

## Фрикционная усталость полимера при трении по стали

Л. А. Сосновский<sup>а</sup>, А. В. Марченко<sup>б</sup>

<sup>а</sup> НПО “Трибофатика”, Гомель, Беларусь

<sup>б</sup> Научный центр проблем механики машин НАН Беларуси, Минск, Беларусь

*По результатам экспериментальных данных построены кривая фрикционной усталости и кривые интенсивности изнашивания для трибосопряжения сталь 45 – полимер Ф4-ВМ. Обнаружены области мало- и многоциклового, а также высокоресурсной усталости, при этом параметры, их описывающие и разделяющие, оказываются устойчивыми – они не зависят, например, от принятой характеристики интенсивности изнашивания. Дано феноменологическое описание процессов изнашивания в характерных областях.*

В работе [1] впервые была предложена методика построения кривой фрикционной усталости для узла трения сталь–полимер в координатах контактная нагрузка – долговечность. Показано, что фрикционная долговечность должна определяться временем (или числом циклов) до достижения величиной износа некоторого (наперед заданного) значения. Это вполне соответствует и определению обычной усталостной долговечности как числа циклов до появления трещины заранее установленной длины [2].

Исходя из этого проведены испытания на фрикционную усталость узла трения сталь 45 – полимер Ф4-ВМ. Стальной вал диаметром 10 мм вращался со скоростью 3000 мин<sup>-1</sup>. Полимерный образец представлял собой кубик размером 10×10×10 мм, который в процессе испытаний прижимался к стальному валу контактной нагрузкой  $F_N$ , варьируемой в широких пределах. За предельное состояние полимера принимали величину износа 1 мм. Испытания проводили на универсальной машине СИ для износоусталостных испытаний [3–5], технический уровень которой соответствовал требованиям стандарта [6]. Наименьшее значение измеряемого на машине СИ износа составляло 5 мкм, наибольшее – 3000 мкм, погрешность – 2% измеряемой величины. Все испытания проводили до достижения полимерным образцом предельного состояния. База испытаний –  $8 \cdot 10^7$  цикл.

Всего испытано 12 узлов трения при 12 различных контактных нагрузках в диапазоне 10...440 Н. По результатам испытаний построена кривая фрикционной усталости (рис. 1) в полулогарифмических координатах: контактная нагрузка  $F_N$ , выраженная в ньютонах, – долговечность по износу  $N$ , определяемая как логарифм числа циклов нагружения до достижения величины износа 1 мм. Оказалось, что эта кривая имеет три характерных участка: *I* – область малоциклового усталости (примерно до  $N = 4 \cdot 10^5$  цикл), *II* – область многоциклового усталости ( $N = 4 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^6$  цикл), *III* – область высокоресурсной усталости ( $N > 5 \cdot 10^6$  цикл). Переход от *I* ко *II* участку обнаруживается при контактной нагрузке  $F_L = 330$  Н, а переход от *II* к *III* участку – при  $F_G = 80$  Н.

