

УДК 620.17

С.В. Словиков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИУРЕТАНА

Предложен метод экспериментального исследования диссипативных и прочностных свойств полиуретана. Отработана методика проведения эксперимента при различных температурах в условиях динамического циклического сжатия, проведены испытания по определению упругих и вязкостных механических характеристик полиуретановых втулок, изготовленных из разных химических основ.

Представлены результаты исследований полиуретановых втулок, произведенных на основе различных изоцианатов: толуолдиизоцианата 80, 4.4'-дифенилметандиизоцианата и 1.5-нафтилендиизоцианата. Автором получены значения вязкоупругих и прочностных характеристик различных типов полиуретана при нормальной и пониженной температурах. Выполнен сравнительный анализ механического поведения различных полиуретанов в зависимости от изменения температуры.

При анализе механического поведения полиуретановых втулок построены температурные диаграммы предела прочности, динамического модуля упругости, коэффициента потерь и дана характеристика изменения прочностных, деформационных и диссипативных свойств с понижением температуры эксплуатации.

Ключевые слова: механические испытания, полиуретан, модуль упругости, модуль вязкости, динамический механический анализ, температурные зависимости.

S.V. Slovikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

IMPROVEMENT OF THE EXPERIMENTAL METHOD OF RESEARCH AND THE STRENGTH OF THE DISSIPATIVE POLYURETHANE

A method of experimental research strength and dissipative properties the polyurethane is proposed. The technique of the experiment at different temperatures under conditions of dynamic cyclic compression, and tests to determine the elastic and viscous mechanical properties of polyurethane bushings made of different chemical bases.

The author presents the results of researches of polyurethane bushings produced from various isocyanates: Toluene diisocyanate 4.4'-Diphenylmethane diisocyanate и 1,5-naphthylene diisocyanate.

The results of the dependencies viscoelastic and strength characteristics of various types of the polyurethane on temperature were obtained. A comparative analysis of the mechanical behavior of different polyurethanes according to the temperature change is carried out.

In the analysis of the mechanical behavior of polyurethane bushings are built temperature chart strength, dynamic modulus of elasticity, loss factor and characteristics of changes in strength, deformation and dissipative properties with decreasing temperature operation.

Keywords: mechanical tests, polyurethane, elastic modulus, the modulus of viscosity, dynamic mechanical analysis, the temperature dependence.

Для отработки и совершенствования технологических процессов изготовления полиуретана, придания ему необходимых механических свойств важно исследовать механическое поведение материала в условиях, наиболее близко приближающихся к эксплуатационным. Это требует нового подхода и разработки нестандартных методик исследований [1, 2, 3].

Исследование не просто образца, а конструкции, например, в форме втулки, позволяет более точно прогнозировать способность данного элемента выполнять свои функции. Для производителей продукции интерес представляет исследование механического поведения полиуретана, выполненного по различным системам. Изучение того, каким образом используемая система меняет механические динамические, диссипативные и прочностные свойства полиуретана в широком диапазоне эксплуатационных температур. Это в дальнейшем и определяет выбор и использование той или иной системы при изготовлении полиуретана.

Исследуемая полиуретановая втулка должна выдерживать высокие динамические нагрузки при достаточно низких температурах окружающего воздуха (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), обладать достаточной прочностью и рассеивать часть энергии.

Диссипативные свойства материала возможно определить из испытания на основе динамического механического анализа (ДМА), состоящего из нескольких циклов нагрузка-разгрузка. В результате данного опыта реализуется петля гистерезиса на диаграмме «напряжение – деформация». Ширина петли (угол сдвига между напряжением и деформацией) характеризует демпфирующие свойства материала, то есть способность рассеивать механическую энергию [4, 5].

Таким образом, в ходе динамического опыта определяются следующие характеристики:

– динамический модуль (E^*) при динамическом одноосном напряженно-деформированном состоянии

$$E^* = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ – размах напряжения; $\Delta\varepsilon$ – размах деформации;

– угол сдвига фазы между напряжением и деформацией (φ_E) при одноосном напряженно-деформированном состоянии:

$$\varphi_E = \arcsin\left(\frac{a}{\Delta u}\right), \quad (2)$$

где a – ширина петли гистерезиса при среднем напряжении; Δu – размах деформации;

– модуль упругости динамический (пропорционален жесткости вязкоупругого материала)

$$E' = E^* \cos\varphi_E, \quad (3)$$

– модуль вязкости (пропорционален потерям энергии в процессе одного цикла нагружения из-за трения и внешних перемещений)

$$E'' = E^* \sin\varphi_E, \quad (4)$$

– коэффициент потерь k

$$k = \operatorname{tg}\varphi_E. \quad (5)$$

Прочностные и деформационные свойства определяются путем проведения испытания на сжатие до 25 % от первоначальной высоты в соответствии с ГОСТ 4651–82.

Применительно к полиуретановым втулкам данное испытание выполнялось по следующей методике:

– выдержка при заданной температуре испытания образца в течение двух часов;

– выполнение 15 циклов динамического сжатия полиуретановой втулки с частотой 0,5 Гц и размахом деформации в пределах упругого участка диаграммы «напряжение-деформация» и построение петель гистерезиса при скорости деформирования $0,01 \text{ с}^{-1}$;

– сжатие образца со скоростью $0,01 \text{ с}^{-1}$ до деформации 25 % от первоначальной высоты втулки;

– определение параметров: угол сдвига фазы, коэффициент потерь, максимальное напряжение сжатия, модуль упругости (динамиче-

ский), модуль вязкости (динамический), наличие разрушение материала или видимых повреждений образца при деформации 25 %.

– заполнение протокола испытания в соответствии с таблицей.

Дата испытания: _____

Марка материала _____

Температура испытания, °С, _____

Но- мер обр.	Максималь- ное напряже- ние сжатия (σ_v), МПа	Модуль упругости (динамиче- ский), МПа	Модуль вязкости (динамиче- ский), МПа	Угол сдви- га фазы, град.	Кoeffи- циент по- терь	Разруше- ние при деформа- ции 25 %, да/нет
1	2	3	4	5	6	7

В ходе проведенных экспериментальных работ исследовались втулки из полиуретана, выполненные из трех химических систем:

- толуолдиизоцианат 80 (ТДИ);
- 4,4'-дифенилметандиизоцианат (МДИ);
- 1,5-нафтилендиизоцианат (НДИ).

Исследование выполнялось на базе оборудования Центра экспериментальной механики ПНИПУ[4]. Испытания проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5882 с использованием высокоточного независимого датчика нагрузки типа Drop-through, климатической камеры SFL 3119-407 и видеоэкстензометра Instron AVE. Погрешность измерения нагрузки и перемещения не превышала 0,5 % от измеренной величины.

В результате динамического испытания на циклическое сжатие втулок из полиуретана ТДИ, МДИ и НДИ при температуре 20 °С получались петли гистерезиса, представленные на рис. 1.

Изменение прочностных свойств полиуретана под воздействием различной температуры характеризуется диаграммами предела прочности (максимальное напряжение сжатия). В результате проведенных экспериментальных исследований мы наблюдаем, что предел прочности в той или иной степени растет с понижением температуры (рис. 2).

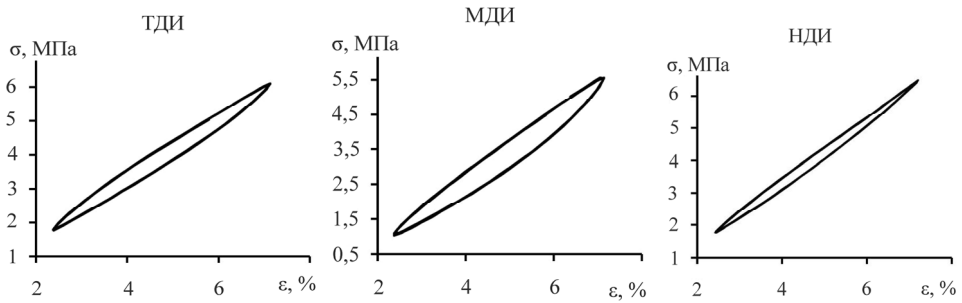


Рис. 1. Петли гистерезиса для исследуемых типов полиуретана

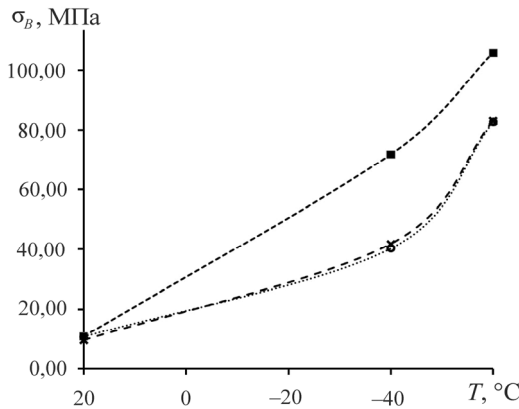


Рис. 2. Зависимость предела прочности полиуретановой втулки от температуры:

■ МДИ; × ТДИ; ● НДИ

Всем типам полиуретана свойственно повышение предела прочности с понижением температуры до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в несколько раз: для ТДИ – в 8,7 раз; для МДИ – в 9,8 раз; для НДИ – в 7,8 раз.

Деформационные свойства всех исследуемых типов полиуретановых втулок соответствуют требованиями стандарта, то есть все образцы выдержали деформацию в 25 %.

Необходимо отметить, что анализа статических прочностных и деформационных характеристик недостаточно, так как важную роль для исследуемой конструкции втулки играют динамические вязкостные характеристики.

Для сравнительного анализа графики зависимостей динамических модулей упругости от температуры были сведены на одной диаграмме и представлены на рис. 3.

Для всех типов полиуретана с понижением температуры до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ характерно повышение динамического модуля упругости. Полиуретан, выполненный на основе системы НДИ, обладает наиболее ярко выраженным возрастанием модуля в результате понижения температуры до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При эксплуатации в таких температурных условиях это может приводить к быстрому износу сопряженных с втулкой деталей, так как при наличии между сопряженными деталями сил трения, с ростом модуля упругости одной из них (или у обеих) износ деталей увеличивается в результате увеличения сил взаимодействия между ними.

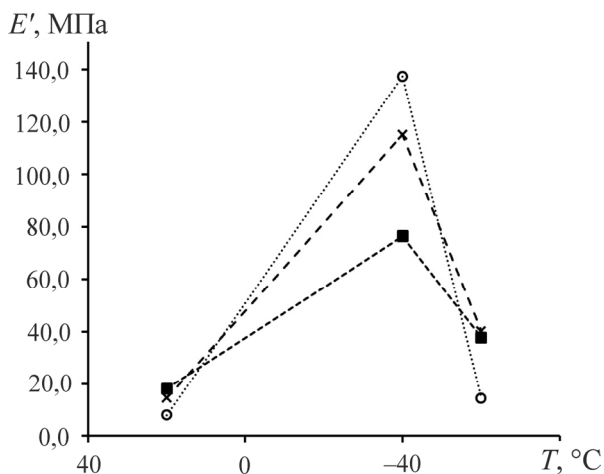


Рис. 3. Графики зависимостей динамических модулей упругости полиуретана от температуры:
 x- МДИ; ■- ТДИ; o- НДИ

Для образцов системы МДИ характерно меньшее возрастание динамического модуля упругости при понижении температуры до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с образцами из ТДИ и НДИ, модуль которых возрастает очень значительно. Для всех образцов характерно снижение модуля при понижении температуры от -40 до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Далее рассмотрим такой параметр диссипативных функций материала, как коэффициент потерь, который показывает, какая часть энергии рассеивается в материале и является важной в случае использования конструкции в роли демпфера.

Зависимость коэффициента потерь от температуры для всех типов исследуемых материалов представлена на рис. 4.

Из диаграмм $k = f(T)$ видно, что среди исследованных типов полиуретановых втулок стабильным коэффициентом потерь в диапазоне температур до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ отличаются образцы из полиуретана системы ТДИ. Образцы системы МДИ ухудшили свои диссипативные свойства, а образцы системы НДИ улучшили.

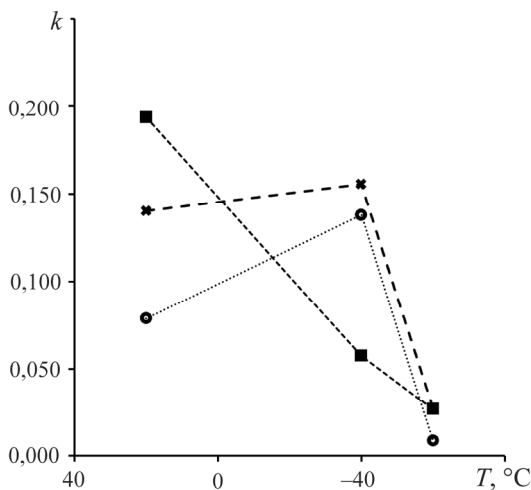


Рис. 4. Диаграмма зависимости коэффициента потерь полиуретана от температуры:
- * - ТДИ; - ■ - МДИ; - ● - НДИ

В диапазоне температур от -40 до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ значительно снизилась эффективность рассеивания энергии в образцах из систем ТДИ и НДИ.

Все исследуемые типы не стабильны по коэффициенту потерь во всем диапазоне температур.

Таким образом, в ходе исследования механического поведения полиуретановых изделий, выполненных в форме втулок, отработана методика проведения эксперимента при различных температурах в условиях динамического циклического сжатия, проведены испытания по определению упругих и вязкостных механических характеристик полиуретановых втулок, изготовленных из разных химических основ.

При проведении испытаний различных марок полиуретана построены зависимости «напряжение – деформация» в ходе циклического сжатия для температур $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$; определены: максимальное напряжение при сжатии, динамический модуль, угол сдвига фазы между напряжением и деформацией, модуль упругости динамический, модуль вязкости и коэффициент потерь.

При анализе механического поведения полиуретановых втулок построены температурные диаграммы предела прочности, динамического модуля упругости, коэффициента потерь и дана характеристика изменения прочностных, деформационных и диссипативных свойств с понижением температуры эксплуатации.

Работа выполнена в рамках исполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям (шифр проекта 1.3166.2011), при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00304).

Библиографический список

1. Словигов С.В. Методика исследования зависимости механических свойств полиуретановых изделий от температуры // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 2. – С. 177–189.
2. Влияние динамических нагрузок на полимерные армированные трубы / А.Ф. Сальников, С.В. Словигов, А.Н. Аношкин, В.Э. Вильдеман // Газовая промышленность. – 2010. – № 6. – С. 38–40.
3. Зуйко В.Ю., Лобанов Д.С., Аношкин А.Н. Методики определения предела прочности полунатурных образцов-панелей из композиционных материалов при статических испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 2. – С. 99–111.
4. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В., Бульбович Р.В. [и др.]; под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – 204 с.
5. Словигов С.В., Бульбович Р.В. Экспериментальное исследование динамических механических свойств вязкоупругих материалов // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Механика. – 2010. – № 2. – С. 104–112.

References

1. Slovikov S.V. Metodika issledovaniya zavisimosti mekhanicheskikh svoystv poliuretanovakh izdelij ot temperatury [Exploratory procedure of the dependence mechanical properties of polyurethane products on temperature]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 2, pp. 177-189.

2. Salnikov A.F., Slovikov S.V., Anoshkin A.N., Vildeman V.E. Vliyaniye dinamicheskikh nagruzok na polimernye armirovannye truby [Impacts of dynamic loads on reinforced polymer pipes]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2010, no. 6, pp. 38-40.

3. Zuyko V.Y., Lobanov D.S., Anoshkin A.N. Metodiki opredeleniya predela prochnosti polunaturnykh obraztsov-panelej iz kompozitsionnykh materialov pri staticheskikh ispytaniyakh na rastyazhenie, szhatie i sdvig [Technique of experimental determination ultimate strength composite materials sandwich-panel specimens of under static tests by tensile, compression and shear]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 2, pp. 99-111.

4. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Bulbovich R.V., Slovikov S.V., Babushkin A.V., Ilinykh A.V., Lobanov D.S., Ipatova A.V. Eksperimental'nye issledovaniya svojstv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeystviyakh [Experimental researches of materials the properties under complex thermomechanical effects]. Ed. V.E. Vildeman. Moscow: Fizmatlit, 2012. 202 p.

5. Slovikov S.V., Bulbovich R.V. Eksperimental'noe issledovanie dinamicheskikh mekhanicheskikh svojstv vyazkouprugikh materialov [Experimental study of dynamic mechanical properties of viscoelastic materials]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2010, no. 2, pp. 104-112.

Об авторах

Словиков Станислав Васильевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem.pstu@citydom.ru).

About the authors

Slovikov Stanislav Vasilivich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, senior researcher of the Center of Experimental Mechanics of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: cem.pstu@citydom.ru).

Получено 07.05.13