

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.178.16

ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ ФРЕТТИНГЕ: РЕЖИМЫ И ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2024

На модели электроконтактного соединения экспериментально исследовано влияние на процесс изнашивания при фреттинге основных факторов: материала контактирующих деталей, нормальной контактной нагрузки и величины тангенциальных микросмещений. Механизм этого влияния раскрыт с помощью так называемой карты режимов фреттинг-изнашивания. Приведен пример такой карты для исследованных контактных пар. На карте режимов изнашивания выделяются две основные области – область частичного проскальзывания и область существенного проскальзывания в контакте. Все исследованные экспериментально контактные пары попадают в область существенного проскальзывания, в которой основными механизмами фреттинг-изнашивания являются адгезионный и абразивный. Индикатором состояния изнашиваемого соединения служит величина контактного электросопротивления, очень чувствительного к свойствам поверхностей контактирующих деталей. Критерием достижения предельного состояния электроконтактного соединения служит резкий рост контактного сопротивления. Показано, что благодаря оптимальному выбору материала контактирующих деталей, нормальной нагрузки и тангенциальной жесткости контактного соединения можно существенно повысить его ресурс.

Ключевые слова: изнашивание при фреттинге, контактное электросопротивление, карты режимов фреттинг-изнашивания.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Изнашивания при фреттинге и фреттинг-коррозии достаточно распространены и опасны. Одной из разновидностей контактных соединений, в которых наблюдается этот вид изнашивания, являются электрические контакты [1, 2]. Из многочисленных факторов, влияющих на интенсивность изнашивания при фреттинге, выделяют три основных: окружающую среду, параметры контакта и свойства материалов контактирующих деталей. Первый фактор обычно задан назначением и режимом работы контактного соединения, тогда как в выборе материалов контактирующих деталей и параметров контакта имеется определенная свобода. Выбор оптимальных материалов и параметров контакта может существенно повысить надежность электроконтактного соединения. При этом указанный выбор должен происходить исходя из назначения контактного соединения с учетом характера процесса фреттинг-изнашивания и механизма влияния того или иного фактора на этот процесс, иными словами, на основании понимания физики процесса фреттинг-изнашивания.

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (24), 2024*

Цель работы – исследование влияния материалов контактирующих деталей и основных параметров контакта в условиях изнашивания при фреттинге на модели электроконтактного соединения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Согласно определению, изнашивание при фреттинге – это «механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении» (ГОСТ 27674-88). Обычно к механическому изнашиванию добавляется химическое взаимодействие материалов контакт-деталей с окружающей средой, тогда говорят об изнашивании при фреттинг-коррозии. Величина микросмещения, как видим, не уточняется. В связи с этим к изнашиванию при фреттинге иногда, на наш взгляд, необоснованно относят процессы изнашивания при любых возвратно-поступательных перемещениях контактирующих деталей. В основном в качестве верхней границы микросмещений при фреттинге указываются величины порядка 100...300 мкм [1], однако можно встретить и значение 2,5 мм [3].

Названная неопределенность объясняется тем, что указать границы величин микросмещений, при которых проявляются характерные черты фреттинг-изнашивания, в виде конкретных числовых значений невозможно, так как они зависят от указанных выше основных влияющих факторов. В этой связи более обоснованным является использование так называемых карт режимов изнашивания при фреттинге [4, 5]. Пример подобной карты для контакта двух деталей с первоначальным касанием в точке – сферической и плоской – представлен на рис. 1.

