

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 678.5.046:621.762

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

С.И. ИВАНОВ

(Таганрогский филиал Донского государственного технического университета),

Н.Г. СНЕЖИНА, Н.А. ХОМИЧ

(Донской государственный технический университет)

Приведены результаты экспериментальных исследований особенностей ползучести полимерных покрытий непосредственно в подшипниках скольжения при повышенной температуре.

Ключевые слова: статическая ползучесть, коэффициент типа нагружения, равенство мгновенных и равновесных модулей.

Введение. Доказано [1], что в металлополимерных узлах трения с антифрикционными композиционными фторопластсодержащими покрытиями увеличение зазора трибосопряжения вызывают два процесса: изнашивание и вязкоупругая деформация при рабочих нагрузках.

Исследуемые полимерные покрытия, сформированные на базе тканых фторопластсодержащих каркасов и аморфного матричного связующего, являются вязкоупругими материалами [2]. Их ползучесть под нагрузкой, интенсифицированной объёмной температурой окружающей среды и генерируемой при трении, вносит существенный вклад в формирование зазора трибоконтакта, жёстко определяющего ресурс последнего.

Постановка задачи. Основной задачей проведённых экспериментальных исследований являлось установление вклада процесса ползучести композиционных полимерных покрытий в формирование зазора трибосопряжения непосредственно в процессе эксплуатации подшипника, а также ряда особенностей этого процесса.

Методика исследований. Установка для исследования процесса статической ползучести покрытия (рис.1) имеет винтовое нагружающее устройство с источником усилия в виде образцового динамометра сжатия ДОСМ–3–1; электронагревательный блок, температура которого регулируется хромель-копелевой термопарой и вольтметром марки МР64–02 со специальным устройством, релейно-контактный блок и собственно нагреватель, запитанный через лабораторный трансформатор.

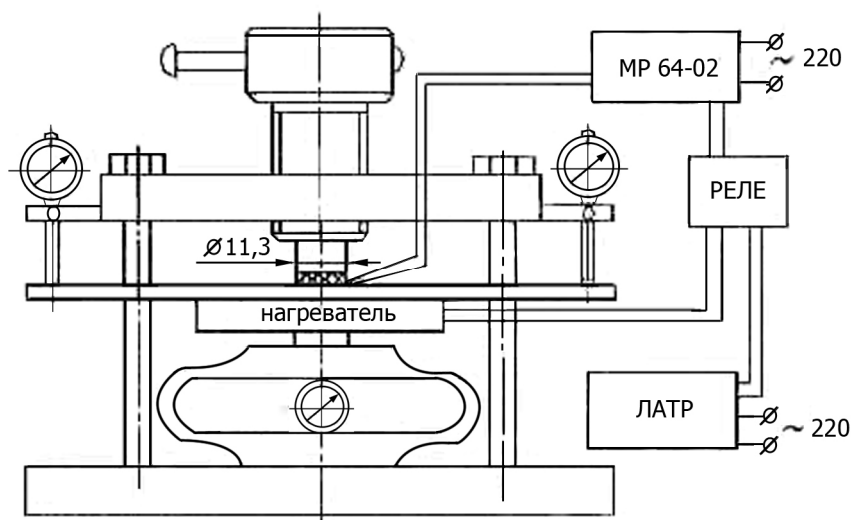


Рис.1. Схема установки для исследования ползучести

Измерение деформаций осуществлялось рычажной системой с двумя индикаторными головками типа ИГ с ценой деления 0,001 мм (ход 1 мм). Во избежание влияния перекосов измерения проводились с двух сторон рычага и за искомую величину деформации принимался средний результат. При этом учитывался знак перемещений. Выполнялось не менее трех параллельных измерений. На первом этапе определялась ползучесть композита при нагружении между плоскими поверхностями, на втором – между цилиндрическими поверхностями, соответствующими условиям работы реального подшипника.

Образцы представляли собой полувтулки $\varnothing 14 \times 10$ с покрытием. Армирующая компонента, определяющая композиционную структуру покрытия, выполнялась на основе специальных технических тканей саржевого и атласного плетения, толщиной 0,24 – 0,55 мм. Диапазон варьирования переменных составлял: для напряжений 4,9 – 98,1 МПа, для температуры 294 – 474 · 10⁻² К.

Анализ полученных результатов. Используя методику двойной параметризации [2], были получены модели первого уровня общего вида:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E_\infty} - \frac{\sigma}{E_0} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1)$$

где σ – действующие напряжения, МПа; E_0 и E_∞ – соответственно мгновенный и равновесный модули композита при сжатии, МПа; t – время, мин; τ – постоянная времени ползучести, мин.

