

DOI 10.5862/JEST/16

УДК 621.88.084.4

А.Я. Башкарёв, А.В. Кущенко

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СВОЙСТВА ТОНКОСЛОЙНЫХ ПОЛИАМИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

Al.B. Bashkarev, A.K. Kushchenko

DEFORMATION CHARACTERISTICS AND PROPERTIES OF THIN-LAYER POLYAMIDE COATINGS IN COMPRESSION CONNECTIONS

Соединения с натягом в узлах машин подвергаются разрушению в результате фреттинг-коррозии. Одним из способов борьбы с этим может стать применение полимерных покрытий. В работе исследовались деформативные характеристики тонкослойных полиамидных покрытий на стальной подложке. Установлены величины статического и мгновенного модуля упругости, коэффициент Пуассона, величина функции ползучести и ее зависимость от гидростатического давления.

СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ; ПОЛИАМИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ; МОДУЛЬ УПРУГОСТИ; КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА; ФУНКЦИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ.

Compression connections in machine units may be destroyed as a result of fretting corrosion. One way to combat this can be the use of polymeric polyamide coatings. The technology applying such coatings and their working conditions in compounds with interference have many features. We investigated values of static and instantaneous moduli of elasticity, Poisson's ratio, the value of creep function and its dependence on hydrostatic pressure for polyamide coatings on a steel substrate. Instantaneous modulus of elasticity for polyamide coating PA-6 is almost three orders of magnitude greater than its static value, and Poisson's ratio is 0.5. Creep function of polyamide coatings decreases with increasing hydrostatic pressure.

COMPRESSION CONNECTIONS; POLYAMIDE COATINGS; ELASTICITY MODULUS; POISSON'S RATIO; CREEP FUNCTION.

Расчет напряженного состояния конструкций и деталей машин, изготовленных из полимерных материалов, проводится по методикам, базирующимся на основных положениях теории упругости. При этом фактор времени и скорость изменения нагрузки практически не рассматриваются. Применительно к металлам такие методики дают весьма достоверные результаты.

В широкой инженерной практике они же используются и для расчетов изделий из полимерных материалов, при этом зависимость их деформации от времени обычно учитывается «условными» модулями деформации, значения которых зависят от времени действия нагрузки. Однако такой подход во многих случаях оказывается нерезультативным. Многие конструкци-

онные полимерные материалы, относящиеся к эластомерам, например полиамиды, имеют коэффициент Пуассона, близкий к 0,5 [1]. С точки зрения классической теории упругости эти материалы являются практически несжимаемыми. На самом деле они достаточно легко деформируются за счет пластических деформаций, происходящих без изменения объема. Если деформация происходит без перемещения материала, т. е. пластических сдвигов, то в случае полимеров она может происходить только благодаря изменению межмолекулярных расстояний, что требует значительных усилий, соизмеримых с усилиями деформации металлических надмолекулярных структур. При этом такую деформацию можно считать почти идеально упругой.

Таким образом, эластомеры деформируются одновременно как за счет перераспределения своего объема, так и вследствие изменения межмолекулярных и межатомных расстояний и расстояний между надмолекулярными образованиями. Как правило, при использовании стандартных методик и образцов величина последних оказывается на несколько порядков меньше. Поэтому при расчете модуля деформации учитываются только те деформации, которые происходят во времени при перераспределении материала.

Для условий, при которых полимеры не могут перераспределять свой объем, такие характеристики физико-механических свойств оказываются для расчетов бесполезными. В частности, это относится к тонкослойным полимерным покрытиям. Существующие адгезионные связи между полимерами и металлическими подложками исключают возможность протекания так называемых эластичных деформаций. Поэтому для расчетов их напряженного состояния деформационные характеристики необходимо определять по специальным методикам, исключающим перераспределение полимера. Особенно это важно для композитов, когда в полимерную матрицу вводятся различные наполнители.

В данной статье предлагается такая методика. С ее помощью получен ряд физико-механических характеристик некоторых марок полиамидов, применение которых может быть перспективно в виде тонкослойных покрытий.

