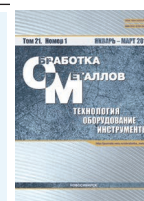




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды

И-Кан Ан ^{1, а}, Эрнст Вольф ^{1, б}, Юрий Сараев ^{2, с, *}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

^а <http://orcid.org/0000-0002-4721-7333>, igwan@sibmail.com, ^б <http://orcid.org/0000-0003-0121-8290>, volfernst@tpu.ru,

^с <http://orcid.org/0000-0002-9457-4309>, litsin@ispm.s.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.03

История статьи:

Поступила: 09 ноября 2018

Рецензирование: 31 января 2019

Принята к печати: 11 февраля 2019

Доступно онлайн: 15 марта 2019

Ключевые слова:

Абразивный износ

Низкотемпературная воздушная среда стали

Закономерности изнашивания

Схемы износных испытаний

Финансирование

Работа выполнена в рамках договора о научно-техническом сотрудничестве между НИ ТПУ, ИФПМ СО РАН, ИФТПС СО РАН, ИМАШ УрО РАН и программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, проект III.23.2.1.

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность рассмотренных в статье вопросов обусловлена стратегией освоения перспективных в экономическом отношении регионов России, для которых характерны суровые климатические условия. Это приводит прежде всего к неблагоприятному воздействию на материал деталей эксплуатируемой техники климатически низких температур. Выход из строя деталей, а нередко целых узлов бывает связан чаще всего с их износом, интенсивность которого, как правило, нарастает при воздействии отрицательных температур (к низкотемпературным принято относить процессы, протекающие при температурах ниже 273 К). Наиболее губительным в плане влияния на работоспособность этих элементов механических систем является их абразивное изнашивание. При этом практика эксплуатации техники в северных условиях показала, что интенсивность этого вида механического изнашивания деталей в узлах трения связана с неблагоприятным воздействием на физико-механические свойства, а значит, и на износостойкость сталей охлажденной воздушной среды. Поэтому изучение характера и причин поверхностного разрушения деталей, изготовленных из стальных материалов, представляет как научный, так и сугубо практический интерес. Ферритоперлит является основой для широко применяемых сталей (сплавов), и в рассматриваемом контексте стал **предметом** настоящего исследования, цель которого «выявить закономерности абразивного низкотемпературного изнашивания отожженных углеродистых сталей для их использования при разработке научно обоснованных рекомендаций, необходимых при конструировании высокоизносостойкости металлических материалов». **Методы исследования.** В научно-прикладном исследовании применялись как аналитические методы, так и экспериментальные износные испытания на установках оригинальных конструкций (защитены авторскими свидетельствами). В качестве расчетной модели для оценки траекторий и параметров скольжения абразивных зерен по рабочей поверхности ускорителя (ротора) использовалось понятие кинематической пары пятого класса (в качестве связи частицы с рабочей поверхностью в рассмотрение было введено понятие фрикционной связи по И.В. Крагельскому). **Результаты и обсуждения.** Обобщая полученные результаты, отметим следующее. Во-первых, экспериментально зафиксировано влияние схемы воздействия абразивных частиц в условиях низких температур на изнашиваемую поверхность образцов. За счет вогнутой (установка типа ЦУК) или выпуклой (способ кольца) формы изнашиваемой поверхности изменялась схема напряжений на разрушаемой поверхности образца. Отмеченное наглядно прослеживается на кривых износа в условиях охлажденной воздушной среды. Во-вторых, увеличение протяженности межфазовой некогерентной границы в системе α – твердый раствор – упрочняющая карбидная фаза (в отожженном состоянии испытывались углеродистые стали по составу от доэвтектоидных до заэвтектоидных) привело к росту абразивной износостойкости на всем интервале исследованных температур. Вместе с этим обозначенное имеет ряд особенностей, связанных с изменением механизма изнашивания при преодолении порога хладноломкости (от вязкого к хрупкому).

Для цитирования: Ан И-Кан, Вольф Э.Л., Сараев Ю.Н. Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 108–121. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-108-121.

*Адрес для переписки

Сараев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор,
 главный научный сотрудник
 Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
 пр. Академический, 2/4,
 634055, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (3822)492-942, e-mail: litsin@ispm.s.ru

Введение

Стратегия развития территорий в Арктике, на Крайнем Севере и в Сибири требует уделять проблемам работоспособности машин и техники северного исполнения особое внимание

[1–4]. Объекты топливно-энергетического, нефтегазового, горнодобывающего, строительного, транспортного и машиностроительного комплексов в процессе эксплуатации подвержены воздействию таких неблагоприятных факторов для их эксплуатационных свойств, как высокие нагрузки и значительные температурные перепады. Эти факторы, как правило, природно-техногенного характера ведут к авариям и иногда катастрофам, а также чаще всего к потере у вышеуказанных объектов работоспособного состояния. Анализируя эту ситуацию, авторы статей [2, 5] обращают внимание на то, что только прямой материальный ущерб от аварийных и иных ситуаций достигает 10 млрд руб. Неблагоприятные факторы ими сгруппированы так: конструктивные, к которым прежде всего относят научно- и нормативно-необоснованный выбор материалов; технологические; эксплуатационные и влияние человеческого фактора.

В настоящей работе основное внимание было сконцентрировано на изучении закономерностей абразивного изнашивания металлов и сплавов при воздействии глубоких отрицательных температур. Отметим, что к низкотемпературным принято относить процессы, протекающие при температурах ниже 273 К, а к криогенным – ниже 120 К. Кроме этого необходимо подчеркнуть и то, что к самому губительному – в плане влияния на работоспособность деталей и узлов трения – относят абразивное изнашивание, сопровождающееся царапающим, а еще хуже режущим изнашиваемую поверхность действием абразивных частиц. Поэтому с точки зрения методологии и методики в проведенном исследовании пристальное внимание было уделено вопросу выбора способа абразивного изнашивания и обоснования принципиальной схемы (см. сводную таблицу) абразивного воздействия на изнашиваемую охлажденную поверхность образца [6].

О методологических особенностях

Для решения методологического вопроса выполнен анализ способов и схем низкотемпературных испытаний на абразивное изнашивание. Оказалось, что в настоящее время для исследования в экспериментальных стендах и установках воспроизводятся следующие основные условия для реализации сугубо механического процесса:

- 1) изнашивание абразивной струей;
- 2) изнашивание в абразивной массе;
- 3) трение о закрепленный абразив;
- 4) ударно-абразивное изнашивание.

