

УДК 669:539(073)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ФРИКЦИОННОГО ИЗНОСА
ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 45 ПОСЛЕ РАЗЛИЧНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ****Болобов В.И., Кремчев Э.А., Короткова О.Ю.***Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, e-mail: mouse_pzv@mail.ru*

Фрикционный износ на контактных поверхностях деталей приводит к размерному искажению поверхностей и потере массы деталей машин. На износостойкость влияет прочность, твердость, макро- и микроструктура металла поверхности детали. Применение современных масел и смазочных материалов с поверхностно-активными присадками позволяет значительно уменьшить потери на трение, но горные машины высокой энерговооруженности работают в условиях масляно-абразивного и полусухого трения, что приводит к значительному абразивному и фрикционному износу. Постановка задачи исследования выполнена на основе известных данных и снижении величины линейного и объемного износа при увеличении твердости контактирующих поверхностей. В работе предложены мероприятия по уменьшению фрикционного износа деталей путем увеличения твердости и прочности рабочих поверхностей, достигаемых при использовании высокотемпературной термомеханической обработки. Эффект увеличения фрикционной износостойкости подтвержден серией экспериментов, проведенных на машине трения МИ-1М (производство Россия); в парных испытаниях образцов в виде дисков из Ст45 (ГОСТ 1050-88) после высокотемпературной термомеханической обработки и дисков из Ст45 (ГОСТ 1050-88) после обычной закалки в воде. Как основной результат работы представлен расчетно-экспериментальный метод определения энергоемкости фрикционного износа.

Ключевые слова: фрикционный износ, высокотемпературная термомеханическая обработка, удельная энергоемкость износа, потеря массы образцов, путь трения скольжения, путь трения качения

**STUDY OF ENERGY CAPACITY OF FRICTION WEAR OF STEEL 45 SAMPLES
AFTER VARIOUS HEAT TREATMENT****Bolobov V.I., Kremcheev E.A., Korotkova O.Yu.***St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, e-mail: mouse_pzv@mail.ru*

Frictional wear on the contact surfaces of parts leads to dimensional distortion of surfaces and weight loss of machine parts. Wear resistance is affected by strength, hardness, macro- and microstructure of the metal surface of the part. The use of modern oils and lubricants with surface-active additives can significantly reduce friction losses, but the mining machines have a high power capacity and work under conditions of oil-abrasive and semi-dry friction, which leads to significant abrasive and friction wear. The statement of the research problem is performed on the basis of known data and a decrease in the magnitude of linear and volumetric wear with an increase in the hardness of the contacting surfaces. The work proposed measures to reduce the frictional wear of parts by increasing the hardness and strength of working surfaces, achieved with the use of high-temperature thermomechanical processing. The effect of increasing frictional wear resistance is confirmed by a series of experiments carried out on a friction machine MI-1M (manufactured in Russia); in paired tests of samples in the form of disks from St45 (GOST 1050-88) after high-temperature thermomechanical treatment and disks from St45 (GOST 1050-88) after the usual quenching in water. As the main result of the work, a calculated-experimental method is presented for determining the energy intensity of frictional wear.

Keywords: frictional wear, high-temperature thermomechanical treatment, specific energy-carrying capacity, loss of sample mass, sliding friction path, rolling friction path

Горные машины работают в тяжелых условиях с высокой вариабельностью внешних эксплуатационных факторов, подвергаются воздействию осадков, пыли, агрессивных сред и динамических нагрузок, что является причинами высокой интенсивности износа деталей.

Повышение надежности высоконагруженных горных машин связано с необходимостью снижения интенсивности изнашивания их деталей. Известны работы [1–3], связанные с развитием технологических способов повышения износостойкости деталей горных машин и оборудования. Обилие статей в научно-технических изданиях и проводимых конференций, посвященных проблеме износа высоконагруженной техники, говорят о нерешенности ряда вопросов и высокой актуальности данной темы.

Очевидно, что в зависимости от технологии изготовления деталей горных машин и используемых материалов интересен поиск технического решения, которое позволит решить производственную проблему повышения износостойкости в условиях сохранения энерговооруженности техники.

Существуют различные технические решения и методы, которые позволяют снизить интенсивность изнашивания деталей горного оборудования (применение специальных смазочных материалов и технологий смазки [1, 4, 5], применение более прочных сплавов для изготовления деталей, наплавка сплавов с высокой твердостью, поверхностная закалка, поверхностная пластическая деформация). Эти способы требуют изменения конструкций машин или дополнительного специального оснащения

их производства, что естественным образом усложняет и удорожает процесс.