Среди полиамидных материалов наименьший модуль упругости имеют смолы ПА-54,

ПА-66/6. По некоторым данным [2] его нижний предел может достигать до 400 МПа. Однако деформативные свойства полиамидов существенно зависят от технологии их переработки, поскольку ее режимы определяют их надмолекулярные структуры, степень термодеструкции и т. д.

Процесс нанесения тонкослойных покрытий из полиамидов с точки зрения термо-временного воздействия на материал имеет свою специфику [3]. Как правило, здесь используются более высокие температуры, чем, например, при изготовлении деталей методами литья, но продолжительность теплового воздействия оказывается значительно меньшей. Большое влияние оказывают также кислород воздуха и структурообразующее воздействие металлической подложки.

Таким образом, проводить измерение и исследование деформативных характеристик полиамидов применительно к тонкослойным покрытиям целесообразно только на образцах, сформированных на металлической основе при идентичных технологических режимах.

В связи с этим была использована методика, согласно которой значения коэффициентов Пуассона и квазистатического модуля упругости устанавливались по результатам испытания на металлополимерных образцах, изображенных на рис. 1. Полиамидное покрытие наносилось на их торцы, которыми они после его оплавления соединялись. После остывания и удаления наплывов отвержденного полимера образцы нагружались по схеме, также изображенной на рис. 1.

Наличие адгезионных связей и малая величина бокового зазора S_0 исключали возможность перемещения «запертого» материала в поперечном направлении, поэтому деформация слоя при нагружении образцов происходила за счет изменения объема материала. Устранялось влияние торцевого трения, которое имеет место при испытании на сжатие монолитных образцов [1, 2]. Деформация полимерного слоя под действующей нагрузкой измерялась с помощью инструментального микроскопа. Абсолютная погрешность измерения деформации составляла 0,6 мкм.

Методика экспериментальных исследований базировалась на следующих теоретических обоснованиях.

Перемещения упругого слоя, прочно соединенного с жесткими штампами под действием сжимающей силы P_1 , могут быть найдены решением осесимметричной задачи методами теории упругости [4, 5]. Для этого используется бигармоническая функция перемещений $\psi = \psi(r, z)$, удовлетворяющая граничным условиям задачи и условию

$$\nabla^2 \nabla^2 \psi = 0. \quad (1)$$

При этом подходе искомые величины напряжений и перемещений, выраженные через бигармоническую функцию ψ , определяются следующими соотношениями:

$$2Gu = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z}; \quad (2)$$

$$Gw = 2(1 - \mu) \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \mu) \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right], \quad (4)$$

где u — радиальные перемещения; w — осевые перемещения; σ_z — нормальные напряжения сжатия; ∇^2 — оператор Лапласа; G — модуль сдвига материала покрытия; μ — коэффициент Пуассона.

Условие равновесия полимерного слоя под действием сжимающей нагрузки P_1 имеет вид

$$P_1 = \int_0^R \int_0^{2\pi} r \sigma_z dr d\theta, \quad (5)$$

где r — радиальная координата, θ — угловая координата.

Если функцию перемещений ψ принять в виде суммы полиномов Лежандра третьей степени [4]

$$\psi = a(2z^3 - 3r^2z) + b(r^2z + z^3), \quad (6)$$

и выполнить необходимые преобразования с учетом того, что при $r = R, u = 0$, то выражение для расчета величины модуля упругости полиамида может быть записано так:

$$E = \frac{P_1}{\pi R^2} \frac{(1 - 2\mu)(1 + \mu)h}{(1 - \mu)S}. \quad (7)$$

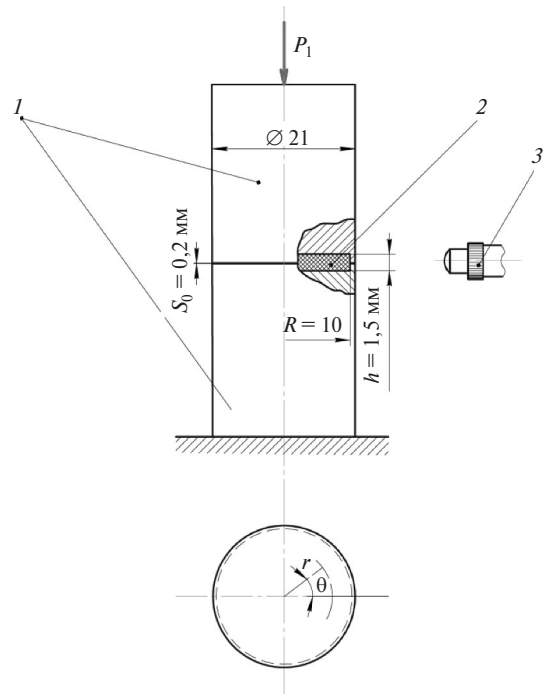


Рис. 1. Испытание полимерного слоя на сжатие: 1 — стальные штампы; 2 — полимерный слой; 3 — микроскоп

Таким образом, величина модуля упругости E выражается через толщину слоя полиамида h , размер образцов R , продольное сближение образцов S и коэффициент Пуассона μ .

Для определения значений коэффициента Пуассона были проведены испытания металлополимерных образцов при простом сдвиге (рис. 2).

В этом случае касательные напряжения, возникающие в полимерном слое под действием сдвигающей нагрузки P_2 , рассчитываются по формуле

$$\tau = \frac{P_2}{F_{\text{сд}}} = G \gamma = \frac{E}{2(1 + \mu)} \frac{l}{H}, \quad (8)$$

где l — смещение одной поверхности полимерного слоя толщиной H относительно другой; $F_{\text{сд}}$ — площадь сдвига полимерного покрытия.

Отсюда

$$E = \frac{2P_2 H (1 + \mu)}{l F_{\text{сд}}}. \quad (9)$$

Покрyтия в образцах для испытаний на сжатие и сдвиг были получены с помощью одной

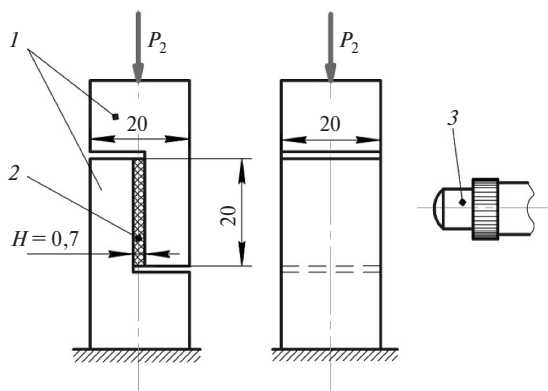


Рис. 2. Испытание полимерного слоя на сдвиг:
1 — стальные пластины; 2 — слой полимера;
3 — измерительный микроскоп

и той же полимерной композиции при идентичной технологии нанесения. Поэтому здесь справедливо приравнять правые и левые части выражений (5) и (6), то есть

$$\frac{P_1 F_{сд} l h}{P_2 \pi R^2 S H} (1 - 2\mu) = 2(1 - \mu). \quad (10)$$

Тогда выражение для коэффициента Пуассона может быть записано в виде

$$\mu = \frac{a - 2}{2(a - 1)}, \quad (11)$$

где $a = \frac{P_1 F_{сд} \gamma}{\pi R^2 P_2 \varepsilon}$; $\varepsilon = \frac{S}{h}$.

После подстановки выражения (11) для коэффициента Пуассона в (9) можно определить величину модуля упругости материала покрытия.

В соответствии с разработанной методикой были определены значения модуля упругости и коэффициента Пуассона для покрытий на ос-

нове полиамидных смол ПА-66/6, ПА-68 и поликапроамида применительно к условиям их работы в тонкослойных покрытиях соединений с натягом.

При измерении модуля упругости полимерных материалов особое значение имеет время действия нагрузки. В проведенных опытах деформация измерялась через 5 минут после приложения или очередного изменения нагрузки. Таким образом, был установлен квазистатический модуль деформации, который удобен для сравнительной оценки свойств полимеров.

Полученные значения характеристик представлены в таблице.

При работе в соединениях с натягом полимерное покрытие находится в сложном напряженном состоянии, которое определяется контактным давлением со стороны металлических деталей и касательными напряжениями от сдвигающей осевой нагрузки и приложенного внешнего момента. Это создает особенности, требующие проверки деформативных характеристик покрытия в этих условиях.