Различие в объеме разрушений, возникающих на изнашиваемых поверхностях, на наш взгляд, обуславливается в рассматриваемых способах испытаний рядом факторов. С одной стороны, влиянием механофизических свойств изнашиваемого материала, с другой – способом абразивного воздействия, а также абразивной способностью самой изнашивающей среды.

В том случае, когда отрицательная температура влияет на все перечисленные факторы одновременно, об исследовании закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания металлов и сплавов с позиций физики и механики разрушения судить весьма проблематично. В подобных ситуациях вернее всего вести речь об исследованиях, имеющих конкретное прикладное значение. По этой причине, с нашей точки зрения, при исследовании закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания (механофизический аспект) при выборе способа и обоснования схемы испытаний на износ следует, прежде всего, обеспечить такие условия:

- 1) на изнашиваемых металлических поверхностях процесс разрушения должен происходить при реализации такого напряженного состояния, когда свободно развиваются пластические деформации;
- 2) абразивная среда не должна менять своих обычных характеристик за весь период фрикционного взаимодействия с охлажденной поверхностью изнашиваемого образца;
- 3) параметры режима износных испытаний, например, скорость, угол атаки, характер приложения нагрузки, не должны оказывать существенного влияния на механизмы, контролирующие процесс хрупкого разрушения, а значит, и на механизм возникновения частицы износа.

На основании указанных выводов, следующих из анализа закономерностей абразивного износа, сделано заключение о том, что наиболее приемлемым для решения поставленных задач является способ, действие которого основано на свободном воздействии абразивных частиц на изнашиваемую поверхность.

Весьма распространенным является разгон частиц воздушным потоком. В практическом от-

Сводная таблица /
Summary table

Схемы испытаний / Test patterns				
Способы абразивного изнашивания / Abrasive wear methods		1	2	3
	1			
	2			
	3			
	4			

ношении способ интересен, однако для цели настоящего исследования малоприменим, так как обладает существенным недостатком. Суть недостатка может быть проиллюстрирована на примере широко известного способа центробежного разгона частиц [7 и 8]. Так, например, в направляющих каналах установки может иметь место существенное влияние на радиальную скорость частиц из-за их трения о стенки по всей длине канала. Отсутствие учета вышеуказанного влияния может привести к существенным погрешностям результатов исследований, и, как следствие, снизить их достоверность при достижении основной цели настоящего исследования – выявление закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания.

Методика исследования

Расчетно-аналитическая оценка траектории и параметров скольжения абразивных частиц по плоскому дну ускорителя

Для определения траектории частицы на дне плоского вращающегося центробежного ускорителя воспользуемся уравнением кинетики

$$F_{\text{тр}} + F_{\text{ин}} = 0, \quad (1)$$

в котором сила трения равна

$$F_{\text{тр}} = -mgf \frac{v}{\sqrt{v^2}} \quad (2)$$

и сила инерции

$$\mathbf{F}_{\text{ин}} = -m\mathbf{a}. \quad (3)$$

В выражении (3) ускорение равно [9]

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}^r + \mathbf{a}^e + \mathbf{a}^k, \quad (4)$$

где $\mathbf{a}^r$ – относительное ускорение; $\mathbf{a}^e$ – переносное ускорение; $\mathbf{a}^k$ – кориолисово ускорение.

Перепишем выражение (1) с учетом зависимостей (2)–(4) и сократим на m :

$$gf \frac{\mathbf{v}}{\sqrt{v^2}} + \mathbf{a}^r + \mathbf{a}^e + \mathbf{a}^k = 0. \quad (5)$$

Введем прямоугольную декартовую систему координат. Теперь положение частицы можно находить радиусом-вектором $\mathbf{r}$ (рис. 1).

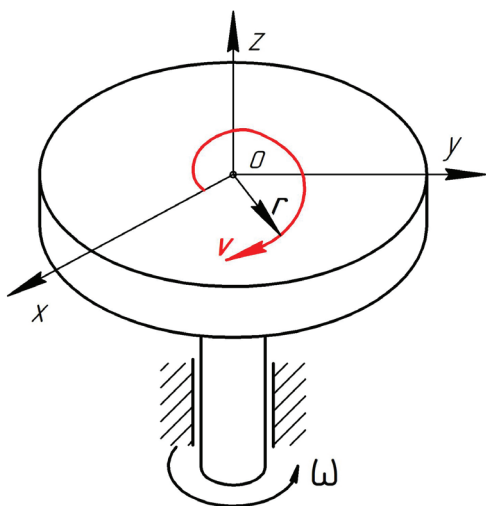


Рис. 1. Схема плоского центробежного ускорителя

Fig. 1. Pattern of a flat centrifugal accelerator

После несложных преобразований из векторного уравнения (5) получим два дифференциальных уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 2\omega \frac{dy}{dt} + \omega^2 x - gf \frac{\frac{dx}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}}, \quad (6)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -2\omega \frac{dx}{dt} - \omega^2 y - gf \frac{\frac{dy}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}}. \quad (7)$$

На рис. 2 и 3 представлены результаты численного решения уравнений (6) и (7) при начальных условиях $x = 5 \text{ мм}, y = 0, z = 0, \left(\frac{dx}{dt} \neq 0, \frac{dy}{dt} = 0\right)$,

когда сила трения оказывается меньше центробежной силы, и начало движения возможно. Коэффициент трения f задавался равным 0,10; 0,15; 0,20. Радиус ускорителя $R = 0,05 \text{ м}$. Использовалось несколько значений угловой скорости.

Расчетные траектории представляют спирали типа архимедовой, причем подход частиц к отверстиям обода ускорителя происходит под весьма острыми углами, так что частица может набрать радиальную составляющую скорости (v_r) лишь на пути в длину выходного канала ускорителя.

Из полученных графиков следует, что увеличение коэффициента трения f ведет к уменьшению времени достижения границы диска, увеличению шага спирали и мало сказывается на величине скорости вблизи периферии диска. Рост значения ω сопровождается увеличением количества витков спирали, увеличением скорости скольжения, что обеспечивает острый угол подхода частицы к ободу ускорителя и мало влияет на общее время движения.

