

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 620.19

**ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЕ  
МЕТАЛЛ–МЕТАЛПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ**© 2023 г. А. Ю. Албагачиев<sup>а,\*</sup>, Б. М. Гантимиров<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: albagachiev@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.07.2023 г.

После доработки 10.08.2023 г.

Принята к публикации 20.08.2023 г.

Приведены результаты испытания на фреттинг-изнашивание металлополимерных материалов в паре трения с конструкционными материалами чугуна 20 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т по прямой и обратной схемам испытаний. В качестве металлополимерного материала был выбран двухкомпонентный пастообразный материал, основанный на смеси металлокерамического сплава с высокомолекулярными полимерами и олигомерами – BELZONA 1111.

*Ключевые слова:* фреттинг, износ, металл, металлополимер**DOI:** 10.31857/S0235711923060020, **EDN:** YYCALL

Несмотря на то, что явление фреттинга находится в поле зрения исследователей более 100 лет, удовлетворительной теории этого процесса до сих пор нет, а прогнозирование сопротивления фреттинг-изнашиванию при проектировании деталей машин, за редким исключением, не делается.

Существуют способы снижения изнашивания при фреттинге. В частности, при проектировании машин для контактирующих пар рекомендуется выбирать разнородные материалы, не склонные к химическому взаимодействию при фреттинге. Однако во многих случаях эти рекомендации не применимы, т.к. выбор материалов обусловлен эксплуатационными или иными требованиями.

**Методика проведения экспериментальных исследований.** Методика проведения испытаний на фреттинг-изнашивание включает следующий алгоритм: **1)** цилиндрический подвижный образец (контрольобразец), соприкасающийся торцом с неподвижным цилиндрическим образцом из исследуемого материала при заданном давлении, приводится в возвратно-вращательное движение с заданными амплитудой и частотой (рис. 1); **2)** измеряется износ неподвижного образца за заданное количество циклов, по величине которого определяется износостойкость исследуемого материала.

Режимные параметры испытаний: нормальная нагрузка 500 Н (9,8 МПа); амплитуда возвратно-вращательного движения образца 50 мкм; частота возвратно-вращательного движения образца 23 Гц; длительность испытаний  $2 \times 10^6$  циклов (24 часа).

Образцы изготавливались из стали 12Х18Н10Т, чугуна 20 и металлополимерного материала BELZONA 1111. Предварительно была подготовлена испытываемая поверхность путем шлифования.



Рис. 1. Общий вид модельной установки: 1 – рычаг нагрузки; 2 – грузы.

Поверхности образцов перед испытанием тщательно промывались в бензине (ГОСТ 443-70) и ацетоне (ГОСТ 2603-79), высушивались на воздухе в соответствии с рекомендациями ГОСТ 23.211-80.

Последовательность проведения испытания: 1. Образец и контрообразец закрепляют в зажимах модели испытательной установки. 2. Образец и контрообразец прижимают друг к другу рабочими поверхностями с усилием не менее 500 Н, обеспечивая их взаимное прилегание с помощью самоцентрирующейся цанги образца, после чего жестко фиксируют положение цанги образца. 3. Образцы приводят в соприкосновение и прикладывают сжимающую нагрузку при испытаниях вида  $I\ 500 \pm 25$  Н. 4. Включают привод установки. Во время испытаний поддерживают амплитуду  $50 \pm 5$  мкм, частоту 23 Гц. 5. После достижения заданного количества циклов испытаний, равного  $2 \times 10^6 \pm 50$  циклов, выключают привод установки, снимают нагрузку, освобождают образцы из цанговых зажимов, промывают последовательно в бензине и ацетоне и высушивают на воздухе.

В зависимости от схемы испытания исследовались следующие пары трения: 1) *испытания по прямой схеме*: металлополимер (контрообразец)—12X18H10T (образец); металлополимер (контрообразец)—чугун 20 (образец); 2) *испытания по обратной схеме*: 12X18H10T (контрообразец)—металлополимер (образец); чугун 20 (контрообразец)—металлополимер (образец).

