

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-10-74-82>

СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ И ИЗНОСЕ

© Ирина Михайловна Петрова*, Елена Алексеевна Марченко,
Михаил Михайлович Хрущов, Илья Александрович Буяновский

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер, д. 4;

*e-mail: impetr@mail.ru

*Статья поступила 28 декабря 2022 г. Поступила после доработки 9 февраля 2023 г.
Принята к публикации 30 марта 2023 г.*

Исследовано влияние повреждений, вызванных трением и износом, на накопление усталостных повреждений в приповерхностных слоях материала технических систем, работающих при динамическом нагружении. Сравнение данных испытаний образцов из науглероженной стали Cr – Mn – Si при ультразвуковом нагружении в диапазоне до 10^9 циклов с результатами испытаний образцов стали 45 при постоянной частоте 100 Гц, имитирующей условия при трибологических испытаниях на фрикционную усталость, показало, что во всех характерных диапазонах частот нагружения возникающие повреждения однотипны. При оценке влияния фрикционной усталости на накопление повреждений и вероятность эксплуатационных отказов авторы исходили из предположения о подобии процессов накопления структурных повреждений при циклической и фрикционной усталости. Проведены экспериментальные исследования поведения коэффициентов трения и величины уширения рентгеновских линий, характеризующей изменения дислокационной структуры металлических материалов (сталей и титановых сплавов) при трении, а также кривых фрикционной усталости. Показано, что процесс фрикционно-усталостного разрушения происходит по механизмам мало- и многоциклового усталости, что может служить обоснованием предложенного подхода. В качестве примера приведены данные расчета вероятности отказов компрессора, основанные на кривых фрикционной усталости в широком диапазоне циклов нагружения, полученных в результате испытаний шейки коленчатого вала. Использование этих кривых дало возможность оценить влияние совместного действия динамической нагрузки и трения, выражающегося в увеличении зазоров, и динамических нагрузок в процессе изнашивания контактирующих деталей на накопление усталостных повреждений, долговечность и надежность в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: динамическое нагружение; мало-, много- и гигацикловая усталость; трение и контактное взаимодействие; фрикционно-усталостное повреждение; износ; коэффициент трения; эволюция дислокационной и дефектной структуры; развитие трещин; накопление повреждений; вероятность отказа.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL REGULARITIES OF THE DAMAGE ACCUMULATION AND FAILURE IN METALS UNDER DYNAMIC LOADING AND WEAR

© Irina M. Petrova*, Elena A. Marchenko,
Mikhail M. Khrushchov, Ilya A. Buyanovskii

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonievskii per., Moscow, 101990, Russia; *e-mail: impetr@mail.ru

Received December 28, 2022. Revised February 9, 2023. Accepted March 30, 2023.

The effect of damage caused by friction and wear on the accumulation of fatigue damage in the near-surface layers of the material used in technical systems operating under dynamic loading is studied. A comparative study of the samples of carbonized Cr – Mn – Si steel under ultrasonic loading in the range up to 10^9 cycles and the samples of steel 45 loaded at a permanent frequency of 100 Hz to simulate conditions of tribological tests for frictional fatigue revealed the same types of damage occurring in the characteristic frequency ranges of loading. To assess the effect of friction fatigue on damage accumulation and the prob-

ability of operational failures the authors have supposed that the processes of structural damage accumulation in cyclic and frictional fatigue are similar. The analysis of experimental data on the behavior of the friction coefficients and the magnitudes of broadening X-ray lines which characterize changes in the dislocation structure of the metallic structural materials (steels and titanium alloys) upon friction and the friction fatigue curves confirmed that the process of friction fatigue failure occurs via the mechanisms of low and high cycle fatigue that proves the validity of the proposed approach. The calculation results for the probability of the compressor failure are presented as an example. The calculations are based on the friction fatigue curves in a wide range of loading cycles obtained upon testing the crankshaft neck. The use of friction fatigue curves thus obtained provided assessment of the effects of combined action of the dynamic loading and friction, resulting in increased gaps and the dynamic loads (due to the wear of contacting parts) on the fatigue damage accumulation, durability and the reliability of the mechanical systems during operation.

Keywords: dynamic loading; low; high and gigacycle fatigue; friction and contact interaction; tribo-fatigue damage; wear; friction coefficient; evolution of dislocation and defect structure; crack progress; damage accumulation; probability of failure.

Введение

Дальнейшее развитие машин и механизмов характеризуется ростом требований к их техническим характеристикам с одновременным усложнением условий эксплуатации [1]. Значительный парк изделий машиностроения работает при динамическом нагружении, когда износ и усталостные разрушения в большой степени определяют их работоспособность и надежность. При этом в зависимости от окружающей среды и условий нагружения реализуются различные механизмы накопления повреждений и разрушения [2 – 4]. Требуемый уровень надежности и долговечности механических систем, находящихся в эксплуатации, должен быть рассмотрен с учетом степени влияния этих факторов на накопление повреждений.

Тенденция увеличения сроков эксплуатации механических систем привела к необходимости исследования поведения материалов в широком диапазоне чисел циклов нагружения — от малоциклового до гигациклового области циклической усталости. Это имеет основополагающее значение для обеспечения безопасности конструктивных элементов. Модели накопления повреждений и оценки соотношения напряжение — долговечность или зависимостей нагрузка — долговечность — вероятность, включающие малоцикловую, многоцикловую и гигацикловую усталость, классифицируются в соответствии с подходом, применяемым для определения зависимости срока службы от действующих нагрузок и условий эксплуатации с учетом их случайного характера.

