Литература
1. ***Ермаков А.С.*** Основы моделирования механико-технологических процессов изготовления швейно-трикотажных изделий: Учебное пособие, МГУ сервиса. М., 2002. 69 с.
2. САПР в технологии машиностроения: Учебное пособие / В.Г. Митрофанов, О.Н. Калачев, А.Г. Схиртладзе и др. Ярославль; Ярославский государственный технический университет, 1995. 298 с.

УДК 678.674.002.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛЕЙ ВОССТАНОВЛЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА РЕМОНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Пашковская Т.И.,
доктор педагогических наук, профессор,
ФГОУВПО «Российский государственный университет туризма и сервиса», г. Москва,
Пашковский И.Э.,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой,
ФГОУВПО «Российский государственный университет туризма и сервиса», г. Москва,
Сергеев С.Ю., *аспирант,*
ФГОУВПО «Российский государственный университет туризма и сервиса», г. Москва.

The mathematical model for the strained state of polymeric coating in the renewed bearing unit defines normal voltage and shearing stress and assesses the value of elastic and plastic deformation in the polymer layer. The results of the tribological research determine the optimal solution of polymer composite material based on unsaturated polyester resin PN-1. The mixture enhances the performance improvement, including the tribological characteristics.

Приведена математическая модель деформированного состояния полимерного покрытия в восстановленном подшипниковом соединении, позволяющая рассчитывать нормальные и касательные напряжения, а также определять величины упругой и пластической деформаций полимерной прослойки. Приведены результаты триботехнических исследований, позволившие определить оптимальный состав полимерного композиционного материала на основе ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-1, обеспечивающий улучшение эксплуатационных, в том числе триботехнических, характеристик.

Ключевые слова: *композиционный материал, подшипниковый узел, триботехнические характеристики.*

В процессе проведенных исследований [9, 10] нами разработаны композиционные материалы с заранее заданными технологическими свойствами на основе ненасыщенных полиэфирных смол, а также уравнения, позволяющие осуществить выбор значений модуля упругости Еи, твердости НВ, содержания наполнителя Н и предопределить режим технологического процесса для получения установленных показателей при конструировании деталей из композиционных материалов.

Разработанные полимерные композиционные материалы могут использоваться при ремонте изношенных металлических подшипников скольжения или посадочных отверстий подшипников качения в корпусных деталях бытовых машин и технологического оборудования сервиса. При использовании разработанных полимерных композиционных материалов для восстановления (изготовления) деталей технологического оборудования и машин бытового назначения необходима проверка их работоспособности с учетом физико-механических характеристик.

В процессе эксплуатации полимерная про-

слойка в восстановленном соединении бытовой машина или технологического оборудования сервиса испытывает значительные статические и динамические нагрузки, воздействие температурных полей, агрессивной среды и т.д. При этом начальные реологические свойства полимерной композиции могут изменяться в значительных пределах, что непременно отразится на деформационной способности и других эксплуатационных свойствах материала. Наряду с упругой может возникнуть пластическая деформация полимера, что приведет к постепенному перемещению деталей и недопустимому увеличению зазора в соединении.

С целью подбора составов полимерных композиций для восстановления изношенных деталей, образующих номинально неподвижное соединение, был проведен комплекс исследований их физико-механических свойств, а также математическое моделирование возможного деформирования полимерного покрытия в восстановленном подшипниковом соединении [1, 3, 7]. На рис. 1 приведена расчетная схема восстановленного подшипникового соединения с использованием полимерного покрытия.

Математическая модель включает в себя следующие основные уравнения:

— статические уравнения теории упругости для плоскодеформированного состояния (массовыми силами пренебрегаем):

$$\sum_i \frac{\partial \sigma_y}{\partial x_j} = 0; \quad \sigma_y = S_{ij} + \delta_{ij} \cdot p, \qquad (1),$$

где σ_{ij} — тензор напряжений; S_{ij} — девиаторная часть тензора напряжений; p — шаровая часть тензора напряжений; x_j — координата точки среды; δ_{ij} — символ Кронекера,

— реологические уравнения сжимаемой вязкоупругой среды Бингама-Шведова:

$$S_{ij} - S_{ij}^0 = 2G \cdot \Theta \cdot \dot{\varepsilon} - \Theta \cdot \dot{S}_{ij}$$

