



МЕХАНИКА ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.178

А.В. БОГДАНОВИЧ, д-р техн. наук, доц.
профессор кафедры теоретической и прикладной механики
E-mail: bogal@tut.by
Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 06.06.2019.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СТАЛЬ 45 — ФТОРОПЛАСТ» ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ И ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Приведены результаты испытаний трибофатической системы «цилиндрический образец из стали 45 — призматический контробразец-вкладыш из полимера фторопласта Ф4-В» при трении скольжения и фрикционно-механической усталости при разных уровнях контактной нагрузки. Опытные данные проанализированы с помощью уравнения Арчарда и представлены в виде кинетических кривых износа полимерного вкладыша и кривой фрикционной усталости. Введено представление о коэффициенте интенсивности фрикционных напряжений при трении скольжения и предложено выражение, связывающее скорость изнашивания с этим коэффициентом, близкое по форме к уравнению Пэриса в механике усталостного разрушения. Получено удовлетворительное соответствие результатов испытания металло-полимерной трибофатической системы предложенному выражению как в условиях трения скольжения, так и при фрикционно-механической усталости.

Ключевые слова: трение скольжения, фрикционно-механическая усталость, трибофатическая система, контактное давление, износ, коэффициент интенсивности напряжений

Введение. Среди различных теорий механического изнашивания твердых тел, пожалуй, наиболее широкое признание получила усталостная теория [1–3]. Она адекватно описывает результаты испытаний в тех случаях, когда контактная нагрузка относительно мала, а деформации поверхности трения преимущественно упругие.

Усталостный износ полимера представляет собой повреждение материала при повторяющемся воздействии сжимающих, растягивающих и сдвиговых деформаций в процессе скольжения полимерного образца при взаимодействии с твердыми выступами на шероховатой поверхности сопряженного металлического контртела, которые вызывают образование и развитие поверхностных трещин [4, 5]. Согласно ряду проведенных исследований, в паре трения с полимером возникают переменные во времени деформации, растягивающие и сжимающие нормальные и касательные

напряжения в изнашиваемом поверхностном слое, вследствие чего в нем образуются усталостные трещины [6]. Установлено также [7, 8], что наибольшее напряжение сдвига имеет место на определенной глубине под поверхностью, причем эта область находится тем ближе к поверхности, чем больше сила трения. С другой стороны, наибольшая деформация материала имеет место на поверхности, что благоприятно для образования трещин, но в то же время в этой области сжимающие напряжения также являются самыми большими, и они сдерживают образование усталостных трещин. С увеличением расстояния до изношенной поверхности напряжения сжатия уменьшаются быстрее, чем деформация, поэтому на некоторой глубине в изнашиваемом поверхностном слое действуют практически только касательные напряжения, и это облегчает образование трещин [9].

Среди моделей изнашивания, основанных на контактной механике, особенно широко используется модель, предложенная Арчардом [10, 11], которую обычно записывают в виде:

$$W = \frac{k}{H} F_N L, \quad (1)$$

где W — объемный износ, мм³; F_N — контактная нагрузка, Н; L — путь трения, м; k — безразмерный коэффициент износа, зависящий от свойств пары трения; H — твердость материала, Н/мм². Для практического применения более полезным является отношение $K = k/H$ [мм³ Н⁻¹ м⁻¹], которое называют удельной скоростью износа [9].

Как известно, типичную кривую изнашивания (рисунок 1) можно охарактеризовать тремя различными стадиями: первая стадия приработки, на которой довольно высокая скорость изнашивания в контактной паре обусловлена сглаживанием имеющихся микронеровностей поверхностей; вторая, стационарная стадия (так называемого нормального износа), на которой имеет место примерно постоянная скорость изнашивания; третья, ускоренная стадия (катастрофического износа), когда скорость износа увеличивается экспоненциально и приводит к катастрофическому разрушению.

Закон Арчарда, выражаемый уравнением (1), обычно применяют к стационарной стадии изнашивания.

В данной статье кинетически процесс изнашивания полимерного вкладыша анализируется с применением критерия механики усталостного разрушения.