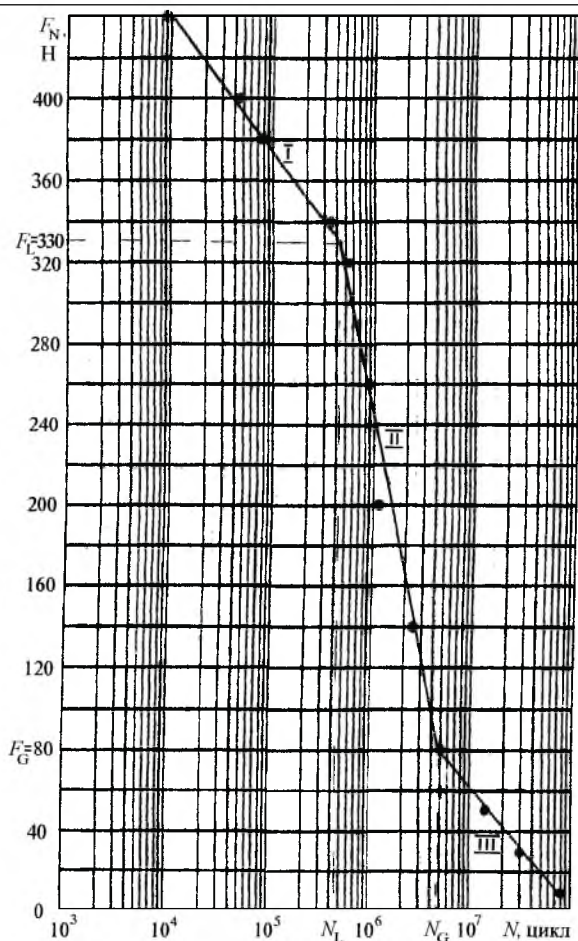


Рис. 1. Кривая фрикционной усталости для трибосопряжения сталь 45 – полимер Ф4-ВМ: I, II, III – соответственно малоцикловая, многоцикловая и высокоресурсная фрикционная усталость.

На рис. 2 представлены кинетические кривые изменения величины износа во времени при принятых уровнях контактных нагрузок. Легко видеть, что различаются три типа кинетических кривых. Тип I реализуется при больших контактных нагрузках ( $F_N = 380...440$  Н) и представляет собой практически прямую линию. Сопоставление с кривой фрикционной усталости (рис. 1) показывает, что такой процесс накопления износа во времени характерен для области малоцикловой усталости. Тип II – это сложная кривая, состоящая из трех (A, B, B) участков (кривые при  $F_N = 200$  и 260 Н). При более высоких ( $F_N = 320$  и 340 Н) и более низких ( $F_N = 140$  и 80 Н) контактных нагрузках начальный участок A таких кривых постепенно трансформируется и становится как бы продолжением участка B. В этом случае сопоставление с кривой фрикционной усталости (рис. 1) свидетельствует, что такой процесс накопления износа во времени характерен для области многоцикловой усталости ( $F_N = 140...340$  Н). Наконец, тип III представляет собой кривую, состоящую из двух участков (B и B); такого рода кривые характерны для области высокоресурсной усталости ( $F_N = 10...80$  Н). Таким

образом, закономерности накопления износа во времени при фрикционной усталости оказываются аналогичными закономерностям накопления неупругой и остаточной деформаций при обычной усталости [2].

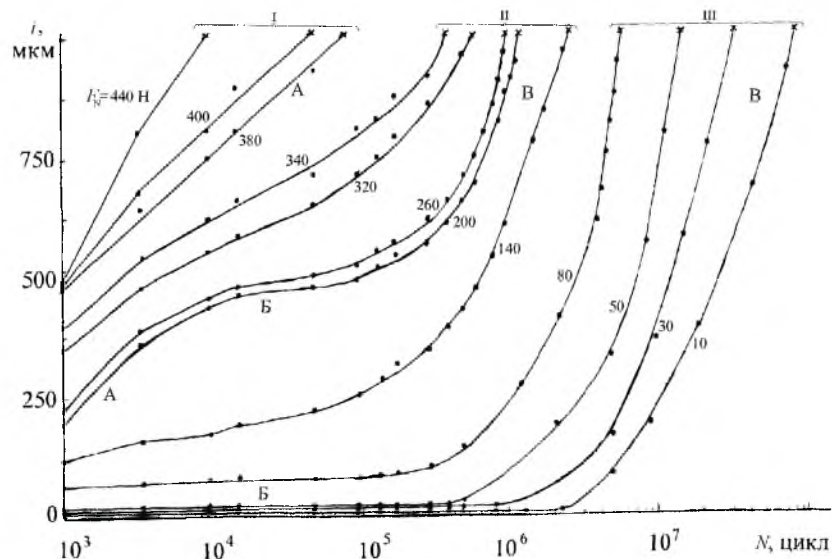


Рис. 2. Кинетические кривые износа  $i$  полимера Ф4-ВМ при различных величинах контактной нагрузки  $F_N$ .