Параметрическая идентификация моделей типа (1) для исследуемых материалов, выполненная на основе экспериментальных исследований, позволила получить регрессионные модели второго порядка:

$$E_0, E_\infty, \tau = a \cdot b^{-T^2} \cdot \sigma^{c-dT^2}, \quad (2)$$

где a, b, c, d – параметры модели; T – температура, 10⁻² К.

Параметры полученных моделей сведены в табл. 1, а графики зависимостей (2) представлены на рис.2 а, б.

Таблица 1

Примеры параметров моделей ползучести покрытий

Армирующая компонента композита	Толщина покрытия, мм	Тип пуансона	Параметры модели (1)	Параметры модели (2)			
				a	b	c	d
Шестиремизный неправильный атлас	0,47	Цилиндр	E_0	12,830	1,021	0,778	0,010
			E_∞	9,833	1,003	0,869	0,019
			τ	5,983	0,950	0,103	0,009
	0,31	Цилиндр	E_0	5,205	0,998	0,987	0,019
			E_∞	4,959	0,994	0,982	0,021
			τ	7,792	0,965	0,118	--
Саржа 1/1 с 66,9% ПТФЭ	0,29	Плоскость	E_0	4,385	1,001	1,097	0,016
			E_∞	3,565	0,986	1,142	0,022
			τ	15,949	0,965	0,248	--

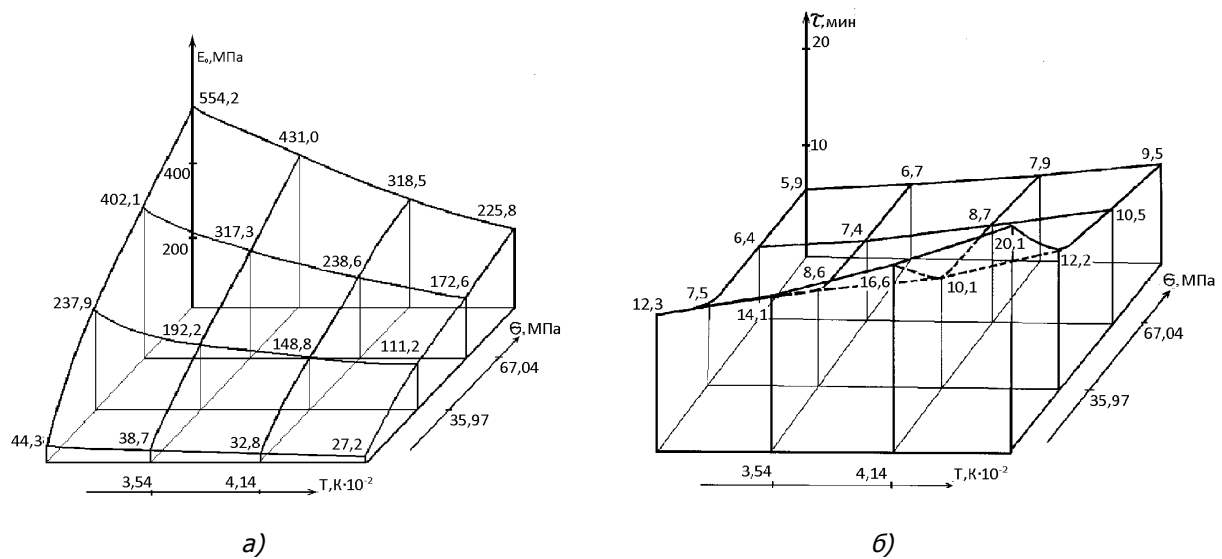


Рис. 2. Зависимость мгновенного модуля (а) и постоянной времени ползучести (б) от термосилового нагружения (саржа 1/1 с 66,9% ПТФЭ)

Следует отметить, что напряжённо-деформированное состояние вязкоупругого покрытия существенно различается при нагружении между плоскими поверхностями и цилиндрическими, имеющими место в подшипнике скольжения. Наибольшую практическую значимость имеет последний тип нагружения, так как в этом случае деформация непосредственно увеличивает зазор в подшипнике.

Геометрические ограничения при смещении коаксиальных цилиндров (вал-втулка) и характер эпюры контактных напряжений в зоне трения подшипника скольжения приводят к неравномерной деформации ползучести. Для ее оценки было выбрано смещение центра вала или его диаметрального сечения в вертикальной плоскости. В качестве характеристики типа нагружения (плоская или цилиндрическая контактная поверхность) предложен параметр $K_{ТН}$, равный отношению абсолютных деформаций при разных типах нагружения.

Результаты сравнительных экспериментальных исследований ползучести приведены в табл. 2. Таблица 2

Абсолютная вязкоупругая деформация покрытий на основе саржи, мм

Тип нагружения	Контактные напряжения, МПа						
	4,9	20,4	35,9	51,4	66,9	82,9	98,1
	Параметр $K_{ТН}$						
	1,338	1,705	1,790	1,891	1,965	2,046	2,102
Плоский	0,071	0,078	0,081	0,083	0,086	0,087	0,088
Цилиндрический	0,095	0,133	0,145	0,157	0,169	0,178	0,185

По данным табл. 2 построена адекватная эмпирическая модель зависимости параметра $K_{ТН}$ от контактных напряжений:

$$K_{ТН} = 1,075\sigma^{0,15}. \quad (3)$$

Перемещение вала в подшипнике с композиционным покрытием может быть определено как произведение выражений (1) и (3) с учётом исходной толщины покрытия H :

$$\delta(t) = 1,075 \cdot H \cdot \sigma^{1,15} \left[\frac{1}{E_0} + \left(\frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right], \quad (4)$$

где δ – абсолютная деформация покрытия в диаметральной сечении сопряжения подшипник-вал, мм.

Анализ полученных моделей и графиков показывает, что зависимости модулей E_0 и E_∞ от термостатического нагружения носят аналогичный характер, так как модели аналогичны по структуре, а их параметры близки по величине. Температура, пластифицируя матрицу, уменьшает жёсткость покрытия, а напряжения, затрудняя подвижность сегментов макромолекул, повышает её. Это характерно для всех антифрикционных покрытий данного класса [2].

В исследованном диапазоне нагружения величина контактных напряжений сжатия влияет на покрытия существенно интенсивнее температуры. Подобный факт может быть объяснён распределением фторопластовых волокон в армирующей композит ткани и полным отсутствием адгезии матричного связующего к фторопласту, что заставляет относительно легко деформировать аморфную матрицу.

Противоположное влияние напряжений и температуры приводит к экстремальной (min) зависимости постоянной времени ползучести от этих параметров (см. рис. 2, б). Напряжения определяют величину вязкоупругой деформации в начальный период нагружения, а температура – общую продолжительность процесса.

Существенный интерес представляет соотношение мгновенного и равновесного модулей покрытия, которое может быть использовано для оценки упругой и вязкой составляющих деформации при формировании зазора в трибосопряжении.

Это соотношение для исследованного покрытия на основе саржи 1/1 с 66,9% политетрафторэтиленовых волокон будет:

$$\frac{E_0}{E_\infty} = 1,230 \cdot 1,013^{-T^2} \sigma^{0,006T^2 - 0,045}, \quad (5)$$

для покрытий на основе неправильного атласа толщиной 0,55 мм:

$$\frac{E_0}{E_\infty} = 1,305 \cdot 1,017^{-T^2} \sigma^{0,01T^2 - 0,09}. \quad (6)$$

Следует отметить, что структура выражений (5) - (6) свидетельствует о наличии зоны поверхности отклика, где выход не зависит от параметров модели, поскольку влияние температуры и напряжений противоположно.

Особый интерес представляет задача для этих зависимостей, заключающаяся в отыскании области изменения значений параметров T и σ , которые обеспечат равенство этого отношения единице. Подобный факт равенства модулей $E_0 = E_\infty$ в исследованном диапазоне факторного пространства может существенно упростить инженерные расчёты.

Для нахождения этой области формализуем задачу, введя буквенные обозначения числовых параметров, входящих в (5) и (6):

$$\begin{cases} a \cdot b^{-T^2} \sigma^{cT^2 - d} = 1, \\ \text{при } \sigma \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}], \\ T \in [T_{\min}, T_{\max}]. \end{cases} \quad (7)$$

Логарифмируя уравнение (7), получаем:

$$[c \ln(\sigma) - \ln(b)]T^2 - [d \ln(\sigma) - \ln(a)] = 0 \Rightarrow T(\sigma) = \sqrt{\frac{d \ln(\sigma) - \ln(a)}{c \ln(\sigma) - \ln(b)}}. \quad (8)$$

Здесь решение уравнения (7) представлено в виде функции от параметра σ , что позволяет, изменяя σ внутри исследованного диапазона, получить все соответствующие значения температуры. То обстоятельство, что выражение, стоящее под квадратным корнем, должно быть неотрицательным, накладывает дополнительные ограничения на допустимые значения напряжений σ .

Вещественные значения температуры могут быть получены при

$$\begin{cases} d \ln(\sigma) - \ln(a) > 0 \\ c \ln(\sigma) - \ln(b) > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma > \exp(\ln(a)/d) \\ \sigma > \exp(\ln(b)/c) \end{cases} \Rightarrow \quad (9)$$

$$\Rightarrow \sigma > \max[\exp(\ln(a)/d), \exp(\ln(b)/c)] = \sigma_2,$$

$$\begin{cases} d \ln(\sigma) - \ln(a) < 0 \\ c \ln(\sigma) - \ln(b) < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma < \exp(\ln(a)/d) \\ \sigma < \exp(\ln(b)/c) \end{cases} \Rightarrow \quad (10)$$

$$\Rightarrow \sigma < \min[\exp(\ln(a)/d), \exp(\ln(b)/c)] = \sigma_1.$$

Как видно из выражения (8), зависимость температуры от напряжений, при которой удовлетворяется (7), нелинейная.