Цель работы — оценка влияния фрикционной усталости на накопление повреждений и вероятность эксплуатационных отказов. Используемый авторами подход основан на определенном сходстве явлений при циклической и фрикционной усталости, поскольку и износ, и усталостное разрушение материала начинаются от поверхности или в приповерхностном слое образца.

Типы отказов и локализация усталостных повреждений при динамическом нагружении

К настоящему времени накоплен большой объем информации по кривым усталости и развитию усталостных трещин от малоциклового до гигациклового области. Недостатком исследований в гигациклового области является то, что для сокращения продолжительности времени испытаний они, как правило, проводятся при ультразвуковых частотах нагружения. Это может существенно менять механику накопления повреждений по сравнению с испытаниями при частотах, не превышающих 200 Гц. Важны также исследования механизмов возникновения и развития (роста) трещин. Как правило, в области мало- и многоциклового усталости трещина в области концентрации напряжений начинает развиваться от поверхности, тогда как трещины в гигациклового области в основном возникают на дефектах, изначально присутствующих в объеме материала. При этом они могут возникать и развиваться, если даже коэффициент интенсивности напряжений, связанный с начальным дефектом, ниже порогового значения, необходимого для распространения трещины [5].

Пример экспериментальной кривой усталости в широком диапазоне чисел циклов N , полученной в ходе проводившихся при ультразвуковых частотах нагружения испытаниях науглеродженной низкоуглеродистой стали Cr – Mn – Si с цементированным поверхностным слоем [6], представлен на рис. 1. На нем хорошо видно, что для усталостного разрушения этой стали характерны три режима (типа) отказов, вызванных:

поверхностными дефектами при высокой амплитуде напряжения (режим I, малоцикловая усталость);

поверхностными дефектами, при которых действующие напряжения не превышают предела упругости (режим II, многоцикловая усталость);

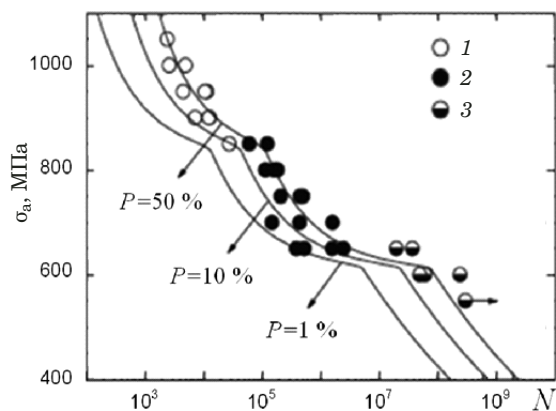


Рис. 1. Пример кривых усталости, полученных в широком диапазоне чисел циклов нагружения N : 1 – 3 соответствуют режимам разрушения I, II, III

Fig. 1. Fatigue curves obtained in a wide range of loading cycles N . Failure modes: 1 — type I (surface); 2 — type II (surface); 3 — type III (internal)

наличием внутреннего включения или образованием мелкозернистой области при низкой амплитуде напряжения (режим III, гигацикловая усталость).

Кривые усталости при вероятностях разрушения P , равных 50, 10 и 1 %, хорошо согласуются с экспериментальными данными, особенно для режимов отказа I и II (см. рис. 1).

В ИМАШ РАН проведены усталостные испытания до базы чисел циклов $N = 10^9$ при регулярном и нерегулярном нагружении и плоском изгибе образцов, изготовленных из стали 45. Частота нагружения составляла 100 Гц во всем диапазоне чисел циклов, что исключало влияние частоты на конечные результаты исследования, а также позволяло соотнести их с данными испытаний на фрикционную усталость, в которых периодическое контактное воздействие на поверхность происходит при близких действующих частотах.

Предел выносливости на базе 10^7 циклов определяли на 20 образцах методом ступенчатого изменения нагрузки [7]. Для описания первой зоны накопления повреждений кривую усталости использовали в форме

$$\sigma_{ai}^m N_i = \sigma_{-1}^m N_G, \quad (1)$$

где $m = 5,7$ — параметр, характеризующий наклон кривой усталости; N_G — долговечность, соответствующая точке перелома кривой усталости. Испытания проведены в статистическом аспекте при программном блоке нагружения, соответствующем экспоненциальному закону распределения. На каждом уровне было испытано от 5 до 10 образцов. Функции распределения долговечностей, полученные в результате испытаний, представлены на рис. 2, где 1 – 4 соответ-

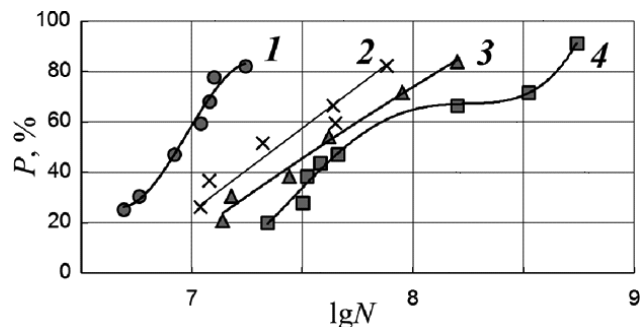


Рис. 2. Функции распределения долговечностей при программном нагружении для экспоненциального закона распределения: 1 – 4 — $\sigma_{a \max}/\sigma_{-1}$ равно 1,3; 1,2; 1,1; 1,05 соответственно

Fig. 2. Durability distribution functions for programmed loading and exponential distribution: 1 — $\sigma_{a \max}/\sigma_{-1} = 1,3$; 2 — $\sigma_{a \max}/\sigma_{-1} = 1,2$; 3 — $\sigma_{a \max}/\sigma_{-1} = 1,1$; 4 — $\sigma_{a \max}/\sigma_{-1} = 1,05$

вуют $\sigma_{a \max}/\sigma_{-1}$, равным 1,3; 1,2; 1,1; 1,05 (σ_{-1} — предел усталости, соответствующий долговечности 10^7 циклов; $\sigma_{a \max}$ — максимальная амплитуда в блоке нагружения).