С поверхностей неподвижных образцов снимались профилограммы на профилографе-профилометре фирмы “Mahr” (Германия) (рис. 2), по результатам которых определяли износ. Профилограммы снимались по трассам в соответствии с рис. 3, и далее определялась величина линейной интенсивности изнашивания.

Для участков каждой из 8 профилограмм, соответствующих неизношенной поверхности и рабочей поверхности трения образца, проводят средние линии профиля согласно ГОСТ 2789-73 и определяют расстояние  $h_i$  между ними с погрешностью  $\pm 0.5$  мкм.



Рис. 2. Профилограф-профилометр фирмы “Mahr”.

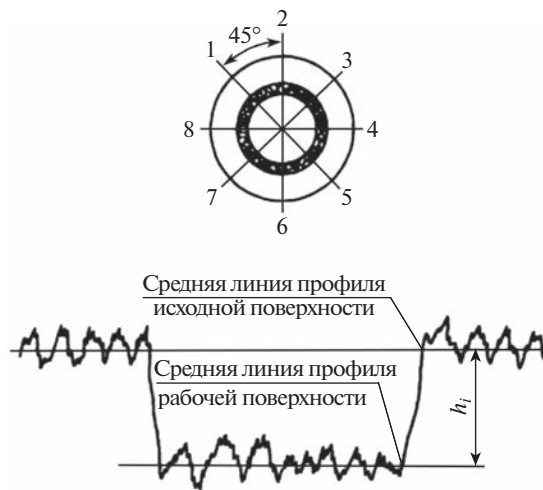


Рис. 3. Схема профилограммы с изношенной поверхностью.

**Основные результаты.** По полученным профилограммам (представлены примеры на рис. 4–6), для каждого образца рассчитывался средний износ и интенсивность изнашивания. Данные расчетов представлены в табл. 1–5.

В таблице 6 приведены результаты, полученные методом взвешивания на аналитических весах с точностью измерения 0.0001 грамма.

Средний износ  $i$ -того образца  $h_i$ , мкм, вычисляют по формуле

$$h_i = \frac{\sum_{j=1}^8 h_{ij}}{8}. \quad (1)$$

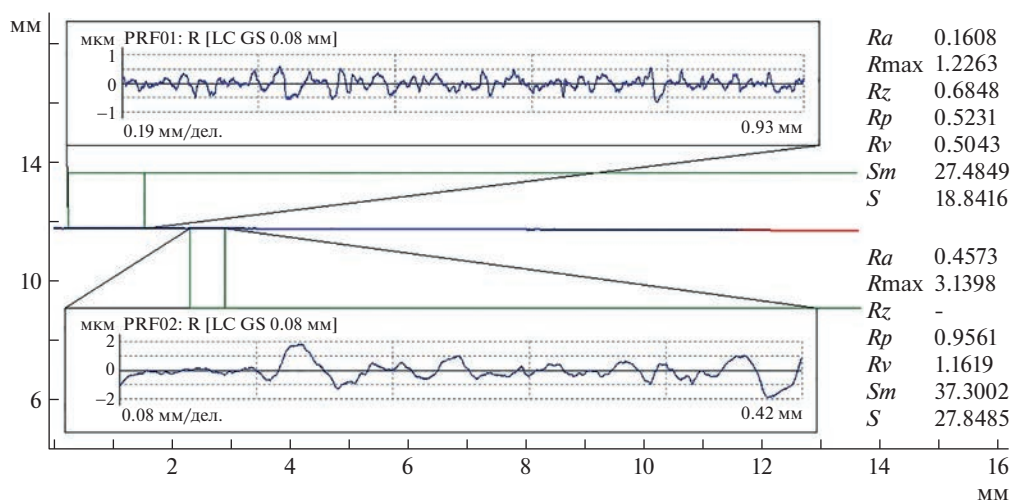


Рис. 4. Профилграмма образца из стали 12X18H10T после  $2 \times 10^6$  циклов испытаний.