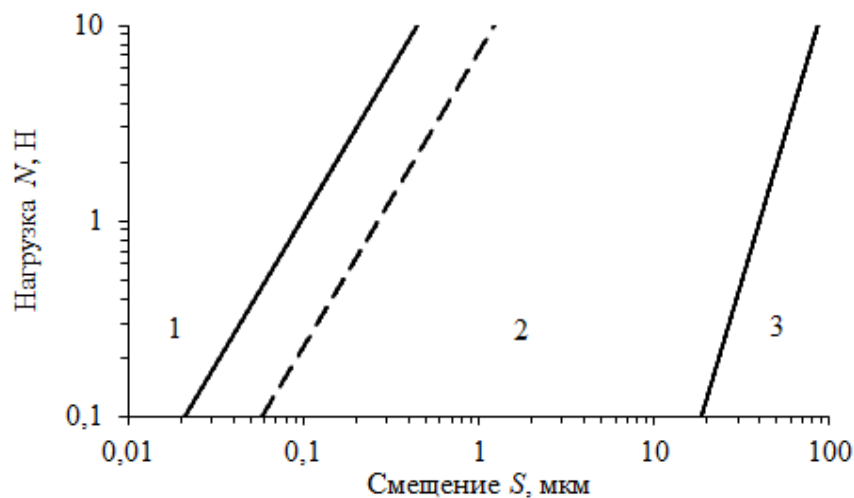


Рис. 1. Пример карты режимов изнашивания при фреттинге:
 1 – область частичного проскальзывания; 2 – область существенного проскальзывания;
 3 – область реверсивного макросмещения контактирующих тел;
 сплошные линии – коэффициент трения $f_c = 0,2$, пунктирная – $f_c = 0,55$

На карте можно выделить три области. Малым величинам относительного смещения контактирующих тел S соответствует область частичного проскальзывания 1 (см. рис. 1). В этой области относительное проскальзывание контактирующих тел под действием приложенной сдвигающей силы отсутствует, однако на площадке контакта с радиусом a наблюдаются две зоны – зона сцепления в центре с радиусом c и кольцевая зона относительного микропроскальзывания на периферии шириной $(a - c)$ (рис. 2а).

Радиус зоны сцепления зависит от величины приложенной сдвигающей силы T и коэффициента сцепления f_c :

$$c = a \left(1 - \frac{T}{f_c N} \right),$$

где N – нормальная нагрузка. При увеличении сдвигающей силы до значения $T = f_c N$ зона проскальзывания распространяется на всю площадку контакта и трение покоя переходит в трение скольжения (рис. 2б). Максимальной силе трения покоя соответствует максимальное значение относительного микросмещения контактирующих тел, т.е. так называемое предварительное смещение $\delta_{\tau \max}$:

$$\delta_{\tau \max} = \frac{1}{2} f_c \left(\frac{2-\mu}{1-\mu} \right) \delta_n, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона; δ_n – нормальная деформация контакта (сближение контактирующих тел). Величина δ_n при этом зависит от нормальной нагрузки N :

$$\delta_n = \left(\frac{9}{16} \cdot \frac{N^2}{RE^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где R – радиус сферической детали; E^* – эквивалентный модуль упругости, $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$ (E_1, E_2, μ_1, μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона контактирующих тел).

В итоге параметрическая зависимость $S(N) = \delta_{\tau \max}(N)$, выражаемая формулами (1) и (2), образует границу зон 1 и 2 (см. рис. 1). Точки с координатами (N, S) , попадающие в область 1 ($S \leq \delta_{\tau \max}$), соответствуют режиму частичного проскальзывания, точки с координатами (N, S) , попадающие в область 2, – режиму существенного проскальзывания.

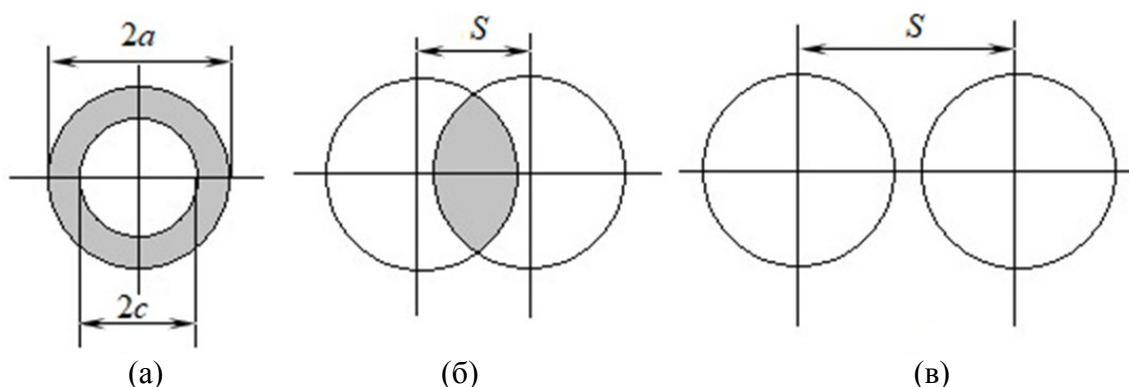


Рис. 2. Схема контакта двух тел при фреттинг-изнашивании: режим частичного проскальзывания (а); режим существенного проскальзывания (б); режим реверсивного макросмещения контактирующих тел (в)

Область существенного проскальзывания соответствует схеме контакта (см. рис. 2б). Контактующие тела перешли от режима трения покоя к режиму трения скольжения, при этом их взаимный контакт частично сохраняется (затемненная

область, см. рис. 2б). Очевидно, что максимальная величина относительного смещения S контактирующих тел, при котором сохраняется их частичный контакт, равна диаметру пятна контакта $2a$. Радиус площадки контакта зависит от нормальной нагрузки:

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{NR}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

соответственно, правая граница области существенного проскальзывания на карте режимов трения определяется зависимостью $S(N)$ при $S = 2a$ с учетом уравнения (3).

