

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 620.178.162.43

doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-4-13

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Сергей Петрович Шец^{1✉}, Аркадий Евгеньевич Могилев²

^{1,2} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ shetssp@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0742-0247>

² chicagorose8565@gmail.com

Аннотация

Обоснована необходимость прогнозирования оптимальной износостойкости пар трения скольжения на этапе их проектирования. Проведен трибоанализ изнашивания пар трения скольжения в течение всего периода эксплуатации на различных режимах, соответствующих этапам: пуска, установившегося изнашивания и останова. Проанализированы существующие подходы к решению контактных задач при взаимодействии твердых тел, учитывающих протекание физико-механических процессов в поверхностных слоях пар трения при их изнашивании. Предложена модель изнашивания, основанная на разрушении контактирующих поверхностей пары трения с отделением частиц, размер которых изменяется в зависимости от нагрузочных характеристик, физико-механических и структурных параметров, теплофизические свойства, каче-

ства смазочного материала и др. Представлены результаты испытаний опытных образцов на износостойкость и численной реализации предложенной модели прогнозирования износостойкости пары трения скольжения с аналогичными характеристиками. Установлено, что предлагаемая модель изнашивания, дает возможность в определенном диапазоне прогнозировать (рассчитывать) износостойкость пары трения скольжения путем изменения исходных данных, тем самым исключать необходимость, достаточно трудоемких испытаний пар трения на износ при воздействии различных факторов.

Ключевые слова: пара, трение, модель, площадь, контакт, материал, прогнозирование, интенсивность, изнашивание, износостойкость.

Ссылка для цитирования:

Шец С.П. Прогнозирование износостойкости пар трения скольжения / С.П. Шец, А.Е. Могилев // Транспортное машиностроение. – 2024. - №2. – С.4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-4-13.

Original article

Open Access Article

PREDICTION OF WEAR RESISTANCE OF SLIDING COUPLERS

Sergey Petrovich Shets^{1✉}, Arkady Evgenievich Mogilev²

¹ shetssp@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-0742-0247>

² chicagorose8565@gmail.com

Abstract

The necessity to predict optimal wear resistance of sliding couplers at the design stage is grounded. A tribological analysis of the wear of sliding couplers is carried out during the entire period of operation in various

modes corresponding to the following stages: start-up, steady-state wear and shutdown. The existing approaches to solving contact problems in the interaction of solids, taking into account physico-mechanical

processes in the surface layers of couplers during their wear, are analyzed. A wear model is proposed based on the destruction of the contacting surfaces of a coupler with the separation of particles, which size varies depending on the load characteristics, physico-mechanical and structural parameters, thermal properties, quality of the lubricant, etc. The results of testing prototypes for wear resistance and numerical implementation of the proposed model for predicting the wear resistance of a sliding coupler with similar char-

acteristics are presented. It is found out that the proposed wear model makes it possible to predict (calculate) the wear resistance of a sliding coupler in a certain range by changing the initial data, thereby eliminating the need for rather laborious tests of couplers for wear under the influence of various factors.

Keywords: coupler, friction, model, area, contact, material, prediction, intensity, wear, wear resistance.

Reference for citing:

Shets SP, Mogilev AE. Prediction of wear resistance of sliding couplers. *Transport Engineering*. 2024;2:4-13. doi: 10.30987/2782-5957-2024-2-4-13.

Введение

Прогнозирование износостойкости пар трения скольжения, связано с влиянием изменяющихся в процессе эксплуатации различных факторов, таких как: давление и температура в зоне трения, цикличность нагружения и скорость относительного скольжения, наличие и качество смазочного материала и др., что приводит к неточности прогнозной оценки. Неточность прогнозной оценки на этапе проектирования зачастую приводит к заниженной или завышенной износостойкости пары трения, что влияет на производствен-

ные и эксплуатационные затраты. Заниженная износостойкость вызывает преждевременные отказы, связанные с дополнительными затратами на незапланированный ремонт, а завышенная – к повышению стоимости производства и изготовления. В этом случае, возникает необходимость определения оптимальной износостойкости пар трения, которая обеспечивается применением различных методов: конструктивного, трибоматериаловедческого, триботехнологического и др., что является актуальной задачей.

Материалы, модели, эксперименты и методы

При взаимном перемещении поверхностей деталей в паре трения скольжения под нагрузкой возникает контактирование по выступам шероховатостей, сопровождающиеся различными режимами трения и, как правило, более значительному износу при антифрикционном контакте, подвергается поверхность той детали, которая имеет меньшую твердость. Деталь с меньшей твердостью поверхности обладает ресурсом, который и определяет долговечность пары трения в целом. В процессе всего периода эксплуатации любой машины или механизма, составляющие их конструкцию пары трения, работают периодически в три этапа: «пуск», «установившееся изнашивание» и «останов» при нарастающем линейном износе Δh и изменяющейся скорости изнашивания J во времени (рис. 1).

«На первом этапе «пуск» (рис. 1, поз. 1), начинается переход от трения покоя к трению движения «сухое трение», а затем

возникает взаимное скольжение поверхностей деталей пары трения при малых скоростях под действием нагрузки. В этот момент наблюдаются явления упругого и пластического оттеснения с преобладающим процессом микрорезания сопровождающегося силами молекулярного сцепления. Вследствие такого характера взаимодействия разрушается часть выступов шероховатости, причём отдельные выступы деформируются пластично, с образованием усталостных трещин, характерных для малоциклового усталостного разрушения, а некоторые выступы деформируются упруго, что характерно для упругого насыщенного контакта» [8].

На втором наиболее продолжительном этапе «установившегося изнашивания» (рис. 1, поз. 2), преобладает граничное или полужидкостное трение – трение осуществляется между граничными слоями молекул смазочного материала, адсорбированных на поверхностях деталей пары

трения. Толщина слоя смазочного материала при этом составляет порядка 0,1 мкм. Скорость скольжения между контактирующими поверхностями изменяется незна-

чительно и стремится к постоянному значению, а контакт между отдельными сглаженными выступами шероховатости происходит упруго.

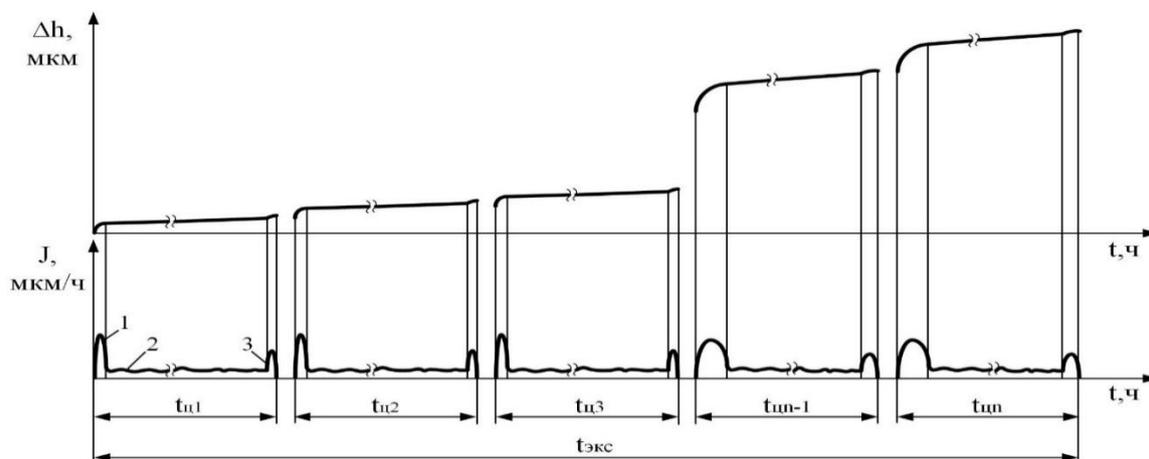


Рис. 1. Зависимость линейного износа Δh и скорости изнашивания J менее твердой поверхности детали пары трения: 1 – пуск; 2 – установившееся изнашивание; 3 – останов

Fig. 1. The dependence of linear wear Δh and the wear rate J of the less rigid surface of the friction part: 1 – start; 2 – steady wear; 3 – stop

На третьем этапе «останов» (рис. 1, поз. 3), происходит переход к полусухому трению – сочетанию сухого и граничного трения при очень тонком слое смазочного материала менее 0,1 мкм. Скорость скольжения между контактирующими поверхностями снижается и достигает нулевой отметки. «На этом этапе при относительном смещении контактирующих поверхностей, и всё большая часть вершин микронеровностей деформируется упруго с дальнейшим переходом к пластическому характеру деформации» [8].

На протяжении одного цикла работы скорость изнашивания поверхностей пары трения значительно увеличивается при кратковременных периодах «пуска» и «останова», и стабилизируется на низком уровне в период «установившееся изнашивания». С увеличением времени работы, длительность кратковременных периодов «пуска» и «останова» увеличивается из-за изменения геометрии деталей пары трения вследствие износа контактирующих поверхностей. «Процессы, сопровождающие изнашивание имеют различные виды и формы» [7]. Кроме того, длительность циклов «пуска – установившегося изнаши-

вания – останова» крайне неравномерна в течении всего периода эксплуатации.

Проведенный трибоанализ изнашивания пар трения скольжения показал, что процесс изнашивания поверхностей трения имеет многостадийность. Первая стадии сопровождается процессами приработки, формируется оптимальные формы поверхностей трения контактирующих деталей и структур поверхностных слоев. На второй наиболее длительной стадии формируется активная среда, которая постепенно прогрессирует в направлении ухудшения трибологических свойств. Третья стадия сопровождается разрушением поверхностных слоев из-за накопления различных видов дефектов и процесс изнашивания резко интенсифицируется.

В процессе эксплуатации удельное давление в парах трения по мере износа контактирующих поверхностей уменьшается из-за постепенного увеличения фактического пятна контакта, зазоры увеличиваются и возникают ударные нагрузки, изменяется структура контактирующих поверхностей деталей из-за накопления дефектов в поверхностных слоях, изменяется температура в зоне трения, качество третьего тела «смазочного материала» ухудша-

ется и эти изменения носят вероятностный характер. Учесть изменения перечисленных выше факторов затруднительно, поэтому, существующие модели изнашивания

Анализ существующих моделей изнашивания

Существующие подходы к построению моделей изнашивания основаны на том, что с контактирующей поверхности на определенном пути трения через некоторое время отделяются частицы износа различной величины, отличающиеся по форме и размерам, тем самым возможно прогнозирование интенсивности или скорости изнашивания. Процессы отделения частиц при каждом подходе различны и основаны на различных взглядах на природу изнашивания.

«Модель и методика расчетов на изнашивание, разработанная И.В. Крагельским и его школой, рассматривает понятие удельного износа, съема материала объемом на единицу фактической площади контакта на пути скольжения, равном среднему диаметру пятна контакта, при этом фактически частица определенного объема отделяется при многоцикловом нагружении, что подтверждает теория усталостного изнашивания» [9].

Кинематическая модель изнашивания, предложенная Д.Г. Громаковским, предусматривает то, что контактирование поверхностей пары трения осуществляется по суммарной площади фактических пятен контакта. «При этом повреждения локализуются в микрообъемах материала, ограниченного площадью и глубиной, на которой находится зона наибольшей концентрации дислокаций и других повреждений материала. Микрообъем отделяемого материала, характеризуется преобладанием разрыва межатомных связей над их релаксацией. Изначально накопление повреждений носит латентный характер, а затем наблюдается быстрый рост отделения частиц износа. После удаления продуктов износа начинается новый цикл накопления повреждаемости и разрушение переходит на новый уровень совокупности выступающих неровностей» [3].

Модель изнашивания антифрикционных пар трения скольжения предложенная

ния строятся на основании длительных испытаний пар трения на износ в различных условиях, а полученные зависимости являются эмпирическими (опытными).

А.О. Горленко основывается на том, что контакт осуществляется между твердой шероховатой поверхностью и гладкой менее твердой. Выступы шероховатости внедряются в гладкую поверхность и при относительном перемещении осуществляется процесс «пропахивания». «При этом следует рассматривать модули упругости и коэффициенты Пуассона элементов данной пары, а для гладкой поверхности обязательно учесть ее физико-механические свойства (предел прочности, твердость и т.п.)» [2]. Дальнейшее совершенствование предложенной модели заключается в том, что гребень шероховатости можно представить в виде полусферы, а гладкую менее твердую поверхность – упругоэластическим полупространством. При относительном перемещении поверхностей, твердая полусфера оттесняет мягкий материал полупространства с временным образованием фрикционной связи. «Время жизни такой связи составляет $10^{-3} \dots 10^{-7}$ с и зависит от диаметра пятна контакта и от скорости скольжения» [2]. Таким образом, интенсивность изнашивания определяется отношением средней толщины износа к диаметру пятна контакта за несколько циклов нагружения. «Интенсивность изнашивания не является постоянной величиной, и она пропорциональна давлению в контакте, модулю упругости, коэффициенту трения и параметру отношения величины внедрения к радиусу полусферы» [2].

Существующие модели и расчеты на изнашивание, основанные на решении контактных задач при взаимодействии твердых тел, учитывающих протекание процессов в поверхностных слоях контактирующих деталей пар трения, дают удовлетворительный результат в отдельных узких диапазонах периода эксплуатации и не учитывают влияние значительного количества как внутренних, так и внешних факторов.

Предлагаемая модель изнашивания

Процесс изнашивания пары трения заключается в том, что износу подвергаются обе контактирующие поверхности. Расчет интенсивности изнашивания в антифрикционной паре трения скольжения проводится для менее износостойкой поверхности детали, как правило, обладающей меньшей твердостью. «При сближении под действием нормальной нагрузки двух шероховатых поверхностей формируется фактическое пятно контакта, равная сумме элементарных площадок контакта, возникающих при деформации отдельных микронеровностей» [5]. Структуры материалов неоднородны по глубине и обычно имеют различные, точечные дефекты (нульмерные: вакансии, замещения, внедрения). При взаимодействии поверхностей трения на уровне фактического пятна контакта в структуру поверхностных слоев распространяются напряжения и темпера-

турные волны, которые приводят к колебаниям атомов в кристаллической решетке, разрыву межатомных связей и как следствие образованию сначала двумерных дефектов (микротрещин), а ближе к поверхности трехмерных (микрочастиц) (рис. 2). «В различных структурных уровнях по глубине от поверхности и на поверхности трения протекают интенсивные структурные и атомно-молекулярные перегруппировки: генерирование, взаимодействие и размножение дефектов, связанное с термофлуктуационным разрушением межатомных связей в поле градиентно убывающих напряжений от внешних сил трения» [4]. Через определенное количество циклов нагружений микрочастицы (частицы износа) отделяются с поверхности фактического пятна контакта и выносятся из зоны трения. При этом размеры (объемы) частиц износа различны и сопо-

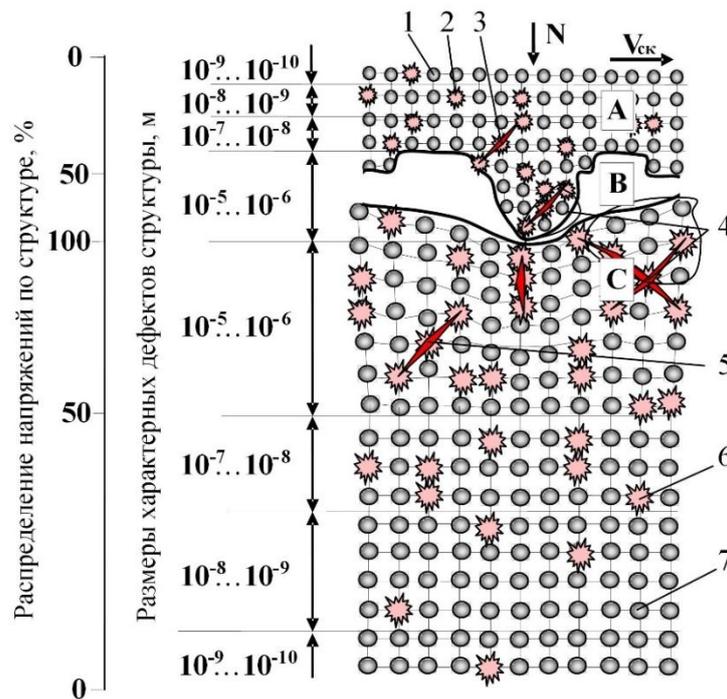


Рис. 2. Структура материалов поверхностных слоев пары трения: А – структура поверхности № 1; В – смазочный слой; С – структура поверхности № 2; 1, 7 – атомы кристаллических решёток; 2, 6 – нульмерные дефекты; 2, 5 – двумерные дефекты; 4 – трехмерные дефекты

Fig. 2. The structure of the materials of the surface layers of the friction pair: A - surface structure No. 1; B - lubricating layer; C - surface structure No. 2; 1, 7 - atoms of crystal lattices; 2, 6 - zero-dimensional defects; 2, 5 - two-dimensional defects; 4 - three-dimensional defects

ставимы с размерами группы атомов или зерна. Время отделения частиц также различно и зависит от изменяющихся напряжений в структуре материала и температуры в зоне контакта, а, следовательно, от давления (нагрузки) и от скорости относительного скольжения контактирующих поверхностей. При увеличении нагрузки (давления в контакте) увеличивается амплитуда колебаний атомов в кристаллической решетке, а при повышении скорости относительного скольжения повышается частота колебаний. И в первом, и во втором случае, снижается износостойкость пары трения.

«Между атомами кристаллической решетки материала поверхностного слоя, находящегося в контакте, существуют силы отталкивания при сближении и силы притяжения при удалении» [6].

При многоцикловом нагружении возникают зоны изменения напряжений: сжатия, равновесия, растяжения. При этом, происходят многократные переходы, от кинетической энергии к потенциальной, вызывая разрушения межатомарных связей. В момент превышения энергетический барьера, соответствующего энергии разрыва межатомарных связей трехмерного дефекта, когда поверхность трения находится в зоне растяжения, образуется микрочастица определенного объема, которая отделяется с поверхности фактического пятна контакта, являясь продуктом износа (рис. 3а). Если в паре трения имеется третье тело (смазочный материал), то образуется слой адсорбционных молекул, образующий пленку смазочного ворса, который удерживается за счет сил межмолекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями (рис. 3, б).

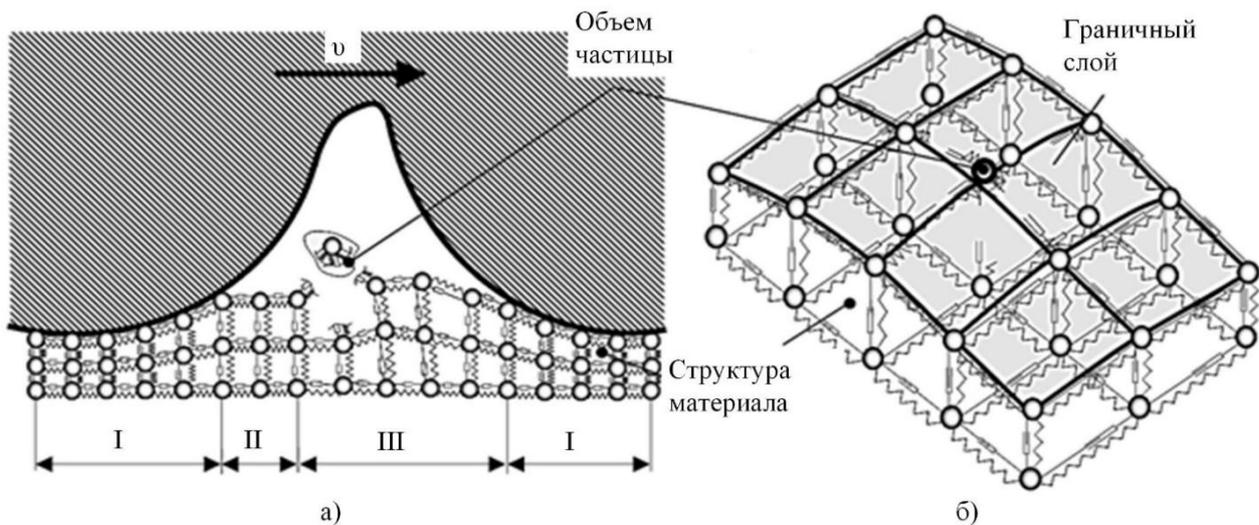


Рис. 3. Процесс образования частицы износа: а – без наличия третьего тела; б – при наличие третьего тела: I – зона сжатия; II – зона равновесия; III – зона растяжения

Fig. 3. The process of formation of a wear particle: a – without the presence of a third body; b – with the presence of a third body: I – compression zone; II – equilibrium zone; III – stretching zone

Смазочный материал отводит тепло, препятствует колебанию поверхностного слоя, тем самым повышает энергетический барьер, и частица износа отделяется через большее число циклов нагружений и промежуток времени, что повышает износостойкость поверхности трения.

«При моделировании пары трения скольжения предполагается, что определяющим является износ менее износостой-

кой, обладающей меньшей твердостью поверхность трения, средний линейный износ Δh за весь период эксплуатации пары трения $t_{\text{экс}}$ равномерный, а скорость изнашивания J постоянна. Тогда, плоскую модель изнашивания за период эксплуатации $t_{\text{экс}}$ можно представить графически (рис. 4)» [10]. Процесс изнашивания сопровождается непосредственным контак-

том поверхностей пары трения их разрушением.

Разрушение контактирующих поверхностей: сопровождается отделением частиц износа одинаковых по размерам и форме объема, зависит от материала поверхности трения, от давления (нагрузки) в паре трения и от скорости относительного скольжения контактирующих поверхностей, а также от используемого смазочного материала.

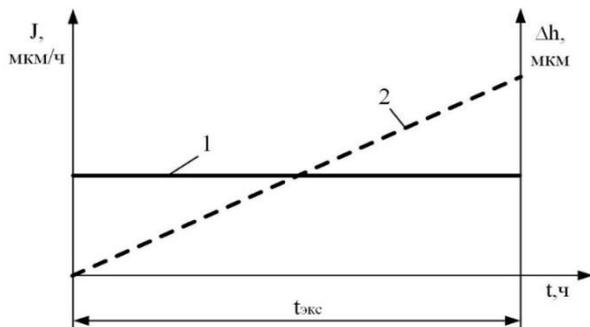


Рис. 4. Плоская модель процесса изнашивания: 1 – скорость изнашивания J ; 2 – линейный износ Δh
 Fig. 4. A flat model of the wear process: 1 – wear rate J ; 2 – linear wear Δh

Предлагаемая модель изнашивания, представляет собой идеальную поверхность, состоящую из слоев правильных октаэдров (рис. 5). Объем каждого октаэдра равен условному объему материала, отделяемого с идеальной поверхности за время действия определенного числа циклов нагружений. На поверхности трения октаэдры, располагаются послойно и отделяются последовательно не меняя профиль поверхности трения (рис. 5, а).

«Объем отделяемого октаэдра (рис.5, б) равен активационному объему, который равен произведению атомарной площади, охваченной единичным актом скольжения, на расстояние, включающее то число атомов, которые движутся во время процесса скольжения» [9].

«Для любого материала существует собственный активационный объем определенного размера. Активационный объем можно определить по формуле» [9]:

$$V' = \frac{c_{\mu}}{\alpha E} \chi = \frac{3k}{\alpha E} \chi \quad (1)$$

где c_{μ} – атомная теплоемкость; α – коэффициент теплового линейного расшире-

ния; E – модуль упругости материала; $k_1 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; χ – коэффициент перегрузки.

«Коэффициент перегрузки можно получить из соотношения» [9]:

$$\chi = \frac{\delta_p E}{\sigma_B} \quad (2)$$

где δ_p – относительное удлинение после разрыва; σ_B – предел прочности на разрыв.

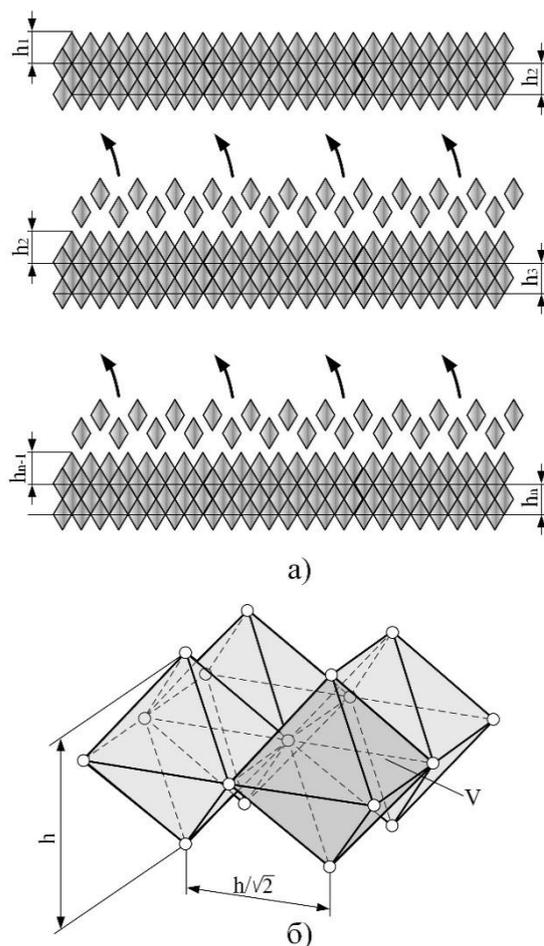


Рис. 5. Модель отделения поверхностного слоя:
 а – процесс отделения;
 б – объем отделяемого октаэдра
 Fig. 5. Surface layer separation model:
 а – separation process; b is the volume of the separated octahedron

Толщина слоя, состоящего из октаэдров, отделяется с условной поверхности трения подобно частицам, отделяемых при многоцикловом нагружении с поверхности фактической площади контакта, и характеризуется износостойкостью материала. Чем более износостойкий материал, применяется в паре трения, тем меньший объем отделяется с поверхности трения за единицу времени работы пары трения.

Если считать, что соотношение между объемом V октаэдра и расстоянием h между его вершинами

$$V = \frac{(h/\sqrt{2})^3 \sqrt{2}}{3} \quad (6)$$

то линейный износ при отделении одного слоя материала с поверхности трения, состоящего из октаэдров, определяется как:

$$\Delta h = \frac{\sqrt{2}(3V/\sqrt{2})^{1/3}}{2} \quad (7)$$

Средняя скорость изнашивания толщины одного слоя октаэдров:

$$J_t = \frac{\Delta h}{t} \quad (8)$$

«Если считать, что время отделения слоя октаэдров сопоставимо со временем ожидания активационного объема при элементарном акте разрушения, то согласно термофлуктуационной концепции прочности его можно определить по формуле С.Н. Журкова» [3, 4]:

$$t = t_0 \exp(W_0 - V \sigma / (kT)), \quad (9)$$

где $t_0 = 10^{-12} \dots 10^{-13}$ – «период колебаний атомов в твердом теле» [4]; W_0 – «начальный энергетический барьер напряженного тела (энергия межатомарных связей)» [1, 4]; σ – напряжение межатомарных связей; T – термодинамическая температура [4].

Напряжение межатомарных связей σ , определяется как отношение нагрузки в паре трения N к площади контакта A_r^* :

$$\sigma = \frac{N}{A_r^*}. \quad (10)$$

Термодинамическая температура:

$$T = 273 \pm T_{окр.с} + T_{мп}, \quad (11)$$

где $T_{окр.с}$ – температура окружающей среды по шкале Цельсия; $T_{мп}$ – повышение температуры в контакте за счет трения.

Повышение температуры в контакте за счет трения:

$$T_{тр} = \frac{\delta_p f_{тр} \sigma v}{m + k_n \rho c 2,6 \sqrt{\frac{a}{\Delta h}} \sqrt{v}}, \quad (12)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент граничного трения; v – скорость относительного скольжения поверхностей трения; m – физическая константа материала; k_n – коэффициент подобия модели; ρ – плотности материала; c – коэффициент теплоемкости; a – коэффициент температуропроводности.

Физическая константа материала:

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_t u}{\lambda A_r^*}}, \quad (13)$$

где α_t – коэффициент теплоотдачи; u – периметр площади пятна контакта в паре трения; λ – коэффициент теплопроводности.

Износостойкость пары трения скольжения:

$$I = \frac{t v}{\Delta h}. \quad (14)$$

где v – скорость скольжения.

Результаты

Для проверки предложенной модели прогнозирования износостойкости пар трения скольжения проводились расчеты и

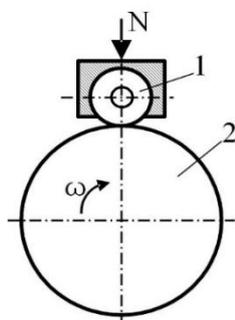


Рис. 6. Схема испытаний и характеристики пары трения
Fig. 6. Test scheme and characteristics of the friction pair

Характеристика	Индентор (диск)	Образец (диск)
Материал	ВК8	Сталь 40X
Диаметр, мм	15,2	48 ± 1
Нагрузка, Н	400	
Частота вращения образца, мин ⁻¹	-	400
Максимальный момент трения, Нм	15	
Смазочный материал	И-20А	
Погрешность измерения износа, %	±5	

экспериментальные исследования образцов по схеме «индентор – образец» (рис.6).

Анализируя полученную модель изнашивания установлено, что на износостойкость пар трения скольжения оказывают влияние: нагрузочные характери-

стойкость пар трения скольжения оказывают влияние: нагрузочные характери-

ки (давление в паре трения, скорость относительного скольжения), физико-механические и структурные параметры (твердость материала поверхности трения, модуль упругости материала, предел прочности на разрыв, геометрические размеры контакта), теплофизические свойства (теплоемкость материала, температуропроводность, атомная теплоемкость), качество смазочного материала и др. Все перечисленные факторы учитываются при проведении численной реализации (расчета). Модель удачно адаптируется к расчету износостойкости для различных этапов эксплуатации (пуск, установившееся изнашивание и останов) путем изменения исходных данных, что дает возможность ее применение к реальным парам трения машин и механизмов. Кроме того, появляется возможность прогнозировать износостойкость, как одной менее износостойкой поверхности трения, так и другой более износостойкой.

Результаты, полученные при численной реализации предложенной модели и экспериментальных испытаний опытных

Заключение

Следует отметить, что прогнозирование износостойкости пар трения скольжения, позволяет определять оптимальную износостойкость для длительного периода их эксплуатации еще на этапе проектирования и конструирования машины или механизма путем подбора: материалов трибосопряжений, смазочного материала, а также применения соответствующего метода обеспечения износостойкости конструктивного, трибоматериаловедческого,

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабичев, А.П. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.], под ред. Н.С. Григорьева, Е.З. Мелихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
2. Горленко А.О. Аспекты природы изнашивания / А.О. Горленко, С.В. Давыдов, В.П. Тихомиров [и др.] // Известия юго-западного государственного университета. 2023. № 1. С. 8-24.
3. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография /. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.

образцов с аналогичными характеристиками представлены в виде гистограмм на рис.7.

Экспериментальные исследования опытных образцов на износостойкость показали, что прогнозируемая износостойкость пары трения скольжения при реализации предложенной модели, имеет тот же порядок и находится в диапазоне минимального и максимального значений, полученных при эксперименте.