Если обратиться к механизмам деформирования и изнашивания полимеров, которые описаны, например, в работах [7, 8], то применительно к полученным результатам испытаний можно предложить следующее их феноменологическое описание, которое в дальнейшем требует обоснования и уточнения путем проведения соответствующих физико-химических исследований.

В области высокоресурсной усталости III преимущественным является квазиупругое отеснение материала, которое характеризуется тонким износом (порядка 5 мкм), не сопровождающимся пластическим отеснением. Это заключение подтверждает участок III на рис. 3: при  $F_N$  до 80 Н величина  $c/c_0 = 1$  ( $c$  и  $c_0$  – размер рабочей зоны трущегося образца в направлении движения соответственно до и после испытаний). В области многоциклового усталости II (рис. 3) основную роль в процессах изнашивания играет пластическое отеснение ( $1,0 < c/c_0 < 1,15$  при  $80 \leq F_N \leq 340$  Н), приводящее к охрупчиванию и последующему разрушению поверхностных слоев полимера; при этом, чем больше контактная нагрузка, тем значительнее пластическое отеснение. Наконец, в области малоциклового усталости I (рис. 3) решающую роль в формировании износа играет микрорезание, сопровождающееся выраженными тепловыми повреждениями; последние обуславливают значительное пластическое отеснение ( $c/c_0$  при  $F_N > 340$  Н).

При визуальном изучении поверхностей трения установлено, что в областях мало- и многоциклового усталости полимер активно намазывается на сталь: это явление хорошо изучено и давно известно [9]. А в области

высокоресурсной усталости оно практически не реализуется – наоборот, при небольших увеличениях ясно обнаруживаются вкрапления мелкодисперсных частиц стали в полимер, т.е. имеет место обратный перенос (от твердой стали к относительно мягкому полимеру). При этом шероховатость обеих поверхностей трения существенно увеличивается. По-видимому, в процессе длительного контактного взаимодействия в зоне трения образуются свежие высокодисперсные свободные частицы полимера, которые, как известно [9], обладают свойствами поверхностно-активных веществ. Это приводит к облегчению и ускорению образования, движения и размножения на стальной поверхности дислокаций, ступеньки которых легко обламываются. Затем они шаржируются в относительно мягкий полимер и, следовательно, не все уносятся из контактной зоны. Вследствие трения шаржированной металлическими частицами поверхности полимера по стали ухудшается шероховатость обеих контактирующих поверхностей. Дальнейшие физико-химические исследования позволят более обоснованно и детально изучить картину указанных процессов.

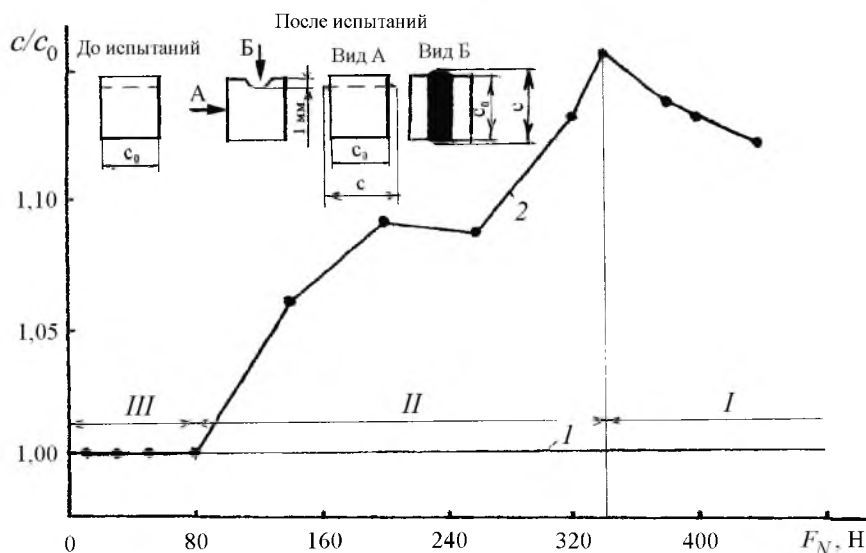


Рис. 3. Развитие пластического отгеснения полимера по направлению движения при трении скольжения: 1 – расчет; 2 – эксперимент.

Если изменить значение предельного износа, то как это повлияет на кривую фрикционной усталости? Рис. 4 иллюстрирует кривые фрикционной усталости при различных уровнях предельного износа  $i_{lim}$ . Как видно, все кривые аналогично имеют три характерных участка, но их переходные координаты, конечно, изменяются. В табл. 1 представлены уравнения кривых фрикционной усталости с их показателями наклона  $m_N$ , полученные методом наименьших квадратов. Как видно, показатель наклона  $m_N$  для областей мало- и многоциклового усталости может изменяться от 1,25 до 13,7, т.е. более чем в 10 раз, в то время как для области высокоресурсной усталости он мало изменяется при выборе того или иного значения предельного износа: от 1,05 до 1,61, всего на 50%.

Т а б л и ц а 1

## Уравнения кривых фрикционной усталости

Предельный износ $i_{lim}$ , мкм	Участки	Уравнения кривых фрикционной усталости	$m_N$
1000	I	$\lg F_N = -0,0763 \lg N + 2,95$	13,11
	II	$\lg F_N = -0,6125 \lg N + 6,037$	1,63
	III	$\lg F_N = -0,9528 \lg N + 8,5512$	1,05
750	I	$\lg F_N = -0,0731 \lg N + 2,88$	13,70
	II	$\lg F_N = -0,5631 \lg N + 5,59$	1,78
	III	$\lg F_N = -0,8031 \lg N + 7,27$	1,25
400	I	$\lg F_N = -0,2941 \lg N + 3,44$	3,40
	II	$\lg F_N = -0,0811 \lg N + 2,608$	12,35
	III	$\lg F_N = -0,621 \lg N + 5,73$	1,61
250	I	$\lg F_N = -0,81 \lg N + 3,0$	1,25
	II	$\lg F_N = -0,119 \lg N + 2,616$	8,40
	III	$\lg F_N = -0,795 \lg N + 6,764$	1,26

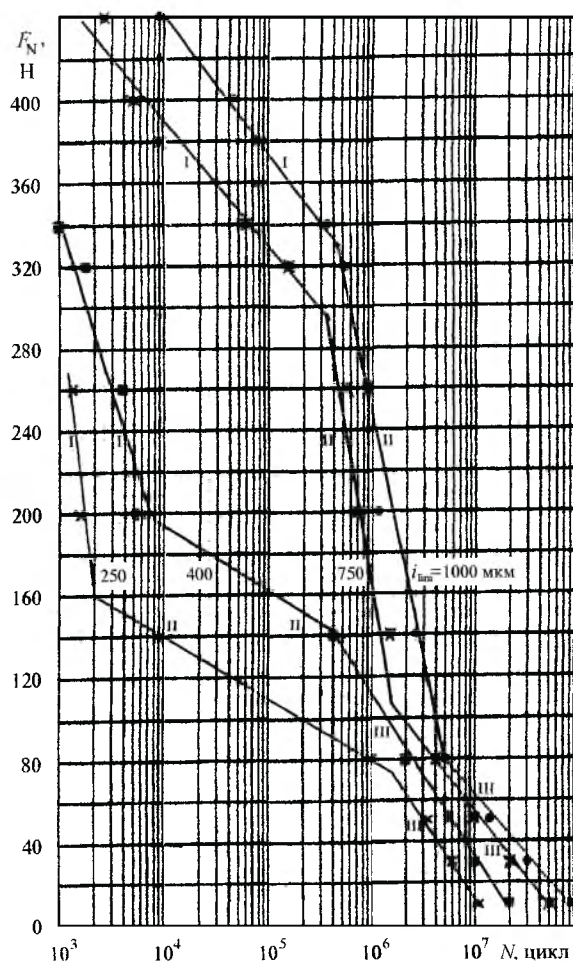


Рис. 4. Кривые фрикционной усталости трибосопряжения сталь 45 – полимер Ф4-ВМ при различных уровнях предельного износа.