Из приведенных данных следует, что закономерности накопления повреждений в гигацикловой области при программном нагружении с частотой 100 Гц и при испытаниях при регулярном нагружении с ультразвуковой частотой носят одинаковый характер, что позволяет использовать их результаты для оценок надежности и ресурса деталей, эксплуатируемых при наличии трения и износа в условиях динамического нагружения.

Как отмечено выше, при динамическом нагружении развитие трещины достаточно часто начинается от поверхности или в приповерхностной зоне. Траектория износа как усталостного разрушения поверхностного слоя [8] сближает задачи трибологии и динамического нагружения в области исследования процессов накопления повреждений в конструкционных материалах, приводящих к разрушению детали и отказу механической системы в целом. В этой связи целесообразно более тщательно рассмотреть процессы, связанные с влиянием трения и износа на накопление усталостных повреждений в поверхностном слое материала, и оценить их возможный вклад в суммарную величину возникших при эксплуатации повреждений.

Природа износоусталостных повреждений и кривые фрикционной усталости

При контактном взаимодействии трущихся тел знакопеременная деформация поверхностного слоя материала возникает при перемещении по нему выступов шероховатой поверхности контробразца. Каждый такой выступ, внедряясь

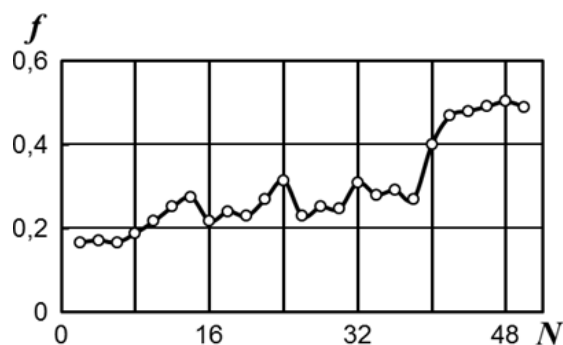


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения f стали 45 от числа N воздействий индентора при нагрузке 150 Н

Fig. 3. Dependence of friction coefficient f (steel 45) on the number N of indenter passes at a normal load of 150 N

в поверхность и деформируя ее материал, создает в нем знакопеременное сложнапряженное состояние. Он сжимает материал непосредственно перед собой, растягивает его на некотором расстоянии впереди выступа на гребне волны деформации и значительно растягивает его в зоне позади выступа за счет силы трения. Таким образом, каждое сечение истираемого тела последовательно подвергается сжимающим и растягивающим напряжениям. Разрушение поверхностей при трении происходит в условиях многоциклового (упругий контакт) и малоциклового (пластический контакт) усталости. Условие осуществления этих видов разрушения зависит от соотношения h/R — высоты h и радиуса закругления R неровности на шероховатой поверхности контртела. Во всех случаях разрушение поверхности металлов обусловлено, прежде всего, интенсивностью протекания пластической деформации [8].

При трении различные стадии усталостного процесса проявляются через зависимость коэффициента трения от нагрузки, которая характеризуется двумя ветвями, между которыми существует переходная область от одного вида фрикционного контакта к другому. Согласно [8], нисходящая ветвь характеризует область упругого контакта (многоцикловая усталость), а восходящая — область пластического контакта (малоцикловая усталость).

Все стадии развития в материале усталостных повреждений, вызванных пластической деформацией, сопровождаются изменениями его дислокационной структуры, за эволюцией которой можно наблюдать, например, с помощью современных дифракционных методов структурного анализа. Одной из методик, позволяющих контролировать эволюцию дислокационной структуры, является измерение физического уширения рентгеновских дифракционных линий. Авторам работы [9] на основе измерений ширины рентге-

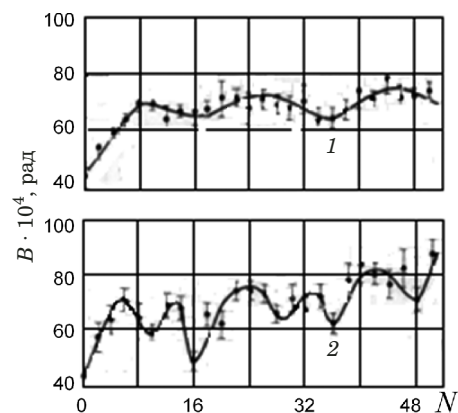


Рис. 4. Зависимость ширины B линии $(220)_{\alpha-Fe}$ стали 45 от числа N воздействий индентора при нагрузках 60 (1) и 300 Н (2)

Fig. 4. Dependence of $(220)_{\alpha-Fe}$ X-ray line broadening B (steel 45) on the number of indenter passes N under two loads: 1 — 60 and 2 — 300 N

новских линий в металлических образцах, подвергшихся трибологическим испытаниям в условиях циклического нагружения, удалось изучить особенности накопления фрикционно-усталостных повреждений, приводящих к поверхностному разрушению при трении в условиях пластического контакта, и сопоставить их с наблюдаемыми при испытаниях на механическую усталость.

Трибологические испытания проводили на модели фрикционного контакта при скольжении без смазки в одном направлении боковой поверхности цилиндра из стали ШХ15 диаметром 3 мм по плоской поверхности образца в интервале контактных давлений $\sigma_s < \sigma_{max} < HB$. На рис. 3 представлена зависимость коэффициента трения f от числа N воздействий цилиндрического индентора на образец из стали 45, а на рис. 4 — зависимость ширины дифракционной линии $(220)_{\alpha-Fe}$ для испытанных образцов той же стали от N .

Видно (см. рис. 3), что коэффициент трения в условиях периодического фрикционного воздействия на поверхность стального образца меняется немонотонно. Через определенное число проходов индентора величина f возрастает, после чего снижается, затем процесс с определенной периодичностью повторяется. Подобное поведение может свидетельствовать об определенных трибостимулированных структурных изменениях в поверхностном слое в процессе трения.

Характер происходящих изменений может быть истолкован на основе представлений о дефектах кристаллической решетки, создаваемых пластической деформацией. При воздействии контртела, выполняющего роль индентора, на образец в поверхностном слое последнего происходит пластическая деформация, в результате

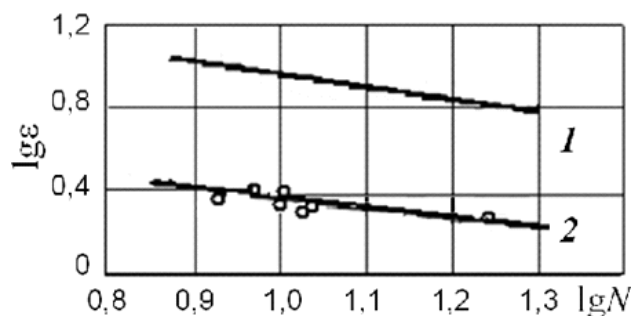


Рис. 5. Связь между числом циклов до разрушения и остаточной деформацией стали 45: 1 — в условиях малоциклового усталости (расчет по (2) при $C = 0,29$); 2 — при трении

Fig. 5. The “residual deformation — number of cycles to failure” curves for: 1 — low cycle fatigue (calculated according to equation (2) at $C = 0.29$); 2 — friction fatigue (steel 45)

которой плотность дефектов увеличивается, что фиксируется возрастанием ширины дифракционных линий. Рост плотности дислокаций приводит к повышению относительной упругой деформации решетки на начальной стадии процесса. Плотность дефектов при повторяющемся неоднократном механическом воздействии увеличивается до тех пор, пока не достигнет некоторой предельной величины. Последующее насыщение решетки дислокациями приводит к нарушению сплошности металла, сопровождаемому образованием микротрещин, в результате чего дислокационная плотность уменьшается. При этом снижаются величина упругой деформации решетки, а также степень уширения рентгеновских линий (см. рис. 4). В дальнейшем процесс накопления дефектов, достижения предельного значения их плотности и последующей релаксации повторяется многократно и в конце концов рост числа усталостных микротрещин приводит к образованию и отделению частиц износа. В этом случае число циклов до разрушения может быть определено как среднее значение чисел циклов, через которые уширение рентгеновских линий B (см. рис. 4) достигает минимальных значений. Испытания в интервале нагрузок 60 – 300 Н показали, что существует обратно пропорциональная зависимость между числом циклов до разрушения и интенсивностью износа [9].

В условиях малоциклового усталости разрушение практически всех промышленных металлов и сплавов может быть описано уравнением Коффина-Мэнсона — степенным уравнением с единым показателем степени $m = 0,5$ [10]:

$$N^{0,5} \Delta \varepsilon = C, \quad (2)$$

где N — число циклов до разрушения; $\Delta \varepsilon$ — размах пластической деформации; C — константа.

В большинстве случаев $C = \varepsilon_{\text{ист}}/2$, где $\varepsilon_{\text{ист}}$ — величина истинной деформации в шейке при статическом разрушении образца. Например, для стали 45 константа C , полученная при испытаниях на растяжение, равна 0,29, а уравнение имеет вид: $N^{0,5} \Delta \varepsilon = 0,29$ [9].

Связь между величиной действующей деформации и числом циклов до разрушения для трения можно установить, сравнивая ширины рентгеновских линий с соответствующими значениями, полученными при растяжении. Фактически это та остаточная деформация растяжения, при которой плотность дислокаций равна плотности дислокаций в данных условиях трения. Использование ее для сравнительного анализа обусловлено существованием определенной связи между величиной плотности дислокаций и суммарной деформацией.

На рис. 5 в логарифмических координатах по результатам рентгеновского структурного анализа представлена зависимость между остаточной деформацией и числом циклов до разрушения. Число циклов до разрушения при трении определяли по зависимостям рис. 4 как среднее (из 12 – 20 значений) расстояние между минимумами ширины линии $(220)_{\alpha\text{-Fe}}$. Разрушение в данном случае происходило при небольшом (единицы, десятки) числе воздействий индентора в условиях малоциклового усталости. Полученное уравнение для кривой фрикционной усталости в обычных координатах имеет вид, аналогичный уравнению Коффина – Мэнсона, $N^{0,4} \varepsilon_T = 0,06$. Близость аналитических зависимостей, описывающих разрушение при малоциклового и фрикционной усталости, подтверждает общность механизмов, приводящих к разрушению, у рассматриваемых видов нагружения.