Было проведено исследование деформативных свойств полиамидных покрытий на специальных кольцевых образцах, изображенных на рис. 3. Образец состоит из полого рабочего цилиндра 1, находящегося между двумя ограничивающими цилиндрами — наружным 2 и внутренним 3. Цилиндры с помощью полиамидного слоя 4 соединяются с пластиной 5.

Подготовка образцов к испытаниям проводилась следующим способом. На торец рабочего цилиндра 1 погружением его в нагретом состоянии в мелкодисперсный порошок наносился полимерный слой. После отверждения он протачивался под наружный и внутренний диаметры цилиндра 1, на который после этого по-

Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона полиамидных покрытий

Материал покрытия	Модуль упругости E, МПа		Коэффициент Пуассона μ	
	Среднее значение	Доверительный интервал $\alpha = 0,95$	Среднее значение	Доверительный интервал $\alpha = 0,95$
Полиамид ПА-66/6	530	49	0,490	0,003
Полиамид ПА-68	1245	84	0,493	0,004
Поликапроамид	1425	68	0,493	0,003

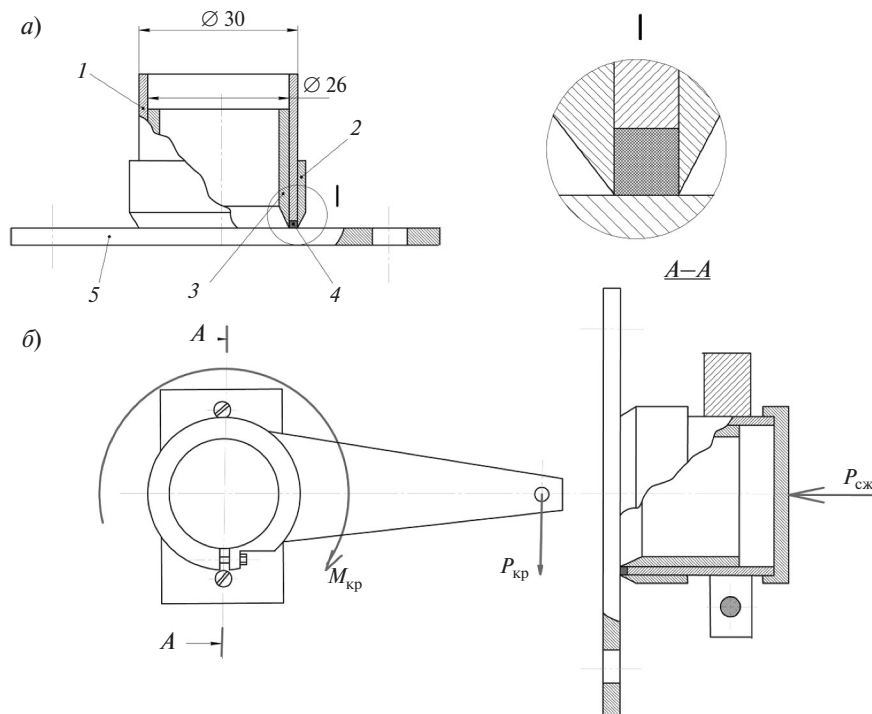


Рис. 3. Исследование деформации полимерного покрытия при нагружении кольцевого слоя крутящим моментом и осевой силой (*a* — общий вид образца; *б* — нагружение образца):

1 — рабочий цилиндр; 2 — наружный ограничивающий цилиндр; 3 — внутренний ограничивающий цилиндр; 4 — полимерный слой; 5 — стальная пластина

скользящей посадке надевались цилиндры 2 и 3. Предварительно обезжиренная пластина 5 нагревалась до температуры 300 °С. Цилиндры устанавливались на нее полимерным слоем, который, оплавляясь за счет ее тепла, после охлаждения соединялся с ней силами адгезии. Специальным калибрующим упором при установке цилиндров обеспечивалась постоянная толщина слоя — 1,0 мм.