Можно предполагать, что по мере продвижения по спирали скорость частицы v должна несколько возрастать. В самом деле, сила Кори-

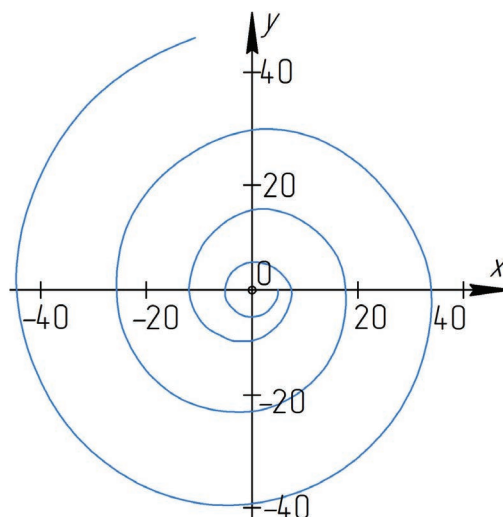


Рис. 2. Спиралеобразная траектория частицы относительно дна вращающегося ускорителя $f = 0,15; \omega = 78,75 \text{ с}^{-1}$

Fig. 2. The spiral-shaped trajectory of a particle relative to the bottom of the rotating accelerator is $f = 0.15; \omega = 78.75 \text{ s}^{-1}$

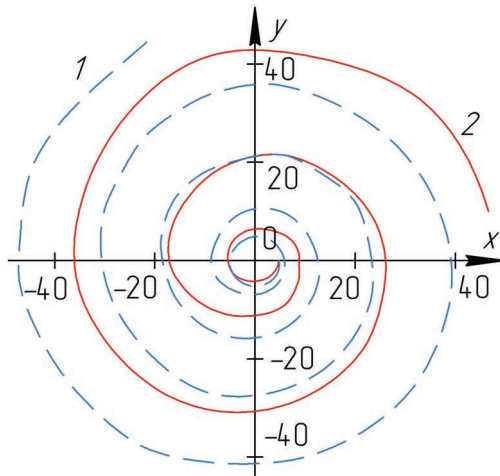


Рис. 3. Спиралеобразные траектории частицы относительно вращающегося дна ускорителя:

1 – $f = 0,1$; $\omega = 78,75 \text{ с}^{-1}$; 2 – $f = 0,1$; $\omega = 52,5 \text{ с}^{-1}$

Fig. 3. Spiral-shaped trajectories of a particle relative to the rotating bottom of the accelerator:

1 – $f = 0,1$; $\omega = 78.75 \text{ s}^{-1}$; 2 – $f = 0,1$; $\omega = 52.5 \text{ s}^{-1}$

олиса лишь в начальные моменты движения перпендикулярна радиусу ускорителя, т. е. центробежной силе. Далее сила Кориолиса, оставаясь перпендикулярной скорости v , будет составлять с направлением центробежной силы уже тупой угол, который по мере движения по спиральной кривой будет становиться все больше и больше. И хотя обе силы (центробежная и кориолисова) с ростом радиуса будут увеличиваться, но увеличение их равнодействующей замедлится вследствие увеличения тупого угла между ними.

Для проверки приведенных выше предположений умножим уравнение (6) на $\frac{dx}{dt}$, а (7) на $\frac{dy}{dt}$ и сложим их. Далее с учетом того, что $\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = v^2$ и $\sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = dL$ есть дифференциал длины дуги L , то в результате интегрирования, получим выражение $v = \omega r \sqrt{1 - \frac{2gL}{\omega^2 r^2}}$.

Из полученной формулы следует, что с ростом L скорость v все более отстает от значения ωr , хотя и возрастает с ростом r , что и высказывалось в предположении.

С учетом сил трения в выходном канале ускорителя (рис. 4), обусловленных прижимающими

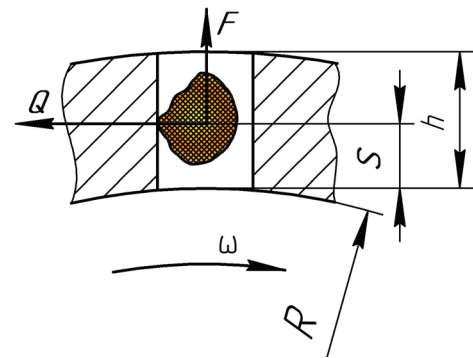


Рис. 4. Частица в радиальном канале

Fig. 4. Particle in the radial channel

частицу к стенкам канала силой веса mg и силой Кориолиса $2m\omega v_r = Q$, можно записать:

$$v_r \frac{dv_r}{dS} = \omega^2 (R + S) - f(g + 2\omega v_r). \quad (8)$$

Так как S по сравнению с радиусом дна ускорителя R мало, то можно для упрощения принять, что $S = h/2$. Тогда, обозначив

$$A = \omega^2 \left(R + \frac{h}{2} \right) - fg = \text{const},$$

из выражения (8) получим зависимость

$$dS = \frac{v_r dv_r}{A - 2f\omega v_r}.$$

Интегрируя последнее выражение при $S = 0$ и $v_r = 0$, получаем уравнение для определения значения скорости в момент вылета частицы из канала:

$$v_r + 2f\omega h = \frac{A}{2f\omega} \{ \ln A - \ln(A - 2f\omega v_r) \}. \quad (9)$$

Решение численного примера показало, что величина скорости, найденная по формуле (9) при $R = 0,05 \text{ м}$; $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$; $f = 0,1$; $h = 0,001 \text{ м}$, равна $v_r = 3,111 \text{ м/с}$. При этом $\text{tg } \alpha = \frac{3,111}{\omega(R+h)}$ и

$\alpha \approx 10,59^\circ$. Естественно, что с увеличением коэффициента трения радиальная скорость на вылете будет меньше. Меньше будет и сам угол.

Аналогичный подсчет для $\omega = 52,35 \text{ с}^{-1}$; $f = 0,1$; $R = 0,05 \text{ м}$ и $h = 0,001 \text{ м}$ показывает, что радиальная скорость на вылете v_r будет $0,515 \text{ м/с}$, а угол между направлением полета частицы вне ускорителя и касательной составляет $\alpha \approx 10,55^\circ$.

Следовательно, можно утверждать, что простой по изготовлению плоский центробежный ускоритель обладает таким свойством, что траектории частиц относительно вращающегося дна ускорителя носят спиралеобразный характер, причем подход частиц к цилиндрическому ободу ускорителя происходит под острыми углами. При малых каналах траектория частиц практически остается неизменной с сохранением линейной скорости периферийных точек ускорителя.

Таким образом, частицы могут быть направлены на исследуемые образцы под заданными углами атаки и найденной выше скоростью.