В данной работе предложено решение, направленное на снижение интенсивности фрикционного изнашивания высоконагруженных деталей горных машин, заключающееся во включении в процесс изготовления отдельных групп контактирующих деталей высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) [6].

Цель исследования: повышение износостойкости поверхностей деталей горных машин на основе совершенствования технологии их высокотемпературной термомеханической обработки (далее в тексте ВТМО) в процессе изготовления [7].

Материалы и методы исследования

В качестве материала для изготовления образцов была выбрана Сталь 45 (ГОСТ 1050-88) [8], как материал, широко используемый для изготовления конструктивных элементов различного назначения.

Для изготовления образцов были сконструированы и изготовлены сборные подкладные штампы (рис. 1), состоящие из внутреннего пуансона, матрицы с отверстием для фиксации пуансона, верхней крышки и кольца (рис. 1). Для проведения высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) были изготовлены образцы (рис. 2) из материала Сталь 45 (ГОСТ 1050-88), различного диаметра ($D_1 = 33$ мм, $D_2 = 36$ мм, $D_3 = 38$ мм) и высоты ($h_1 = 27$ мм, $h_2 = 23$ мм, $h_3 = 21$ мм), но одинакового объема ($V = 21$ см³), с отверстием в центре.



Рис. 1. Оправка для осаждения заготовок в процессе ВТМО



Рис. 2. Заготовки для изготовления опытных образцов: образец 1 – Ст45 (ГОСТ 1050-88), $D_1 = 33$ мм $h_1 = 27$ мм, $V = 21$ см³; образец 2 – Ст45 (ГОСТ 1050-88), $D_1 = 36$ мм $h_1 = 23$ мм, $V = 21$ см³; образец 3 – Ст45 (ГОСТ 1050-88), $D_1 = 38$ мм $h_1 = 21$ мм, $V = 21$ см³

Заготовка нагревалась и выдерживалась в муфельной электрической печи при температуре 1000° ~ 20 мин, далее помещалась в штамп и с по-

мощью пневмомолота осаживалась для получения образца требуемой конфигурации (диск с отверстием). После осадки образцы подвергались закалке в воде [9]. В результате были получены образцы (рис. 3) одинакового размера ($D_k = 50$ мм, $H_k = 12$ мм), подвергнутые ВТМО с разной степенью деформации (табл. 1), которая характеризуется коэффициентом, рассчитываемым по формуле: $\lambda = H/H_k$.

Таблица 1

Результаты оценки твердости и степени деформации экспериментальных образцов

Номер образца	Режим термической обработки	λ	HRC
0	ТО	–	$\frac{45 - 53,5}{50}$
1	ВТМО	1,7	$\frac{51 - 56,5}{55}$
2	ВТМО	1,9	$\frac{54 - 59,5}{56,7}$
3	ВТМО	2,25	$\frac{55 - 60}{57,8}$

Примечание. Числитель дроби – интервал значений величины диаметра образцов, полученный при измерениях, знаменатель – среднее значение.

Боковая поверхность полученных образцов подвергалась токарной обработке.

При испытаниях образцов на радиальной машине трения МИ-1М в качестве контртела были использованы образцы такой же формы, но прошедшие только термическую обработку (рис. 3).



Рис. 3. Образец 1 Ст45 после ВТМО, образец 2 Ст45 после ТО

И в тех и других образцах изготавливали посадочные отверстия диаметром 16 мм для установки на машину трения (МИ-1М).

У всех образцов, подвергнутых ВТМО, твердость и прочность выше, чем у прошедших только закалку. Причем с увеличением степени деформации значение HRC образцов возрастает.

Опыты проводились на машине трения МИ-1М, позволяющей испытывать материалы на изнашивание при различных видах трения: качения, скольжения или трения обоих видов (табл. 2).

Таблица 2
Основные технические характеристики
машины трения МИ-1М

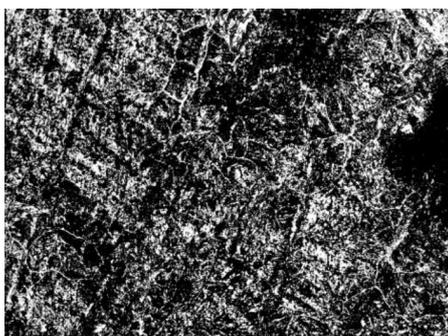
Технический показатель	Величина
Мощность электродвигателя привода, кВт	1
Частота вращения нижнего образца, с ⁻¹	7
Проскальзывание образцов, %	0, 10, 15, 20, 100
Максимальная нагрузка на пару трения, Н	2000

Образцы испытываемого материала в виде дисков диаметром 43 мм и толщиной 12 мм монтировались на отдельные валы, затем они прижимались друг к другу и приводились в движение с вращением в разные стороны. Частота вращения верхнего вала установки составляла 5,7 с⁻¹, что на 10% меньше частоты вращения нижнего вала 7 с⁻¹. В предположении равенства диаметров испытываемых образцов проскальзывание состав-

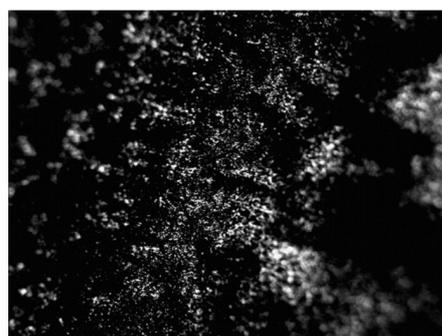
ляло 10%. Изменяя диаметр образцов, можно уменьшать или увеличивать проскальзывание [10].

Испытания проходили при усилии прижатия образцов 560 Н и 700 Н. Время проведения опыта 240 мин. Для обеспечения равных условий изнашивания производилась перестановка образцов с периодичностью один раз в 60 мин.

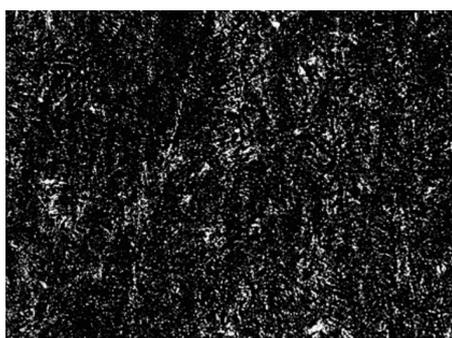
На рис. 4 представлены фотографии микрошлифов поверхностей дисков после проведения испытаний на износостойкость на машине трения МИ-1М. При изготовлении микрошлифов поверхность образцов шлифовалась, полировалась, а затем подвергалась и травлению 3% раствором HNO₃ в этиловом спирте. На всех поверхностях отчетливо просматривается мелкоигольчатый мартенсит, но особо измельченные зерна наблюдаются на образце 4 (рис. 4). На микрошлифе 1 (рис. 4) на торцевой поверхности закаленного диска под микроскопом отчетливо просматриваются цепочки зерен мартенсита (или цементита), а на микрошлифе 2 (рис. 4) микроструктуры цилиндрической поверхности этих структур уже нет – они, видимо, были разрушены при циклическом воздействии и изнашивании поверхностного слоя металла.



1)



2)



3)



4)

Рис. 4. Микрофотографии испытанных образцов, полученные при увеличении $\times 100$ на металлографическом микроскопе без объекта микрометра: образец ТО торцевая поверхность, Ст45 (ГОСТ 1050-88), после объемной закалки в воде (1); образец ТО цилиндрическая поверхность, Ст45 (ГОСТ 1050-88), после объемной закалки в воде (2); образец VTMO, торцевая поверхность, Ст45 (ГОСТ 1050-88), после высокотемпературной термомеханической обработки (3); образец VTMO, цилиндрическая поверхность, Ст45 (ГОСТ 1050-88), после высокотемпературной термомеханической обработки (4)

**Результаты исследования
и их обсуждение**

При обработке экспериментальных данных сравнивались потери массы Δm_1 образца, подвергнутого ВТМО, проведенной с максимальной интенсивностью пластической деформации $\lambda = 2,25$ (твердость 58 HRC), с потерей массы Δm_2 образца после ТО с твердостью 56 HRC за время $t = 240$ мин. Результаты представлены в табл. 3. Там же указан путь, пройденный каждой точкой поверхности образца за время испытаний, который принимали за путь качения $L_{\text{кач}}$. За путь трения $L_{\text{тр}}$ принимали разницу между путями, пройденными каждой точкой образцов, закрепленных на верхнем и нижнем валу испытательной установки, за цикл (60 мин), умноженную на число циклов (4). Полученные расчетом убыли массы $\Delta m_1, \Delta m_2$ относили к указанному пути $L_{\text{тр}}$ и получали величину удельного износа δ мг/км, а обратную ему величину за износостойкость материала I после той или другой термической обработки.

Величину напряжения σ_{max} образцов рассчитывали по формуле Г. Герца для случая сжатия двух дисков с усилием прижатия 700 Н.

$$\sigma_{\text{max}} = 0,418 \frac{\sqrt{P \times E}}{\sqrt{l \times R}} = 477 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где P – усилие прижатия дисков 700 Н; l – длина контактной линии (принималась равной ширине дисков 10 мм); $R_1 = R_2$ – радиусы дисков $21,5 \times 10^{-3}$ м; E – модуль упругости 2×10^{11} МПа.

Найдем ширину контактной линии:

$$a = 1,52 \sqrt{\frac{P}{E \times l} \times \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}} = 93,24 \times 10^{-6} \text{ мм}. \quad (2)$$

Площадь контакта составляет

$$S_k = 2a \times l = 186,48 \times 10^{-8} \text{ м}^2. \quad (3)$$

Тогда среднее напряжение:

$$\sigma_m = \frac{P}{S_k} = 376 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Сила трения на контакте при $f = 0,3$:

$$F_{\text{тр}} = P \times f = 700 \times 0,3 = 210 \text{ Н}. \quad (5)$$

Работа силы трения скольжения $A_{\text{тр.ск}}$ в контактной зоне дисков за время эксперимента (240 мин) и пути взаимного проскользывания дисков ($L_{\text{ск}} = 2637$ м) составит

$$A_{\text{тр.ск}} = F_{\text{тр}} \times L_{\text{ск}} = 210 \times 2592 = 544320 \text{ Дж}.$$

При экспериментах диски прокатываются друг по другу, и при этом так же происходит износ при трении качения сталь по стали с коэффициентом трения качения $f_k = 0,02$, путь качения рассчитывается следующим образом:

$$L_{\text{кач}} = \left[\pi (D_{\text{в}} n_{\text{в}} + D_{\text{н}} n_{\text{н}}) \frac{t}{2} \right] - L_{\text{ск}}, \quad (6)$$

где $D_{\text{в}} = D_{\text{н}}$ – диаметры верхнего и нижнего роликов, 0,043 м; $n_{\text{в}}$ – частота вращения верхнего шпинделя, 340 об/мин.; $n_{\text{н}}$ – частота вращения нижнего шпинделя, 420 об/мин.; t – длительность эксперимента, 240 мин.

$$L_{\text{кач}} = \frac{(3,14 \times 32,68 \times 240)}{2} - 2592 = 9678 \text{ м}. \quad (7)$$

Найдем работу, потраченную на изнашивание дисков при качении:

$$A_{\text{кач}} = f P L_{\text{кач}} = 135464 \text{ Дж}. \quad (8)$$

Общая работа трения составит

$$2A = A_{\text{кач}} + A_{\text{тр.ск}} = 67984 \text{ Дж}. \quad (9)$$

В процессе изнашивания взаимодействуют две поверхности, с практически одинаковой твердостью и прочностью, поэтому на изнашивание каждого диска тратится примерно половина общей работы трения, что составляет $A = 339892$ Дж на каждый диск.

Потеря массы диска, подвергнутого ВТМО, составила 0,477 г, а диска, подвергнутого ТО – 0,760 г, тогда удельная работа изнашивания рассчитывается по формуле

$$a_{\text{уд. втмо}} = \frac{A}{\Delta m_{\text{втмо}}} = 712,6 \text{ Дж/мг}, \quad (10)$$

$$a_{\text{уд. то}} = \frac{A}{\Delta m_{\text{то}}} = 430,2 \text{ Дж/мг}. \quad (11)$$

Проведенные испытания показали, что износостойкость образца, подвергнутого ВТМО, в 1,59 раза выше чем у образца, подвергнутого ТО.

Таблица 3

Результаты эксперимента

	m_0 (мг)	m_k (мг)	Δm_1 (мг)	$L_{\text{кач}}$ (м)	$L_{\text{тр}}$ (м)	K (мг/км)	δ (мм/км)	I (км/мм)
Образец ВТМО	115989	115608	477	12313	2592	180	0,017	58,8
Образец ТО	116085	115304	760	12313	2592	288	0,027	37,0

Аналогичные результаты были получены при усилии прижатия образцов 560 Н; $L_{\text{кач}} = 520$ м, $A_{\text{кач}} = 37312$ Дж, $A_{\text{тр.ск}} = 443016$ Дж, $A = 240164$ Дж, $a_{\text{уд.втмо}} = 2450,65 \frac{\text{Дж}}{\text{мг}}$, $a_{\text{уд.то}} = 1601 \frac{\text{Дж}}{\text{мг}}$, износостойкость в 1,53 раза выше у образца, подвергнутого ВТМО.

Выводы

Проведенные исследования позволили выполнить оценку повышения срока службы деталей горных машин при фрикционном изнашивании их рабочих поверхностей. На основании анализа используемых в настоящее время способов снижения интенсивности изнашивания предложено техническое решение, основанное на применении при изготовлении деталей высокотемпературной термомеханической обработки, повышающей износостойкость их рабочих поверхностей. Эффективность мероприятий по ВТМО заготовок из материала Сталь 45 подтверждена результатами экспериментальных исследований, полученных с применением ВТМО. В результате выполненной работы были сделаны следующие выводы:

– Использование метода свободнойковки при высокотемпературной осадке заготовок в процессе ВТМО позволяет получать образцы со степенью деформации до 2,25, имеющих твердость после закалки (57,8 HRC), что существенно превышает твердость закаленных образцов (50HRC), не подвергнутых предварительному деформированию.

– Сравнительные испытания полученных образцов на машине трения показали, что образцы, прошедшие ВТМО, имеют в 1,59 раза более высокую износостойкость, по сравнению с образцами, прошедшими только термическую обработку.

Результаты экспериментов доказывают, что термомеханическая обработка увеличивает износостойкость стали при фрикционном изнашивании в сравнении с традиционной закалкой. Условия испытаний на машине трения соблюдались одинаковыми для всех серий. При трении происходил значительный нагрев образцов (более 100 °С), что могло несколько разупрочнить материал, и эти тепловые потери не выделялись как отдельные затраты энергии.

Как основной результат работы представлен расчетно-экспериментальный метод определения энергоемкости фрикционного износа через оценку удельной работы изнашивания образцов контактирующих материалов. Следует отметить, что при трении на образцах мог возникнуть и электропотенциал, но это тонкое явление не удалось оценить количественно. При дальнейшем усовершенствовании оборудования и методики проведения экспериментальных исследований возможна оценка распределения затрат энергии, в том числе и на отделение частиц металла при фрикционном воздействии не только при сухом трении, но и при наличии смазки.

Список литературы

1. Поддубная А.А., Фокин А.С., Иванов С.Л., Кремчев Э.А., Потапенко В.С. Оценка смазывающей способности масел трансмиссий горных машин // Записки Горного института. 2008. Т. 178. С. 86–90.
2. Кремчев Э.А., Иванов С.Л. Энергоресурс подшипника скольжения // Записки Горного института. 2004. Т. 157. С. 178–180.
3. Zeytin H.K., Yildirim H., Berme B., Duduoğlu S., Kazdal G., Deniz A. Effect of Boron and Heat Treatment on Mechanical Properties of White Cast Iron for Mining Application. Journal of Iron and Steel Research International. 2011. vol. 18. no. 11. P. 31–39. DOI: 10.1016/S1006-706X(11)60114-3.
4. Куц С.Д., Кузнецов С.В., Моднев А.Ю. Триботехническая смазка и смазочная композиция // Патент РФ № 2327733С1. Патентообладатель Куц С.Д., Кузнецов С.В., Моднев А.Ю. 2008. Бюл. № 18.
5. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). М.: Эко-пресс, 2010. 604 с.
6. Smirnov V.A., Filatov V.I. High-Temperature Thermo-mechanical Treatment of Alloyed Structural and Tool Steels. Metal Science and Heat Treatment. 2015. vol. 56. no. 9–10. P. 470–476. DOI: 10.1007/s11041-015-9784-7.
7. Берштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1968. Т. 1. 695 с.
8. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. М.: Издательство стандартов, 1989. 85 с.
9. Берштейн М.Л., Берштейн Л.М., Бейлина О.Я., Горюхов Л.С., Гладышев С.А., Жуков В.А., Займовский В.А., Маресев М.И., Марковский В.Ф., Матевосьян А.П., Орджоникидзе Н.Ш., Прибавкин Е.М., Самедов О.В. Способ термомеханической обработки стали // Патент СССР № 1321075. Патентообладатель Московский институт стали и сплавов. 1999.
10. Гончаров П.Н., Коршунов В.Я. Методика проведения экспериментальных исследований износа образцов на машине трения МИ-1М. ФГБОУ ВПО «Брянская ГСХА», 2014. № 3. С. 67–69.