

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРА Ф4-В ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

маг. <sup>1</sup>Лис И.Н., маг. <sup>2</sup>Калечиц Н.А., д.т.н. <sup>2</sup>Богданович А.В.

<sup>1</sup>УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», Гродно  
<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск

В условиях трения скольжения закономерности изнашивания полимеров и композиций на их основе определяются чаще всего усталостными процессами в поверхностных слоях материала, который находится в контакте с металлом металлополимерной пары трения. Процессы, происходящие в зоне фрикционного контакта (взаимодействие поверхностей, изменение структурного строения и свойств тончайших поверхностных слоев, их разрушение) и определяющие сопротивление элементов узлов трения изнашиванию, в значительной мере зависят от контактных деформаций материала, определяемых, в свою очередь, контактными нагрузками [1, 2].

Усталостный характер изнашивания поверхностей трения обусловлен, как известно, дискретностью контакта и возникновением вследствие этого высоких напряжений и температур, достигающих сотен градусов в зонах фактического контакта [3 – 8]. Однако какой из указанных выше факторов оказывает большее влияние на процесс усталостного разрушения, определить с достаточной точностью не представляется возможным. Это связано в первую очередь с отсутствием экспериментальных методов определения локальных всплесков температур, а также с отсутствием надежных методов измерения фактической площади скользящего контакта. При этом для практики расчетов на трение и износ важно знать особенности, кинетику процесса изнашивания материалов в исследуемой паре трения при заданных условиях испытания при использовании современных оборудования, методов измерения параметров нагрузки и изнашивания, геометрии контактирующих элементов пары трения.

В данном докладе представлены результаты экспериментального исследования кинетики изнашивания в металлополимерной паре трения. Испытания проводили по схеме вал-вкладыш, рекомендованной в СТБ 1448 – 2004 [9]. Образец-вал 1 из стали 45 с диаметром рабочей части 10 мм консольно закреплялся в шпинделе 2 испытательной машины УКИ-6000-2 и вращался с частотой 3000 мин<sup>-1</sup> (рисунок 1,а). Контроль образца-вкладыш 3, представляющий из себя кубик 10×10×10 мм, выполненный из полимера Ф4-В, прижимался к опасному сечению образца 1 контактной нагрузкой  $F_N$ , величину которой задавали при помощи специального приспособления и поддерживали постоянной в процессе испытания каждой пары образец-контроль.

В процессе испытаний обеспечивался капельный подвод смазочного материала – универсального всесезонного моторного масла Лукойл супер 15W-40.

В качестве предельного состояния был принят суммарный износ пары образец – вкладыш, равный 1000 мкм, а базу испытаний приняли равной  $10^7$  циклов нагружения.

Отметим, что в процессе испытаний периодически проводилось измерение с помощью индикаторной головки с точностью 2 мкм величины линейного износа  $i$  фрикционной пары в локальных 8-и точках по периметру опасной зоны стального образца (рисунок 1,б) дискретным способом [10]. Суть этого способа состоит в том, что в опасном сечении образца, где реализуется процесс трения скольжения, отмечаются по длине окружности восемь точек: (1), (2), ..., (8), в каждой из которых с высокой точностью измеряется параметр  $i$  в течение 1 оборота образца при его вращении. Естественно, что такие измерения могут быть проведены в любой момент испытаний (по времени  $t$ ). Та-

ким образом, можно изучать кинетику повреждения конкретной локальной точки (зоны) образца.

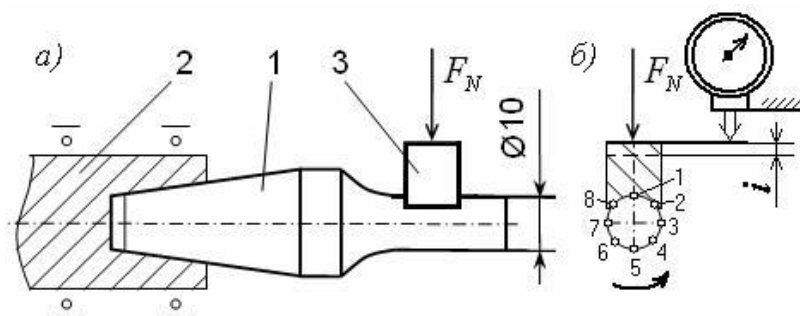


Рис. 1. Схемы: а) испытания на трение скольжения (фрикционную усталость); б) измерения износа в локальных точках дискретным способом  
1 – образец; 2 – шпиндель; 3 – контробразец

В качестве примера рассмотрим некоторые результаты испытаний фрикционной пары при контактной нагрузке  $F_N = 180$  Н. На рисунке 2, а приведена круговая диаграмма износа  $\bar{i}$ , мкм, на которой отражено изменение величины  $\bar{i}$  в каждой из 8-и точек, равномерно распределенных по опасной зоне образца. Значения  $\bar{i}$  в этих локальных точках при заданном числе циклов  $n$  нагружения соединяли ломаными линиями. Видно, что изнашивание происходит неравномерно по периметру образца преимущественно в процессе приработки, а затем разница между значениями износа соседних точек изменяется в крайне узких пределах до конца испытания. Наибольший износ имел место при  $n = 10^5$  циклов в области локальных точек 2 – 3 (1024 – 1028 мкм).

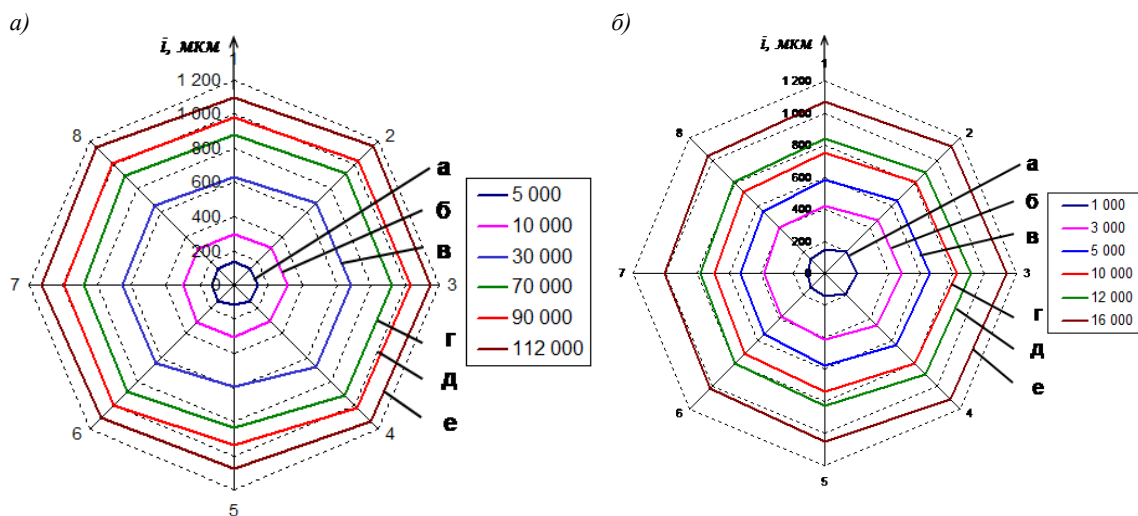


Рис. 2. Круговая диаграмма износа полимерного вкладыша: а – при  $F_N = 180$  Н и наработке (тыс. циклов): а – 5; б – 10; в – 30; г – 70; д – 90; е – 112; б – при  $F_N = 450$  Н и наработке (тыс. циклов): а – 1; б – 3; в – 5; г – 10; д – 12; е – 16

Для сравнения на рисунке 2, б показаны круговые диаграммы износа при  $F_N = 450$  Н. Характер изнашивания аналогичен описанному выше для контактной нагрузки 180Н.

Кинетика изменения износа полимера при контактной нагрузке  $F_N = 350$  Н в 1-й, 2-й, 3-й, и 4-й локальных точках представлена на рисунке 3. Видно, что наиболее интенсивное изнашивание происходит при заданной нагрузке за первые 25 – 30 тыс. циклов нагружения – период приработки, который обусловлен срезанием микровыступов, главным образом, поверхности полимерного контробразца, имеющего меньшую, чем у

стального образца, твердость. Экспериментальные точки удовлетворительно описываются степенной зависимостью вида  $i = a \cdot N + b \cdot N^2 + d \cdot N^3 + c$ . Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , полученные путем математического анализа в пакете Wolfram Mathematica, приведены в таблице 1.

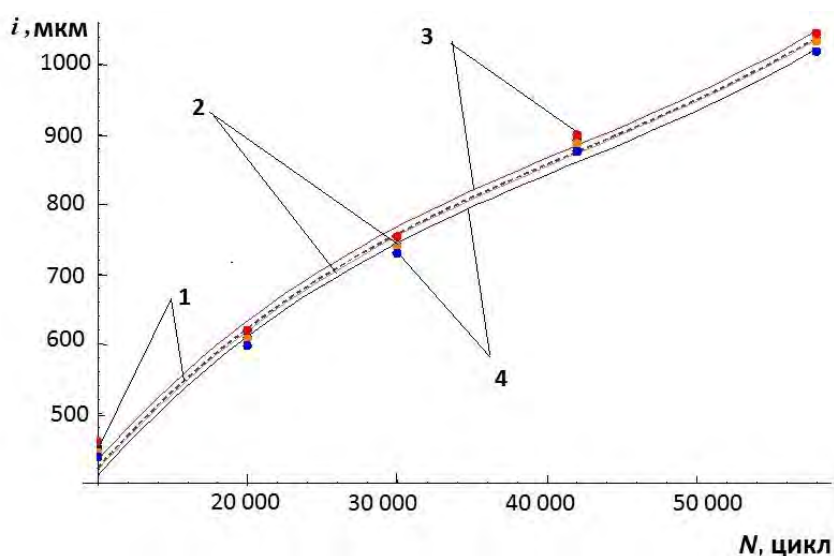


Рис. 3. Кинетические кривые износа в локальных точках 1, 2, 3 и 4

Табл. 1. Результаты обработки экспериментальных кинетических зависимостей величины износа полимера от числа циклов нагружения по выражению  $i = a \cdot N + b \cdot N^2 + d \cdot N^3 + c$

Коэффициенты	Номер локальной точки							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$a$	128	125	137	115	94	77	89	113
$b$	0,035	0,035	0,035	0,035	0,033	0,034	0,035	0,035
$c$	$-6,16 \cdot 10^{-7}$	$-6 \cdot 10^{-7}$	$-6,26 \cdot 10^{-7}$	$-6,29 \cdot 10^{-7}$	$-5,26 \cdot 10^{-7}$	$-5,72 \cdot 10^{-7}$	$-5,96 \cdot 10^{-7}$	$-6,08 \cdot 10^{-7}$
$d$	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-12}$	$4,97 \cdot 10^{-12}$	$4,99 \cdot 10^{-12}$	$3,86 \cdot 10^{-12}$	$4,27 \cdot 10^{-12}$	$4,51 \cdot 10^{-12}$	$4,78 \cdot 10^{-12}$

В докладе анализируются кинетические кривые накопления износа и при других значениях контактной нагрузки. Показано, что с ростом контактной нагрузки  $F_N$  скорость изнашивания увеличивается, что согласуется с известными результатами испытаний других пар трения [1 – 3, 11 – 13 и др.].

Результаты испытаний серии исследуемых пар трения представлены на рисунке 4 в виде кривой фрикционной усталости в координатах контактная нагрузка  $F_N$  – число циклов  $N$  до наступления предельного состояния полимерного вкладыша. Оказалось, что кривая усталости в заданном диапазоне контактной нагрузки  $F_N$  имеет три характерных участка, которые условно можно назвать так: *I* – область квазистатического разрушения (примерно до  $N = 7,2 \cdot 10^4$  циклов,  $F_N = 400 \dots 450$  Н), *II* – область малоциклового разрушения ( $N = 7,2 \cdot 10^4 \dots 9 \cdot 10^4$  циклов,  $F_N = 165 \dots 400$  Н), *III* – область многоциклового разрушения ( $N > 1 \cdot 10^5$  циклов,  $F_N < 165$  Н). Видно, что кривая фрикционной усталости состоит из трех ветвей: левой с большим наклоном, средней, расположенной почти вертикально, и правой с относительно малым наклоном (см. рисунок 4). Контактная нагрузка, соответствующая пределу ограниченной фрикционной выносливости исследуемой пары трения на заданной базе испытаний, составила  $F_f = 165$  Н.

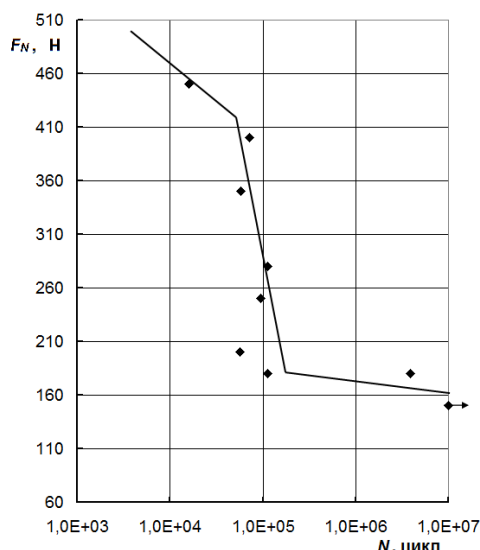


Рис. 4. Кривая фрикционной усталости полимерного вкладыша

Значения характеристик фрикционной усталости полимера Ф4-В, определяемых согласно рекомендациям [9], представлены в таблице 2.