при

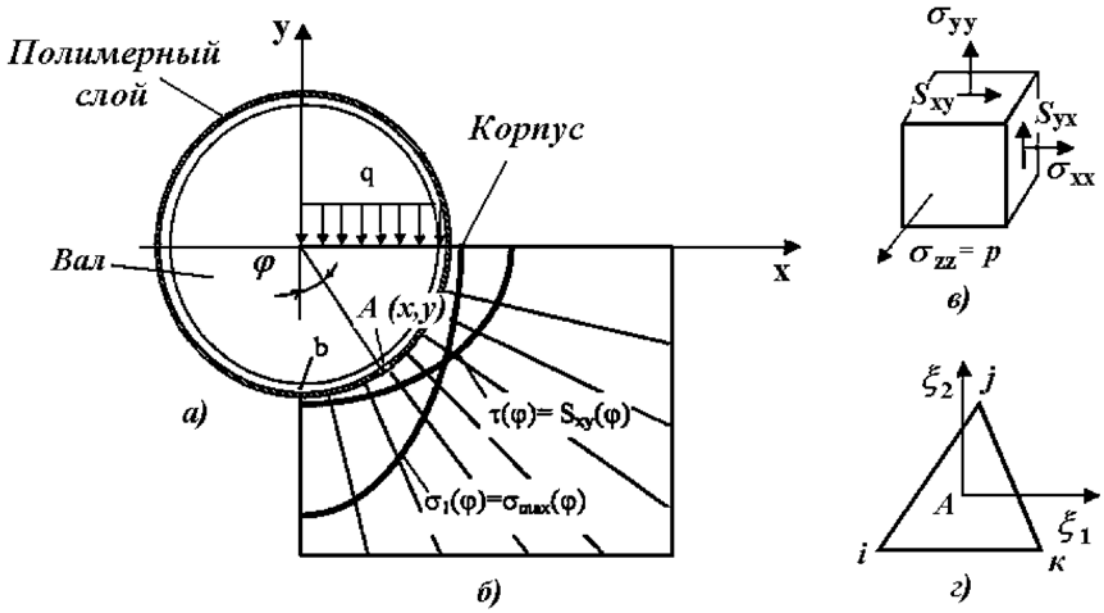


Рис. 1. *Схема восстановленного подшипникового соединения:*
а) расчетная схема подшипникового соединения; б) вид эпюр максимальных $\sigma_{max}(\varphi)$ и касательных $S_{xy}(\varphi)$ напряжений в полимерной прослойке; в) напряженное состояние точки А полимерной прослойки; г) конечно-элементарный образ точки А(x,y); q – удельное на единицу длины подшипника усилие нагружения соединения; ξ_1, ξ_2 – локальная система координат конечного элемента

$$S_{ij} \geq S_{ij}^0,\ S_{ij} = 2G \cdot \varepsilon_{ij}$$

при

$$S_{ij} \leq S_{ij}^0.$$

$$p = \lambda \cdot \varepsilon_{ij} = \lambda \cdot \varepsilon_V,$$

или в дифференциальной форме:

$$dS_{ij} = 2G \cdot \Theta \cdot d\varepsilon_{ij} - \frac{dt}{\Theta} \cdot (S_{ij} - S_{ij}^0)$$

при

$$S_{ij} \geq S_{ij}^0, \qquad (2),$$

$$dS_{ij} = 2G \cdot d\varepsilon_{ij}$$

при

$$S_{ij} \leq S_{ij}^0,\ \ dp = \lambda \cdot d\varepsilon_V = \frac{2G\nu}{1-2\nu} d\varepsilon_V,$$

где $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига;

$\Theta = \frac{\eta_0}{G}$ – время релаксации;

S_{ij} – линейный тензор скорости изменения напряжений;

$\varepsilon = 0{,}5\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$ – тензор линейных деформаций;

S_{ij}^o – предел текучести среды; η_o – ньютоновская вязкость;

$$\lambda = \frac{2G\nu}{1-2\nu} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

– параметр Ламе, характеризующий сопротивление среды объемным деформациям; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; u_i, u_j – полные смещения точки среды в направлении координатных осей; $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} = \varepsilon_V$ – объемная деформация; ε_{ij} – тензор скорости деформации,

— уравнения, описывающие параметры, входящие в состав реологических уравнений. Вязкость полимеров существенно зависит от действующих напряжений, температуры и эффективного времени воздействия на среду, поэтому её значение определено в виде:

$$lg\eta = lg\, c = lg\eta_1(I) + lg\eta_2(T) + lg\eta_3(S_u), \qquad (3),$$

где c — константа, характеризующая структуру полимерных цепей; S_u — интенсивность напряжений.

После определения неизвестных уравнения (3) получено, что

$$\eta_0(I) = \left\langle \eta_к^0 - (\eta_к^0 - \eta_н^0) exp\left[-k_0(I - I_0)\right]\right\rangle exp\left[\frac{E^*(T - T_0)}{RT_0T}\right] \qquad (4),$$

где η_0 — ньютоновская вязкость при температуре приведения T_0; k_0 — константа скорости старения; I_0 — реокинетический параметр, характеризующий длительность индукционного периода; $\eta_н^0, \eta_к^0$ — начальное и конечное значения вязкости при температуре приведения T_0; E^* — энергия активации процесса течения.

Эффективная длительность воздействия на среду, учитывающая возможность изменения температуры узла (подшипникового соединения) определена зависимостью:

$$I = exp\left(\frac{U}{RT_0}\right) \cdot \int_0^I exp\left(-\frac{U}{RT}\right) dt, \qquad (5),$$

где U — энергия активации процесса старения; t — длительность воздействия на среду.

Время релаксации, выраженное через вязкость и модуль упругости,

$$\Theta = f(I,T) =$$

$$= \frac{I}{E(T)}\{\eta_к^0\left(\eta_к^0 - \eta_н^0\right)\exp[-k_0(I - I_0)]\}\exp\left[\frac{E^*(T - T_0)}{RTT_0}\right], \qquad (6),$$

Система уравнений решалась численным методом конечных элементов с помощью пакета компьютерных программ.

Таким образом, данная методика позволила формировать исходную схему подшипникового узла, восстановленного с применением полимерных композиционных материалов, рассчитывать нормальные (осевые и главные) и касательные напряжения, а также определять величины упругой и пластической деформаций полимерной прослойки.

Наиболее важной частью исследований разработанных композиционных материалов являются триботехнические испытания с целью установления основных эксплуатационных характеристик — износостойкости, коэффициента трения и др. Для исследований применялась известные методика и оборудование [5].

Подобные исследования, как правило, про-

Таблица 1

Результаты триботехнических испытаний композиционных полимерных материалов

Характеристика	Содержание наполнителя, мас. ч.					
	0	25	40	50	75	100
Суммарный линейный износ в установившемся режиме Σh, мкм	56	39	24	27	48	78
Интенсивность изнашивания $I_h \times 10^{-8}$	2,1	1,4	0,9	1,3	2,6	3,5

водятся в два этапа [7, 8, 11]. На первом этапе нами были проведены эксперименты по определению влияния концентрации наполнителя, реализующего эффект металлоплакирования на интенсивность изнашивания композиций, имеющих наполнение: 0, 25, 50 и 100 мас. частей к массе полиэфирной смолы. В качестве материала контробразца была взята сталь 45, термообработанная до HRC 45; ше-роховатость поверхности образца *Ra = 1,25 мкм*. В результате проведенных испытаний были получены экспериментальные данные, позволившие установить кинетические зависимости суммарного линейного износа контактирующих образцов (стального и полимерных) от времени испытаний. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Анализ зависимостей $\Sigma h = \varphi(\tau)$ для различных композиций показал, что их противоизносные свойства не связаны напрямую с физико-механическими характеристиками. Например, минимальный износ наблюдался у пары «сталь — композит» с наполнением полимерного материала в 50 мас. ч.; примерно в 1,5 раза выше износ у пары, контробразцом в которой является полимерный материал без наполнителя, а самый большой износ Σh= 78 мкм наблюдался у пары, в которой композиционный материал имел наполнение 100 мас. ч. Очевидно, здесь можно говорить о том, что при использовании композиционного материала на основе полиэфирной смолы ПН-1 без наполнителя в процессе эксплуатации в зоне контакта образуются полимерные пленки переноса, способствующие хорошей работе узла и относительно невысокому износу. Наполнение в 50 мас. ч. и менее приводит, вероятно, к формированию не только полимерной, но и металлической пленки, образованной из наполнителя вследствие протекания сложных физико-химических явлений. Очевидно, что количество наполнителя играет здесь наиболее существенную роль: при наполнении полимерной композиции, обеспечивающем наилучшие триботехнические характеристики (в данном случае — 50 мас. ч.) образуется сложная по составу металлополимерная защитная пленка, снижающая величину износа. При наполнении полимерного материала, отличающимся от оптимального, наблюдается понижение износостойкости, которое связано, вероятно, с тем, что при малых концентрациях активного наполнителя его оказывается недостаточно для образования сплошной защитной металлической пленки по всей поверхности контакта; большие концентрации не могут обеспечить существования стабильной пленки, т.к. большое количество наполнителя в данном случае может сыграть роль абразива, и может разрушать только что образованную защитную пленку. Это подтверждается результатами других исследований [2, 6], проведенных на других, например, смазочных материалах. Кроме того, наполнение в 100 мас. ч. и более приводит к резкому снижению всех физико-механических характеристик (твердости, прочности и т.д.), что также оказывает отрицательное влияние на износостойкость материала. Здесь также сле-дует отметить, что при увеличении концентрации наполнителя ухудшается смачивае-мость его частиц смолой и соответственно прочность их сцепления с полимерной матрицей, что приводит к отрыву частиц и разрушению материала.