Зона равенства модулей в реально исследованном и достижимом диапазоне температур и контактных напряжений существует только у относительно толстого покрытия (0,53 – 0,56 мм), сформированного на основе неправильного атласа.

В общем случае, но особенно для этого материала, представляет интерес поведение корней уравнения (7) при совместном изменении температуры и контактных напряжений. Чтобы выяснить это, левая и правая части уравнения (7) были протабулированы в области реально исследованных изменений переменных факторов и представлены в виде графиков на рис.3.

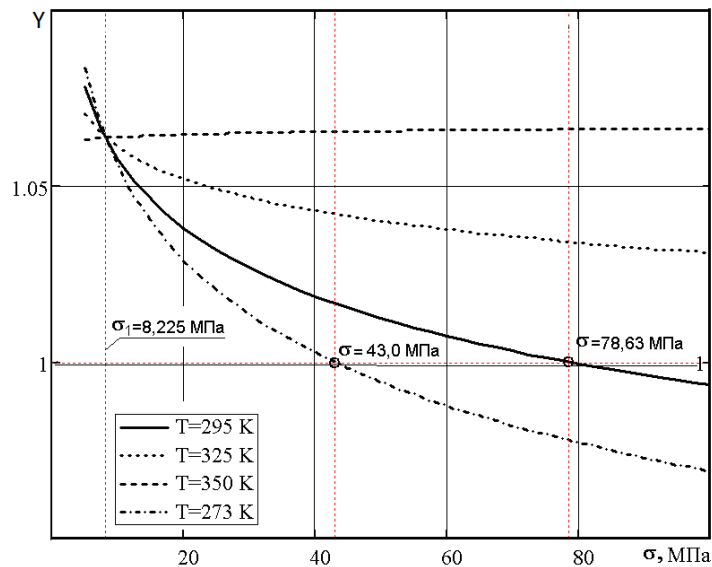


Рис. 3. Точки пересечения линий семейства корней уравнения (7) и прямой $Y = 1$, обеспечивающие равенство модулей

Для большей наглядности на графике приведено семейство кривых, представляющих левую часть уравнения (7) при различных температурах. Точка пересечения линии при $T = 295$ К с горизонтальной прямой $Y = 1$ дает величину напряжения, соответствующего температуре, при которой модули E_0 и E_∞ равны. Интересно отметить, что все кривые семейства пересекаются в точке, соответствующей ранее определенному напряжению.

Выводы. Экспериментальные исследования вязкоупругого поведения антифрикционных композиционных покрытий позволили установить, что деформация ползучести достигает 18,5%, что составляет значительную долю рабочего зазора подшипника. Кроме того, установлены основные закономерности протекания этого процесса в покрытиях разной структуры. Впервые получены регрессионные модели, описывающие ползучесть непосредственно в самом подшипнике, и позволяющие выявить особенности противоположного влияния на вязкоупругую деформацию нагрузки и температуры, вызывающую эффект равенства мгновенных и равновесных модулей полимерного покрытия.

Библиографический список

1. Белый В.А. Металлополимерные материалы и изделия / В.А. Белый, М.И. Егоренков, Л.С. Корецкий и др. – М.: Химия, 1979. – 312 с.
2. Кохановский В.А. Идентификация металлополимерных трибосистем / В.А. Кохановский // Пластические массы. – 1997. – №6. – С. 28-32.

Материал поступил в редакцию 07.12.10.

References

1. Belyi V.A. Metallopolimernye materialy i izdeliya / V.A. Belyi, M.I. Egorenkov, L.S. Koreckii i dr. – M.: Himiya, 1979. – 312 s. – In Russian.
2. Kohanovskii V.A. Identifikaciya metallopolimernyh tribosistem / V.A. Kohanovskii // Plasti-cheskie massy. – 1997. – №6. – S. 28-32. – In Russian.

STUDY OF ANTIFRICTION POLYMERIC COATING CREEP

S.I. IVANOV

(Taganrog branch of Don State Technical University),

N.G. SNEZHINA, N.A. KHOMICH

(Don State Technical University)

The field research results on the creep features of polymeric coatings directly in the sliding bearings at elevated temperatures are presented.

Keywords: static creep, type of loading factor, equation of equilibrium and instantaneous moduli.