Нагружение подготовленного к испытаниям образца осуществлялось по схеме, изображенной на рис. 3, б. Нагружающее устройство создавало между пластиной 5 и рабочим цилиндром 1 постоянный крутящий момент $M_{кр}$, который передавался через полимерный слой. Одновременно к образцу прикладывалась сжимающая нагрузка $P_{сж}$, создающая в адгезионном соединении нормальные напряжения. Таким образом, полимерное покрытие находилось под воздействием сжимающего давления и сдвигающей нагрузки. Устройство позволяло вести запись во времени угловой деформации поли-

мерного слоя. Наружный 2 и внутренний 3 цилиндры исключали возможность перемещения в радиальном направлении.

Использование кольцевой формы образцов и описанной методики их нагружения позволило довольно просто создавать достаточно большие напряжения сравнительно малыми статическими нагрузками. В результате удавалось в течение нескольких часов стабильно сохранять задаваемое напряженное состояние полимерного слоя и записывать его деформации. Кольцевая форма нагружаемого полимерного слоя практически исключала влияние концентраторов напряжений [6], что по сравнению с другими формами приближает величину наибольших напряжений к их расчетным значениям, а при толщине стенки кольца менее 0,1 диаметра можно с достаточной точностью допустить прямолинейный закон распределения их по радиусу. Использование данной методики основывается на том, что значение коэффициента Пуассона полимерных материалов установлено в ранее проведенных опытах.

Теоретически перемещения упругого слоя, прочно соединенного с жесткими штампами под действием равнодействующей силы Q , могут быть найдены, как и в предыдущем случае, с учетом граничных условий:

$$\text{при } r = R_1 \text{ и } r = R_2, u = 0.$$

После проведения преобразований с учетом того, что при заданной схеме нагружения нормальные напряжения сжатия не зависят от координаты r , получаем

$$\sigma_r = \frac{Q\mu}{\pi(R_2^2 - R_1^2)(1-\mu)}; \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r; \quad (13)$$

$$\sigma_z = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}. \quad (14)$$

Максимальные касательные напряжения $\tau_{z\theta}$, возникающие при действии крутящего момента, равны

$$\tau_{z\theta}(R_2) = \frac{2M_{\text{кр}}R_2}{\pi(R_2^4 - R_1^4)}.$$

При одновременном действии сжимающей силы и крутящего момента девиатор напряжений имеет вид

$$S_{ij} = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_r(2\mu-1)}{3\mu} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_r(2\mu-1)}{3\mu} & 0 \\ 0 & \tau_{r\theta} & \frac{2\sigma_r(1-2\mu)}{3\mu} \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Девиатор перемещений с учетом того, что полимер работает без возможности бокового расширения, равен

$$e_{ij} = \begin{vmatrix} \frac{2}{3}\varepsilon_r & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\varepsilon_r & \varepsilon_{\theta z} \\ 0 & \varepsilon_{z\theta} & -\frac{1}{3}\varepsilon_r \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Следовательно, при условии линейной вязкоупругости для заданной схемы нагружения справедлива зависимость

$$\varepsilon_{z\theta} = \frac{\tau_{z\theta}}{2G} \left[1 + \int_0^{t_p} K_c(t) dt \right], \quad (17)$$

где t_p — заданный момент времени; $K_c(t)$ — функция скорости ползучести.

Шаровой тензор напряженного состояния полимерного слоя:

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{3}\sigma_r \frac{1+\mu}{1-\mu}. \quad (18)$$

Поскольку $\mu \approx 0,5$, то с учетом (12):

$$\tilde{\sigma} = \sigma_r = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}. \quad (19)$$

Функцию скорости ползучести $K_c(t)$ согласно рекомендациям, приведенным в [4], целесообразно искать в виде

$$K_c(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_1^\infty \frac{[A\Gamma(\alpha)]^n}{\Gamma(\alpha n)} t^{\alpha n}, \quad (20)$$

где A , α и β — постоянные, зависящие от физико-механических свойств материала; $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция Эйлера [11].

При выполнении экспериментальных исследований использовалась полиамидная смола ПА-66/6, которая, как было отмечено выше, имеет наиболее низкий модуль упругости. Предварительно была установлена ее адгезионная прочность, а затем диапазон касательных напряжений $\tau_{z\theta}$, при котором имеет место линейная область деформирования полимерного слоя, т. е. когда кривые податливости $\frac{\varepsilon_{z\theta}}{\tau_{z\theta}}$ совпадают. Опыты показали, что при $\tau_{z\theta} < 0,3[\tau]$ это условие всегда выполняется.