По полученным зависимостям было также определено время приработки, величина первоначального («приработочного») износа и интенсивность изнашивания материалов в установившемся режиме, которая в настоящем случае принимается в качестве критерия, определяющего работоспособность композиции. Из экспериментальных данных видно, что наилучшими эксплуатационными характеристиками (Σh) обладают композиционные материалы, степень

наполнения которых лежит в области концентраций, близкой к 50 мас. ч. от массы смолы.

На втором этапе были проведены эксперименты по определению влияния концентрации наполнителя на интенсивность изнашивания композиций, имеющих наполнение 40 и 75 мас. ч. к массе полиэфирной смолы. В результате проведенных испытаний были получены экспериментальные данные, которые позволили установить кинетические зависимости суммарного линейного износа контактирующих образцов (стального и полимерных) от времени испытаний и величины интенсивностей изнашивания I_h. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Второй этап экспериментальных исследований подтвердил и дополнил результаты первого этапа. Экстремум зависимости $I = \varphi(C)$ сдвинулся в область меньших концентраций; содержание наполнителя в композиции на основе полиэфирной смолы, обеспечивающее снижение интенсивности изнашивания в 1,7—2 раза, составляет 32—47 мас. ч. от массы смолы. К аналогичным выводам пришел В.К. Крыжановский [4], проведя исследования на эпоксидных композиционных материалах для узлов трения. Отклонение от рационального содержания наполнителя в композиции приводит к ухудшению эксплуатационных показателей материала; причины этого явления изложены выше. В результате проведенных исследований определен рациональный состав полимерного композиционного материала на основе ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-1, обеспечивающий улучшение эксплуатационных, в том числе триботехнических, характеристик.

Литература

1. ***Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П.*** Работоспособность и долговечность восстановленных деталей и сборочных единиц. Саранск: Изд-во МГУ им. Н.П. Огарева, 1993. 112 с.
2. ***Гаркунов Д.Н.*** Триботехника (износ и безызносность): Учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МСХА, 2001. 616 с.
3. ***Кравчук А.С., Майборода В.П., Уржумцев Ю.С.*** Механика полимерных и композиционных материалов: Экспериментальные и численные методы. М.: Наука, 1985. 303 с.
4. ***Крыжановский В.К.*** Износостойкие реактопласты. Л.: Химия, 1984. 120 с.
5. Метод проведения триботехнических испытаний конструкционных и смазочных материалов в режиме избирательного переноса / А.К. Прокопенко, Д.Н. Гаркунов, И.Э. Пашковский и др. М.: Минбыт РСФСР, 1984. 40 с.
6. ***Пашковский И.Э.*** Технологические методы защиты деталей бытовых машин и оборудования сервиса от водородного изнашивания: Монография. М.: МГУС, 2004. 228 с.
7. ***Пашковский И.Э., Пашковская Т.И.*** Теоретические и прикладные основы разработки металлоплакирующих композиционных материалов: Монография. М.: ГОУВПО «МГУС», 2003. 160 с.
8. ***Пашковская Т.И.*** Исследование процессов структурирования и разработка композиционных материалов на основе ненасыщенных полиэфирных смол для машин и технологического оборудования предприятий сервиса. Дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. 158 с.
9. ***Пашковская Т.И., Сергеев С.Ю.*** Исследование технологических свойств новых компо-зиционных материалов на основе ненасыщенных полиэфирных смол. Прогрессивные технологии и научные исследования в области сервиса и дизайна: Межвузовский сборник научных трудов. ГОУВПО «МГУС». М., 2006. С. 22—31.
10. ***Пашковская Т.И., Сергеев С.Ю.*** Исследование и оптимизация состава композиционных материалов на основе ненасыщенных полиэфирных смол с учетом требуемых технологических свойств // Теоретические и прикладные проблемы сервиса, 2007, № 2 (23). С. 3—9.
11. ***Пашковская Т.И., Сергеев С.Ю.*** Разработка и исследование состава композиционных материалов с заранее заданными технологическими свойствами. Современные проблемы сервиса и туризма // Материалы Всероссийской научной конференции аспирантов и молодых ученых. Ч. 2. ГОУВПО «МГУС». М., 2007. С. 130—132.