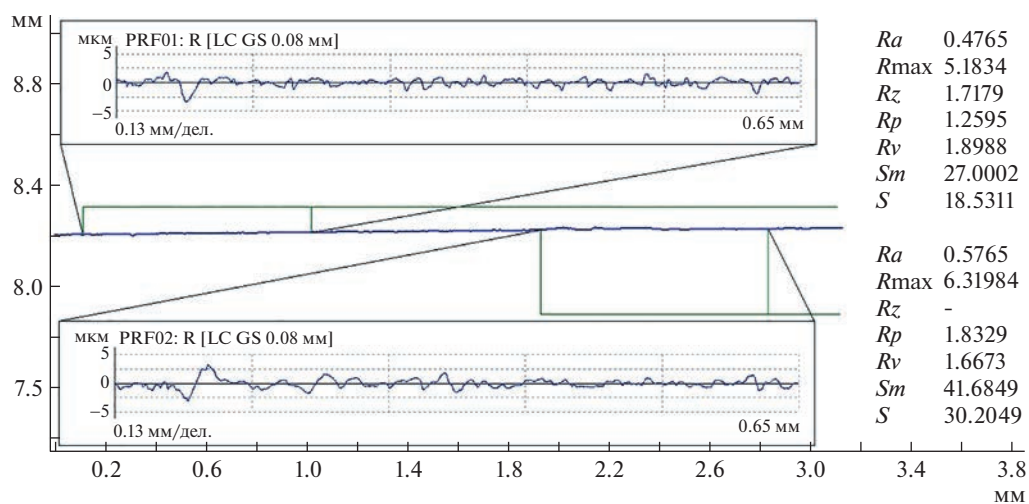


Рис. 5. Профилграмма образца из чугуна после  $2 \times 10^6$  циклов испытаний.

Интенсивность изнашивания  $I_h$  испытываемого материала определяется по формуле

$$I_h = \frac{\sum_{j=1}^k h_j}{2ANk}, \quad (2)$$

где  $A$  — амплитуда, мкм;  $N$  — количество циклов испытаний;  $k$  — количество испытанных образцов материала.

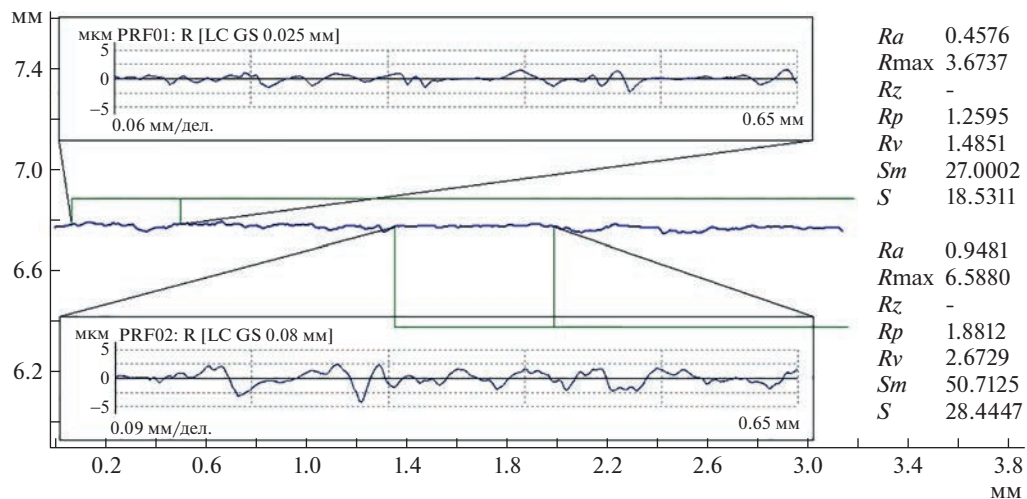


Рис. 6. Профилограмма образца из металлополимера после  $2 \times 10^6$  циклов испытаний.