Коэффициент трения отражает деформацию и разрушение площади фактического контакта как ансамбля пятен контакта и является комплексной характеристикой всех процессов, связанных как с формированием и изменением поверхностных структур, так и с их разрушением (изнашиванием).

В качестве примера на рис. 6 показаны фрагменты типичных трибограмм — зависимостей силы или коэффициента трения от продолжительности испытания (числа циклов) и нагрузки, характеризующих фрикционно-усталостное разрушение. Данные трибограммы получены авторами работы [11] при исследовании конструкционных материалов, используемых в теплообменном оборудовании, — титановых сплавов (BT1-00, ПТ-7М) и коррозионностойких сталей (08X18H10T, ХН35ВТ). Испытания проводили на шариковом трибометре при трении без смазки

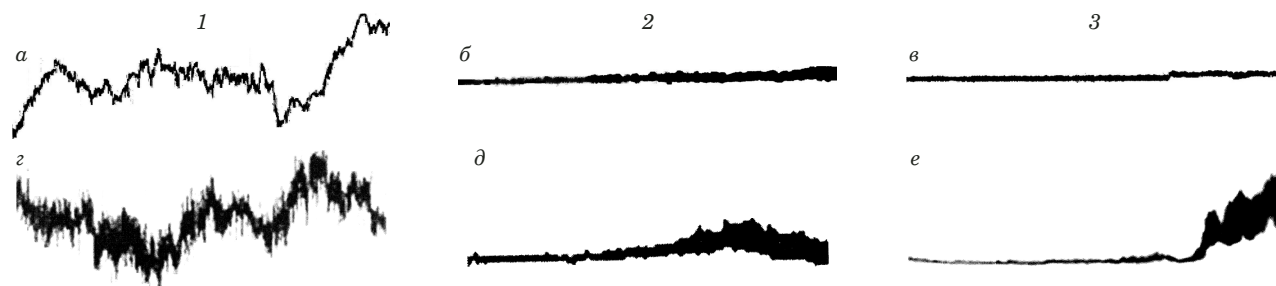


Рис. 6. Типичные трибограммы фрикционно-усталостного разрушения металлических материалов, полученные при испытаниях пар трения: 1 — ПТ-7М – ПТ-7М при нагрузках 0,02 (а) и 0,2 Н (z); 2 — ХН35ВТ – ХН35ВТ при 0,1 (б) и 0,5 Н (д); 3 — 08Х18Н10Т – ХН35ВТ при 0,02 (в) и 0,3 Н (е)

Fig. 6. Typical tribograms of the friction-fatigue failure of metallic materials obtained in pin-on-disk tests of friction couples: 1 — PT-7M vs PT-7M titanium alloy (at normal loads equal to 0.02 (a) and 0.2 N (d)); 2 — KhN35VT vs KhN35VT steel (at 0.1 (b) and 0.5 N (e)) and 3 — 08Kh18N10T vs KhN35VT steel (at 0.02 (c) and 0.3 N (f))

в интервале нагрузок 0,02 – 0,20 Н на базе 6000 циклов.

При трении титановых сплавов ПТ-7М – ПТ-7М и ВТ1-00 – ПТ-7М (в одноименных парах) изменение коэффициента трения носит периодический характер, аналогичный показанному на рис. 6, а и z. Такое поведение является отражением усталостных процессов в области пластического контакта (малоцикловая усталость) и связано с периодическим упрочнением и разрушением материала. Следует отметить, что выявление периодического изменения коэффициента трения возможно только на определенной стадии процесса формирования и разрушения поверхностных структур, когда отсутствует влияние частиц изнашивания.

Момент начала разрушения пары ХН35ВТ – ХН35ВТ фиксируется по возникновению флуктуаций на трибограмме (рис. 6, д), а пары 08Х18Н10Т – ХН35ВТ — по резкому увеличению коэффициента трения (рис. 6, е), что типично при разрушении в области упругого контакта (многоцикловая усталость). Характер изменения коэффициента трения пары трения ХН35ВТ – ХН35ВТ, предположительно, соответствует области, переходной между упругим и пластическим контактом.

Количественная обработка трибограмм позволила построить экспериментальные кривые фрикционной усталости, характеризующие зависимость между величиной приведенных напряжений σ_e (для упругого контакта) или деформаций e_e (для пластического контакта) и числом циклов до разрушения N . Для титановых сплавов число циклов до разрушения определялось средним расстоянием между минимальными значениями коэффициента трения, которое вычислялось при статистической обработке 5 – 20 значений, а для коррозионностойкой стали — моментом начала осцилляций коэффициента трения или резким его увеличением. При построении

кривых эквивалентные максимальные напряжения, действующие в поверхностном слое, рассчитывались с учетом средних значений коэффициента трения по третьей гипотезе прочности: $\sigma_{\max}^{(3)} = \sigma_{\max} \sqrt{1 + 4f^2}$ [4], где $\sigma_{\max}$ соответствует максимальному контактному давлению, рассчитанному по Герцу, без учета сил трения. При построении кривых фрикционной усталости для титановых сплавов было использовано предположение о пропорциональности между напряжением и деформацией.

Периодический характер изменения коэффициента трения в сочетании со значениями показателей степени в уравнении фрикционной усталости для титановых сплавов свидетельствует о том, что процесс фрикционной усталости развивается в области упругопластического контакта. При трении обеих пар из коррозионностойкой стали фиксируется только усталостный механизм изнашивания при упругом контакте (многоцикловая усталость), поэтому для предварительной оценки их долговечности можно использовать существующие расчетные методики оценки износостойкости, основанные на этом механизме.