Табл. 2. Характеристики кривых фрикционной усталости полимера Ф4-В

Характеристика	Обозначение	Значение характеристики
Предел ограниченной выносливости, Н	$F_{fN}$	165
Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл	$N_{FG}$	$8,2 \cdot 10^4$
Показатель наклона кривой усталости (средний участок)	$m_F$	1,556

Для оценки меры поврежденности пары трения, работающей в условиях фрикционной усталости, может использоваться функция [14]:

$$\omega = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{n}{N} \right)^\alpha \right]^\beta, \quad (1)$$

где в качестве аргумента принята относительная наработка  $n/N$  ( $n$  – текущее число циклов нагружения;  $N$  – долговечность, циклов);  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты разупрочнения и упрочнения, соответственно.

В качестве аргумента для меры поврежденности (1) для исследуемой пары трения приняли относительный износ:

$$\frac{i}{i_{пред}}, \quad (2)$$

где  $i$  – текущий износ, мкм;  $i_{пред}$  – предельный износ, мкм. Тогда имеем меру поврежденности в виде:

$$\omega = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{i}{i_{пред}} \right)^\alpha \right]^\beta, \quad (3)$$

В докладе выполнен анализ кинетических кривых изнашивания полимерного вкладыша Ф4-В при разной величине контактной нагрузки на основе меры поврежденности (3), определены значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ .

## РЕЗЮМЕ

В докладе приведены экспериментальные результаты исследования кинетики повреждения полимера Ф4-В в металлополимерной паре трения вал-вкладыш при скольжении, полученные на основе дискретного способа измерения износа. Проанализированы закономерности изнашивания полимера в заданных условиях испытаний. Построена кривая фрикционной усталости полимера, приведены численные значения характеристик сопротивления фрикционной усталости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Сысоев, П.В. Деформация и износ полимеров при трении / П.В. Сысоев, П.Н. Богданович, А.Д. Лизарев. – Минск : Наука и техника, 1985. – 239 с.
3. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
4. Крагельский, И.В. К вопросу создания особо долговечных материалов / И.В. Крагельский, А.А. Силин // Механика полимеров, 1969.- № 2.- с. 298-302.
5. Dow T. A. Preventing hot spots in sliding contact // Machine Design, 1978.- V. 50, N 2.- PP. 94-99.
6. Gitter, H. Beanspruchungs und Reibungsverhältnisse am Nockentrieb / H. Gitter // Maschinenbautechnik, 1970.- N 2.- PP. 643-649.
7. Quinn, T. F. J. The division of heat and surface temperatures at sliding steel interfaces and their relation to oxidational wear / T. F. J. Quinn // Transactions of the ASME, 1978.- V. 21.- PP. 78-86.
8. Quinn, T. F. J., Developments in the oxidational theory of mild wear / T. F. J. Quinn, G. L. Sullivan, D. M. Dowson // Tribology International, 1980. -V. 13, N 4.- PP. 153-158.
9. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость (Стандарт Беларуси) СТБ 1448 – 2004.– Минск : ГОССТАНДАРТ, 2004. –14 с.
10. Yelovoy O. M., Stukachev V. N., Zamyatin V. O. Method of measurement of the parameters of wear-fatigue tests using the SI-series machines // Proc. of the III International Symposium on Tribo-Fatigue (Beijing, China, October 2-26, 2000). – Beijing: Human University Press, 2000. – P.208-212.
11. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин: Учебное пособие для вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. – М. : Высш. школа, 1991. – 319 с.
12. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: учебник для вузов/ П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск. : Выш. шк., 1999. – 374 с.
13. Махутов, Н.А. О построении кривой фрикционной усталости / Н.А. Махутов, Л.А. Сосновский, А.В. Марченко // Заводская лаборатория. – 1998. - № 12. – С. 36 – 39.
14. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения: монография / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.

## SUMMARY

*The experimental results of a study of the damage kinetics of polymer F4-B in metal-to- polymer friction pair shaft-liner under sliding derived from discrete method of measuring wear are given in report. The laws of wear process for polymer in predetermined test conditions are analyzed. The sliding fatigue curve of the polymer is built. The numerical values of the characteristics of resistance to sliding fatigue are given.*

**E-mail:** [lisivan@yandex.ru](mailto:lisivan@yandex.ru);  
[kooler-bart@mail.ru](mailto:kooler-bart@mail.ru);  
[bogal@tut.by](mailto:bogal@tut.by).

Поступила в редакцию 15.10.2015