Экспериментальные исследования

В соответствии с вышеизложенным ранее, нами была создана установка [10], принцип действия которой базировался на центробежном разгоне абразивных частиц. В отличие от известных конструкций установок типа ЦУК [11] в ускорителе (роторе) отсутствовали радиальные каналы большой длины (делались в боковой стенке ротора отверстия). Таким образом, обеспечивался выход абразивных частиц практически по касательной к боковой поверхности ротора. Угол атаки α в рассматриваемом случае не зависел от скорости выхода абразивных частиц из боковых отверстий ротора и определялся из чисто геометрических соображений: $\alpha = \arccos(\rho/R)$, где ρ – радиус окружности внешней боковой поверхности ротора; R – радиус окружности концентрически расположенного относительно ротора цилиндрического образца (рис. 5).

Разработанная система охлаждения позволяла плавно изменить температуру на изнашиваемой поверхности от комнатной до 143 К [10]. Износ определялся одним из самых достоверных способов – взвешиванием на аналитических весах до и после опыта. Весовой износ пересчитывался в объемный (в кубических миллиметрах).

Результаты оценки влияния температуры на закономерности абразивного изнашивания отожженной стали 20 представлены на рис. 6. Монотонное возрастание абразивной износостойкости (линейная зависимость) по мере понижения температуры изнашиваемой поверхности образца, несмотря на рост твердости HV [12], объяснить на основе известных исследований по вопросам хрупкого разрушения [13–15] весьма

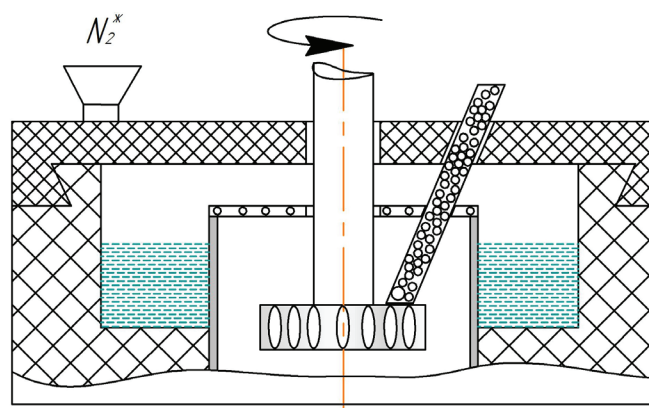


Рис. 5. Схема конструкции установки для низкотемпературных испытаний на износ по способу центробежного разгона

Fig. 5. The design of the installation for low-temperature wear tests by the method of centrifugal acceleration

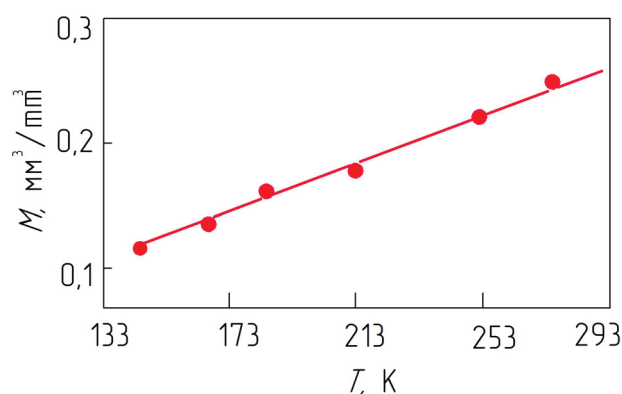


Рис. 6. Зависимость величины износа стали 20 от низких температур

Fig. 6. Dependence of wear of “steel 20” on low temperatures

затруднительно. По-видимому, повышение износостойкости при понижении температуры как-то связано с проявлением эффекта хладноломкости в сталях. Найти до конца удовлетворительное объяснение полученному результату с точки зрения изменения только физико-механических характеристик в рассматриваемом интервале изменения температуры затруднительно [16]. В какой-то мере удовлетворительное объяснение выявленным закономерностям абразивного низкотемпературного изнашивания дают результаты склерометрических испытаний, которые проведены Н.Н. Титовским и В.О. Титовской (выполнены под руководством доктора физ.-мат. наук В.Н. Кашеева). Исследовался характер поверх-

ностного разрушения сталей при царапающем воздействии конического индентора в широком интервале температур от +20 до –196 °С. Обнаружено, что с понижением температуры воздушной среды прежде всего уменьшается глубина царапин и вместе с этим возрастает тангенциальное усилие микрорезания. Кроме того, было зафиксировано также возникновение в контактной зоне сложного напряженного состояния (микрообъем), которое отличается от напряженного состояния, возникающего в приконтактной зоне (макрообъем). В результате следует подчеркнуть тот факт, что образование микростружки связано как с деформационными характеристиками, так и с характеристиками процесса разрушения (причем специфического поверхностного).

В частности, не исключено, что в использованной нами схеме износных испытаний в разрушаемой поверхности реализуется напряженное состояние, при котором затруднительно свободное развитие пластической деформации, а способ охлаждения неподвижного образца отвечает условиям, при которых по толщине неподвижного цилиндрического образца возникают градиенты температур, влияние которых на характеристики износа доказано исследованиями проф. В.Н. Кашеева [18, 19]. В этой связи было проведено исследование абразивного износа с использованием способа, исключающего влияние фактора, связанного с градиентом температуры, а также обеспечивающего свободное развитие пластических деформаций на изнашиваемой поверхности.

Результаты и их обсуждение

Способ кольца, вращающегося в потоке свободнопадающих абразивных частиц (патент РФ № 763741)

Проанализируем возможные варианты принципиальных схем испытаний на износ в рамках данного способа аналитическим методом (рис. 7).

Угол атаки α можно найти из скалярного произведения двух векторов

$$\mathbf{V}_{об} \mathbf{V}_{\Sigma} = V_{об} V_{\Sigma} \cos \alpha, \quad (10)$$

где $\mathbf{V}_{об}$ – вектор линейной скорости образца в точке падения частицы обращенного механизма:

$$\mathbf{V}_{об} = R\omega(\sin \varepsilon \mathbf{j} - \cos \varepsilon \mathbf{i}); \quad (11)$$

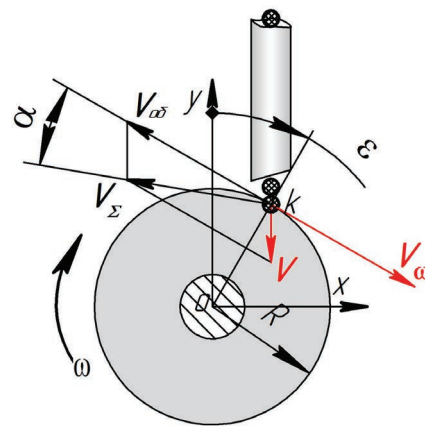


Рис. 7. Расчетная схема для определения угла атаки

Fig. 7. Computational pattern for determining the angle of impact

$\mathbf{V}_{\Sigma}$ – вектор суммарной скорости, равный

$$\mathbf{V}_{\Sigma} = \mathbf{V}_{об} + \mathbf{V}, \quad (12)$$

в котором $\mathbf{V}$ – вектор скорости падения абразивной частицы:

$$\mathbf{V} = -V\mathbf{j}. \quad (13)$$

В выражениях (11) и (13) $\mathbf{i}$ и $\mathbf{j}$ -орты соответственно осей x и y прямоугольной системы координат Oxy .