На рис. 5 и в табл. 2 и 3 приведены результаты анализа интенсивности изнашивания полимера при работе данного трибосопряжения в условиях, когда предельным принят износ  $i_{\text{lim}} = 1000$  мкм. Расчет осуществляли по известным формулам:

для линейной интенсивности изнашивания –

$$I_h = \frac{h}{L_f}; \quad (1)$$

для объемной интенсивности изнашивания –

$$I_V = \frac{\Delta V}{L_f}; \quad (2)$$

для линейной интенсивности изнашивания с учетом действия контактной нагрузки –

$$I_{hF} = \frac{h}{L_f F_N}; \quad (3)$$

для объемной интенсивности изнашивания с учетом действия контактной нагрузки –

$$I_{VF} = \frac{\Delta V}{L_f F_N}, \quad (4)$$

где  $L_f = \pi dn$  – путь трения, мм;  $h$  – высота изношенного слоя, мм;  $d$  – диаметр стального образца, мм;  $n$  – число циклов до достижения предельного состояния;  $\Delta V$  – объем изношенного материала, мм<sup>3</sup>;  $F_N$  – контактная нагрузка, Н.

В табл. 2 представлены уравнения интенсивности изнашивания и их показатели наклона при предельном износе  $i_{\text{lim}} = 1000$  мкм, полученные методом наименьших квадратов. Видно, что показатели наклона  $m_N$  аналогичных участков кривых фрикционной усталости и интенсивности изнашивания практически совпадают. Из рис. 5 следует, что кривые интенсивности изнашивания, построенные в зависимости от уровня контактной нагрузки, имеют те же три области (I, II и III), что и кривые фрикционной усталости на рис. 1. Согласно данным табл. 2, показатели наклона  $m_N$  аналогичных участков кривых фрикционной усталости и кривых интенсивности изнашивания оказываются тоже одинаковыми. При этом нагрузочные координаты  $F_L$  и  $F_G$  точек перегиба обоих типов кривых являются устойчивыми – они тоже совпадают (табл. 3). Это весьма важно с практической точки зрения: исключается необходимость использования несколько усложненных формул (2)–(4) для подсчета интенсивности изнашивания (во всяком случае для данных и аналогичных схем испытания).

Т а б л и ц а 2

Уравнения интенсивности изнашивания при предельном износе  $i_{lim} = 1000$  мкм

Участки	$I_h$	$m_N$	$I_V$	$m_N$
I	$\lg F_N = 0,0761 \lg I_h + 3,06$	13,16	$\lg F_N = 0,0771 \lg I_V + 3,645$	12,99
II	$\lg F_N = 0,6271 \lg I_h + 7,07$	1,59	$\lg F_N = 0,6151 \lg I_V + 11,553$	1,63
III	$\lg F_N = 0,7451 \lg I_h + 8,07$	1,34	$\lg F_N = 0,7941 \lg I_V + 14,4$	1,26

Т а б л и ц а 3

Координаты точек перегиба кривой фрикционной усталости и кривых интенсивности изнашивания при  $i_{lim} = 1000$  мкм

$I$	$N_L$ , цикл	$N_G$ , цикл	$F_L$ , Н	$F_G$ , Н
—	$4,5 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^6$	330	80
$I_h$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$7,0 \cdot 10^{-9}$	325	80
$I_V$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	325	80
$I_{hF}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$8,0 \cdot 10^{-11}$	325	80
$I_{VF}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	325	80