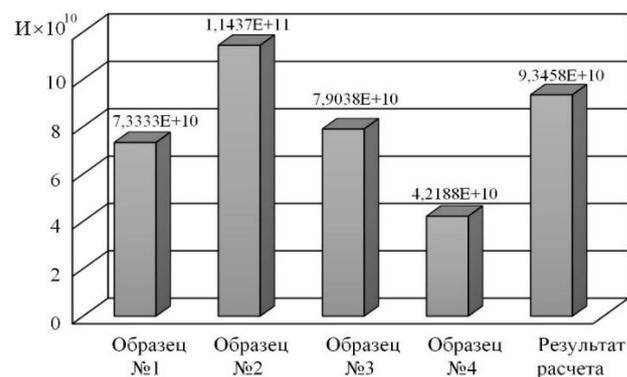


Рис. 7. Гистограммы износостойкости
Fig. 7. Histograms of wear resistance

триботехнологического и др. Предложенная модель изнашивания, дает возможность в определенном диапазоне прогнозировать (рассчитывать) износостойкость пары трения скольжения путем изменения исходных данных, таких как: нагрузка (давление), скорость относительного скольжения и др., тем самым исключать необходимость, достаточно трудоемких испытаний пар трения на износ при воздействии различных факторов.

4. Ковшов А.Г. Кинетическая, термофлуктуационная природа разрушения поверхностей трения твердых тел при изнашивании / А.Г. Ковшов. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т.22. № 3 (95). С. 37-43.
5. Ковшов А.Г. Влияние динамических параметров нагружения при вибротрении на эквивалентные напряжения и скорость износа в скользящем контакте / А.Г. Ковшов. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т.22. № 3 (95). С. 98-102.

6. Шец С.П. Повышение износостойкости подшипниковых узлов трения машин и механизмов: автореф... дис. д-ра. техн. наук 05.02.04 / Шец С. П. Брянск, 2011. – 36 с.
7. Шец С.П. Взаимосвязь герметичности подшипниковых узлов трения с абразивным изнашиванием их трибосопряжений / Шец С.П., В.И. Сакало, А.Г. Суслов А.Г. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. № 2 (50). – С. 36-40.
8. Шец С.П. Изнашивание нестационарно нагруженных радиальных подшипников скольжения/

Шец С.П. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2007. № 1 (13). – С. 13-19.

9. Шец С.П. Изнашивание стальных пар трения на уровне фактического пятна контакта / С.П. Шец, А.О. Горленко, Д.А. Болдырев // Сталь. 2022. № 2. С. 27-32.
10. Шец С.П. Моделирование процессов изнашивания в подшипниках скольжения / С.П. Шец // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. № 3. С. 32-37.

REFERENCES

1. Babichev AP, Babushkina NA, Bratkovsky AM. Physical quantities: handbook. Moscow: Energoatomizdat; 1991.
2. Gorlenko AO, Davydov SV, Tikhomirov VP. Aspects of the nature of wear. Proceedings of Southwest State University. 2023;1:8-24.
3. Ibatullin ID. Kinetics of fatigue damage and destruction of surface layers: monograph. Samara: Samara State Technical University; 2008.
4. Kovshov AG. Kinetic, thermofluctuation nature friction surfaces of solid friction during wear. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2020;3(95):37-43.
5. Kovshov AG. Effect of dynamic loading parameters when vibrating to equivalent stress and wear speed in sliding contact. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2020;3(95):98-102.
6. Shets SP. Increasing the wear resistance of bearing friction units of machines and mechanisms [abstract of dissertation]. [Bryansk (RF)]; 2011.
7. Shets SP, Sakalo VI, Suslov AG. Correlation of bearing friction assemblies with abrasive wear of their tribo-coupling. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016;2(50):36-40.
8. Shets SP. Wearing out of nonstationary laden radical friction bearings. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2007;1(13):13-19.
9. Shets SP, Gorlenko AO, Boldyrev DA. Wearing out of steel friction pairs at the level of the actual contact spot. Stal. 2022;2:27-32.
10. Shets SP. Modeling of wear processes in sliding bearings. Repair. Reconditioning. Modernization. 2008;3:32-37.

Информация об авторах:

Шец Сергей Петрович – доцент, доктор технических наук, тел. +7(909)240–52–41, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт», профессор.

Shets Sergey Petrovich – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Motor Transport, Professor; phone: +7(909)240–52–41.

Могилев Аркадий Евгеньевич – аспирант кафедры «Трубопроводные транспортные системы», тел. +7(920)839–33–11.

Mogilev Arkady Evgenievich – Postgraduate Student of the Department of Pipeline Transport Systems; phone: +7(920)839–33–11.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 18.11.2023; одобрена после рецензирования 25.12.2023; принята к публикации 26.01.2024. Рецензент – Горленко А.О., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 18.11.2023; approved after review on 25.12.2023; accepted for publication on 26.01.2024. The reviewer is Gorlenko A.O., Doctor of Technical Sciences at Bryansk State Technical University, Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.