На основании (10)–(13) после несложных преобразований получим угол атаки:

$$\alpha = \arccos \frac{\omega R - V \sin \varepsilon}{\sqrt{(\omega R \sin \varepsilon - V)^2 + (\omega R \cos \varepsilon)^2}}.$$

Принципиальной особенностью данного способа испытаний на износ является свободное падение абразивных частиц, которые не увлекаются газовым или жидкостным потоком. Вертикальная скорость зерна обеспечивает пробивание слоя воздуха, прорывающегося в зазор между торцевой поверхностью конца направляющей трубки и изнашиваемой поверхностью вращающегося образца (Т-образный в диаметральном сечении, рис. 8). Тангенциальные силы, развивающиеся в результате удара абразивного зерна по изнашиваемой поверхности вращающегося образца, обеспечивают разрушение. Многочисленными экспериментами [18] доказано, что механизм формирования частицы металлического износа при острых углах атаки связан с процессом царапания или микрореза-

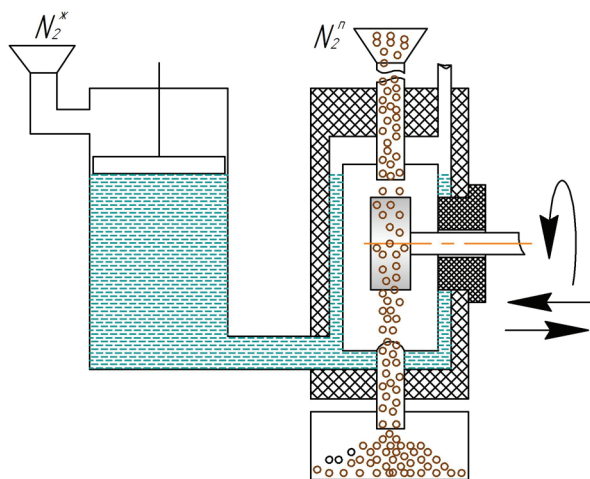


Рис. 8. Схема конструкции установки для низкотемпературных испытаний на износ по способу кольца, вращающегося в абразивном потоке

Fig. 8. Installation pattern design for low-temperature wear tests according to the method of a ring rotating in an abrasive flow

ния (продукты износа представляются в виде коротких микростружек). Важно подчеркнуть, что в обычных условиях при комнатной температуре возникновение частицы металлического износа для пластичных материалов сопровождается появлением по краям следов абразивного разрушения характерных навалов с одновременным возникновением наклепанного слоя. По данным Э.В. Рыжова, степень и глубина наклепанного слоя незакаленной углеродистой стали при шлифовании кругами разной зернистости лежат в диапазоне величин: 40...60 % и 30...60 мкм соответственно. Данные параметры наклепанного слоя определялись измерением микротвердости на косых шлифах. Отмеченное свидетельствует о развитии на изнашиваемых металлических поверхностях кольцевого образца значительных пластических деформаций. При этом следует отметить, что эти деформации на выпуклой поверхности образца развиваются в нестесненных условиях.

Результатами исследований М.М. Хрущева процессов изнашивания пластичных металлических материалов по абразивной шкурке (кругу) с соблюдением рекомендуемого режима испытаний (нагрузка на образец, скорость скольжения) показано, что после стадии прирабочного износа наступает стадия установившегося износа, при которой частица металлического износа форми-

руется в пределах слоя, наклепанного предшествующим абразивным воздействием [19, 20]. Вполне закономерно предположить, что при достижении области низких температур степень и глубина наклепа уменьшаются, что, в свою очередь, приводит к уменьшению объема, уносимого с изнашиваемой охлажденной поверхности материала.

Чрезвычайно важным параметром режима испытаний на износ в рассматриваемом случае является и скорость соударения. В.Н. Кашеевым [18] доказано, что удары под острыми углами атаки в обычных условиях испытаний не дают оплавлений на изнашиваемой металлической поверхности при скоростях соударения частиц с поверхностью вплоть до $50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В проведенных испытаниях угол атаки был в пределах острого, а скорость соударения была не более $16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В качестве абразивного материала применялся электрокорунд нормальный с номером зернистости 200 (шлифзерно). Интервал температур задавался от 293 до 113 К. Абразивному изнашиванию были подвергнуты углеродистые стали (0,23; 0,57; 0,68 и 1,04 %С) в отожженном состоянии. Результаты представлены на рис. 9.

Из графиков весьма наглядно прослеживается повышение износостойкости (величина,

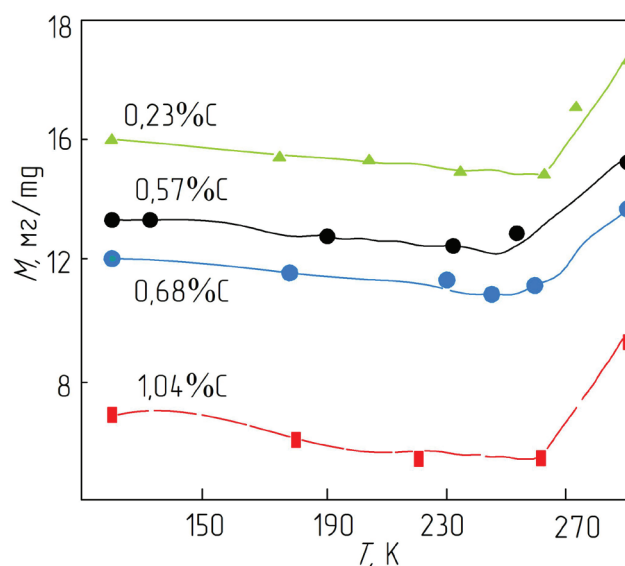


Рис. 9. Зависимости износа углеродистых сталей от низких температур (процентное содержание углерода показано на кривых износа)

Fig. 9. Dependence of the wear of carbon steels on low temperatures (the percentage of carbon is shown on the curves of wear)

обратная износу) в интервале температур от 293 до 240 К. В этом же интервале температур происходит рост твердости для сталей Ст. 3кп, 45, У10А [12]. Однако несмотря на дальнейший рост твердости на всем рассматриваемом в цитируемой книге [12] температурном интервале вплоть до 77 К, износостойкость после 240 К, как следует из представленных графиков, снижается. Комплексный анализ [21] позволяет выявить тенденцию – снижение идет более интенсивно для сталей с меньшим содержанием углерода, а значит, и с меньшим содержанием упрочняющей фазы (карбидов). Данный факт можно гипотетически объяснить опережающим распространением частицы износа у пластичного при комнатной температуре феррита за пределы наклепанной зоны (после преодоления порога хладноломкости).