При испытаниях пары 08Х18Н10Т – ХН35ВТ момент разрушения зафиксирован только при двух нагрузках. Этих данных оказалось недостаточно для построения кривой фрикционной усталости. Для остальных пар трения кривые фрикционной усталости приведены на рис. 7. Видно, что наилучшие усталостные характеристики имеет сталь ХН35ВТ. Титановые сплавы значительно уступают ей по этим показателям, их усталостные характеристики близки, но у сплава ПТ-7М за счет легирования (1,8 – 2,5 % Al и 2,0 – 3,0 % Zr) они немного лучше, чем у ВТ1-00 (технический титан). Соответственно, максимальный износ фиксируется у сплава ВТ1-00. У стали ХН35ВТ на выбранной базе испытаний следов частиц изнашивания не обнаружено [12].

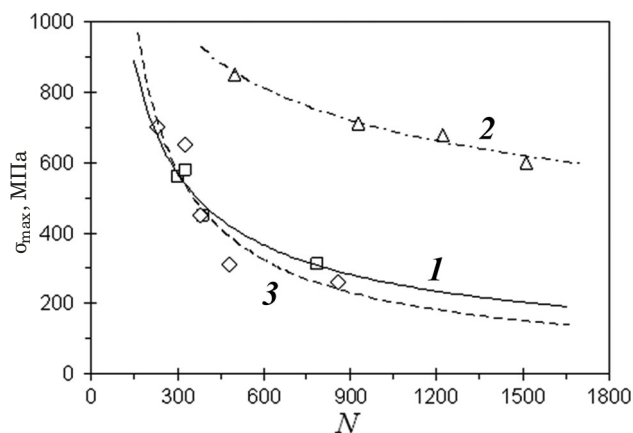


Рис. 7. Кривые фрикционной усталости для пар трения ПТ-7М – ПТ-7М (1), ХН35ВТ – ХН35ВТ (2) и ВТ1-00 – ПТ-7М (3), полученные при испытаниях на трение без смазки [11]

Fig. 7. Friction fatigue curves for two friction couples of similar materials PT-7M (1) and KhN35VT (2), and a pair of dissimilar titanium alloys — VT1-00 vs PT-7M (3) obtained in dry friction tests (according to [11])

Показатели степени m в уравнениях типа Коф-фина – Мэнсона $N^m \sigma_{\max}^{(3)} = C$, описывающих приведенные кривые фрикционной усталости сплавов ВТ1-00, ПТ-7М и ХН35ВТ, значительно отличались друг от друга и были равны 0,83, 0,63 и 0,31 соответственно.

В этой связи отметим, что в литературе нет общепринятого мнения о возможном интервале значений показателя m , характеризующего наклон экспериментальной кривой механической или фрикционной усталости. В случае кривых фрикционной усталости эта величина может содержать опосредованную информацию не только о микромеханическом поведении и пластичности контактирующих поверхностей, но и об особенностях формирующихся вторичных структур и трибохимическом взаимодействии.

К оценке вероятности износоусталостных отказов

Усталостный характер накопления повреждений и изменения коэффициента трения, зафиксированный при испытании на моделях фрикционного контакта, подтверждают экспериментально полученные в работе [12] кривые фрикционной усталости шеек коленчатого вала ЗМЗ-53 на базе $10^8 - 10^9$ циклов нагружения, приведенные на рис. 8 в координатах удельная контактная нагрузка — число циклов до наступления предельного состояния вкладыша.

Испытания показали, что изнашивание по периметру опасного сечения происходит неравномерно. При этом наибольшая неравномерность наблюдается на начальном этапе, уменьшаясь с ростом числа циклов.

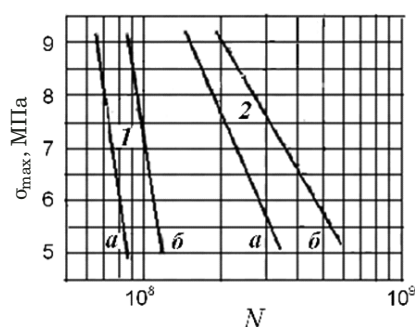


Рис. 8. Кривые фрикционной усталости для коренных (1) и шатунных (2) шеек коленчатого вала ЗМЗ-53, полученные в предположении равномерности износа (а) и с учетом неравномерности износа (б) [12]

Fig. 8. Friction fatigue curves for: 1 — core; 2 — connecting rod necks of a ZMZ-53 crankshaft obtained under the assumption of: a — uniformity of wear; b — taking into account an uneven wear (according to [12])

Таким образом, в зоне фрикционного контакта элементов трибосопряжений при их динамическом нагружении происходит накопление повреждений, соответствующее малоцикловой и многоцикловой усталости. В наиболее распространенном и практически важном случае, с учетом процессов, происходящих при трении, суммарное повреждение

$$D = D_N + D_e + D_{и}, \quad (3)$$

где D_N отражает накопление повреждений при динамическом нагружении и упругом деформировании, соответствующее многоцикловой усталости; D_e — накопление повреждений при упругопластических деформациях (малоцикловая усталость); $D_{и}$ — накопление износоусталостных повреждений при трении. Критерий (3) предложен авторами работы [13], в которой приведен алгоритм использования данного критерия и дана оценка влияния увеличения зазоров в узлах трения на долговечность деталей машин.

Оценка накопления повреждений в области малоцикловой и многоцикловой усталости (критерии D_N и D_e соответственно) подробно рассмотрена в работе [14]. Условием прочности является неравенство $D \leq 1$, где D — накопленное усталостное повреждение.