Результаты проведенных исследований при различных значениях сжимающей нагрузки показали, что мгновенный модуль упругости полиамидного слоя в диапазоне до 100 МПа практически не зависит от величины гидростатического давления.

Для слоя из полиамидной смолы ПА-66/6 мгновенный модуль сдвига оказался равен $G = 6,0 \cdot 10^4$ МПа, а так как $E = 2G(1+\mu)$, то при $\mu = 0,49$ имеем $E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа.

В процессе дальнейших экспериментальных исследований проводилось измерение угловой деформации полимерного слоя во времени при действии крутящего момента.

Одна из полученных таким образом кривых приведена на рис. 4. Для определения мгновенного модуля сдвига G_0 , постоянных A , α и β эти же кривые строились в логарифмических координатах, что давало возможность определить их значения, сравнивая экспериментальные и теоретические кривые по методике, предложенной Б.А. Колтуновым [8].

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что ползучесть покрытия с увеличением давления заметно уменьшается. Таким образом, функция ползучести $K_c(t)$ для него зависит от величины гидростатического давления.

Параметры функции $K_c(t)$ при отсутствии давления:

$$A = 0,0117; \quad \alpha = 0,075; \quad \beta = 0,05.$$

Используя эти значения, можно рассчитать деформацию материала при любой продолжительности действия нагрузки.

Сравнение мгновенного модуля упругости с определенным ранее квазистатическим модулем упругости смолы ПА-66/6 показывает, что значение первого из них почти на три порядка больше. Таким образом, полиамидное покрытие при динамических нагрузках будет деформироваться как, например, слой бронзы того же размера. Причем это относится к самому податливому полиамиду. Деформация смолы ПА-68 и поликапроамида, как показали измерения, в 2,5–3 раза меньше. Следовательно, покрытие из этих материалов по своим мгновенным деформационным качествам приближается к стальным.

Особого внимания заслуживает характер изменения деформации покрытий при постоянных или длительных нагрузках. Как отмечалось выше, этот процесс существенно зависит от величины гидростатического давления, которое в наиболее нагруженной контактной зоне сопрягаемых деталей достигает у тонкослойного полиамидного

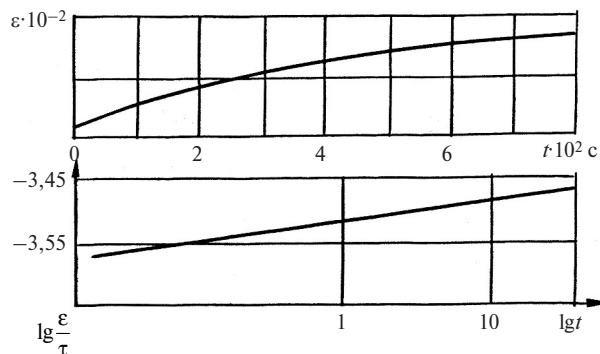


Рис. 4. Деформация полиамидного покрытия во времени

покрытия величины, близкой к значениям максимальных контактных давлений [9, 10]. Рассматриваемое свойство полиамидных материалов подтверждает их перспективность для работы в тяжело нагруженных узлах, например в соединениях деталей с натягом.

Выводы

Разработанная методика измерений позволила установить значения величины модуля упругости и коэффициента Пуассона для полимерных материалов, наиболее перспективных для использования в виде тонкослойных покрытий при ремонте соединений с натягом в узлах строительных машин.

Экспериментально подтверждено, что значения коэффициента Пуассона для полиамидного слоя, работающего в условиях соединения с натягом, близки к 0,5.

Мгновенный модуль упругости полиамидов почти на три порядка больше их квазистатических значений.

Функция ползучести для полиамидов уменьшается с ростом гидростатического давления.