Результаты испытания на трение скольжения и их анализ. Испытания металлополимерной пары трения на трение скольжения вели по схеме «вал — вкладыш». Образец-вал 1 из стали 45 с диаметром рабочей части 10 мм консольно закреплялся в шпинделе 2 модернизированной испытательной машины УКИ-6000-2 и вращался с частотой 3000 мин⁻¹ (рисунок 2). Контробразец-вкладыш 3, представляющий из себя кубик 10 × 10 × 10 мм, выполненный из полимера Ф4-В, прижимался к рабочей части образца 1 контактной нагрузкой F_N , величину которой задавали при помощи специ-

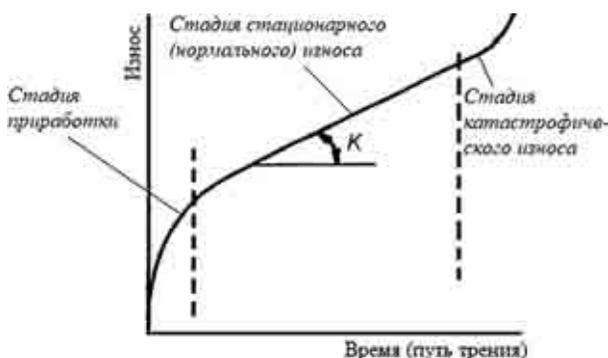


Рисунок 1 — Типичная кривая изнашивания трибосистемы
Figure 1 — Typical curve of tribosystem wear

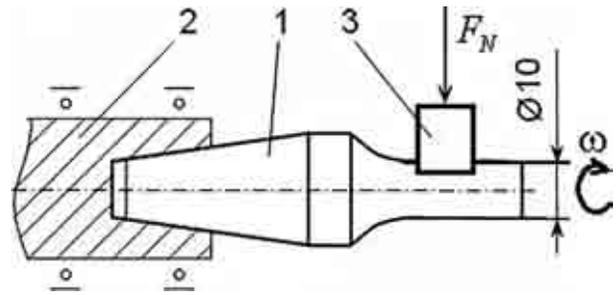


Рисунок 2 — Схема испытания на трение скольжения:
1 — образец; 2 — шпиндель; 3 — контробразец
Figure 2 — Sliding friction test scheme: 1 — specimen; 2 — spindle; 3 — counterspecimen

ального приспособления и поддерживали постоянной в процессе испытания каждой пары образец-контробразец.

В процессе испытаний обеспечивался капельный подвод смазочного материала — универсального всесезонного моторного масла Лукойл супер 15W-40 и проводилось измерение с помощью индикаторной головки с точностью 2 мкм величины i линейного износа фрикционной пары. Поскольку в исследуемой паре стальной образец не изнашивался, то весь износ приходился на полимерный вкладыш. В качестве предельного состояния был принят износ вкладыша $i_{lim} = 1000$ мкм.

Результаты испытаний фрикционной пары при контактной нагрузке F_N , равной 150, 180, 280, 350 и 450 Н, приведены в виде кинетических графиков зависимости износа i от числа циклов нагружения N на рисунке 3. Эти графики соответствуют стационарной стадии процесса изнашивания. Поэтому уравнение Арчарда (1) можно применить к приведенным результатам испытаний.

С другой стороны, результаты проведенных испытаний можно представить в виде кривых фрикционной усталости в координатах «контактная нагрузка F_N — число циклов N до наступления предельного состояния (при $i_{lim} = 1000$ мкм)» полимерного вкладыша (рисунок 4). Как видно из рисунка 4, кривая усталости состоит из трех ветвей: левой ветви с наклоном (область квазистати-