Рис. 7. Вид контрообразца из чугуна и образца из металлополимера после  $2 \times 10^6$  циклов испытаний.

Вычисления проводят с погрешностью не более  $1 \times 10^{-8}$ . Результаты расчетов заносят в протокол.

#### Пара трения металлополимер (контрообразец) – 12X18Н10Т (образец)

Средний износ  $j$ -го образца определяем по формуле (1) для пары трения металлополимер–12X18Н10Т

$$\frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8} = \frac{-0.1483 - 0.0985 - 0.0768 + 0.0044 - 0.1294 - 0.2283 - 0.1196 - 0.0114}{8} = -0.1014 \text{ мкм.}$$

**Таблица 1.** Износ и шероховатость пары трения металлополимер–12Х18Н10Т

|   | <i>Ra</i> до | <i>Ra</i> после | $h_i$   |
|---|--------------|-----------------|---------|
| 1 | 0.1608       | 0.4573          | –0.1483 |
| 2 | 0.1857       | 0.3827          | –0.0985 |
| 3 | 0.1128       | 0.2663          | –0.0768 |
| 4 | 0.1388       | 0.1301          | 0.0044  |
| 5 | 0.1885       | 0.4472          | –0.1294 |
| 6 | 0.0809       | 0.5375          | –0.2283 |
| 7 | 0.1078       | 0.3470          | –0.1196 |
| 8 | 0.1025       | 0.1312          | –0.0144 |

Средний износ  $h_i = -0.1014$  мкм

**Таблица 2.** Износ и шероховатость пары трения металлополимер–чугун 20

|   | <i>Ra</i> до | <i>Ra</i> после | $h_i$   |
|---|--------------|-----------------|---------|
| 1 | 0.4765       | 0.5767          | –0.0501 |
| 2 | 0.3442       | 0.4145          | –0.0352 |
| 3 | 0.3523       | 0.2945          | 0.0289  |
| 4 | 0.3758       | 0.3506          | 0.0126  |
| 5 | 0.3661       | 0.3448          | 0.0107  |
| 6 | 0.4110       | 0.3756          | 0.0177  |
| 7 | 0.4136       | 0.4449          | –0.0157 |
| 8 | 0.5683       | 0.4193          | 0.0745  |

Средний износ  $h_i = 0.0054$  мкм

В проведенном испытании средний износ имеет отрицательное значение, а это значит, что износа образца не было. Изнашивался только подвижный контро образец, и при этом происходил перенос металлополимера на поверхность стального образца.

#### Пара трения металлополимер (контро образец)–чугун 20 (образец)

Средний износ  $j$ -го образца определяем по формуле (1) для пары трения чугун–металлополимер

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8} = \frac{-0.2453 + 0.5211 - 0.3589 + 0.3474 + 0.1502 - 0.1502 - 0.1717 - 0.1648}{8} = 0.0322 \text{ мкм.}$$

Интенсивность изнашивания для пары трения чугун–металлополимер находим по формуле (2)

$$I_h = \frac{\sum_{i=1}^k h_i}{2ANk} = \frac{0.0322}{2 \times 50 \times 2 \times 10^6 \times 1} = 1.61 \times 10^{-10}.$$

**Таблица 3.** Шероховатость и средний износ пары трения 12Х18Н10Т–металлополимер

|   | $Ra$ до | $Ra$ после | $h_i$  |
|---|---------|------------|--------|
| 1 | 1.1923  | 0.3682     | 0.4121 |
| 2 | 1.3004  | 0.7390     | 0.2807 |
| 3 | 1.3110  | 0.9183     | 0.1964 |
| 4 | 1.7150  | 1.0074     | 0.3538 |
| 5 | 1.4305  | 0.9898     | 0.2204 |
| 6 | 1.4430  | 1.1092     | 0.1669 |
| 7 | 1.3883  | 1.0640     | 0.1622 |
| 8 | 1.3533  | 1.1931     | 0.0801 |

Средний износ  $h_i = 0.2341$  мкм

**Таблица 4.** Шероховатость и средний износ пары трения чугун–металлополимер

|   | $Ra$ до | $Ra$ после | $h_i$   |
|---|---------|------------|---------|
| 1 | 0.4576  | 0.9481     | −0.2453 |
| 2 | 1.6988  | 0.6567     | 0.5211  |
| 3 | 0.5763  | 1.2941     | −0.3589 |
| 4 | 1.8607  | 1.1659     | 0.3474  |
| 5 | 1.6656  | 1.3652     | 0.1502  |
| 6 | 1.5226  | 1.8229     | −0.1502 |
| 7 | 1.5547  | 1.8981     | −0.1717 |
| 8 | 1.9410  | 1.6114     | 0.1648  |

Средний износ  $h_i = 0.0322$  мкм

Средний износ  $j$ -го образца определяем по формуле (1) для пары трения металл–полимер–чугун

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8} = \frac{-0.0501 - 0.0352 + 0.0289 + 0.0126 + 0.0107 + 0.0177 - 0.0157 + 0.0745}{8} = 0.0054 \text{ мкм.}$$

Интенсивность изнашивания для пары трения металл–полимер–чугун находим по формуле (2)

$$I_h = \frac{\sum_{i=1}^k h_i}{2ANk} = \frac{0.0054}{2 \times 50 \times 2 \times 10^6 \times 1} = 2.72 \times 10^{-11}.$$

**Таблица 5.** Обобщенные результаты испытаний

| Материал образцов              | Прямая схема испытаний    |                                 |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
|                                | Средний износ $h_j$ , мкм | Интенсивность изнашивания $I_h$ |
| Металлополимер—сталь 12X18H10T | —                         | —                               |
| Металлополимер—чугун           | 0.0054                    | $2.72 \times 10^{-10}$          |
| Обратная схема испытаний       |                           |                                 |
| Сталь 12X18H10T—металлополимер | 0.2341                    | $1.17 \times 10^{-9}$           |
| Чугун—металлополимер           | 0.0322                    | $1.61 \times 10^{-10}$          |

**Таблица 6.** Массовая оценка износа

| № исп. | Пара трения (контроль образец—образец) | Масса, г |         |                   |
|--------|----------------------------------------|----------|---------|-------------------|
|        |                                        | до       | после   | фактический износ |
| 1      | Металлополимер<br>12X18H10T            | 10.0217  | 10.0199 | 0.0018            |
|        |                                        | 32.8536  | 32.8525 | 0.0011            |
| 2      | Металлополимер<br>Чугун 20             | 8.23540  | 8.23480 | 0.0006            |
|        |                                        | 36.6161  | 36.6156 | 0.0005            |
| 3      | 12X18H10T<br>Металлополимер            | 38.4223  | 38.4221 | 0.0002            |
|        |                                        | 9.1739   | 9.1731  | 0.0008            |
| 4      | Чугун 20<br>Металлополимер             | 30.3470  | 30.3463 | 0.0007            |
|        |                                        | 4.8934   | 4.8920  | 0.0014            |

Средний износ  $j$ -го образца определяем по формуле (1) для пары трения 12X18H10T—металлополимер

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8} = \frac{+0.4121 + 0.2807 + 0.1964 + 0.3538 + 0.2204 + 0.1669 + 0.1622 + 0.0801}{8} = 0.2341 \text{ мкм.}$$

Интенсивность изнашивания для пары трения 12X18H10T—металлополимер находим по формуле (2).

Полученные результаты расчетов сведены в общую табл. 5.

Также была проведена массовая оценка износа образцов. Полученные данные приведены в табл. 6.

**Выводы.** Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы: **1.** Металлополимерный материал BELZONA 1111 показал высокую износостойкость при фреттинг-изнашивании, при этом и образцы из стали и чугуна имели минимальный износ, а металлополимерный материал больше изнашивался чем металлические образцы. **2.** Полученные экспериментальные данные: износ  $h_j = 0.0054$  мкм, интенсивность изнашивания  $I_h = 2.72 \times 10^{-10}$  показали, что металлополимерный материал может использоваться в узлах трения, подверженных фреттингу и фреттинг-коррозии, как для восстановления изношенных поверхностей, так и для изготовления полноценных элементов конструкций.

**Конфликт интересов.** Конфликта интересов авторы не имеют.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гантимиров Б.М., Бурякин А.В., Колесникова Т.К. Фреттинг-изнашивание металлополимерных и металлических материалов // Сборник докладов III Региональной научно-технической конференции “Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России”, посвященной 110-летию А.И. Скобло и 105-летию Г.К. Шрейбера, 2019. С. 61.
2. Гантимиров Б.М., Почес Н.С., Колесникова Т.К. Влияние смазочного материала на фреттинг-изнашивание металлических материалов // Сборник докладов III Региональной научно-технической конференции “Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России”, посвященной 110-летию А.И. Скобло и 105-летию Г.К. Шрейбера, 2019. С. 60.
3. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. 272 с.
4. Безъязычный В.Ф., Драпкин Б.М., Любимов Р.В., Тимофеев М.В. Экспериментальное подтверждение малоцикловой усталостной природы фреттинг-изнашивания поверхностных слоев металлов // Трение, износ, смазка (электр. ресурс). 2000. Т. 2. № 3. С. 9.
5. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. М.: Наука, 1979. 118 с.
6. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
7. Петухов А.Н. Фреттинг и фреттинг-усталость конструкционных материалов и деталей // Авиационная промышленность. 2014. № 5. С. 45.
8. Conner B.P., Lindley T.C., Nicholas T., Suresh S. Application of a fracture mechanics-based life prediction method for contact fatigue // Int. J. Fatigue. 2004. № 26. P. 511.
9. Farris T.N., Murthy H. High Temperature Fretting Fatigue of Single Crystal Nickel // Proc. 10th Nation. Turbine Engine, HCF Conference, New Orleans. LA, March 8–11, 2005. P. 123.
10. Houghton D., Wavish P.M., Williams E.J., Leen S.B. Multiaxial fretting fatigue testing and prediction for splined couplings // Int. J. Fatigue. 2009. № 31. P. 1805.
11. Jacob M.S.D., Arora P.R., Saleem M. et al. Fretting fatigue crack initiation: An experimental and theoretical study // Ibid. 2007. № 29. P. 1328.
12. Jacob M.S.D., Arora P.R., Sapuan S.N. et al. Experimental evaluation of fretting fatigue test apparatus // Ibid. 2007. № 29. P. 941.
13. Xin L., Yang B.B., Li J. et al. Wear damage of Alloy 690TT in partial and gross slip fretting regimes at high temperature // Wear. 2017. V. 390. P. 71.
14. Чжан Ч., Ван Д., Го Я. Fretting friction and wear behavior of spiral wound gasket (SWG) of the sealing surface // Tribol. Int. 2019. V. 133. P. 236.
15. Zabala A., Infante-García D., Giner E. et al. On the use of the theory of critical distances with mesh control for fretting fatigue lifetime assessment // Tribol. Int. 2020. V. 142. 105985.
16. Jin X., Shipway P.H., Sun W. The role of frictional power dissipation (as a function of frequency) and test temperature on contact temperature and the subsequent wear behavior in a stainless-steel contact in fretting // Wear. 2015. V. 330–331. P. 103.
17. O'Halloran S.M., Connaire A.D., Harte A.M. A global-local fretting analysis methodology and design study for the pressure armour layer of dynamic flexible marine risers // Tribology International. 2020. V. 142. 105967.
18. Shouyi S., Lei L., Zhufeng Y. et al. Fretting fatigue failure behavior of Nickel-based single crystal superalloy dovetail specimen in contact with powder metallurgy pads at high temperature // Tribol. Int. 2020. V. 142. 105986.