работе по твердым породам (гранит, габбро). В случае мягких пород (мрамор) сопутствующее ударное воздействие повышает износостойкость материала. Разработано заключение о целесообразности изготовления элементов горно-добычающего и обогатительного оборудования из стали 110Г13Л в зависимости от твердости разрушаемой породы.

Ключевые слова: сталь, абразивные породы, износ, высокие нагрузки, ударные воздействия, наклеп.

ABOUT RESISTANT STEEL 110G13L IN DIFFERENT ABRASIVE MEDIA

Regularities abrasion steel 110G13L with a significant load on the sample and impact. Found that increasing the load to the point where the voltage on the surface of the sample achieved a true rupture stress of the material, does not increase the wear resistance of steel. Shown that the impact and, therefore, have no hardening significant influence on the wear rate of steel in its work on the solids (granite, gabbro). In the case of soft rocks (marble) concomitant impact effect is exceeds durability of the material. Designed conclusion on whether the elements are made of mining and processing equipment from steel 110G13L depending on the hardness of the destroyed rock.

Key words: steel, abrasive, wear, high shock load, cold working.

Аустенитная высокомарганцевая сталь 110Г13Л (0,9-1,4 С, 11,5-15,0 Mn, 0,5-1,0 Si, %), известная по имени шведского изобретателя как сталь Гадфильда, была изобретена в 1888 г. и получила широкое применение в начале 20 в. как материал для тю-

ремных решеток. Решетки представляли собой двухслойный пруток, в середине которого была сталь 110Г13Л, которую невозможно было перепилить [9]. Из-за трудности обработки резанием практически все изделия из этой стали изготавливают только

литьем без последующей механической обработки. Такое поведение стали 110Г13Л объясняется повышенной способностью составляющего ее марганцовистого аустенита к упрочнению (наклепу) при резании с повышением твердости от 200 до 600 НВ, что обычно связывают с возникновением большого количества дефектов в кристаллической решетке стали [6] или превращением аустенита в мартенсит [5].

Принято считать [4], что при чисто абразивном воздействии сталь 110Г13Л демонстрирует низкое сопротивление износу, в то время как в условиях больших удельных нагрузок и ударных воздействий, когда металл поверхностного слоя подвергается интенсивному наклепу, сталь приобретает исключительно высокую износостойкость. По этой причине до настоящего времени сталь 110Г13Л продолжает оставаться основным конструкционным материалов для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа с высокими нагрузками и ударными воздействиями. Из нее делают крестовины и стрелки железнодорожных и трамвайных путей, траки гусеничных машин, зубья ковшей экскаваторов, футеровки шаровых мельниц, била и броню дробилок и др.

В то же время, как показывает практика, в ряде случаев конструкции из стали

110Г13Л демонстрируют в условиях эксплуатации явно недостаточную износостойкость, хотя и работают в условиях больших нагрузок и ударных воздействий. Так при эксплуатации одних и тех же конструкций шаровых мельниц срок службы их брони из стали Гад菲尔да при работе на известняке превышает 10 лет, в то время как на железной руде он не достигает и двух лет, хотя в обоих случаях броня подвергается воздействию примерно одних и тех же ударных нагрузок.

С другой стороны, как показывают результаты экспериментов [11], проведенных при сравнительно невысоких нагрузках на образец ($P = 3$ Н), при изнашивании стали Гад菲尔да о твердые породы предварительный наклеп материала не повышает его износостойкости. Это обстоятельство авторы [11] объясняют тем, что в процессе абразивного изнашивания все металлические материалы наклепываются до своего предельного состояния, которое невозможно достичь при вынужденном наклепе. Такие результаты и их объяснение ставят под сомнение общепринятую точку зрения о благоприятном влиянии высоких нагрузок и ударных воздействий на износостойкость стали Гад菲尔да при работе по твердым породам.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное изучение процесса абразивного износа стали Гад菲尔да о породы различной твердости в условиях ударных воздействий и статических нагрузок, значительно превышающих использованные в работе [11], а также оценка целесообразности использования этой стали при породах той или иной твердости.

В качестве метода испытаний была использована методика Л.И.Барона – А.В.Кузнецова [1] по абразивному изнашиванию цилиндрических образцов ($D = 8$ мм) с отверстием ($d = 4$ мм), модернизированная [3] для проведения испытаний при различных нагрузках на образец (рис.1).

В первой серии испытаний в качестве абразивного материала использовали электрокорунд марки 25А, как материал с твердостью (2300 НВ), значительно превышающей твердость стали Гад菲尔да, в том числе

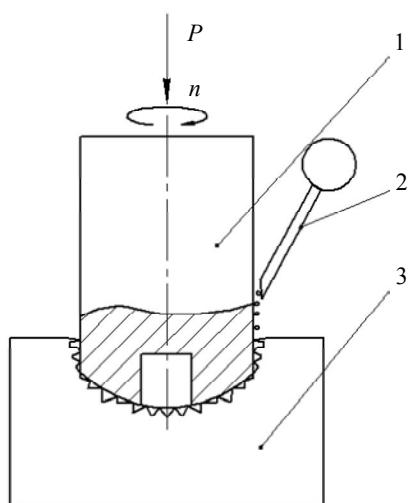


Рис.1. Схема испытаний на абразивный износ
1 – вращающийся образец ($n = 685$ об/мин);
2 – устройство подачи охлаждающей жидкости;
3 – пластина из абразивного материала

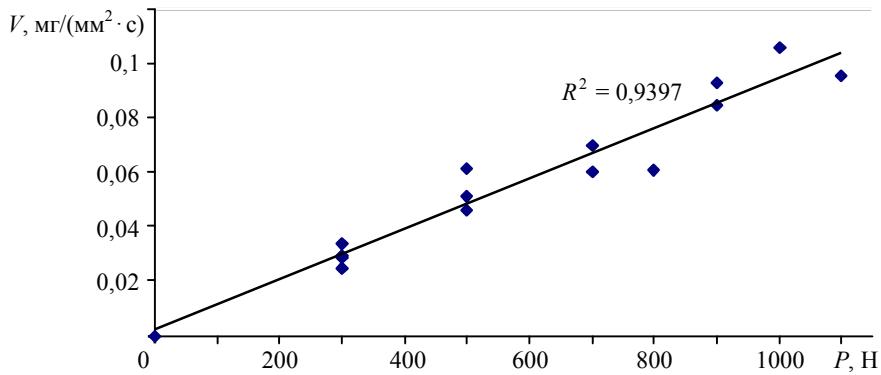


Рис.2. Зависимость скорости износа V стали Гадфильда по электрокорунду от величины нагрузки, действующей на образец

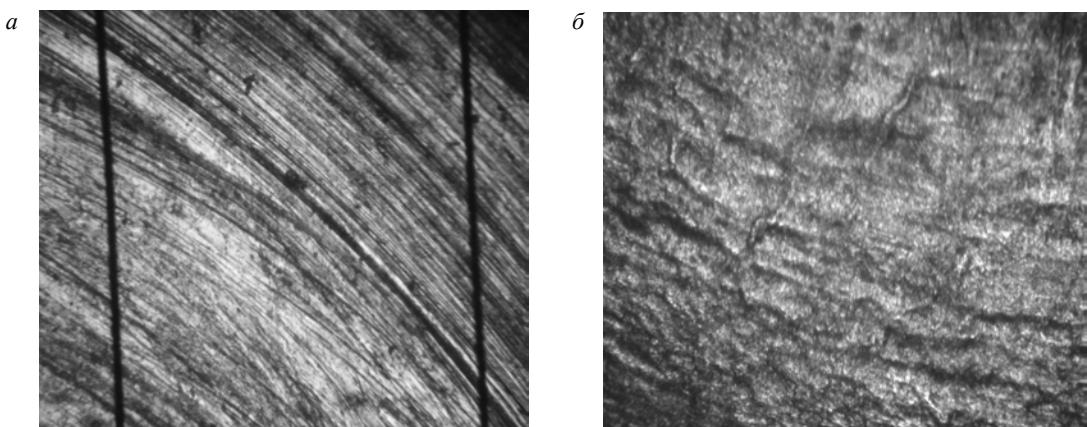


Рис.3. Поверхность износа образца из стали Гадфильда после абразивного воздействия гранита и габбро (а) и мрамора (б)

и в наклепанном состоянии. Образцы из стали 110Г13Л подвергали закалке с 1100 °С в воде, в результате чего они получали исходную твердость ~ 170 НВ. Для предотвращения разогрева и возможного изменения в структуре стали в процессе испытаний зону контакта образца с абразивом непрерывно смачивали водой.

Испытания проводили при возрастающих нагрузках P на образец от 300 до 1100 Н (попытки проведения экспериментов при более высоких нагрузках приводили к нарушению нормальной работы электродвигателя установки). При каждой нагрузке образец 1-3 раза изнашивали об абразив в течение 5-30 с. По результатам замера массы образца для каждого воздействия среды определяли скорость износа V как потерю массы металла Δm , отнесенную к площади контакта образца с абразивом ($S \sim 50 \text{ mm}^2$) и продолжительности t . Оказалось, что все

экспериментальные точки зависимости $V = f(P)$ удовлетворительно ложатся на прямую (рис.2) и описываются уравнением вида

$$V = KP,$$

где K – коэффициент, $K = (5,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ мг/(мм² · мин · Н).

Во второй серии опытов сталь изнашивали от 10 до 90 с по трем породам различной твердости при постоянной статической нагрузке на образце (500 Н). Два вида породы – гранит и габбро с твердостью ~ 1250 НВ превышали по твердости сталь Гадфильда в наклепанном состоянии, третий вид – мрамор был менее твердый (110 НВ). Вид поверхности образцов после их износа по породам различной твердости иллюстрирует рис.3.

Видно, что в случае гранита и габбро (рис.3, а) поверхность металла имеет вид, типичный для абразивного износа, – вся ис-

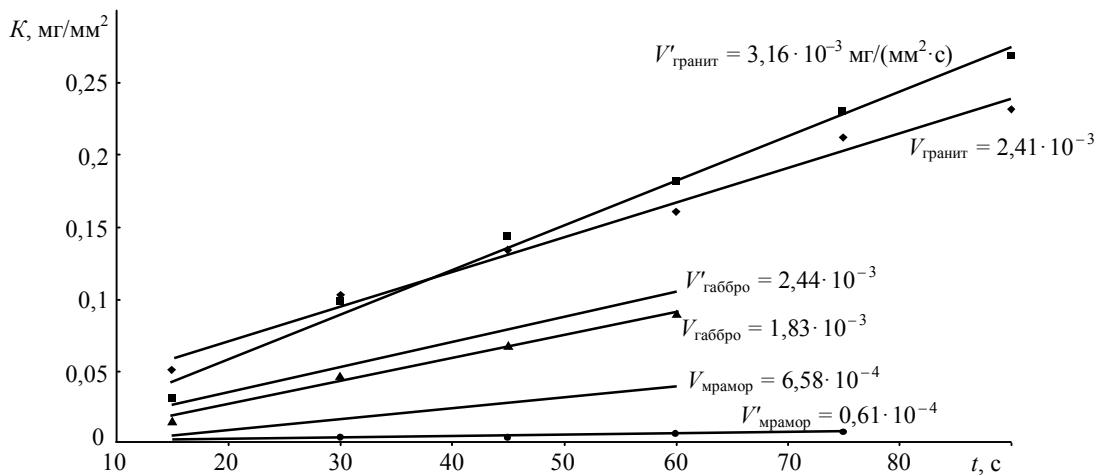


Рис.4. Изменение относительной потери массы образца из стали Гадфильда при его абразивном (кривые V) и ударно-абразивном (кривые V') изнашивании по различным породам

пещрена царапинами, направленными по ходу вращения образца. При износе по мягким породам (рис.3, б) поверхность покрыта продолговатыми возвышенностями и микрократерами, характерными для пластического оттеснения при усталостном износе.

Полученные экспериментальные точки зависимости $\Delta m/S = f(t)$ экстраполировали прямой линией, тангенс угла наклона которой принимали за скорость износа V . Установленные значения V сопоставляли с величинами скорости V' , полученными в сравнительных экспериментах, в которых перед каждым испытанием по изнашивающей поверхности образца наносили удар одинаковой интенсивности металлическим ударником. В результате возникающего наклева твердость стали в поверхностном слое повышалась до 220 НВ. Результаты сравнительных испытаний показаны на рис.4.

Как следует из графика (см. рис.2), с увеличением нагрузки, действующей на образец, величина износа стали Гадфильда во всем интервале P возрастает. На кривой $V=f(P)$ не обнаруживается какого-либо граничного значения P^* , выше которого наблюдается уменьшение скорости износа, что свидетельствовало бы об увеличении износостойкости материала. Хотя удельные нагрузки на образец в настоящих экспериментах名义ально были невелики ($P/S = 6-22$ МПа), в действительности, как можно заключить из факта царапания металла абразивом, из-

за малой площади контакта металла с вершинами зерен абразива они превышали истинное разрушающее напряжение S_k стали (880 МПа). Отсюда можно заключить, что при нагрузках, максимально достижимых в условиях эксперимента (до 1100 Н), и вызывающих в металле напряжения, превышающих истинное разрушающее напряжение стали, высокую износостойкость в условиях абразивного износа по твердым породам сталь Гадфильда не демонстрирует.

Как можно заключить из вида графиков на рис.4, наличие сопутствующих ударных воздействий на износостойкость стали Гадфильда в зависимости от твердости абразивной среды сказывается по-разному: если в случае пород (гранит, габбро), превышающих по твердости сталь в наклепанном состоянии, его влияние практически не заметно ($V' \approx V$), то в случае более мягких пород (мрамор) оказывается весьма существенно, уменьшая скорость износа примерно в 10 раз.

С учетом полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности использования стали Гадфильда в тех или иных условиях.

В случае сравнительно мягкого абразивного материала с твердостью H_a , меньшей твердости стали H_c в наклепанном состоянии, сталь Гадфильда целесообразно использовать как при абразивном, так и ударно-абразивном видах воздействия сре-

ды, например, при работе зубьев ковшей экскаваторов по известняку (135-180 НВ). Поскольку мягкие частицы породы не способны царапать поверхность более твердой стали, в обоих случаях износ носит не абразивный, а усталостный характер (рис.3, б), когда поверхностное упрочнение (наклеп) является эффективным способом повышения усталостной прочности деталей и их стойкости к усталостному изнашиванию [7, 8].

При работе по твердым породам эту сталь целесообразно использовать только в случае, если деталь работает в условиях ударов без абразивного воздействия. Поскольку потеря массы при таком воздействии определяется усталостью металла от циклических пластических деформаций на поверхности детали, повышение способности сопротивляться этим деформациям в результате наклена должно приводить к уменьшению величины износа по сравнению со сталью близкой исходной твердости. Если же наряду с ударами имеет место и режущее воздействие абразивных зерен (рис.3, а), то сталь 110Г13Л каких-либо преимуществ, с точки зрения износстойкости, перед другими сталью не имеет, в том числе и при работе деталей под значительной нагрузкой.

Сравнительная твердость минеральных и инструментальных материалов:

Материал	Твердость (микротвердость) НВ
Гипс	30
Барит	100
Мрамор	110
Известняк	135-180
Известковый шпат	180
Ангидрит, плавиковый шпат	200
Сталь 90ХФ	372-458
Апатит	600
Роговая обманка	650
Нефрит	670
Ортоклаз	720
Оlivинит	800
Халцедон	925
Сплав ВК3	990
Полевой шпат, кремень	900-1100
Кварцит	1100-1130
Кварц	1250
Топаз	1350
Плавленый оксид ZrO ₂	1900
Корунд	2500-3000
Карбид кремния	3500
Карбид бора	3700
Алмаз	8000

Представлены значения твердости химически однородных природных минералов и микротвердости наиболее твердых фракций неоднородных, расположенные в порядке возрастания твердости [2, 6, 10], а также твердости металлических и неметаллических материалов, используемых в качестве режущего инструмента. Жирная линия разделяет материалы с твердостью, меньшей и большей значения твердости наклепанной стали 110Г13Л.

Можно заключить, что для минеральных материалов с меньшей твердостью целесообразно использовать сталь 110Г13Л при изготовлении изнашиваемых элементов горно-добывающего и перерабатывающего оборудования при всех видах износа, а для пород с большей твердостью (после жирной линии) – только в случае, если отсутствует абразивный износ.

Соответственно, резать сталь 110Г13Л могут только инструментальные материалы с большей твердостью. Твердость, которую приобретает эта сталь в результате наклена в процессе ее механической обработки (резания), превышает твердость обычно применяемого режущего инструмента, в том числе и полотна ножовки (обычно сталь 90ХФ). Из-за разности твердостей сталей режущая кромка инструмента быстро затупляется и инструмент выходит из строя. Это и объясняет высокую стойкость тюремных решеток из стали Гад菲尔да к перепиливанию и вообще самой стали к обработке резанием. В случае необходимости применения механической обработки изделий из стали Гад菲尔да для этой цели применяют алмазные и корундовые абразивные круги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барон Л.И. Абразивность горных пород при добыче / Л.И.Барон, А.В.Кузнецов. М., 1961, 213 с.
2. Барон Л.И. Определение свойств горных пород / Л.И.Барон, Б.М.Логунцов, Е.З.Позин. М., 1962, 332 с.
3. Болобов В.И. Износстойкость стали Гад菲尔да при больших удельных нагрузках / В.И.Болобов, В.С.Бочкин, Сюй Цинянь // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 1. С.38-42.
4. Гуляев А.П. Металловедение. М., 1986. 544 с.
5. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. М., 1976. 407 с.

6. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Б.Н.Арзамасов, И.И.Сидорин, Г.Ф.Косолапов и др. М., 1986. 384 с.

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

8. О целесообразности изготовления зубьев ковшей экскаваторов из стали 110Г13Л / В.И.Болобов, А.П.Баталов, Ю.В.Лыков, В.С.Бочков. Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Труды 10-й Международной научно-практической конференции. Воркута, 2012. С.319-322.

9. Солntsev Ю.П. Металловедение и технология металлов. М., 1988. 512 с.

10. Tennenbaum M.M. Износостойкость деталей и долговечность горных машин. М., 1960. 247 с.

11. Хрицков М.М. Закономерности абразивного изнашивания. М., 1975. 192 с.

3. Bolobov V.I. Wear resistance of Hadfield steel at high specific loads / V.I.Bolobov, V.S.Bochkov, Syui Tsinyan. Mining Machinery and Electromechanics. 2012. N 1. P.38-42.

4. Gulyaev A.P. Metallography. Moscow, 1986. 544 p.

5. Lakhtin Yu.M. Metallography and heat treatment of metals. Moscow, 1976. 407 p.

6. Materials Science: Textbook for higher technical education. / B.N.Arzasov, I.I.Sidorin, G.F.Kosolapov etc. Moscow, 1986. 384 p.

7. Methods to improve the durability of machine parts / V.N.Tkachev, B.M.Fishteyn, V.D.Vlasenko, V.A.Ulanov. Moscow, 1971. 272 p.

8. The expediency of making teeth excavator bucket of steel 110G13L / V.I.Bolobov, A.P.Batalov, Yu.V.Lykov, V.S.Bochkov. Development of mineral resources in the North: issues and solutions // Proceedings of the 10th International Scientific Conference. Vorkuta, 2012. P.319-322.

9. Solntsev Y.P. Metallography and metal technology. Moscow, 1988. 512 p.

10. Tennenbaum M.M. Wear resistance and durability of mining machines. Moscow, 1960. 247 p.

11. Khrushchev M.M. Patterns of abrasive wear. Moscow, 1975. 192 p.

REFERENCES

1. Baron L.I. Abrasion rocks at procuring / L.I.Baron, A.V.Kuznetsov. Moscow, 1961, 213 p.

2. Baron L.I. Defining the properties of rocks / L.I.Baron, B.M.Loguntsov, E.Z.Posin. Moscow, 1962. 332 p.