При $S > 2a$ (см. рис. 2в) процесс изнашивания утрачивает характерные для фреттинга особенности: затрудненное или полностью отсутствующее удаление продуктов износа из зоны контакта, невозможность визуального контроля состояния контакта и т.п. По сути, процесс изнашивания протекает так, как в обычном скользящем контакте при однонаправленном трении (область 3 на карте режимов фреттинг-изнашивания).

С помощью карты режимов фреттинг-изнашивания можно установить преобладающий механизм процесса. В области частичного проскальзывания преобладает усталостный механизм изнашивания с образованием трещин и последующим отделением частиц износа. В области существенного проскальзывания преобладают уже адгезионный и абразивный механизмы изнашивания [6, 7].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально исследовано влияние определяющих факторов на процесс и результат фреттинг-изнашивания на физической модели точечного электрического контакта сферической и плоской контакт-деталей. Контактная пара «сфера/плоскость» использовалась многими исследователями изнашивания при фреттинге [8]. Индикатором состояния контакта в процессе изнашивания служило контактное электрическое сопротивление, которое очень чувствительно к состоянию поверхности контактирующих тел в зоне контакта. Вертикально расположенный и неподвижный в горизонтальном направлении верхний пальчиковый образец диаметром 2 мм своей сферической вершиной с радиусом закругления 1 мм контактировал с плоской поверхностью нижнего образца. Нормальная нагрузка на контакт создавалась с помощью разновесов. Нижний плоский образец совершал горизонтальные перемещения малой амплитуды вместе с опорной платформой, на которой он жестко закреплен. Малые горизонтальные перемещения создавались изгибной деформацией консольной балки, на которой жестко расположена опорная платформа. Напряжение балки обеспечивается механическим приводом с частотой 1 Гц. Величина тангенциальных смещений платформы с плоским образцом измерялась индикатором малых перемещений.

Контактное электросопротивление R_c измеряли по классической четырехпроводной схеме. Постоянный ток силой 1 А пропускали через контакт от источника стабилизированного постоянного тока, контактную разность потенциалов ΔU измеряли цифровым милливольтметром. Очевидно, при силе тока 1 А численно $R_c = \Delta U$.

Материалы образцов: верхнего (пальчикового со сферической вершиной) – во всех экспериментах вольфрам, нижнего – латунь марки Л63 с покрытиями из различных металлов толщиной порядка 5 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены далее в виде графиков зависимости контактного электросопротивления от пути трения. В качестве аргумента этих зависимостей выбрана величина пути трения, а не число циклов тангенциального смещения (как, например, в работе [1]). Число циклов тангенциальных смещений важно при усталостном характере изнашивания, который преобладает в режиме частичного проскальзывания (область 1, см. рис. 1). Все исследованные контактные пары попадают в область существенного проскальзывания на карте режимов фреттинга (см. рис. 1), в которой преобладают адгезионное и абразивное виды изнашивания. В этих случаях в трибологии ресурс фрикционного соединения обычно характеризуется величиной пути трения (например, при расчете интенсивности изнашивания). При этом очевидно, что число циклов $n_{ц}$ однозначно связано с величиной пути трения $L_{тр}$: $n_{ц} = \frac{L_{тр}}{2S}$, где S – величина тангенциального смещения.

Влияние материала контактирующих деталей на процесс фреттинг-изнашивания показано на рис. 3. Во-первых, надо отметить, что начальные величины контактного сопротивления превосходят теоретические значения для всех контактных пар, которые находятся в интервале от 1,1 мОм для контакта W/Ag до 2,7 мОм для контакта W/Sn. Это свидетельствует о наличии физически и химически адсорбированных пленок на контактирующих поверхностях. При этом в начальный период испытаний контактное сопротивление в паре вольфрамового образца с серебряным и никелевым покрытиями уменьшается из-за разрушения этих пленок при тангенциальных микросмещениях. Такое изменение контактного электросопротивления характерно для начальной стадии фреттинг-изнашивания [1].

В дальнейшем сопротивление контактов W/Ag и W/Ni флуктуирует в диапазоне нескольких десятков миллиомов на пути трения до 3...3,5 м, резко возрастая затем в десятки раз. В контакте W/Sn существенное увеличение контактного сопротивления происходит уже при пути трения менее метра (рис. 3в). Таким образом, пара трения с оловянным покрытием существенно уступает по износостойкости парам трения W/Ag и W/Ni.

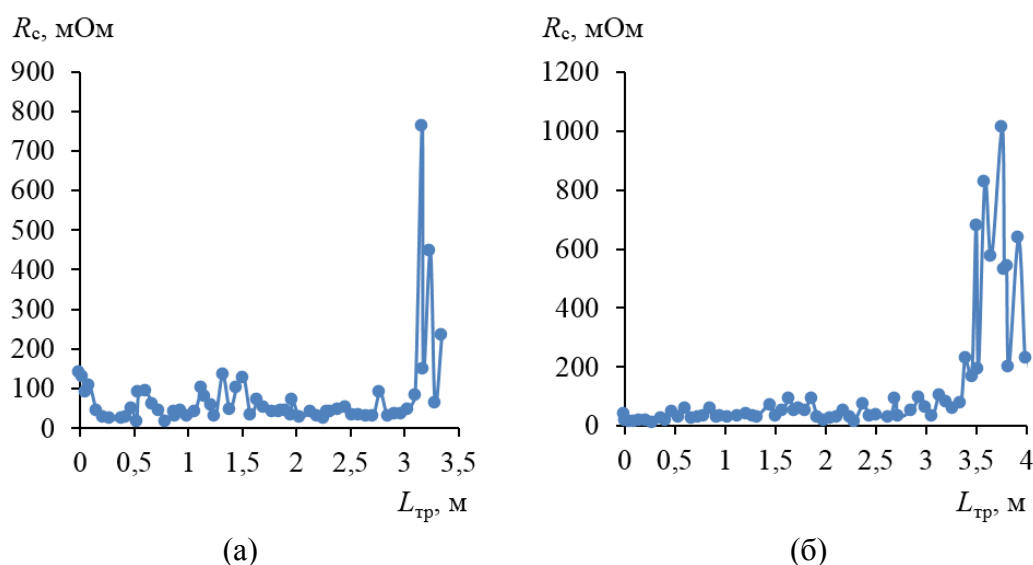


Рис. 3. Зависимость контактного электросопротивления R_c от пути трения для контактных пар: W/Ni (покр.) (а); W/Ag (покр.) (б); W/Sn (покр.) (в); нагрузка $N = 0,5$ Н; тангенциальное смещение $S = 18$ мкм

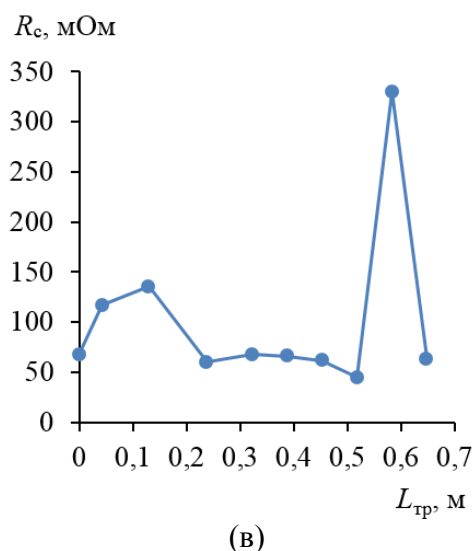


Рис. 3. Продолжение

Влияние величины тангенциальных микросмещений на фреттинг-изнашивание показано на рис. 4. При малой величине тангенциального микросмещения (рис. 4а) контактное электросопротивление практически сразу возрастает в 4,5 раза, а при $L_{тр} \geq 0,1 м$ – в десятки раз. Такой характер зависимости $R_c(L_{тр})$ объясняется неблагоприятными условиями изнашивания. Величина смещения составляет примерно 1/3 от диаметра пятна контакта, поэтому площадь взаимного перекрытия контактирующих деталей (затемненная область, см. рис. 2б) достаточно велика и удаление продуктов изнашивания из зоны трения затруднено. Накапливаясь на поверхности трения в процессе изнашивания, они увеличивают контактное электросопротивление.

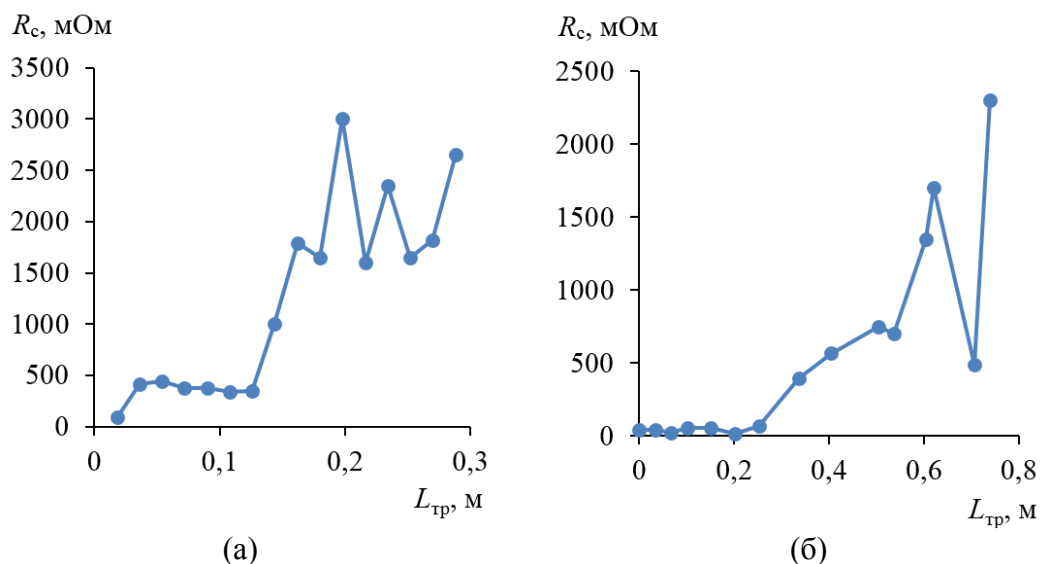


Рис. 4. Влияние величины тангенциальных микросмещений на зависимость контактного электросопротивления R_c от пути трения для контактной пары W/Sn (покр.): $S = 10 мкм$ (а); $S = 28 мкм$ (б); нагрузка $N = 0,5 Н$

Иная картина наблюдается при величине тангенциального микросмещения 28 мкм (см. рис. 4б). На карте режимов фреттинг-изнашивания (см. рис. 1) соответствующая точка располагается практически на границе областей существенного проскальзывания и реверсивного трения. Продукты изнашивания достаточно легко удаляются из зоны трения (см. рис. 2в), поэтому на протяжении пути трения $L_{тр} \approx 0,25$ м сопротивление остается практически на начальном уровне.

Наконец, влияние еще одного существенного фактора – нормальной нагрузки – на процесс изнашивания при фреттинге показано на рис. 5. При небольшой нормальной нагрузке 0,8 Н заметные флуктуации контактного сопротивления с превышением начального значения в 2...3 раза возникают уже на пути трения $L_{тр} \approx 15...20$ см (рис. 5а). При нормальной нагрузке 5 Н значительные превышения начального значения контактного сопротивления начинаются, когда путь трения на порядок больше – при $L_{тр} \approx 1,5–2,0$ м (рис. 5б). Но даже в этом случае величина контактного сопротивления остается сравнительно небольшой – 20...40 мОм, что в десятки раз меньше, чем при нагрузке 0,8 Н.

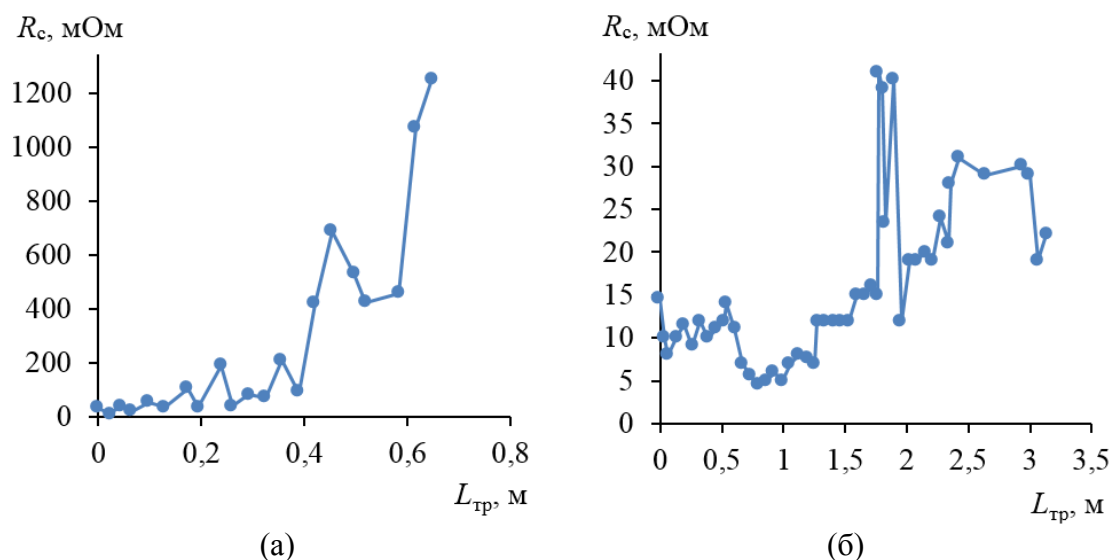


Рис. 5. Влияние нормальной контактной нагрузки N на зависимость контактного электросопротивления R_c от пути трения для контактной пары W/Sn (покр.):
 $N = 0,8$ Н (а); $N = 5$ Н (б); тангенциальное смещение – 18 мкм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа влияния основных факторов на процесс изнашивания при фреттинге целесообразно использовать карты режимов фреттинг-изнашивания. Пример такой карты показан на рис. 1. Дело в том, что в зависимости от режима изнашивания ключевую роль играют различные факторы. Например, в режиме частичного проскальзывания, когда преобладает усталостный механизм изнашивания, важны частота тангенциальных смещений и усталостная прочность материалов. В режиме существенного проскальзывания значимы адгезионные свойства материалов, их твердость, склонность к образованию окисных и других поверхностных пленок, амплитуда тангенциальных смещений. Используя карты режимов фреттинг-изнашивания, можно подобрать оптимальные параметры контактного соединения, обеспечивающие требуемый ресурс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 560 с.
2. Braunovic M. Power Connectors // *Electrical contacts. Principles and applications*. CRC Press. 2014. P. 231–373.
3. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт. 2021. 235 с.
4. Vingsbo O., Söderberg S. On fretting maps // *Wear*. 1988. V. 126. № 2. P. 131–147.
5. Измайлов В.В., Левыкин Д.А. Жесткость контакта и его фреттингостойкость. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.* / под ред. В.В. Измайлова. Тверь: ТвГТУ. 2013. Вып. 6. С. 4–9.
6. Liskiewicz T., Dini D., Liu Y. Transition criteria and mapping approaches // *Fretting wear and fretting fatigue. Fundamental principles and applications*. Elsevier Inc. 2023. P. 37–44.
7. Kapsa P., Fouvry S., Vincent L. Basic principles of fretting // *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*. John Wiley & Sons, Ltd. 2005. P. 317–338.
8. Dini D., Liskiewicz T. Contact mechanics in fretting // *Fretting wear and fretting fatigue. Fundamental principles and applications*. Elsevier Inc. 2023. P. 31–37.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. изнашивание при фреттинге: режимы и основные факторы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 4 (24). С. 5–12.

FRETTING WEAR: REGIMES AND KEY FACTORS

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: iz2v2@mail.ru

Using a model of an electrical contact connection, the influence of the key factors on the fretting wear process was experimentally studied. They are as follows: the material of the contacting parts, the normal contact load and the magnitude of tangential microdisplacements. The mechanism of this influence is revealed using the so-called map of fretting wear regimes. An example of such a map for the studied contact pairs is given. On the map of wear regimes, two main areas are distinguished – the area of partial slip and the area of gross slip in contact. All experimentally studied contact pairs fall into the gross slip area, in which the main fretting wear mechanisms are adhesive and abrasive. An indicator of the condition of a worn connection is the value of contact electrical resistance, which is very sensitive to the properties of the surfaces of the contacting parts. The criterion for achieving the limiting state of an electrical contact connection was a sharp increase in contact resistance. It is shown that the optimal choice of material for the contacting parts, normal load and tangential rigidity of the contact connection can significantly increase its service life

Keywords: fretting wear, contact electrical resistance, maps of fretting wear regimes.

Поступила в редакцию/received: 17.07.2024; после рецензирования/revised: 02.08.2024;
принята/accepted: 28.08.2024