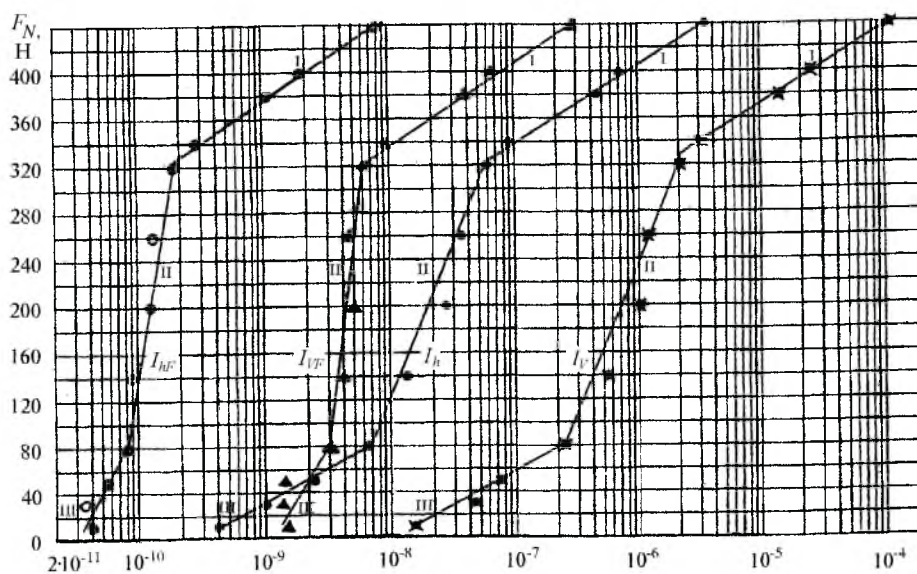


Рис. 5. Кривые интенсивности изнашивания  $I_{hF}$  [1/(цикл·Н)],  $I_{VF}$  [мм<sup>2</sup>/(цикл·Н)],  $I_h$  [1/цикл] и  $I_V$  [мм<sup>2</sup>/цикл].

Обращаясь далее к анализу интенсивности изнашивания, оцененной по формуле (1), можно установить, что для малоциклового области она изменяется в диапазоне  $I_h \geq 5,8 \cdot 10^{-8}$ , а для высокоресурсной области –  $I_h \leq 7 \cdot 10^{-9}$ ; между этими значениями имеет место область многоциклового усталости.

## Резюме

За результатами експериментальних даних побудовано криві фрикційної втоми і криві інтенсивності зношування для трибосполучення сталь 45 – полімер Ф4-ВМ. Виявлено області мало- і багатоциклової, а також високо-ресурсної втоми, при цьому параметри, що їх описують і відокремлюють, є стійкими. Вони не залежать, наприклад, від прийнятої характеристики інтенсивності зношування. Наведено феноменологічний опис процесів зношування в характерних областях.

1. Махутов Н. А., Сосновский Л. А., Марченко А. В. О построении кривой фрикционной усталости // Завод. лаб. – 1998. – № 12. – С. 36 – 39.
2. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Т. 1. – Киев: Наук. думка, 1987. – 510 с.
3. Трибофатика-95. Ежегодник / Под общ. Ред. Л. А. Сосновского. Вып. 1: Машины серии СИ для износоусталостных испытаний / Белиц Ф. Ю., Богданович А. В., Высоцкий М. С. и др. / Под. ред. М. С. Высоцкого. – Гомель, НПО “Трибофатика”, 1996. – 80 с.
4. Махутов Н. А., Богданович А. В., Андронов П. В. и др. Методы износоусталостных испытаний и их реализация на машине СИ // Завод. лаб. – 1995. – № 6. – С. 37 – 42.
5. Индман Н. Л., Ожигар Г. П., Сосновский Л. А. Конструктивные особенности машин СИ // Там же. – С. 44 – 48.
6. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования (Стандарт СТБ 1066-97). – Минск: Госстандарт, 1997. – 10 с.
7. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Бартнев Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 279 с.
9. Гороховский Г. А. Полимеры в технологии обработки металлов. – Киев: Наук. думка, 1975. – 224 с.

Поступила 09. 12. 99