DOI *10.18454/PMI.2016.5.688*

Электромеханика и машиностроение

УДК 669.14: 621.787+621.926.3

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ БЫСТРОИЗНАШИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

В.И.БОЛОБОВ, **В.С.БОЧКОВ**
Санкт-Петербургский горный университет, Россия

На примере стали Гадфильда (110Г13Л), как основного материала быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования – бил, молотков, футеровок, отражающих плит дробилок и мельниц, проанализированы особенности влияния наклепа на интенсивность износа металлических материалов при различных видах изнашивания по твердым (более 1100 НВ) и мягким породам. Отмечена уникальная способность этой стали сопротивляться ударному износу, показано, что при абразивном воздействии породы сталь демонстрирует низкую износостойкость, которая при изнашивании по породам, твердость которых уступает твердости стали в наклепанном состоянии (менее 1100 НВ), может быть существенно (до 10 раз) повышена предварительным наклепом образцов.

Описаны разработанные авторами методики высокотемпературной термомеханической обработки образцов (свободная ковка при 1150-950 °С и последующая закалка в воде) и эксперименты по их абразивному изнашиванию. Представленные результаты испытаний показали, что твердость и износостойкость стали Гадфильда при изнашивании по твердому абразиву (электрокорунду 25А с агрегатной твердостью ~2500 НВ) зависят от интенсивности пластической деформации при ВТМО, возрастая с ее увеличением. Для максимальной интенсивности пластической деформации повышение износостойкости стали по сравнению с недеформированным материалом достигает 70 %. Приведен вид зависимости износостойкости стали от величины твердости НВ в результате пластического деформирования. Способ высокотемпературной термомеханической обработки может быть рекомендован к внедрению в технологии изготовления быстроизнашиваемых элементов горно-добывающего и горно-обогатительного оборудования с целью повышения их срока службы.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, наклеп, термомеханическая обработка, абразивная износостойкость.

Как цитировать эту статью: Болобов В.И. О возможности повышения износостойкости быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования термомеханической обработкой / В.И.Болобов, В.С.Бочков // Записки Горного института. 2016. Т.221. С.688-691. DOI 10.18454/PMI.2016.5.688

В настоящее время значительную часть эксплуатационных затрат на добычу полезных ископаемых и производство продукции горно-обогатительных предприятий составляют затраты на замену и ремонт быстроизнашивающихся элементов машин и оборудования. В связи с этим задача повышения износостойкости этих элементов является весьма актуальной.

При добыче и обогащении горных пород наибольшему износу подвергаются элементы машин и оборудования, непосредственно контактирующие с породой – зубья ковшей экскаваторов, траки гусениц дорожной техники, била, молотки, футеровки, отражающие плиты дробилок и мельниц. Наиболее часто используемый материал для изготовления этих элементов – аустенитная высокомарганцевая сталь 110Г13Л (0,9-1,4 С, 11,5-15,0 Mn, 0,5-1,0 Si, % по массе), известная по имени своего изобретателя как сталь Гадфильда. Сталь Гадфильда по стойкости к ударному износу является уникальной, ее используют более 100 лет и пока не нашли равноценных заменителей. Это объясняется повышенной способностью составляющего стали Гадфильда марганцовистого аустенита к упрочнению (наклепу) при ударном воздействии с повышением твердости с 200 до 700 НВ, что в первые годы изучения природы упрочнения этой стали связывали с превращением аустенита в мартенсит по линиям скольжения (мартенситная теория упрочнения стали Гадфильда [1]). Согласно более современным представлениям [1, 12] высокая стойкость и упрочнение стали при наклепе объясняются тремя основными причинами:

• образованием вторичных фаз (ε-мартенсита с ГПУ решеткой) в плоскостях сдвига аустенита, которые являются эффективными барьерами, затрудняющими пластическое течение;

• фрагментацией зерен, изменением блочности и возникновением микронапряжений;

• интенсивным образованием дефектов упаковки аустенита при внешнем воздействии.

Принято считать [6, 12], что при чисто абразивном воздействии или при абразивном изнашивании с небольшими ударными нагрузками 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 абразивную износостойкость. Хотя, как показано в работах [2, 9], данное утверждение справедливо

DOI 10.18454/PMI.2016.5.688

только для изнашивания стали по сравнительно мягким породам (менее 1100 НВ) (например, мрамору), твердость которых уступает твердости стали в наклепанном состоянии, когда предварительный наклеп может существенно (до 10 раз) повысить износостойкость материала. В случае изнашивания по породам большей твердости значительные удельные нагрузки, как и ударные воздействия, способствующие наклепу материала, не приводят к повышению износостойкости стали Гадфильда, и она по этому параметру не отличается от обычной среднеуглеродистой стали типа 45 [2, 3, 9, 13, 15, 16].

Отсутствие влияния наклепа на абразивную износостойкость стали отвечает общей, подтвержденной [16] опытами на различных металлах и сплавах, закономерности: износостойкость материалов, получивших различную степень наклепа при пластическом деформировании, практически остается неизменной, несмотря на повышение твердости. Эта закономерность объясняется тем, что в самом процессе абразивного изнашивания при царапании абразивными частицами изнашиваемого металла в местах их взаимодействия происходит наклеп, который больше предварительного наклепа и, по всей вероятности, является предельно возможным для данного материала [16]. При трении деталей из стали Гадфильда по породам, имеющим твердость зерен меньше твердости стали, металл разрушается не в результате царапания его зернами, а по причине усталости в результате многократной упругой деформации его поверхностного слоя. Поскольку процесс разрушения при усталостном износе начинается с зарождения на поверхности усталостной трещины, поверхностное упрочнение путем наклепа позволяет уменьшить скорость зарождения такой трещины и, соответственно, повысить усталостную износостойкость материала, что и наблюдалось в экспериментах [2, 9].

В то же время известно [4, 5, 8, 10, 11, 14, 17-20], что одним из наиболее эффективных способов повышения всего комплекса механических свойств и, как можно ожидать, износостойкости сталей широкого спектра наименований является их горячая пластическая деформация с последующей закалкой, т.е. применение высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). В литературе найдены сведения о применении этого способа обработки и для стали 110Г13Л.

Так, в работе [14] сообщается о повышении физико-механических свойств и износостойкости высокомарганцевой стали в результате ее горячего пластического деформирования ковкой и последующей закалки. Деформирование предлагается проводить при температурах 950-1200 °С, при которых сталь 110Г13Л обладает наиболее высокой ковкостью, а образцы, изготовленные из поковок после закалки их в воде с температуры конца ковки, имеют наиболее высокие механические свойства. В результате такой ВТМО повышаются как прочностные, так и пластические свойства стали. Для определения износостойкости образцы стали, обработанные указанным образом, помещали в галтовочный барабан, загруженный стальными шарами диаметром 40 мм. После непрерывной работы барабана в течение 100 ч образцы взвешивали с определением их массового износа. Было выявлено, что по мере повышения степени укова образцов до трех сопротивление стали к износу возрастает на 40 %, после чего изменяется незначительно.

Чтобы выяснить, насколько достигаемый в экспериментах [4] эффект повышения износостойкости будет сохраняться и при изнашивании, характерном для элементов горно-обогатительного оборудования, в настоящей работе исследовано и влияние ВТМО на скорость износа образцов стали 110Г13Л при трении их об абразивный материал.

Испытания проводили по модернизированной методике [2, 3, 9] на установке, схема которой представлена на рис.1, при скорости вращения шпинделя станка 11,4 $с^{-1}$. В качестве абразивной среды 1 (рис.1) использовали электрокорунд 25А как материал с агрегатной твердостью (~2500 НВ), заведомо превышающей твердость стали Гадфильда в наклепанном состоянии. При постоянной статической нагрузке торцевую поверхность образца 3 подвергали циклическому изнашиванию в течение 3,5 мин (7 циклов по 30 с) с замером массы после каждого цикла. Перед каждым новым циклом абразивный диск смещали относительно образца, что обеспечивало контакт металла со свежей поверхностью абразива. Определяли потерю массы образца Δm за каждый цикл, которую относили к площади контакта ($S \sim 50$ мм^2) его с абразивом. Перед испытаниями измеряли твердость HRC образцов на их торцевой поверхности, которую переводили в НВ.

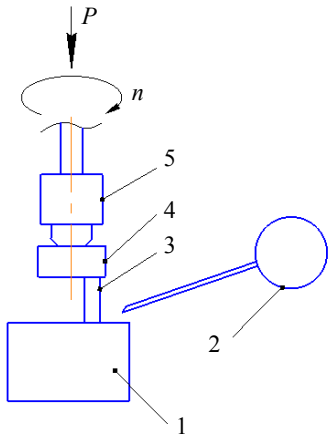


Рис.1. Схема установки для испытания образцов на абразивный износ

1 – диск абразивного материала; 2 – устройство подачи воды; 3 – испытуемый образец; 4 – держатель; 5 – шпиндель вертикально-сверлильного станка

Образцы стали для испытаний изготавливали в виде цилиндров ($D \sim 8$ мм) свободной ковкой при температуре

DOI 10.18454/PMI.2016.5.688

1150-950 °С из поковок больших диаметров (12 и 10 мм), что обеспечивало величину укова α металла 2,25 и 1,56 соответственно. Одну часть образцов с температуры ковки закаливали в воде, т.е. подвергали ВТМО. Другую для снятия эффекта пластического деформирования подвергали выдержке около 15 мин. в печи при температуре 1150 °С, с которой закаливали в воде, тем самым имитируя режим термической обработки (ТТО), обычно используемый при изготовлении изделий из стали 110Г13Л [7].

Зависимость удельной убыли массы образцов, подвергнутых различным видам обработки, от продолжительности воздействия абразива иллюстрирует табл.1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из стали Гадфильда на абразивную износостойкость

Образец	Способ обработки	Степень укова α	$\sum\Delta m/S$, мг/мм^2 за время t, мин.						
			0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
1	Закалка с температуры ковки	2,25	2,20	3,86	5,62	6,97	8,32	9,60	10,74
2	Закалка с температуры ковки	2,25	2,12	3,74	5,08	6,09	7,13	8,12	8,88
3	Закалка с температуры ковки	1,56	2,18	3,80	5,36	6,72	8,65	9,97	11,23
4	Закалка с температуры ковки	1,56	2,01	3,37	5,05	6,68	7,96	9,12	10,34
5	Нагрев и выдержка при 1150 °С с последующей закалкой	–	2,17	4,06	5,91	7,87	9,66	10,99	12,77
6	Нагрев и выдержка при 1150 °С с последующей закалкой	–	2,09	3,84	5,73	7,28	8,94	10,62	12,10

Как показала обработка результатов экспериментов (табл.1), все экспериментальные точки зависимостей $\sum\Delta m/S = f(t)$ удовлетворительно экстраполируются прямыми линиями, тангенсы угла наклона которых представляют собой скорости абразивного изнашивания K_i образцов. Величины, обратные K_i, принимали за значения абразивной износостойкости стали R_i, деформированной при ВТМО с той или иной интенсивностью.

Рис.2 иллюстрирует графические зависимости $\sum\Delta m/S = f(t)$ образцов, показавших наиболее высокую (образец № 2) и наиболее низкую (образец № 5) износостойкость.

Экспериментально установленные скорости изнашивания K_i, соответствующие им величины износостойкости R_i и результаты замера твердости образцов, расположенные в порядке возрастания НВ, представлены в табл.2. Рис.3 иллюстрирует зависимость износостойкости стали от величины твердости, достигаемой в результате высокотемпературной обработки.

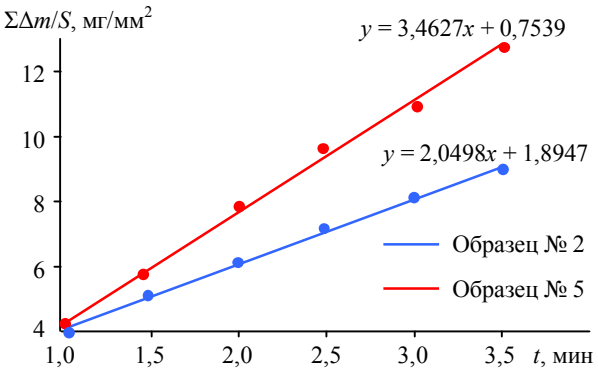


Рис.2. Зависимость потери относительной массы образцов от времени испытания

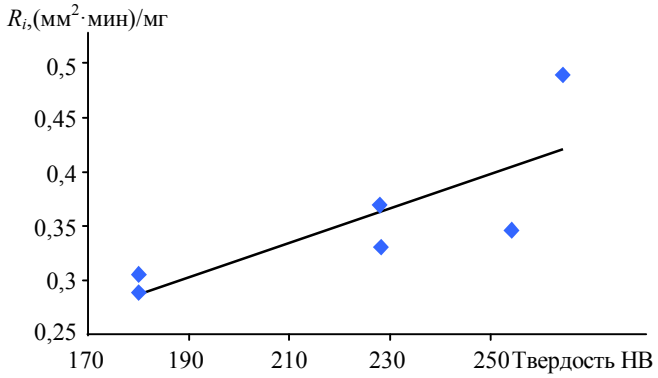


Рис.3. Зависимость износостойкости образцов стали от их твердости, достигаемой в результате обработки

Таблица 2

Характеристики изнашивания и твердость образцов из стали Гадфильда после различных режимов обработки

Образец	Способ обработки	α	Твердость НВ	K_i, мг/(мм^2·мин)	R_i, (мм^2·мин)/мг
5	ТТО	–	180	3,46	0,29
6	ТТО	–	180	3,29	0,30
3	ВТМО	1,56	228	3,02	0,33
1	ВТМО	2,25	228	2,72	0,37
4	ВТМО	1,56	254	2,88	0,35
2	ВТМО	2,25	264	2,05	0,49

DOI *10.18454/PMI.2016.5.688*

Из сравнения результатов испытаний (табл.2, рис.2) видно, что высокотемпературное деформирование материала перед закалкой, как и в условиях проведения экспериментов [14] при трении и ударе образцов о стальные шары, способствует повышению твердости и износостойкости высокомарганцевой стали в условиях абразивного изнашивания, возрастающих с увеличением интенсивности деформации (степени укова): для образца деформированного с максимальной интенсивностью (образец № 2 по сравнению с № 5) эти параметры повышаются на 47 и 70 % соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение способа высокотемпературной термомеханической обработки способно существенно повысить абразивную износостойкость стали 110Г13Л. Поскольку подобный положительный эффект был получен и для стали 35ХГСА [2] как материала, используемого для изготовления деталей горных машин, способ ВТМО может быть рекомендован к внедрению в технологию изготовления быстроизнашиваемых элементов горно-добывающего и горно-обогатительного оборудования с целью повышения их срока службы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богачев И.Н.* Структура и свойства железомарганцевых сплавов / И.Н.Богачев, В.Ф.Еголаев. М.: Металлургия, 1973. 296 с.

2. *Болобов В.И.* Влияние вида упрочняющей обработки на износостойкость материалов горного оборудования / В.И.Болобов, С.А.Чупин // Записки Горного института. 2015. Т.216. С.44-49.

3. *Болобов В.И.* Износостойкость стали Гадфильда при больших удельных нагрузках / В.И.Болобов, В.С.Бочков, Сюй Цинянь // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 10. С.12-14.

4. *Блюхер В.В.* Свойства пластически деформированной высокомарганцовистой стали / В.В.Блюхер, Л.И.Парфенов, И.П.Волчок // Металловедение и термическая обработка металлов. 1970. № 12. С.32-33.

5. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на свойства высокохромистой стали / М.А.Смирнов, И.Ю.Пышминцев, К.А.Лаев, А.М.Ахмедьянов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2012. № 39 (298). С.85-88.

6. *Гуляев А.П.* Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

7. *Давыдов Н.Г.* Высокомарганцевая сталь. М.: Металлургия, 1979. 176 с.

8. *Засыпкин А.Д.* Упрочнение пальцев траков гусеничных машин ВТМО винтовым обжатием / А.Д.Засыпкин, В.Б.Дементьев // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 4. С.37-39.

9. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / В.И.Болобов, А.П.Баталов, В.С.Бочков, С.А.Чупин // Записки Горного института. 2014. Т.209. С.17-22.

10. Исследование влияния деформационных параметров прокатки при повторной ВТМО на механические свойства стали / Д.А.Гурьянов, Е.И.Тескер, Б.Н.Замотаев, И.В.Рубежанская // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2009. Т.3. № 11. С.134-137.

11. Исследование влияния температурно-деформационных параметров прокатки при повторном ВТМО с промежуточным отжигом на механические свойства стали / Б.Н.Замотаев, М.П.Еремин, С.В.Чечин, А.С.Кандауров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т.8. № 15. С.96-99.

12. *Лахтин Ю.М.* Материаловедение / Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

13. *Парфенов П.И.* Структура и износостойкость стали Г13Л / П.И.Парфенов, Г.А.Сорокин // Металловедение и термическая обработка металлов. 1969. № 1. С.67-68.

14. Свойства высокохромистых коррозионностойких сталей, подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке / М.А.Смирнов, И.Ю.Пышминцев, К.А.Лаев, Е.В.Храмков, Д.М.Алютин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова. 2015. № 3 (51). С.78-82.

15. *Тененбаум М.М.* Износостойкость деталей и долговечность горных машин. М.: Госгортехиздат, 1960. 238 с.

16. *Хрущов М.М.* Исследования изнашивания металлов / М.М.Хрущов, М.А.Бабичев. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 351 с.

17. *Шаврин О.И.* Опыт применения процесса ВТМО винтовым обжатием при изготовлении осесимметричных деталей / О.И.Шаврин, В.Б.Дементьев // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 8. С.27-29.

18. Multiscale analysis of heat treatments in steels: Theory and practice / Barroqueiro B., Dias-De-Oliveira J., Pinho-Da-Cruz J., Andrade-Campos A. // Finite Elements in Analysis and Design. 2016. Vol.114. P. 39-56. DOI: 10.1016/j.finel.2016.02.004

19. Influence of hot-working conditions on a structure of X11MnSiAl17-1-3 steel for automotive industry / Dobrzański L.A., Czaja M., Borek W., Labisz K. & Tański T. // International Journal of Materials and Product Technology. 2015. № 51(3). P.264-280. DOI:10.1504/IJMPT.2015.072246

20. Heat treatment and thermo-mechanical treatment to modify carbide banding in AISI 440C steel: A case study / Krishna S.C., Tharian K.T., Chakravarthi K.V.A., Jha A.K. & Pant B. // Metallography, Microstructure and Analysis. 2016. № 5(2). P.108-115. DOI:10.1007/s13632-016-0266-0

***Авторы*: В.И.Болобов**, *д-р техн. наук, профессор, Boloboff@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Россия*), **В.С.Бочков**, *канд. техн. наук, ассистент, bochkof@list.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Россия*).

Статья принята к публикации 28.06.2016.