Величины D_N , D_e , $D_{и}$ при эксплуатации на различных режимах определяют на основании линейного суммирования повреждений:

$$D = \sum_{i=1}^k N_{i\sigma} / [N]_i,$$

где k — число режимов нагружения; $N_{i\sigma}$ — число циклов нагружения на i -м режиме эксплуатации с напряжением $\sigma_{ai\sigma}$ или с деформациями $\varepsilon_{ai\sigma}$; $[N]_i$ — допустимое число циклов нагружения, оп-

ределяемое по кривым усталости по напряжениям или деформациям.

В работе [15] накопленное повреждение предлагается оценивать как

$$D = \int_t^{N_f} \frac{dN}{N_{fi}} + \int_0^{\varepsilon_f} \frac{de}{e_f} + \int_0^L \frac{I_h dl}{H}, \quad (4)$$

где N — число циклов нагружения; N_{fi} — число циклов, определяемое при заданном нагружении в соответствии с кривой усталости (1); N_f — число циклов до разрушения (появления трещины); e — деформация, односторонне накопленная в процессе статического и циклического нагружений; e_f — односторонне накопленная деформация, приводящая к разрушению (образованию трещины); ε_f — располагаемая пластичность (деформационная способность) материала; I_h — интенсивность износа; L — общий путь трения, на котором износ достигает предельно допустимой назначенной величины износа H и протяженность которого пропорциональна общему количеству циклов нагружения.

Данный подход использован для оценки вероятности разрушения шатуна оппозитного компрессора [16]. Оппозитный компрессор — горизонтальная машина со встречным движением поршней и расположением цилиндров по обе стороны вала. Отличается высокой динамической уравновешенностью, что позволяет увеличить частоту вращения приводного вала в 2–3 раза по сравнению с обычным горизонтальным компрессором. Увеличение динамических нагрузок за счет износа в этой работе было учтено через величину предельного коэффициента нагруженности $n_p = \sigma_{a \max} / \sigma_{-1}$, определяемого как отношение максимальной амплитуды в блоке нагружения к пределу выносливости. Значение n_p с увеличением срока службы детали, а следовательно,

и ее износа будет возрастать, что в свою очередь должно приводить к повышению динамических нагрузок. Расчет по изложенному методу позволил оценить зависимость вероятности разрушения шатуна оппозитного компрессора от величины зазора, предельного коэффициента нагруженности и величины поршневых сил. Результаты расчета представлены в таблице.

Проведенная оценка показала, что даже малая нагрузка, возникающая в процессе трения, циклически действующая на поверхность и вызывающая в поверхностном слое сжимающие и растягивающие напряжения, приводит к дополнительному накоплению усталостных повреждений.

Заключение

Установлено, что фрикционная усталость, возникающая при эксплуатации механических систем, существенно влияет на накопление повреждений и, следовательно, на вероятность эксплуатационных отказов.

При динамическом нагружении в зоне фрикционного контакта элементов трибосопряжений конкретных типов (например, деталей коленчатого вала) накопление повреждений реализуется по типу малоциклового и/или многоциклового усталости, что подтверждает данные, полученные при трибологических лабораторных испытаниях на моделях фрикционного контакта.

Показано, при что оценке вероятности разрушения элементов сложных механических систем необходимо учитывать влияние износоусталостных повреждений, возникающих в процессе эксплуатации. Приведенный пример определения зависимости вероятности разрушения шатуна оппозитного компрессора от величины зазоров, увеличивающихся в результате износа, подтвердил правомерность использования данного подхода.

Зависимость вероятности разрушения P шатуна оппозитного компрессора от величины зазора Δ , предельного коэффициента нагруженности n_p и величины поршневых сил F

Dependences of the failure probability P for connecting rod of the opposing compressor on the gap size Δ , the maximum load factor n_p and the magnitude of the piston forces F

Нагрузка F , кН	Зазор в сопряжении Δ , мм	σ_a , МПа	n_p	Вероятность разрушения P , %
180	0,05	40,0	2,10	0,001
	0,10	45,5	1,85	0,002
	0,15	50,7	1,66	0,020
250	0,05	53,3	1,58	0,074
	0,10	60,0	1,40	0,991
	0,15	66,5	1,26	3,363
300	0,05	63,0	1,33	2,400
	0,10	72,0	1,17	14,000
	0,15	78,5	1,07	31,600