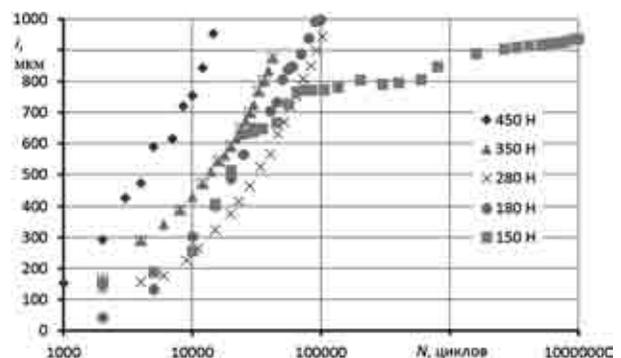


Рисунок 3 — Кинетические кривые износа полимерного вкладыша при испытании на трение скольжения при контактной нагрузке 450, 350, 280, 180 и 150 Н
Figure 3 — Kinetic curves of polymer liner wear during sliding friction testing under contact load of 450, 350, 280, 180 and 150 N

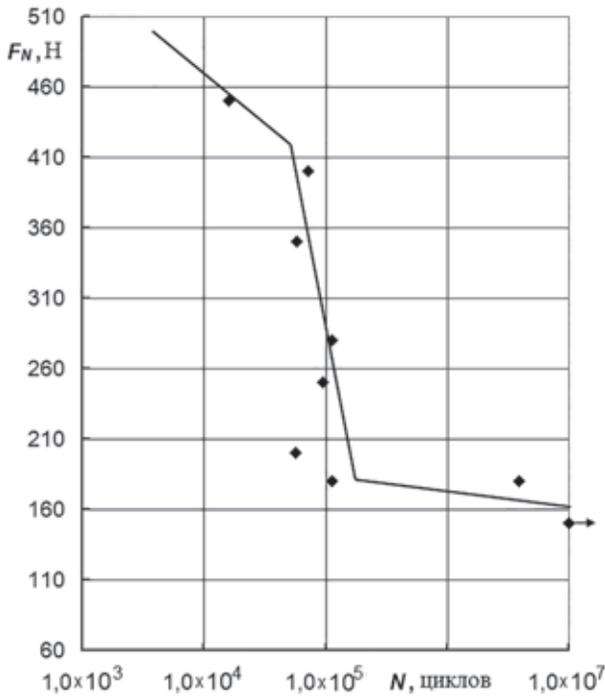
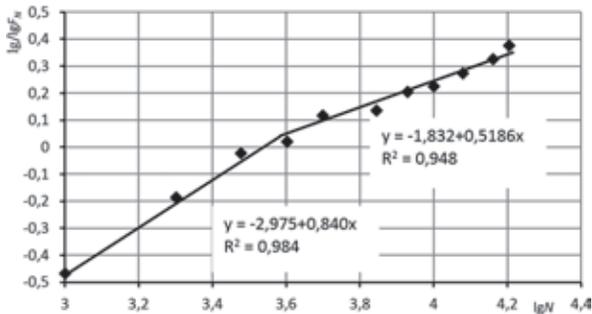
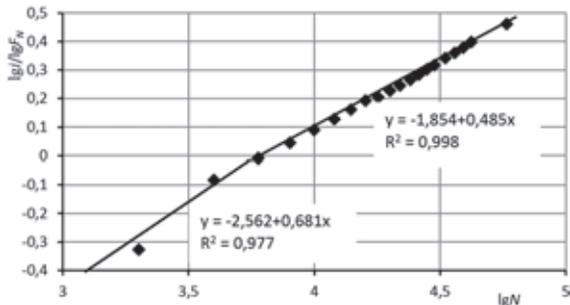


Рисунок 4 — Кривая фрикционной усталости полимерного вкладыша
Figure 4 — Friction fatigue curve of polymer liner

ческого разрушения примерно до $N = 7,2 \cdot 10^4$ циклов, $F_N = 400 \div 450$ Н), средней, расположенной почти вертикально (область малоциклового разрушения $N = 7,2 \cdot 10^4 \div 9 \cdot 10^4$ циклов, $F_N = 165 \div 400$ Н) и правой — с большим наклоном (область многоциклового разрушения ($N > 1 \cdot 10^5$ циклов, $F_N < 165$ Н).