По данным многочисленных исследований [16], например с понижением температуры, прочностные характеристики и, прежде всего, предел текучести возрастают и при этом характеристики пластичности падают. Вероятнее всего, склонность углеродистых сталей к снижению износостойкости после температуры 240 К, как и при абразивно-ударном изнашивании [22], обусловлена соотношением названных характеристик и зависит главным образом от структурно-физических параметров материала [17]. Аспекты физико-механического анализа особенностей поверхностного разрушения при абразивном низкотемпературном изнашивании углеродистых сталей позволяют сделать предположение о проявлении губительного влияния процессов хрупкого разрушения на рост износа после температуры 240 К. В теории разрушения главная проблема в том, что не выявлена связь между атомным (дислокационным) механизмом разрушения твердых тел и его макроскопическими характеристиками.

Вопросами хрупкого разрушения, которые были связаны с поломкой рельсов, возникающими при наступлении климатически низких температур, томские ученые [13 и 14] стали заниматься с 1930 года. Несколько позднее эта проблема привлекла внимание Н.Н. Давиденкова [15] и долгое время оставалась в поле зрения представителей его школы. Более того, с хрупким разрушением стали связывать факт утраты

пластичности при высокоскоростном ударе [23]. Так, например, Ф.Ф. Витман экспериментально установил, что при скорости удара 50 мс^{-1} по образцу из отожженной стали 20 в месте возникновения хрупкой трещины пластическая деформация уменьшилась до нуля. В то же время современными методами анализа выявлено, что применяемые в технике металлические материалы нельзя отнести к идеально хрупким при любой совокупности условий нагружения – процесс разрушения всегда сопровождается пластической деформацией [24 и 25].

Сложность методики проведения испытаний в условиях охлажденной воздушной среды заключалась прежде всего в том, что на охлаждаемых поверхностях – в результате проявления эффекта вымораживания влаги воздуха – образовывалась «снеговая шуба». Это, в свою очередь, приводило к искажению получаемых результатов и, понятно, вызывало сомнение в их достоверности.

Оригинальными приемами удалось не только устранить влияние указанного неблагоприятного фактора (имеется ряд других сложностей), но и добиться приемлемого расхода хладагента – длительность испытаний велика, особенно при переходе в область низких температур. При этом колебание температуры в криокамере относительно заданной в течение проведения опыта было в пределах 3 %. На каждое фиксирование значения температуры производилось три испытания. В случае, если разброс по весовому износу превышал 5 % относительно среднего арифметического, то число испытаний доводилось до пяти. На графиках в виде фиксированных точек представлены средние арифметические значения. Помимо прочего заметим, что максимальную достоверность по износу дает взвешивание – фиксируется потеря массы. Вместе с тем при сравнении абразивной износостойкости сплавов различного удельного веса желательно оперировать параметрами объема (кубический миллиметр). Интенсивность изнашивания, скорость изнашивания (мгновенная, средняя) и другие производные используются для интерпретации в зависимости от цели и задач конкретного исследования.

В качестве резюме отметим, что в предисловии «Многоуровневая природа разрушения:

концепции, модели, эксперименты» к тематическому выпуску журнала «Физическая мезомеханика» (2015. – № 5. – С. 4) его редакторы проф. F. Berto и акад. РАН В. Панин подчеркивают: «Понимание явления разрушения связано с изучением различных форм диссипации энергии, микроскопических свойств и их взаимодействием с макроскопическими параметрами, что представляет собой сложную, но актуальную задачу».

Заключение

Полученные результаты позволяют прояснить металлофизическую и механическую природу абразивного низкотемпературного изнашивания углеродистых сталей доэвтектоидного и заэвтектоидного состава (ферритоперлитных и перлитоцементитных). Поэтому вопросу в настоящее время существует ряд противоречивых представлений. Концепцией красноярских исследователей (Горюшкин, Ковальчук, Титовские, Тарасов) утверждается, что с понижением температуры абразивная износостойкость металлических материалов снижается. Однако результаты исследований Когана и Ангеловой (СФТИ при ТГУ) при близкой схеме износных испытаний устанавливают совершенно противоположный факт. Помимо этого существует точка зрения московских ученых (Тылкин, Суслов) о практической независимости абразивной износостойкости от уровня задаваемого охлаждения. Проведенные нами исследования позволяют утверждать, что на закономерности абразивного низкотемпературного изнашивания углеродистых сталей помимо температуры одновременно оказывает влияние схема абразивного воздействия, а также ряд других факторов, например скорость и характер приложения нагрузки. Более того, на сопротивляемость углеродистых сталей абразивному разрушению следует влиять, как это показывают результаты физико-механического анализа, через упрочняющее воздействие на ферритную основу и карбидную фазу. Такое упрочнение осуществляется в основном термообработкой и легированием.