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Махутов Н. А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2-х ч. — Новосибирск: Наука, 2005. Часть 1: Критерии прочности и ресурса. — 494 с.; Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности. — 610 с.
2. **Ботвина Л. Р.** Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
3. **Лукашев Е. А., Сидоров М. И.** Механохимическая кинетика накопления повреждений, разрушения и износа. — М.: Эко-Пресс, 2017. — 422 с.
4. **Сосновский Л. А.** Механика износоусталостного повреждения. — Гомель: БелГУТ, 2007. — 434 с.
5. **Tridello A., Boursier-Niutta C., Rossetto M., et al.** Statistical models for estimating the fatigue life, the stress — life relation, and the P — S — N curves of metallic materials in very high cycle fatigue: A review / *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2022. Vol. 45. N 2. P. 332 — 370. DOI: 10.1111/ffe.13610
6. **Li W., Sun Z., Zhang Z., et al.** Evaluation of crack growth behavior and probabilistic S — N characteristics of carburized Cr — Mn — Si steel with multiple failure modes / *Mater. Design.* 2014. Vol. 64. P. 760 — 768. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.047
7. **Степнов М. Н.** Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. — Новосибирск: Наука, 2005. — 341 с.
8. **Крагельский И. В.** Трение и износ. — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с.
9. **Марченко Е. А.** О природе разрушения поверхности металлов при трении. — М.: Наука, 1979. — 118 с.
10. **Серенсен С. В.** Сопrotивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. — М.: Атомиздат, 1975. — 192 с.
11. **Марченко Е. А., Хрущов М. М., Каплунов С. М., Панов В. А.** Трибологические свойства конструкционных сплавов деталей теплообменного оборудования, подверженных фреттингу / *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2020. Т. 21. № 9. С. 401 — 407. DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-9-401-407
12. **Еловой О. М., Богданович А. В.** Ресурс подшипников колечатого вала по критерию их локальной поврежденности / *Труды VI Международного симпозиума по трибофатике (МСТФ-2010).* — Минск: БГУ, 2010. Ч. 1. С. 247 — 251.
13. **Петрова И. М., Москвитин Г. В., Гриб В. В.** Влияние износа на накопление усталостных повреждений / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2006. Т. 72. № 11. С. 49 — 52.
14. **Серенсен С. В., Кобаев В. П., Шнейдерович Р. М.** Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. — М.: Машиностроение, 1975. — 488 с.
15. **Petrova I. M., Alimov M. A., Buyanovsky I. A., Gadolina I. V.** Estimation of the ultimate strength of machine parts on the basis of linear hypothesis of fatigue and wear damages / *Int. J. Appl. Mech. Eng.* 2002. Vol. 7. Spec. issue: SITC-2002. P. 415 — 417.
16. **Петрова И. М., Филимонов М. А., Лагуткин М. Г.** Оценка вероятности отказа механических систем на основе моделирования их технического состояния / *Безопасность труда в*

промышленности. 2020. № 2. С. 12 — 17.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-2-12-17

REFERENCES

1. **Makhutov N. A.** Structural Strength, Resource and Technical Safety. — Novosibirsk: Nauka, 2005. Part 1: Strength and Resource Criteria. — 494 p.; Part 2: Justification of Resource and Safety. — 610 p. [in Russian].
2. **Botvina L. R.** Fracture: Kinetics, Mechanisms, General Patterns. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
3. **Lukashev E. A., Sidorov M. I.** Mechanochemical Kinetics of Damage Accumulation, Fracture, and Wear. — Moscow: Éko-Press, 2017. — 422 p. [in Russian].
4. **Sosnovskiy L. A.** Mechanics of Wear-Fatigue Damage. — Gomel: Belarus State Transport Univ. (BelGUT), 2007. — 434 p. [in Russian].
5. **Tridello A., Boursier-Niutta C., Rossetto M., et al.** Statistical models for estimating the fatigue life, the stress — life relation, and the P — S — N curves of metallic materials in very high cycle fatigue: A review / *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2022. Vol. 45. N 2. P. 332 — 370. DOI: 10.1111/ffe.13610
6. **Li W., Sun Z., Zhang Z., et al.** Evaluation of crack growth behavior and probabilistic S — N characteristics of carburized Cr — Mn — Si steel with multiple failure modes / *Mater. Design.* 2014. Vol. 64. P. 760 — 768. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.08.047
7. **Stepnov M. N.** Probabilistic methods for assessing the characteristics of the mechanical properties of materials and the load carrying capacity of structural elements. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 341 p. [in Russian].
8. **Kragelsky I. V.** Friction and Wear. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1968. — 480 p. [in Russian].
9. **Marchenko E. A.** On the Nature of the Frictional Damage of Metallic Surfaces. — Moscow: Nauka, 1979. — 118 p. [in Russian].
10. **Serensen S. V.** Materials Resistance to Fatigue and Brittle Fracture. — Moscow: Atomizdat, 1975. — 192 p. [in Russian].
11. **Marchenko E. A., Khrushchov M. M., Kaplunov S. M., Panov V. A.** Tribological properties of structural alloys of heat exchange equipment parts subjected to fretting / *Sbornik Mashinostr. Priborostr.* 2020. Vol. 21. N 9. P. 401 — 407 [in Russian]. DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-9-401-407
12. **Yelovoy O. M., Bogdanovich A. V.** The resource of crankshaft bearings according to the criterion of their local damage / *Proc. 6th Int. Symp. on Tribo-Fatigue (MSTF-2010).* — Minsk: Belarus State Univ, 2010. Part 1. P. 247 — 251 [in Russian].
13. **Petrova I. M., Moskvitin G. V., Grib V. V.** The effect of wear on the accumulation of fatigue damage / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2006. Vol. 72. N 11. P. 49 — 52 [in Russian].
14. **Serensen S. V., Kogaev V. P., Schneiderovich R. M.** Load Carrying Capacity and Calculations of Machine Parts for Strength. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. — 488 p. [in Russian].
15. **Petrova I. M., Alimov M. A., Buyanovsky I. A., Gadolina I. V.** Estimation of the ultimate strength of machine parts on the basis of linear hypothesis of fatigue and wear damages / *Int. J. Appl. Mech. Eng.* 2002. Vol. 7. Spec. issue: SITC-2002. P. 415 — 417.
16. **Petrova I. M., Filimonov M. A., Lagutkin M. G.** Estimation of the probability of failure of mechanical systems based on modeling their technical condition / *Bezopasn. Truda Prom.* 2020. N 2. P. 12 — 17 [in Russian]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-2-12-17