Характер изменения деформации полиамидных покрытий при постоянных или длительных нагрузках подтверждает их перспективность для работы в тяжело нагруженных узлах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брехова В.Д. Исследование коэффициента Пуассона при сжатии некоторых кристаллических полимеров под нагрузкой // Механика полимеров. 1965. №4. С. 43–46.
2. Шапов И.В. Исследование коэффициента Пуассона полиэтилена ПНД при малых деформациях

- и длительном пребывании под нагрузкой // Механика полимеров. 1965. №3, С. 52–56.
3. Нелсон У.Е. Технология пластмасс на основе полиамидов. М.:Химия, 1979. 255 с.
4. Тимошенко С.Я., Гудьяр Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

5. **Казакевич Г.С., Рудской А.И.** Механика сплошных сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 263 с.

6. **Фрейдин А.С.** Прочность и долговечность клеевых соединений. М.: Химия, 1971. 272 с.

7. **Билик М.М., Слюдикова Н.Н.** Антифрикционные свойства некоторых полимерных материалов в монолите и тонкослойном покрытии // Сб.: Полимеры в промышленности. Гомель, 1968. С. 26–32.

8. **Колтунов М.А.** Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976. 277 с.

9. **Панасюк В.В., Теплый М.И.** Определение контактных напряжений при внутреннем соприкосновении цилиндрических тел // Прикладная механика. 1971. Т. VII. Вып. 4. С. 3–8.

10. **Милов А.Б.** О вычислении контактной жесткости цилиндрических соединений // Проблемы прочности. 1973. №1. С. 70–72.

REFERENCES

1. **Brekhova V.D.** Issledovaniye koeffitsiyenta Puasona pri szhatii nekotorykh kristallicheskikh polimerov pod nagruzkoy. [Studies of the Poisson compressive some crystalline polymers under load]. *Mekhanika polimerov*. 1965. №4. S. 43–46. (rus.)

2. **Shamov I.V.** Issledovaniye koeffitsiyenta Puasona polietilena PND pri malykh deformatsiyakh i dlitelnom prebyvanii pod nagruzkoy. [Studies of the Poisson polyethylene HDPE with small deformation and long stay under the load]. *Mekhanika polimerov*. 1965. №3. S. 52–56. (rus.)

3. **Nelson U.Ye.** Tekhnologiya plastmass na osnove poliamidov. [Technology based plastics polyamides]. М.: Khimiya, 1979. 255 s. (rus.)

4. **Timoshenko S.Ya., Gudyar Dzh.** Teoriya uprugosti. [The theory of elasticity]. М.: Nauka, 1975. 576 s. (rus.)

5. **Kazakevich G.S., Rudskoy A.I.** Mekhanika sploshnykh sred. [Continuum Mechanics], СПб.: Изд-во СПб-ГПУ, 2003. 263 s. (rus.)

6. **Freydin A.S.** Prochnost i dolgovechnost kleyevykh soyedineniy. [The strength and durability of adhesive joints]. М.: Khimiya, 1971. 272 s. (rus.)

7. **Bilik M.M., Slyudikova N.N.** Antifriktsionnyye svoystva nekotorykh polimernykh materialov v monolite i tonkosloynnom pokrytii. [Anti-friction properties of some polymer materials in the monolith, and thin-film coating]. Сб.: *Polimery v promyshlennosti*. Gornel, 1968, S. 26–32. (rus.)

8. **Koltunov M.A.** Polzuchest i relaksatsiya. [Creep and relaxation]. М.: Vysshaya shkola, 1976. 277 s. (rus.)

9. **Panasyuk V.V., Teplyy M.I.** Opredeleniye kontaktnykh napryazheniy pri vnutrennem soprikosnovenii tsilindricheskikh tel. [Determination of contact stress at the inner contact cylindrical bodies]. *Prikladnaya mekhanika*. 1971. Т. VII. Vyp.4. S. 3–8. (rus.)

10. **Milov A.B.** O vychislenii kontaktnoy zhestkosti tsilindricheskikh soyedineniy. [The computation of the contact stiffness of cylindrical connections]. *Problemy prochnosti*. 1973. №1. S. 70–72. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАШКАРЁВ Альберт Яковлевич — доктор технических наук профессор, советник при ректорате Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: bashkarev@spbstu.ru

КУЩЕНКО Александра Владимировна — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru

AUTHORS

BASHKAREV Albert Ya. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: bashkarev@spbstu.ru

KUSHCHENKO Aleksandra K. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru