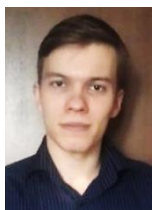


УДК 620.1

doi:10.18720/SPBPU/2/id23-537

А.Ю. Рябикин¹, М.А. Скотникова², Г.В. Иванова³

КАРТА РЕЖИМОВ ИЗНАШИВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ



¹ Алексей Юрьевич Рябикин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (952)358-6974, E-mail: ryabikin-98@mail.ru



² Маргарита Александровна Скотникова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)552-6429, E-mail: skotnikova@mail.ru



³ Галина Валерьевна Иванова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (812)552-6429, E-mail: galura@yandex.ru

Аннотация

Проведены трибологические испытания на машине трения СМЦ-2 по схеме «Ролик – Абразивный ролик», без смазки. Построена упрощенная карта режимов изнашивания износостойких сталей (Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450), по сравнению с конструкционной сталью 09Г2С, по методу Лима - Эшби и Виллиамса. Выделены зоны критического, сильного и умеренного изнашивания. Получены сравнительные результаты сталей по механическим свойствам, износу, интенсивности изнашивания и контактной температуре. Проведены металлографические исследования поверхностей образцов до и после испытаний. Установлены механизмы износа.

Ключевые слова: карта режимов изнашивания, износостойкость, механизм износа, машина трения, сталь, абразивный износ.

Введение

Абразивный износ машин и оборудования хорошо известен, и ученые

всего мира исследуют это явление, пытаются подобрать материалы, режимы работы узлов трения с целью уменьшить его. Развитие существующих и внедрение новых технологий защиты от изнашивания позволяют снизить затраты на ремонт оборудования, увеличить срок его службы [1-4].

Наибольшему разрушению обычно подвержены поверхности в открытых парах трения, например, применяемые в дорожном строительстве: ковши экскаваторов, детали бульдозеров и самосвалов, дробилки, разравниватели, грейдеры (рис. 1).



Рис. 1. Изношенные абразивом зубья ковша экскаватора

Помимо внедрения различных способов упрочнения таких, как нанесение защитных покрытий, наплавки, электрохимической защиты, термической обработки, [5-8], необходимо использовать новые подходы для выявления общих закономерностей, построения карт (диаграмм) изнашивания в зависимости от нагрузки, температуры, интенсивности изнашивания и скорости скольжения. Такой подход позволяет предсказывать правильное направление выбора эксплуатационных режимов для повышения износостойкости трибоузлов машин и оборудования [9 - 12].

Целью работы являлось построение карты интенсивности изнашивания износостойких сталей на основании результатов трибологических испытаний и установления корреляций между свойствами сталей и режимами изнашивания.

Методы и материалы

В качестве материала для исследования были выбраны три износостойкие стали марки Hardox (Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450) по сравнению с обычной конструкционной сталью 09Г2С, химический состав которых представлен в таблице 1.

Мелкозернистые горячекатаные стали Hardox после закалки и отпуска обладали твердостью 550, 500, 450 НВ, соответственно. Твердость стали 09Г2С составляла 151 НВ.

Таблица 1. Химический состав исследованных сплавов

Материал	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Mo
Hardox 550	0.183	0.143	0.927	0.012	0.001	0.077	0.043	0.071
Hardox 500	0.223	0.225	0.877	0.011	0.006	0.830	0.055	0.03
Hardox 450	0.102	0.175	0.655	0.01	0.004	0.921	0.056	0.036
09Г2С	0.099	0.518	1.31	0.021	0.008	0.075	0.003	0.017

Стали Hardox обладают уникальным сочетанием высокой твёрдости, прочности и вязкости, что позволяет им противостоять многим видам износа, выдерживать удары без пластической деформации и растрескивания. Благодаря этому, срок эксплуатации изделий и конструкций из Hardox в пять раз выше, чем у аналогичного металлопроката из других марок сталей [13, 14].

Триботехнические испытания проводились на стандартной Машине трения СМЦ-2 (рис. 2, а) в течение 2,5 часов (с предварительной 15 минутной приработкой) на образцах в виде «роликов» (рис. 3, а) по схеме «ролик – абразивный ролик» (Рис. 3, б), под действием нагрузки 4,5 кгс и вращения ролика диаметром 50 мм с частотой 500 об/мин. При этом, под давлением 1,7 МПа, скорость линейного скольжения составляла 1,3 м/с. Оценивали во времени весовой износ ролика, момент и коэффициент трения, температуру, микротвёрдость, шероховатость поверхности с помощью профилометра и микроструктуру площадок трения ролика с помощью микровизора отраженного света μ Vizo-MET (рис. 2, б).

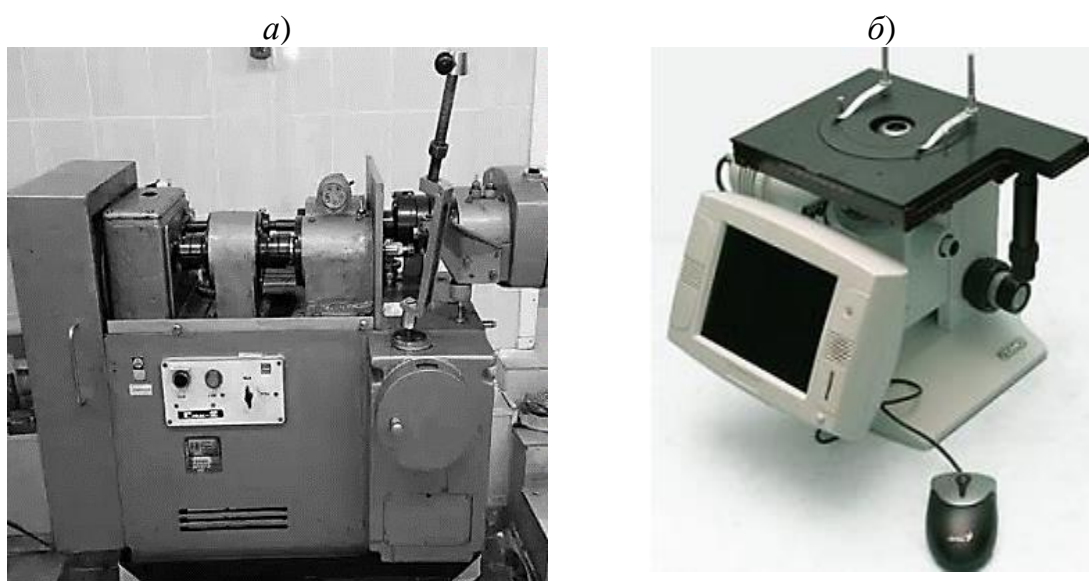


Рис. 2. Оборудование для трибологических испытаний: а) машина трения СМЦ-2; б) Микровизор отраженного света μ Vizo-MET

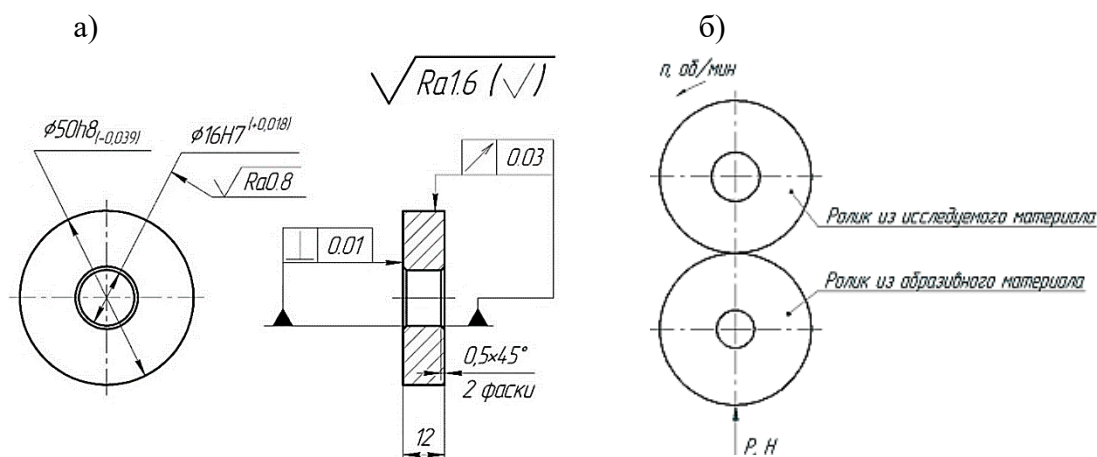


Рис. 3. Схема образцов для проведения трибологических испытаний: а) ролик верхний (подвижный); б) нижний абразивный ролик (неподвижный).

Карта режимов изнашивания была построена по методу Лима-Эшби и Виллиамса, (рис. 4) [15-17]. Авторы провели значительное количество лабораторных испытаний и построили карту износа, на которой коэффициент износа отображался как функция скорости скольжения среднеуглеродистой стали по стали от номинального давления (нормальная нагрузка, деленная на номинальную площадь контакта). Карта износа делится на три основные области: адгезионного схватывания, механического и химического (окислительного) износа (рис. 4).

При очень высоком контактном давлении наблюдается химическое взаимодействие атомов двух трущихся ювенильных поверхностей, происходит схватывание (сваривание) отдельных участков и их вырыв. Возникает катастрофический износ.

Механический износ происходит при низких скоростях скольжения, когда коэффициент износа больше зависит от номинального давления, чем от скорости. Механическая область содержит три зоны: слабого, сильного и умеренного между ними изнашивания.

Химический (окислительный) механизм возникает при скоростях скольжения свыше 1 м/с и сопровождается интенсивным тепловыделением (разогревом) контактной зоны. Химическая область карты, содержит три зоны: умеренного, сильного окислительного и износа плавлением. Высокие нагрузки и скорости скольжения приводят к расплавлению участков металла в контактной зоне и их вырыву (катастрофическому износу). Как видно из рисунка, умеренное окисление может быть даже защитным, поскольку при заданном уровне давления и высокой скорости скольжения коэффициент износа снижается. Такой мягкий оксидный материал действует как смазка между поверхностями.

В центре карты износа авторы выделили область возможного упрочняющего мартенситного превращения. При скоростях скольжения 1 - 3 м/с и давлениях 1 – 10 МПа, в локальных контактных участках поверхности происходит значительный разогрев стали с последующей

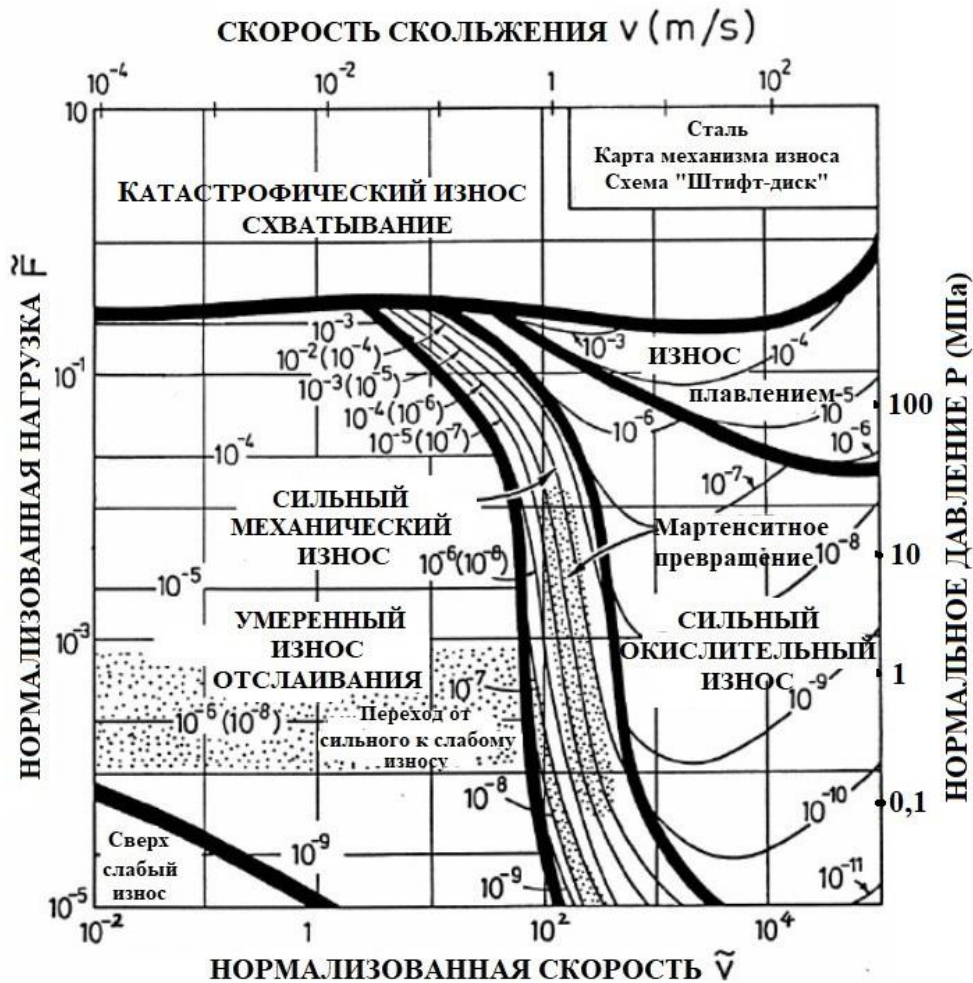


Рис. 4. Карта Лима-Эшби и Виллиамса [15-16] механизмов изнашивания.

закалкой на мартенсит. При этом коэффициент износа снижается, а сам износ происходит по механизму образования и разрушения оксидных пленок.

Результаты и обсуждение

Металлографическое исследование поверхностей до и после трибологических испытаний по схеме «ролик – абразивный ролик»

Снимки поверхностей роликов из четырех сталей до и после трибологических испытаний представлены на рис. 5, а-н. Наблюдались два основных механизма изнашивания поверхностных слоёв: адгезионный и абразивный. В результате возникновения адгезионных связей между образцами, на контактной поверхности менее прочного ролика из стали Hardox, образуются хаотически расположенные вырывы (рис. 5, г, д, е, з, л), а на абразивном ролике из более прочного материала (корунда) — налипания. Абразивные частицы деформируют микрообъёмы поверхностных слоёв и вызывают процессы микрорезания и царапания (рис.

5, д, к). При изнашивании мягкой стали 09Г2С, частицы абразива глубоко внедряются в поверхностный слой ролика, формируя значительную по размеру зону пластической деформации. При этом возникает объёмное напряженное состояние.

а)

Исходная поверхность роликов

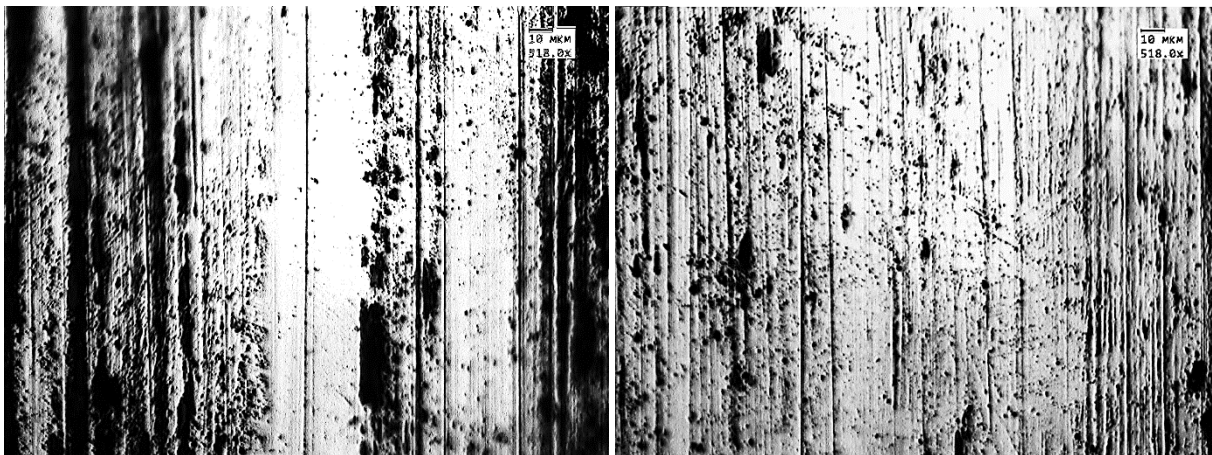
б)



Поверхность роликов после абразивного изнашивания
Hardox 550

в)

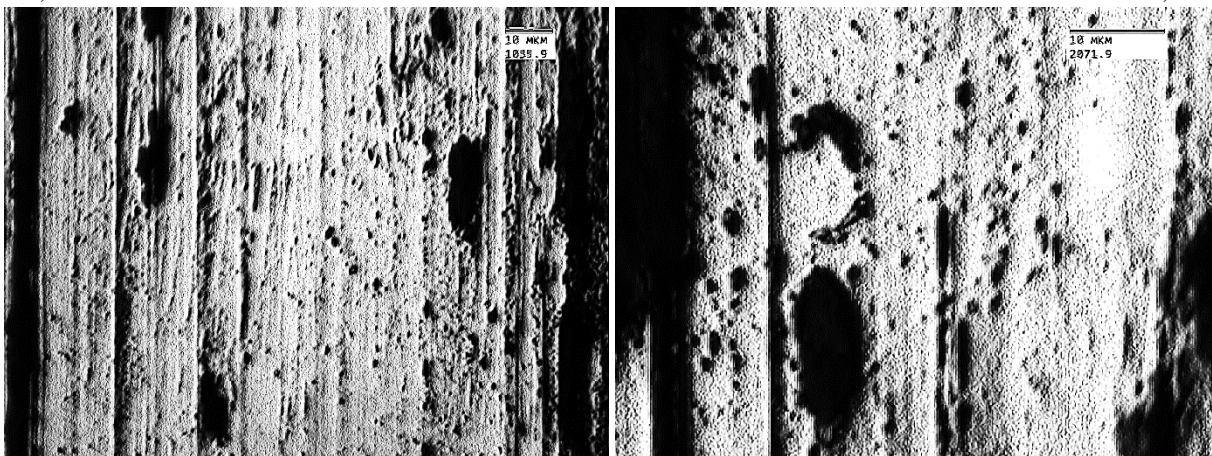
г)



д)

Hardox 550

е)



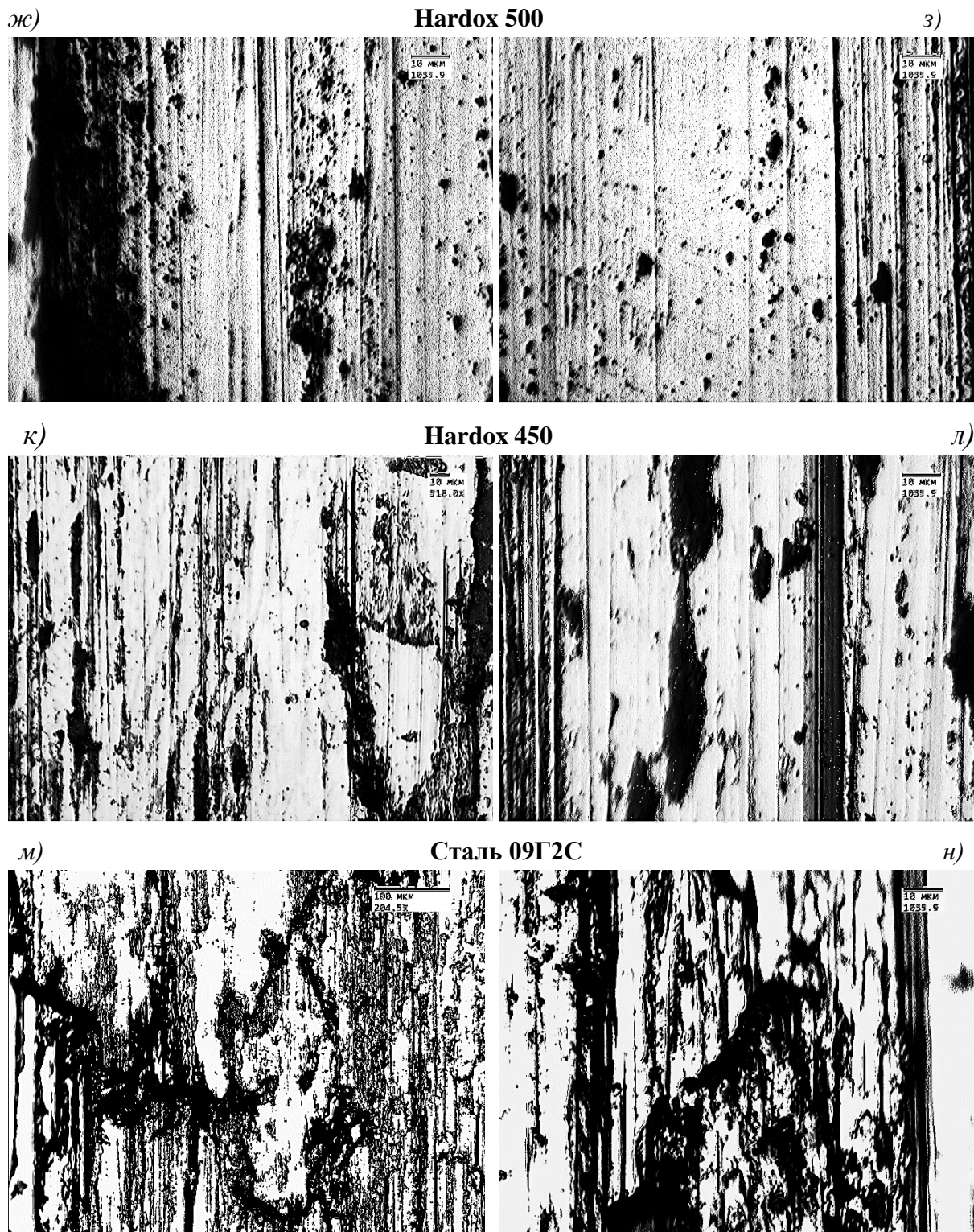


Рис. 5. Снимки поверхностей роликов: (а, б) до испытаний; (в-н) после испытаний.
 (в, г, д, е) Hardox 550; (ж, з) Hardox 500; (к, л) Hardox 450; (м, н) 09Г2С.
 (а, б, в, г, ж, з, к, л, м, н) x500, (д) x1000, (е) x2000.

Трещины зарождаются и распространяются не в поверхностном слое, а разрушают подповерхностный слой на большой глубине, вызывая критический износ (рис. 5, м, н). Следует отметить, что элементы

подповерхностного разрушения были обнаружены и в относительно мягкой стали Hardox 450 (рис. 5, к).

Контроль температуры контактной зоны во время трибологических испытаний по схеме «ролик – абразивный ролик»

На рис. 6 представлены графики изменения температуры в контактной зоне во время испытания образцов.

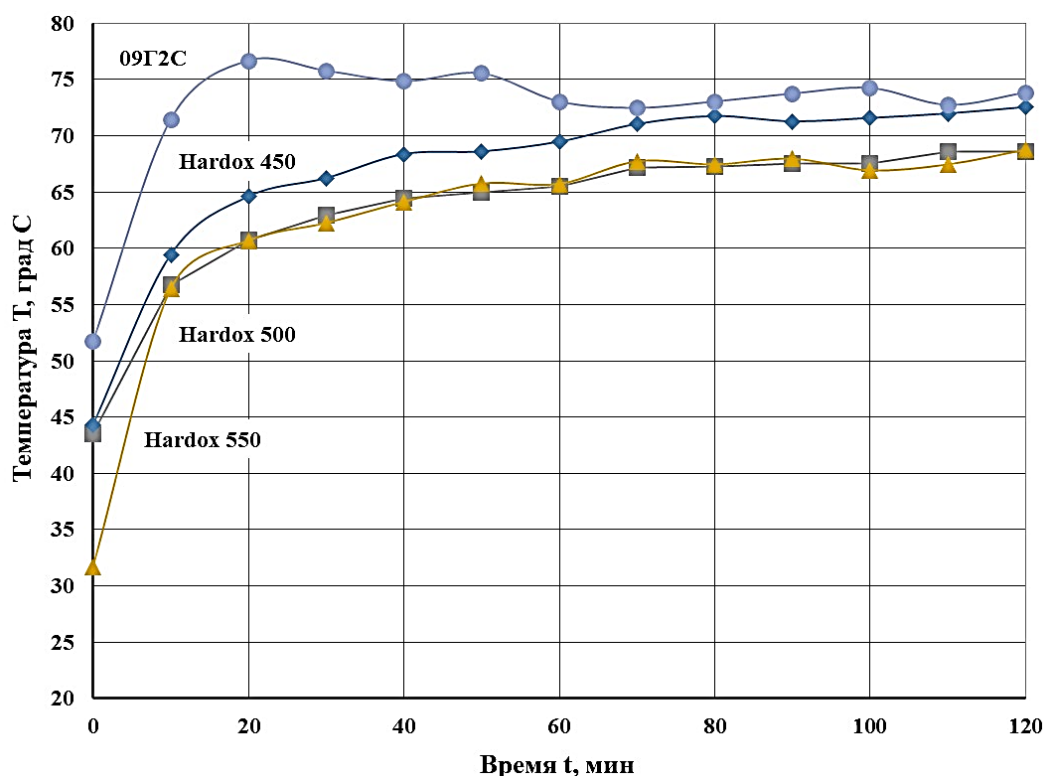


Рис. 6. Графики изменения температуры образцов во время испытаний.

Умеренный износ, как правило, характеризуется относительно невысокой температурой на протяжении всего времени испытания с незначительными волнообразными перепадами. В проведенных нами исследованиях, такой режим соответствует испытанию и поверхностному разрушению сталей Hardox 550 (рис. 5, в - е) и 500 (рис. 5, ж, з).

Сильный износ характеризуется выраженным ростом температуры с течением времени, более значительными перепадами на 3-4 градуса и соответствует изнашиванию стали Hardox 450 (рис. 5, к, л).

Критический износ характеризуется резкими скачками от 5 градусов и выше и стабильно высокой температурой. Это говорит о глубоком разрушении подповерхностных слоёв. Соответствует изнашиванию образцов из стали 09Г2С (рис. 5, м, н).

Построение карты интенсивности изнашивания износостойких сталей

За основу построения карты была взята интенсивность изнашивания образцов из исследованных сплавов (рис. 7), которая рассчитывалась по формуле 1.

$$I_m = \frac{\Delta m}{L} \quad (1)$$

где Δm - массовый износ (г), разность между массой образца до и после испытания, L – путь трения (м).

Результаты расчета интенсивности изнашивания исследованных сплавов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Интенсивность изнашивания исследованных сплавов

Материал	Интенсивность изнашивания, г/м
Hardox 550	$0,21 \cdot 10^{-4}$
Hardox 500	$0,43 \cdot 10^{-4}$
Hardox 450	$0,78 \cdot 10^{-4}$
09Г2С	$6,92 \cdot 10^{-4}$

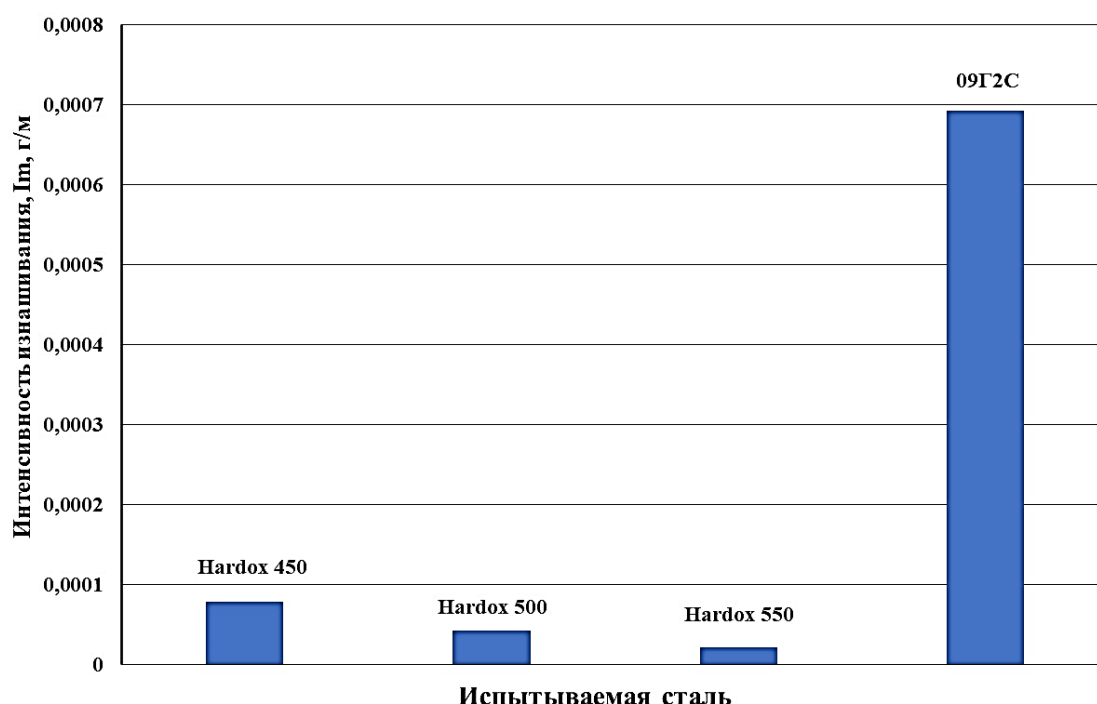


Рис. 7. Интенсивность изнашивания образцов из исследованных сплавов.

Опираясь на полученные данные интенсивности изнашивания (табл. 2) и проводя параллель с графиками изменения температуры [18], были выбраны граничные значения режимов изнашивания, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Граничные значения режимов изнашивания

Режимы изнашивания	Интенсивность изнашивания, г/м
Критический	$> 0,0002$ ($> 2 \cdot 10^{-4}$)
Сильный	$0,000045 - 0,0002$ ($0,45 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4}$)
Умеренный	$< 0,000045$ ($< 0,45 \cdot 10^{-4}$)

Построенная упрощенная карта режимов изнашивания представлена на рис. 8. Образцы из стали 09Г2С, подверженные глубокому разрушению подповерхностных слоёв, попадают в область критического износа. В образцах из стали Hardox 450, трещины при абразивном изнашивании зарождаются и распространяются как в поверхностном, так и в подповерхностном слое и попадают в область сильного износа. Изнашивание образцов из стали Hardox 500 и Hardox 550 попадает в область умеренного износа, так как затрагивает разрушение только поверхностных слоев.

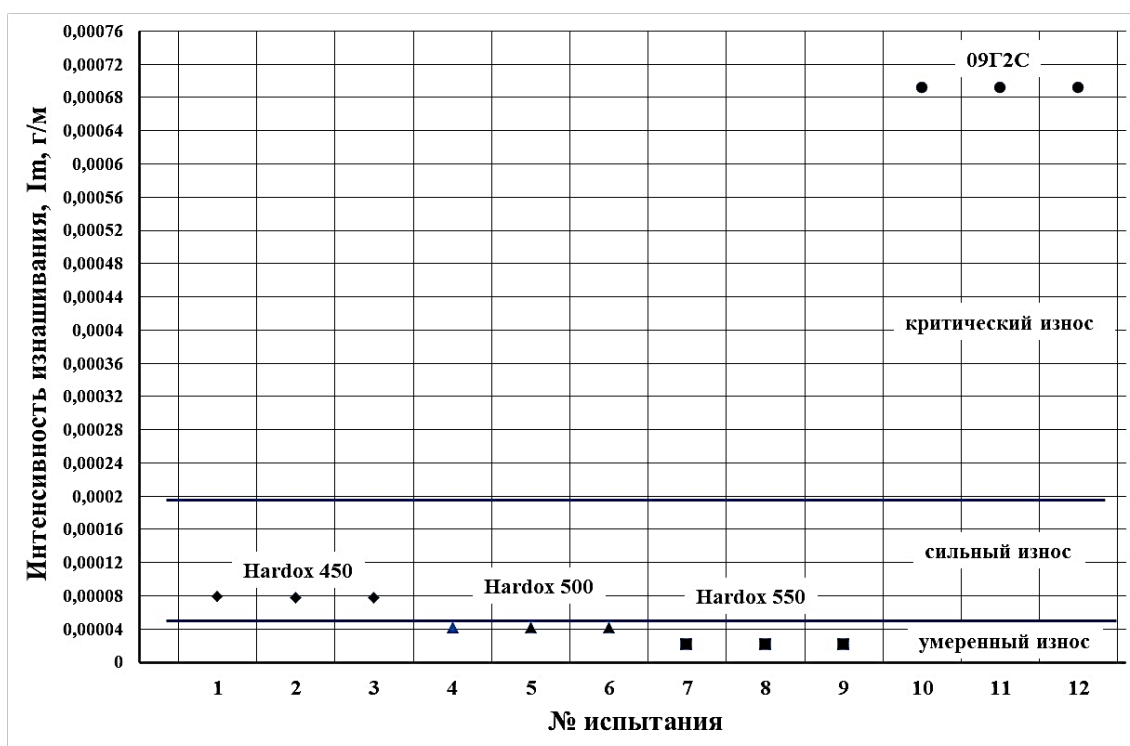


Рис. 8. Карта режимов интенсивности изнашивания износостойких сталей

Разработанная карта представлена в упрощенном виде, так как испытания четырёх сталей были проведены при одном давлении 1,7 МПа и при одной скорости линейного скольжения 1,3 м/с. Однако, даже такая информация позволяет предсказывать правильное направление выбора режимов испытания для повышения износостойкости машин и оборудования. В дальнейшем планируется продолжить исследования в этом направлении, провести испытания под разной нагрузкой и с разной

скоростью для построения полных карт с указанием на них механизмов изнашивания и переходов между ними, а также добавить к исследованию износостойкие белые чугуны для выбора наиболее подходящего материала рабочего инструмента.

Заключение

1. Проведены металлографические исследования и контроль температуры поверхностей до и после трибологических испытаний по схеме «ролик – абразивный ролик». Наблюдали два основных механизма изнашивания поверхностных слоёв: адгезионный и абразивный.

Для сталей с твёрдостью свыше 450 НВ (например, Hardox 500 и Hardox 550), абразивный износ имел поверхностный характер и проходил в режиме *умеренного износа*.

Сталь твёрдостью равной 450 НВ (например, Hardox 450) при абразивном изнашивании разрушалась, как в поверхностном, так и в подповерхностном слое в режиме *сильного износа*.

Стали твёрдостью менее 450 НВ (например, сталь 9Г2С твёрдостью 151 НВ) при абразивном изнашивании подвергалась глубокому разрушению подповерхностных слоёв в режиме *критического износа*.

2. Построена карта интенсивности изнашивания для исследованных сталей с выделенными областями *умеренного, сильного и критического износа*.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Semenov, Y.A., Semenova, N.S. Vibration Active of Machines with Elastic Transmission Mechanism. 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 163-172.
- [2] Kuznetsov R.A., Kuznetsov P.A. A new way of manufacturing bimetal products on the basis of the technology of casting with crystallization under pressure. 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 119–127.
- [3] Шабанов А.Ю., Галышев Ю.В., Сидоров А.А. и др. Исследование эффективности восстановления технико-экономических показателей изношенного двигателя с помощью триботехнических составов. Современное машиностроение: Наука и образование. 2016. С.583-596. (rus.)

- [4] Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., Krylov N.A., Medvedeva V.V. Features of wear of abrasive grains depending on microcuttings speed of steels. 2016. Key Engineering Materials, 674, pp. 189–194.
- [5] Syundyukov I. S., Ryabikin A. Y., Ivanova G. V., Skotnikova M. A. Increasing the Wear Resistance of Crankshafts by the Plasma Spraying Method. 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 142–152.
- [6] Tsvetkova, G., Skotnikova, M. Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel. 2018. Proceedings of 9th International Scientific Conference, BALTTTRIB 2017 - Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania, pp. 166–171.
- [7] Skotnikova M.A., Artemyev V.P., Shasherina, S.A., Paitova, O.V., Tsvetkova, G.V. Tribotechnical properties of nanostructured coppernickel coatings. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 61–71.
- [8] Syundyukov I., Skotnikova M., Padgurskas J., Tsvetkova G., Tarasenko E. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15. 2019. Materials Today: Proceedings, 30, pp. 650–655.
- [9] Meng Y., Xu J., Prakash B., Hu Y., Jin Z. A review of recent advantages in tribology. Friction, 2020. V8. № 2. pp. 221-300.
- [10] Аверин В.А., Евенко В.В. Современные возможности защиты машин и оборудования от фрикционного, абразивного и коррозионного износа. 2022. Новые материалы и технологии в машиностроении. № 36. С. 118-120. (rus.)
- [11] Березин Н.М., Андреев А.К. Исследование влияния твердости стали на сопротивление абразивному износу. Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. 2019. С. 88-91. (rus.)
- [12] Skotnikova, M.A., Breki, A.D., Evsin, M.G., Kalinin, V.Y., Wasilewski, M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils. 2021. AIP Conference Proceedings, 2340, 060005.
- [13] Харченко М.В., Дема Р.Р., Нефедьев С.П., Осипова О.А. Универсальный испытательный комплекс по определению триботехнических характеристик смазочных материалов на базе серийной машины трения СМЦ-2. 2017. Технология и технологические машины. С. 60-62. (rus.)
- [14] Леванов И.Г., Задорожная Е.А., Никитин Д.Н. Модернизация машины трения ИИ5018 для проведения исследований гидродинамических подшипников скольжения. 2020. Современное машиностроение: Наука и образование. 2022. С. 207-223. (rus.)
- [15] Lim F.C., Ashby M.F. Wear mechanism maps. 1987. Acta Metal. 35, pp.1–24.

- [16] Williams John A. Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. 1999. *Wear*. 225–229, 1, pp. 1-17.
- [17] Panaganar E., Anbuselvan S. Wear mechanism map for as-cast AZ31B magnesium alloy. 2016. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 38(4).
- [18] Быков П.А., Калашников И.Е., Кобелева Л.И., Колмаков А.Г., Михеев Р.С. Исследование режимов изнашивания композиционного материала на основе антифрикционного сплава АОМ20-1 упрочненного частицами Ti. Труды Кольского научного центра РАН, 2021. с. 36-41. (rus.).

A.Y. Ryabikin, M.A. Skotnikova, G.V. Ivanova

WEAR MODES MAP of WEAR-RESISTANT STEELS

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

Tribological tests were carried out on the SMC-2 friction machine according to the "Roller – abrasive roller" scheme, without lubrication. A simplified map of the wear modes of samples made of wear-resistant steels (Hardox 550, Hardox 500, Hardox 450), in comparison with structural steel 09G2C, according to the method of Lim - Ashby and Williams. The zones of critical, hard and moderate wear are highlighted. Comparative results of steels on hardness, wear, wear intensity and contact temperature are obtained. Metallographic studies of the sample surfaces before and after the tests were carried out. Wear mechanisms are installed.

Key words: wear modes map, wear resistance, wear mechanism, friction machine, steel, abrasive wear.

REFERENCES

- [1] Semenov, Y.A., Semenova, N.S. Vibration Active of Machines with Elastic Transmission Mechanism. 2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 163-172.
- [2] Kuznetsov R.A., Kuznetsov P.A. A new way of manufacturing bimetal products on the basis of the technology of casting with crystallization under pressure. 2020. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 119–127.
- [3] Shabanov A.Yu., Galyshev Yu.V., Sidorov A.A. et al. Investigation of the effectiveness of restoration of technical and economic indicators of a worn-out engine using tribotechnical compositions. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education*. 2016. pp.583-596. (rus.)

- [4] Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., Krylov N.A., Medvedeva V.V. Features of wear of abrasive grains depending on microcuttings speed of steels. 2016. Key Engineering Materials, 674, pp. 189–194.
- [5] Syundyukov I. S., Ryabikin A. Y., Ivanova G. V., Skotnikova M. A. Increasing the Wear Resistance of Crankshafts by the Plasma Spraying Method. 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 142–152.
- [6] Tsvetkova, G., Skotnikova, M. Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel. 2018. Proceedings of 9th International Scientific Conference, BALTRIB 2017 - Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania, pp. 166–171.
- [7] Skotnikova M.A., Artemyev V.P., Shasherina S.A., Paitova O.V., Tsvetkova G.V. Tribotechnical properties of nanostructured coppernickel coatings. 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. pp. 61–71.
- [8] Syundyukov I., Skotnikova M., Padgurskas J., Tsvetkova G., Tarasenko E. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15. 2019. Materials Today: Proceedings, 30, pp. 650–655.
- [9] Meng Y., Xu J., Prakash B., Hu Y., Jin Z. A review of recent advantages in tribology. Friction. 2020. V8. № 2. pp. 221-300.
- [10] Averin V.A., Evenko V.V. Modern possibilities of protection of machinery and equipment from friction, abrasive and corrosive wear. 2022. New materials and technologies in mechanical engineering. No. 36. pp. 118-120 (rus.)
- [11] Berezin N.M., Andreev A.K. Investigation of the effect of steel hardness on resistance to abrasive wear. Low-temperature and food technologies in the XXI century. 2019. pp. 88-91. (rus.)
- [12] Skotnikova, M.A., Breki, A.D., Evsin, M.G., Kalinin, V.Y., Wasilewski, M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils. 2021. AIP Conference Proceedings. 2340, 060005.
- [13] Kharchenko M.V., Dema R.R., Nefediev S.P., Osipova O.A. Universal testing complex for determination of tribotechnical characteristics of lubricants based on the serial friction machine SMC-2. 2017. Technology and technological machines. pp. 60-62. (rus.)
- [14] Levanov I.G., Zadorozhnaya E.A., Nikitin D.N. Modernization of the friction machine II5018 for research of hydrodynamic sliding bearings. 2020. Modern Mechanical Engineering: Science and Education. 2022. pp. 207-223. (rus.)
- [15] Lim F.C., Ashby M.F. Wear mechanism maps. 1987. Acta Metal. 35, pp.1–24.
- [16] Williams John A. Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. 1999. Wear. 225–229, 1, pp. 1-17.

- [17] Ilanaganar E., Anbuselvan S. Wear mechanism map for as-cast AZ31B magnesium alloy. 2016. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 38(4).
- [18] Bykov P.A., Kalashnikov I.E., Kobeleva L.I., Kolmakov A.G., Mikheev R.S. Study of wear modes of composite material based on antifriction alloy AOM20-1 reinforced with Ti particles. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2021. pp. 36-41. (rus.)