Список литературы

1. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Ю.Н. Сараев, С.В. Гладковский, Н.И. Голиков и др. // Научные технологии в проектах РНФ. Сибирь / под ред. С.Г. Псахье и Ю.П. Шаркеева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. – Гл. 5. – С. 134–202. – ISBN 978-5-89503-607-5.
2. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.Н. Создание техники северного исполнения – проблема социально-экономического развития восточных регионов России // Вестник РАН. – 2015. – Т. 85, № 2. – С. 155–163. – doi: 10.7868/S0869587315020097.
3. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения. Ч. 1 / В.М. Бузник, Н.П. Бурковская, И.В. Зибарева, Р.Н. Черепанин // Материаловедение. – 2017. – № 4. – С. 8–16.
4. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения. Ч. 2 / В.М. Бузник, Н.П. Бурковская, И.В. Зибарева, Р.Н. Черепанин // Материаловедение. – 2017. – № 5. – С. 22–28.
5. Научно-методические основы дефектоскопии, диагностики и мониторинга состояний материалов и технических систем / М.А. Махутов, М.М. Гаденин, В.В. Иванов, П.В. Миодушевский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – № 10. – С. 47–56.
6. Кащеев В.Н. К методике определения абразивной износостойкости металлов при низких температурах // Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научно-технической конференции «Работоспособность машин и конструкций в условиях низких температур. Хладостойкость материалов». – Якутск: ИФТПС ЯФ СО АН СССР, 1973. – С. 22–23.
7. Kleis J. Probleme der Bestimmung des Strahlverschleisses bei metallen // Wear. – 1969. – Vol. 13, iss. 3. – P. 199–215. – doi: 10.1016/0043-1648(69)90151-3.
8. The physical mechanism of the formation of metal microspheres in the wear process / J. Kleis, U. Muiste, U. Pilvre, H. Uemois, H. Uetz // Wear. – 1979. – Vol. 53, iss. 1. – P. 79–85. – doi: 10.1016/0043-1648(79)90218-7.
9. Ишлинский А.Ю. Классическая механика и силы инерции. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
10. Патент 1237951 СССР. Установка для исследования ударного абразивного воздействия на образцы / В.Н. Кащеев, А.Н. Солод, Э.Л. Вольф. – Оpubл. 15.06.1986.

11. Клейс И.Р. Об изнашивании металлов в абразивной струе // Труды Таллинского политехнического института. – Таллин, 1959. – № 168. – С. 3–27.
12. Ларионов В.П., Ковальчук В.А. Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений. – Новосибирск: Наука, 1976. – 206 с.
13. Кузнецов В.Д., Добровидов А.Н. Хрупкость рельсов при низких температурах и способы ее уменьшения // Сталь. – 1930. – № 3–4. – С. 86–87.
14. Кузнецов В.Д. Хрупкость металлов // Техническая энциклопедия. – М., 1934. – Т. 25. – С. 621–626.
15. Давиденков Н.Н. О хрупком разрушении // Вопросы машиноведения. – М., 1950. – С. 467–474.
16. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
17. Глезер А.М. О соотношении прочности и пластичности металлических материалов // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 1. – С. 2.
18. Кащеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1970. – 247 с.
19. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.
20. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
21. Кащеев В.Н., Вольф Э.Л. Изнашивание потока частиц стальной поверхности и ее температура // Трение и износ. – 1982. – № 4. – С. 655–660.
22. Sorokin G.M., Malyshev V.N. Methods of choosing high-strengthened and wear-resistant steels on a complex of mechanical characteristics // New tribological ways / ed. by T. Ghrib. – Intech Open, 2011. – P. 197–218. – ISBN 978-953-206-7.
23. Давиденков Н.Н. Проблема удара в материаловедении. – М.: Изд-во АН СССР, 1938. – 116 с.
24. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
25. Liebowitz H. Fracture. An advanced treatise. Vol. 6. Fracture of metals. – New York; London: Academic Press Publ., 1969. – 506 p. – ISBN 10: 0124497063. – ISBN 13: 9780124497061.

Конфликт интересов

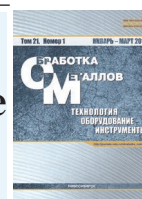
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Physical and Mechanical Aspects of Abrasive Wear of Steels in a Cooled Air Environment

*I-Kan An^{1, a}, Ernst Wolf^{1, b}, Yurii Saraev^{2, c, *}*

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0002-4721-7333>,  igwan@sibmail.com, ^b  <http://orcid.org/0000-0003-0121-8290>,  volfernst@tpu.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-9457-4309>,  litsin@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 November 2018

Revised: 31 January 2019

Accepted: 11 February 2019

Available online: 15 March 2019

Keywords:

Abrasive wear

Low-temperature air environment
steels

Wear patterns

Wear test schemes

Funding

The work is carried out within the framework of an agreement on scientific and technical cooperation between NI TPU, ISPMS SB RAS, IFTPS SB RAS, IMASH UB RAS and fundamental scientific research programs of state academies of sciences for 2013–2020, project III.23.2.1.

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the issues discussed in the paper is due to the strategy of development of economically promising regions of Russia, which are characterized by severe climatic conditions. This leads primarily to adverse effects on the material parts of the equipment operated by climatically low temperatures. Failure of parts and often assemblies is most often associated with its wear, which intensity, as a rule, increases when exposed to negative temperatures (low-temperature processes are usually attributed to processes occurring at temperatures below 273 K). The most destructive, in terms of the impact on the performance of these elements of mechanical systems, is its abrasive wear. At the same time, the practice of operation of equipment in Northern conditions showed that the intensity of this type of mechanical wear of parts in friction units is associated with an adverse effect on the physical and mechanical properties, and hence on the wear resistance of cooled air steels. Therefore, the study of the nature and causes of surface destruction of parts made of steel materials is of both scientific and purely practical interest. Ferrite-perlite is the basis for widely used steels (alloys) and in this context has become the **subject of this study**, associated with the **goal**: “to identify patterns of low-temperature abrasive wear of annealed carbon steels for its use in the development of evidence-based recommendations required in the design of high-wear resistance of metal materials”. This was part 1 of the study. **Methods.** In the scientific and applied research, both analytical methods and experimental wear tests on the installations of the original structures are used (protected by copyright certificates). The concept of kinematic pairs of the fifth class is used as a design model for the estimation of the trajectories and parameters of the sliding of the abrasive grains on the working surface of the accelerator (rotor). **Results and discussion.** Summarizing the results, it is necessary to note the following: **First**, the influence of the scheme of influence of abrasive particles on the wear surface of samples at low temperatures is experimentally recorded. Due to the concave (installation of the type of MCC) or convex (ring method) shape of the wear surface, the scheme of stresses on the destroyed surface of the sample is changed. This can be clearly seen on the wear curves in a cooled air. **Secondly**, the increase in the length of the interphase incoherent boundary in the system α -solid solution-hardening carbide phase (in the annealed state, carbon steels were tested in composition from pre-eutectoid to hypereutectoid) led to an increase in abrasive wear resistance over the entire range of the studied temperatures. At the same time, the indicated phenomenon has a number of features associated with a change in the wear mechanism when overcoming the threshold of cold fracture (from viscous to brittle).

For citation: An I-Kan, Wolf E.L., Saraev Yu.N. Physical and mechanical aspects of abrasive wear of steels in a cooled air environment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 108–121. doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-108-121. (In Russian).

References

1. Saraev Yu.N., Gladkovsky S.V., Golikov N.I. et al. *Poiskovye issledovaniya povysheniya nadezhnosti metallokonstruktsii otvetstvennogo naznacheniya, rabotayushchikh v usloviyakh ekstremal'nykh nagruzok i nizkikh klimaticheskikh temperatur* [Exploratory studies on improving the reliability of critical-use metal structures operating

* Corresponding author

Saraev Yurii N., D.Sc. (Engineering), Chief Researcher

Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS,

2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

Tel.: +7 (3222) 492-942, e-mail: litsin@ispms.ru

under extreme loads and low climatic temperatures]. *Naukoemkie tekhnologii v proektakh RNF. Sibir'* [High-Tech Technologies in RSF Projects. Siberia]. Ed. by S.G. Psakh'e and Yu.P. Sharkeev. Tomsk, NTL Publ., 2017, ch. 5, pp. 134–202. ISBN 978-5-89503-607-5.

2. Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Fomin V.N. Sozdanie tekhniki severnogo ispolneniya – problema sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya vostochnykh regionov Rossii [Designing machinery for the Arctic: a problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 85, no. 2, pp. 155–163. doi: 10.7868/S0869587315020097. (In Russian).

3. Buznik V.M., Burkovskaya N.P., Zibareva I.V., Cherepanin R.N. K voprosu postroeniya dorozhnoi karty otechestvennogo arkticheskogo materialovedeniya. Ch. 1 [On problem of roadmapping of domestic arctic material science. Pt. 1]. *Materialovedenie = Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, no. 4, pp. 8–16. (In Russian).

4. Buznik V.M., Burkovskaya N.P., Zibareva I.V., Cherepanin R.N. K voprosu postroeniya dorozhnoi karty otechestvennogo arkticheskogo materialovedeniya. Ch. 2 [On problem of roadmapping of domestic arctic material science. Pt. II]. *Materialovedenie = Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, no. 5, pp. 22–28. (In Russian).

5. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Ivanov V.V., Miodushevsky P.V. Nauchno-metodicheskie osnovy defektoskopii, diagnostiki i monitoringa sostoyanii materialov i tekhnicheskikh sistem [Scientific and methodical bases of flaw inspection, diagnostics and monitoring of conditions of the materials and engineering systems]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2015, no. 10, pp. 47–56.

6. Kashcheev V.N. [To the method of determining the abrasive wear resistance of metals at low temperatures]. *Tezisy dokladov i soobshchenii Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Rabotosposobnost' mashin i konstruktсии v usloviyakh nizkikh temperatur. Khladostoičnost' materialov"* [Abstracts of the All-Union scientific and technical conference "The efficiency of machines and structures in low temperatures. Cold resistance of materials"]. Yakutsk, 1973, pp. 22–23. (In Russian).

7. Kleis J. Probleme der Bestimmung des Strahlverschleisses bei metallen. *Wear*, 1969, vol. 13, iss. 3, pp. 199–215. doi: 10.1016/0043-1648(69)90151-3.

8. Kleis J., Muiste U., Pilvre U., Uemois H., Uetz H. The physical mechanism of the formation of metal microspheres in the wear process. *Wear*, 1979, vol. 53, iss. 1, pp. 79–85. doi: 10.1016/0043-1648(79)90218-7.

9. Ishlinskii A.Yu. *Klassicheskaya mekhanika i sily inertsii* [Classical mechanics and inertial forces]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 320 p.

10. Kashcheev V.N., Solod A.N., Vol'f E.L. *Ustanovka dlya issledovaniya udarnogo abrazivnogo vozdeistviya na obrazy* [Installation for the study of impact abrasive effects on samples]. Patent SU, no. 1237951, 1986.

11. Kleis I.R. Ob iznashivani metallov v abrazivnoi strue [On the wear of metals in the abrasive jet]. *Trudy Tallinskogo politekhnicheskogo instituta* [Proceedings of the Tallinn Polytechnic Institute]. Tallin, 1959, no. 168, pp. 3–27.

12. Larionov V.P., Koval'chuk V.A. *Khladostoičnost' i iznos detalei mashin i svarnykh soedinenii* [Cold resistance and wear of machine parts and welded joints]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 206 p.

13. Kuznetsov V.D., Dobrovidov A.N. Khrupkost' rel's pri nizkikh temperaturakh i sposoby ee umen'sheniya [The fragility of rails at low temperatures and ways to reduce it]. *Stal' = Steel in Translation*, 1930, no. 3–4, pp. 86–87. (In Russian).

14. Kuznetsov V.D. Khrupkost' metallov [The fragility of metals]. *Tekhnicheskaya entsiklopediya* [Technical Encyclopedia]. Moscow, 1934, vol. 25, pp. 621–626.

15. Davidenkov N.N. O khrupkom razrushenii [On the fragile destruction]. *Voprosy mashinovedeniya* [Problems of science of machines]. Moscow, 1950, pp. 467–474.

16. Yokobori T. *An interdisciplinary approach to fracture and strength of solids*. Groningen, Wolters-Noordhoff Scientific Publications, 1968 (Russ. ed.: Ekobori T. *Fizika i mekhanika razrusheniya i prochnosti tverdykh tel*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 264 p.).

17. Glezer A.M. O sootnoshenii prochnosti i plastichnosti metallicheskh materialov [On relationship of strength and plasticity of metal materials]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian metallurgy (Metally)*, 2016, no. 1, p. 2. (In Russian).

18. Kashcheev V.N. *Abrazivnoe razrushenie tverdykh tel* [Abrasive destruction of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 247 p.

19. Kashcheev V.N. *Protsessy v zone friktsionnogo kontakta metallov* [Processes in the zone of frictional contact of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 213 p.

20. Khrushchov M.M., Babichev M.A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 251 p.
21. Kashcheev V.N., Vol'f E.L. Iznashivanie potokom chastits stal'noi poverkhnosti i ee temperatura [Wear by a stream of steel surface particles and its temperature]. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*, 1982, no. 4, pp. 655–660. (In Russian).
22. Sorokin G.M., Malyshev V.N. Methods of choosing high-strengthened and wear-resistant steels on a complex of mechanical characteristics. *New tribological ways*. Ed. by T. Ghrib. Intech Open, 2011, pp. 197–218. ISBN 978-953-206-7.
23. Davidenkov N.N. *Problema udara v metallovedenii* [The problem of impact in metallurgy]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1938. 116 p.
24. Cherepanov G.P. *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 640 p.
25. Liebowitz H. *Fracture. An advanced treatise*. Vol. 6. *Fracture of metals*. New York, London, Academic Press Publ., 1969. 506 p. ISBN 10: 0124497063. ISBN 13: 9780124497061.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).