a



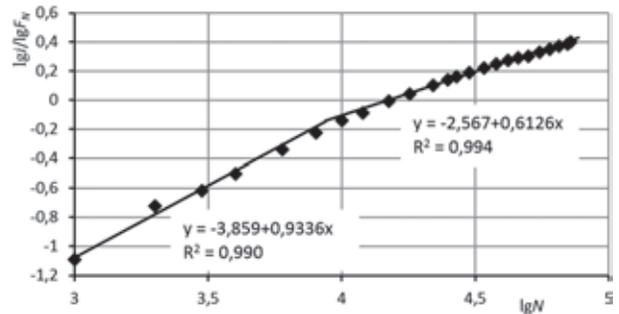
c

Попытаемся описать полученные результаты испытаний с помощью уравнения Арчарда. При этом в уравнении (1) вместо объемного износа W запишем линейный износ i , поскольку они пропорциональны друг другу. Заменим путь трения L на число циклов N нагружения (эти величины также пропорциональны друг другу). На рисунке 5 изображены графики зависимости отношения i/F_N от числа N циклов нагружения, построенные в логарифмических координатах по результатам испытаний исследуемой пары трения.

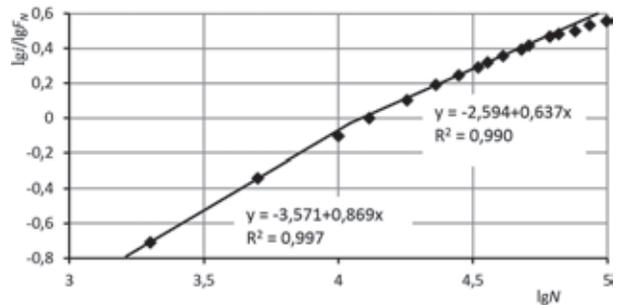
Как видно из рисунка 5, опытные точки вполне удовлетворительно можно описать линейным уравнением вида $y = ax + b$. При этом в исследованном диапазоне изменения i/F_N от N каждый график можно представить состоящим из двух линейных зависимостей, значения параметров a и b уравнений которых представлены на рисунке 5. По-видимому, левая часть зависимостей на рисунке 5 соответствует стадии установившегося (стационарного) изнашивания, а правая часть — началу стадии ускоренного изнашивания в соответствии с типичной кривой изнашивания на рисунке 1.

Анализ графиков на рисунке 5 показывает, что с помощью уравнения Арчарда не удается описать все результаты испытаний исследуемого полимера при разных значениях контактной нагрузки. Поэтому попытаемся взглянуть на эти опытные данные с позиции механики трещин.

В работах [9, 12, 13] приведены результаты исследований, связывающих процессы изнашивания при истирании и процесс роста трещин



b



d

Рисунок 5 — Графики зависимости отношения i/F_N от числа N циклов нагружения полимерного вкладыша при контактной нагрузке 450 (a), 400 (b), 350 (c) и 250 (d) Н
Figure 5 — Graphs of dependence of i/F_N ratio on number N of loading cycles of polymer liner under contact load of 450 (a), 400 (b), 350 (c) and 250 (d) N

механической усталости для полимеров. В частности, был установлен одинаковый наклон участков стабильной скорости роста трещины при механической усталости и равномерного (стабильного) отделения частиц при износе для исследуемого полимера. Можно предположить, что оба явления связаны, поскольку истирание материала происходит в результате множественных актов распространения поверхностных усталостных трещин в малом, циклически деформируемом, объеме.

Остановимся на закономерностях роста трещин механической усталости полимеров. Можно выделить четыре характерные области (рисунок 6) [9, 14]. В области I скорость выделения энергии деформации или энергии разрыва G , определяемой как частная производная полной энергии упругой деформации твердого тела с трещиной по площади одной поверхности разрушения трещины, еще остается меньше пороговой энергии разрыва G_0 , следовательно, рост трещин механической усталости не происходит. В области II происходит относительно быстрый рост трещины. В области III стабильного роста трещины зависимость между скоростью роста трещины и энергией разрыва можно описать степенным законом:

$$\frac{da}{dN} = BG^\beta, \quad (2)$$

где a — длина трещины, мм; N — число циклов; B и β — константы материала. В зависимости от типа полимера β принимает значения от 1,5 до 6. Наконец, область IV соответствует быстрому и не-

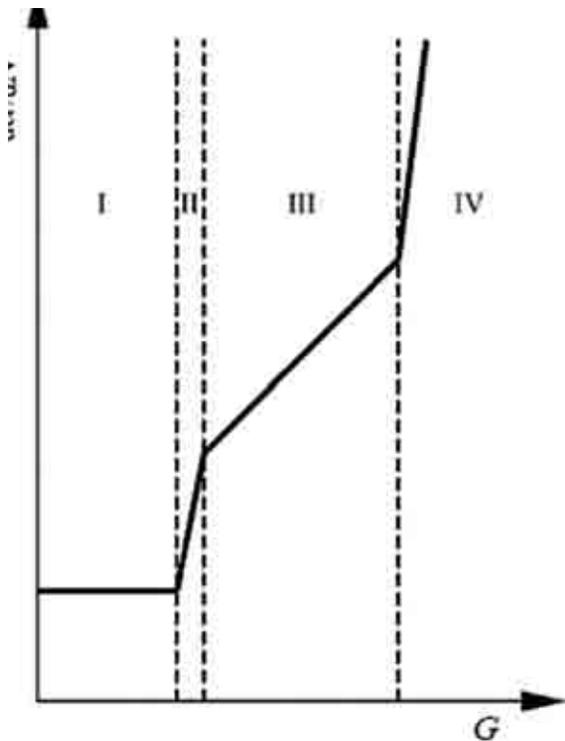


Рисунок 6 — Кривая скорости роста усталостных трещин полимера
Figure 6 — Curve of polymer fatigue crack growth rate

стабильному росту трещин и, следовательно, катастрофическому разрушению.

В качестве управляющего параметра ростом трещины в механике разрушения помимо энергии G часто используют коэффициент интенсивности напряжений, пропорциональный величине G . Для образца ограниченных размеров рост трещины под действием касательных напряжений сдвига τ контролируется коэффициентом интенсивности касательных напряжений K_τ :

$$K_\tau = Y\tau\sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

где Y — поправочная функция, учитывающая геометрию образца и схему его нагружения.

В случае объемного разрушения при механической усталости размер a трещины характеризует степень повреждения материала, в то время как поверхностное повреждение при трении скольжения характеризуется величиной i износа. Вместо касательного напряжения τ сдвига при трении можно применить так называемую удельную силу трения или фрикционное напряжение τ_w , равное [3]:

$$\tau_w = fp_a = f \frac{F_N}{A_a}, \quad (4)$$

где f — коэффициент трения; p_a — среднее контактное давление; A_a — номинальная площадь контакта. Следовательно, применительно к трению скольжения с учетом сделанных предположений и (4) можно выражение (3) записать в виде

$$K_{\tau_w} \sim \tau_w \sqrt{i} \sim p_a \sqrt{i} \sim \frac{F_N}{A_a} \sqrt{i}. \quad (5)$$

Таким образом, с помощью выражения (5) можно выполнить оценку коэффициента интенсивности фрикционных напряжений при трении скольжения. Очевидно, что скорости повреждения $\Delta a/\Delta N$ при росте трещины усталости можно поставить в соответствие скорости изнашивания $\Delta i/\Delta N$ (в дискретной форме). Тогда для скорости изнашивания при трении скольжения получаем выражение, по форме близкое к (2):

$$\frac{\Delta i}{\Delta N} = B^* K_{\tau_w}^{\beta^*} \sim B^* \left(\frac{F_N}{A_a} \sqrt{i} \right)^{\beta^*}, \quad (6)$$

где B^* и β^* — постоянные материала, характеризующие установившуюся стадию процесса изнашивания.

Анализ опытных данных по выражению (6) показал удовлетворительное их соответствие. На рисунке 7 в качестве примера построен график $\lg(\Delta i/\Delta N) - \lg K_{\tau_w}$ для контактной нагрузки 280 Н.

Обобщенный график $\lg(\Delta i/\Delta N) - \lg K_{\tau_w}$ для результатов испытаний при всех уровнях контактной нагрузки представлен на рисунке 8. Он вполне соответствует классической S-образной кривой зависимости скорости роста усталостной трещины от коэффициента интенсивности напряжений, известной в механике разрушения. Следует отме-

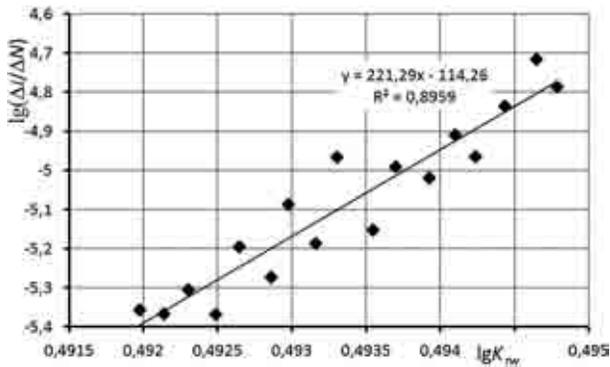


Рисунок 7 — График зависимости отношения i/F_N от величины $K_{тв}$ для полимерного вкладыша при контактной нагрузке 280 Н в логарифмических координатах

Figure 7 — Graph of dependence of i/F_N ratio on value $K_{тв}$ for polymer liner under contact load of 280 N in logarithmic coordinates

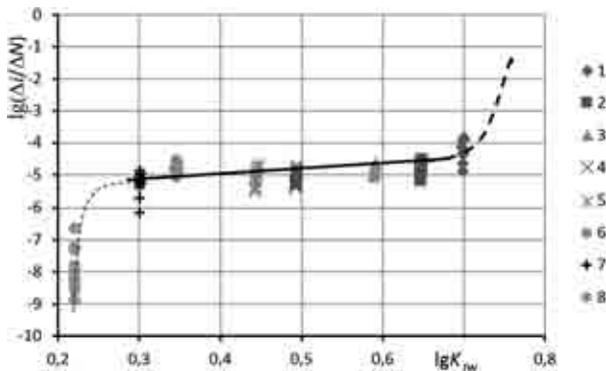


Рисунок 8 — Обобщенный график зависимости отношения i/F_N от величины $K_{тв}$ для полимерного вкладыша при контактной нагрузке 450 (1), 400 (2), 350 (3), 280 (4), 250 (5), 200 (6), 180 (7) и 150 (8) Н в логарифмических координатах

Figure 8 — Generalized graph of dependence of i/F_N ratio on value $K_{тв}$ for polymer liner under contact load of 450 (1), 400 (2), 350 (3), 280 (4), 250 (5), 200 (6), 180 (7) and 150 (8) N in logarithmic coordinates

тить, что левая и правая часть кривой выполнена штриховой линией ввиду недостаточного числа опытных точек и потому не обладает достаточной надежностью. Если соотнести полученный график с типичной зависимостью скорости роста трещин от энергии сдвига для полимеров (см. рисунок 6), то можно заметить, что в диапазоне контактных нагрузок от 180 до 400 Н имеем стадию установившегося процесса изнашивания (что отвечает участку III на рисунке 6), которая удовлетворяет уравнению (6) с параметрами $B^* = 1,122 \cdot 10^{-6}$, $\beta^* = 2,21$. Отметим, что для ряда полимеров установлено $\beta = 1,5 \dots 3,0$ [9, 14].

Очевидно, что при контактных нагрузках меньше 180 Н будем иметь стадию скоростей износа (см. рисунок 8: кривая, уходящая вниз), соответствующую стадии II относительно больших скоростей роста усталостных трещин полимера (см. рисунок 6). При контактных нагрузках, превышающих 400–450 Н, получаем стадию высоких скоростей износа (см. рисунке 8: штриховая кривая, уходящая вверх), соответствующую участку IV высоких скоростей роста трещин (см. рисунок 6).

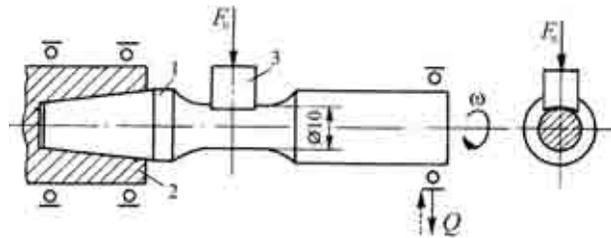


Рисунок 9 — Схема испытания на фрикционно-механическую усталость: 1 — образец; 2 — шпиндель; 3 — контробразец

Figure 9 — Friction and mechanical fatigue test scheme:

1 — specimen; 2 — spindle; 3 — counterspecimen

Анализ результатов испытания на фрикционно-механическую усталость. Испытания на фрикционно-механическую усталость исследуемой трибофатической системы проводили при различной величине контактной нагрузки, которую поддерживали постоянной для каждой системы «вал — вкладыш» согласно схеме на рисунке 9.

При этом изгибающая нагрузка Q (см. рисунок 9) поддерживалась одинакового уровня, что обеспечило постоянную амплитуду циклических напряжений изгиба в опасном сечении стального образца σ_a . Было принято: $\sigma_a = 0,56\sigma_{-1} = 180$ МПа, где $\sigma_{-1} = 320$ МПа — предел выносливости образца (вала) стали 45 при симметричном цикле изгиба. Прочие условия испытаний и критерий предельного состояния оставались такими же, как и при испытании на трение скольжения.

Анализ опытных данных для исследуемой трибофатической системы в диапазоне контактных нагрузок от 180 до 400 Н также показал удовлетворительное их соответствие выражению (6). При этом установлены следующие значения параметров: $B^* = 8,128 \cdot 10^{-7}$; $\beta^* = 2,55$. Сравнение со значениями этих параметров при трении скольжения для данной системы показывает их незначительное отличие.

Таким образом, с помощью выражений (4)–(6) установлено подобие между процессами изнашивания и ростом усталостных трещин при трении скольжения и при фрикционно-механической усталости в заданных условиях испытаний. Необходимо, однако, для получения устойчивых закономерностей продолжить исследования при других контактных нагрузках и условиях испытаний, а также для иных материалов пары трения и трибофатической системы. Также требуется установить ясный физический смысл параметров B и β^* уравнения (6).

Список литературы

1. Крагельский, И.В. Усталостный механизм износа протектора автомобильных шин / И.В. Крагельский, Е.Ф. Непомнящий // Фрикционный износ резин: сб. ст. / под ред. В.Ф. Евстратова. — М.: Химия, 1964. — С. 9–20.
2. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 528 с.
3. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики: учеб. пособие / Л.А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 1. — 246 с.

4. Harsha, A.P. Two-body and three-body abrasive wear behavior of polyaryletherketone composites / A.P. Harsha, U.S. Tewari // *Polymer Tests*. — 2003. — P. 403.
5. Zhang, S.W. Tribology of Elastomers / S.W. Zhang // *Tribology and interface engineering series*. — 2004. — No. 47. — Pp. 37–177.
6. Jia, X. Two-body free-abrasive wear of polyethylene, nylon1010, epoxy and polyurethane coatings / X. Jia, R. Ling // *Tribology International*. — 2007. — No. 40 (8). — Pp. 1276–1283.
7. Marchenko, E.A. Essentials of Friction Breakage for Metals Surface / E.A. Marchenko // National Defence Industry Press, Beijing. — 1990. — Pp. 1–8.
8. Adhesive Wear and Fatigue Wear of Materials / J.J. Liu [et al.] // Machinery Industry Press, Beijing, 1989. — Pp. 234–323.
9. Relationship between wear rate and mechanical fatigue in sliding TPU-metal contacts // F.J. Martinez [et al.] // *Wear*. — 2010. — No. 268, — Pp. 388–398.
10. Archard, J.F. Contact and rubbing of flat surfaces / J.F. Archard // *Journal of Applied Physics*. — 1953. — No. 24. — Pp. 981–988.
11. Rabinowicz, E. Friction and Wear of Materials / E. Rabinowicz. — Wiley, 1995. — 335 p.
12. Champ, D.H. Division of Organic Coatings Plastics / D.H. Champ, E. Southern, A.G. Thomas // *Paper American Chemical Society, Preprints*. — 1974. — No. 34 (1). — 237 p.
13. Cho, K. Effect of molecular weight between cross-links on the abrasion behavior of rubber by a blade abrader / K. Cho, D. Lee // *Polymer*. — 2000. — No. 41 (1). — Pp. 133–140.
14. Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers, Plastics Design Library, 1995. — p. VI.

BOGDANOVICH Alexander V., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics

E-mail: bogal@tut.by

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 06 June 2019.

ANALYSIS OF WEAR PROCESS OF MECHANICAL SYSTEM “0.45% CARBON STEEL – POLYTETRAFLUORETHYLENE” DURING SLIDING AND MECHANO-SLIDING FATIGUE USING FRACTURE MECHANICS CRITERION

The results of the tests for a friction pair “a cylindrical specimen made of 0.45% carbon steel — a prismatic counterspecimen-liner made of polytetrafluoroethylene F4-B” during sliding friction and mechano-sliding fatigue at different levels of contact load are presented. The experimental data are analyzed using the Archard’s equation and are presented as kinetic dependencies of wear and a friction fatigue curve. The concept of the frictional stress intensity factor during sliding friction is introduced, and the expression is proposed that relates the wear rate to this factor and is close in shape to the Paris equation in fatigue fracture mechanics. Satisfactory compliance of the results of testing the metal-polymer tribo-fatigue system to the proposed expression is obtained both under conditions of sliding friction and under mechano-sliding fatigue.

Keywords: sliding friction, mechano-sliding fatigue, tribo-fatigue system, contact pressure, wear, stress intensity factor

References

1. Kragelskiy I.V., Nepomnyaschiy E.F. Ustalostnyy mekhanizm iznosa protektora avtomobilnykh shin [Fatigue mechanism of wear of the car shines protector]. *Friktsionnyy iznos rezin* [Friction wear of rubber], 1964, pp. 9–20.
2. Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Basics of calculations for friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 528 p.
3. Sosnovskiy L.A. *Osnovy tribofatiki. Tom 1* [Fundamentals of tribo-fatigue. Volume 1]. Gomel, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet transporta Publ., 2003. 246 p.
4. Harsha A.P., Tewari U.S. Two-body and three-body abrasive wear behavior of polyaryletherketone composites. *Polymer Tests*, 2003, p. 403.
5. Zhang S.W. Tribology of Elastomers. *Tribology and interface engineering series*, 2004, no. 47, pp. 37–177.
6. Jia X., Ling R. Two-body free-abrasive wear of polyethylene, nylon1010, epoxy and polyurethane coatings. *Tribology International*, 2007, no. 40(8), pp. 1276–1283.
7. Marchenko E.A. *Essentials of Friction Breakage for Metals Surface*. Beijing, National Defence Industry Press, 1990, pp. 1–8.
8. Liu J.J., Zhou P.A., Sun X.T., Liao Q.C., et al. *Adhesive Wear and Fatigue Wear of Materials*. Beijing, Machinery Industry Press, 1989, pp. 234–323.
9. Martinez F.J., Canales M., Bielsa J.M., Jimenez M.A. Relationship between wear rate and mechanical fatigue in sliding TPU-metal contacts. *Wear*, 2010, no. 268, pp. 388–398.
10. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 1953, no. 24, pp. 981–988.
11. Rabinowicz E. *Friction and Wear of Materials*. Wiley, 1995. 335 p.
12. Champ D.H., Southern E., Thomas A.G. Division of Organic Coatings Plastics. *Paper American Chemical Society. Preprints*, 1974, vol. 34, no. 1, p. 237.
13. Cho K., Lee D. Effect of molecular weight between cross-links on the abrasion behavior of rubber by a blade abrader. *Polymer*, 2000, no. 41(1), pp. 133–140.
14. *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers*. Plastics Design Library, 1995. 531 p.