



УДК 620.254.3

В.Л. Мазурин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ АМОРТИЗАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ НА СДВИГ

V.L. Mazurin

STATIC DEFORMATION DETERMINATION OF POLYURETHANE DAMPER WORKING ON SHEAR STRAIN

В статье приведены эмпирическая зависимость для определения деформации амортизатора в форме параллелепипеда и значения допускаемых напряжений сдвига для различных видов нагружения, а также эмпирическая зависимость от фактора формы деформации полиуретанового массива для полиуретанов различной твердости.

АМОРТИЗАТОРЫ СДВИГА; КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ; ДОПУСКАЕМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА; СТАТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ АМОРТИЗАТОРА; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.

Empirical dependence for determination of polyurethane damper with parallelepiped form and values of tolerable shear strain for different types of load are presented. Empirical dependence for determination of polyurethane massif deformation depending on form-factor for polyurethane with different hardness is also given.

SHEAR STRAIN DAMPER; FORM FACTOR; TOLERABLE SHEAR STRAIN; STATIC DEFORMATION OF DAMPER; EXPERIMENTAL STAND.

В современном машиностроении очень актуален вопрос замены традиционного эластомера — резины — на более совершенный современный материал — полиуретан — с целью улучшения конструктивных, технологических и эксплуатационных качеств деталей.

Перспективность полиуретанов для современной промышленности обусловлена тем, что их свойства существенно дополняют возможности использования других эластомеров, каучуков, резин и пр. По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны — наиболее универсальный полимерный материал. Полиуретан имеет высокие физико-механические свойства, большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру, маслостойкость, кислотостойкость и рабочий температурный интервал от -35 до $+75$ °C [1–3].

С помощью амортизаторов достигается значительное уменьшение динамических усилий и тем самым предупреждается возникновение

усталостных поломок, т. е. увеличивается долговечность машин.

При конструировании полиуретановых амортизаторов следует учитывать тот факт, что степень деформации полиуретана существенно зависит от вида нагружения. Наибольшие деформации бывают при нагрузках, вызывающих сдвиг полиуретана, наименьшие — при нагрузках, вызывающих сжатие. В следствие этого амортизаторы сдвига обладают сравнительно небольшой грузоподъемностью, но большой гибкостью. Расчет полиуретановых амортизаторов заключается в определении зависимости между величиной нагрузки и соответствующей деформацией амортизатора.

Полиуретановые детали, работающие на сдвиг [4–5], имеют различную форму, но наиболее часто применяются детали в виде цилиндров или параллелепипедов. Нагрузка прикладывается обычно к двум параллельным металлическим пластинам, между которыми находится полиуретановый массив.

Под действием сдвигающей силы F (рис. 1, а) полиуретановый элемент испытывает не только сдвиг, но и изгиб, вследствие чего в нем, наряду с касательными, возникают и нормальные напряжения.

При деформации параллельность сторон полиуретанового элемента, связанных с металлическими пластинами, нарушается. В производственной практике для исключения перекоса применяются детали, состоящие из двух полиуретановых массивов (рис. 1, б). Если сдвигающая сила прикладывается к средней пластине, а при этом наружные пластины закреплены неподвижно, то полиуретановый элемент испытывает [11] так называемый сложный сдвиг, а по их граням действуют касательные напряжения и незначительные нормальные. Изготавливают амортизаторы методом свободного литья предварительно нагретых исходных компонентов полиуретана в открытую форму. Затем производится полимеризация эластомерно-металлической детали в печи при температуре примерно $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 12 часов. Крепление полиуретанового массива к средней и наружной пластинам производят через слой адгезива, который наносят на металл и перед заливкой предварительно просушивают.

Если исходить из равномерного распределения касательных напряжений (погрешность $\pm 7\%$) по плоскости сдвига, то связь между напряжением и силой выражается, как известно, следующей формулой:

$$\tau = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где F — нагрузка, приложенная к детали, Н; S — площадь плоского сдвига, мм^2 .

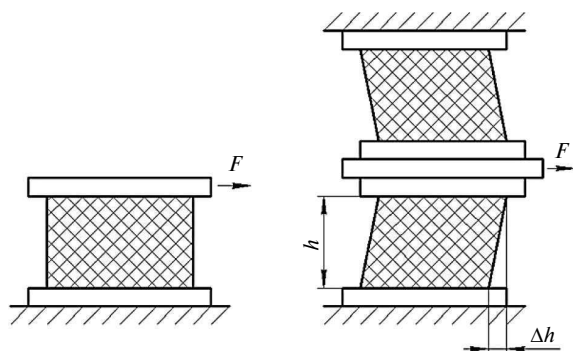


Рис. 1. Полиуретаново-металлические детали, работающие на сдвиг:

а — единичный блок; б — двоянный блок

Деформация Δh (рис. 1, б) называется абсолютным сдвигом, а отношение $\gamma = \Delta h/H$ — относительным сдвигом [11].

Как показывают многочисленные исследования, относительный сдвиг γ и касательное напряжение τ пропорциональны друг другу и связаны между собой законом Гука, согласно которому

$$\tau = G\gamma. \quad (2)$$

В теории упругости установлены следующие зависимости:

$$K = E/3(1 - 2\mu), \quad (3)$$

$$G = E/2(1 + \mu), \quad (4)$$

где K — объемный модуль упругости, МПа; μ — коэффициент Пуассона.

Из этих формул легко получить

$$\mu = (3K - 2G) / 2(3RK - G); \quad (5)$$

$$E = 9KG / (3K + G). \quad (6)$$

Согласно [12] у полиуретана твердостью 85 ShA $K \approx 2720$ МПа, а $G \leq 7$ МПа. Поэтому, если в числителе выражения (5) и в знаменателе выражения (6) пренебречь величинами $2G$ и G , которые весьма малы по сравнению с величиной $3K$, то погрешность не будет превышать $0,1\%$. При этом из формулы (6) следует зависимость

$$E = 3G. \quad (7)$$

Следует отметить, что согласно [13] уравнение (7) справедливо для деформации чистого сжатия. Таким образом, даже в этом случае податливость детали на сдвиг в 3 раза больше, чем на сжатие. Если же принять во внимание тот факт, что модуль сжатия изделия согласно [10] в значительной степени зависит от формы и размеров детали, то эта зависимость будет выражена более ярко.

Расчет полиуретановых деталей, работающих на сдвиг, значительно проще, чем расчет деталей, испытывающих деформацию сжатия. Объясняется это тем, что модуль сдвига полиуретана в пределах практически наблюдаемых деформаций полиуретановых деталей может приниматься постоянным независимым от величины деформации.

Однако модуль сдвига полиуретана, как и модуль сжатия, зависит от соотношения геометрических размеров детали, или согласно [10] от так называемого фактора формы.

Материалы и методика исследования

Для экспериментального исследования использовался полиуретан торговой марки «Дуотан» (Duothane) фирм Synair (США) и CIL (Великобритания) трех твердостей — 65S, 75 и 85 ShA.

При проектировании нагружающего устройства необходимо было сделать выбор: нагружать с помощью пружин или с использованием силы тяжести от подвешенных грузов. Учитывая тот факт, что пружины не всегда надежны и в номинальную нагрузку легко вносятся погрешности, в частности из-за влияния температуры, было решено нагружение полиуретановых амортизаторов производить с использованием силы тяжести от подвешенных грузов.

Для минимизации погрешности нагружения было произведено экспериментальное определение центра тяжести рычага в сборе с подвесом. Эти данные о рычажной системе были использованы для построения тарировочной диаграммы (погрешность $\pm 7\%$), устанавливающей соответствие между величиной груза, помещенного на подвес, и нагрузкой, приложенной к амортизатору.

Результаты исследования и их обсуждение

Сменный упор 9 позволяет устанавливать амортизаторы с различной высотой полиуретанового массива H и поперечными размерами a и b . Перечисленные размеры определяют фактор формы Φ амортизатора — отношение площади нагруженной поверхности к свободной площади. Для деталей прямоугольной формы фактор формы Φ выражается согласно [11]

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)H}, \quad (8)$$

где a и b — стороны основания полиуретанового массива, мм; H — высота массива, мм.

Замер деформации амортизатора производился с помощью стрелочного индикатора с ценой деления 0,01 мм по 15 уровням нагружения согласно тарировочной диаграмме. При замерах деформации использовались амортизаторы с различными факторами формы, которые определяются высотой и поперечными размерами полиуретанового массива.

По результатам экспериментальных замеров было получено выражение для определения модуля сдвига изделия в зависимости от фактора формы:

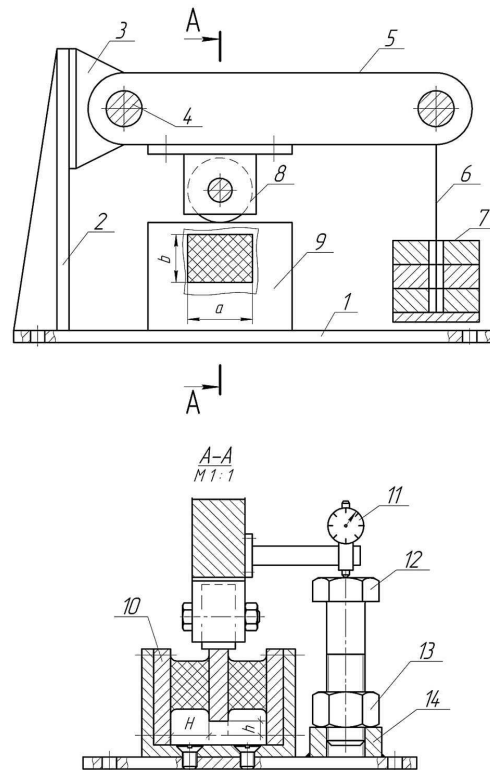


Рис. 2. Нагружающее устройство:

1 — основание; 2 — стойка; 3 — кронштейн; 4 — ось; 5 — рычаг; 6 — подвес; 7 — груз; 8 — подшипник качения; 9 — упор; 10 — амортизатор; 11 — индикатор; 12 — регулируемый упор; 13 — контргайка; 14 — бобышка

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{\text{сд}}}{1 + \frac{1}{28\Phi^2}}, \quad (9)$$

где $G_{\text{сд}}$ — модуль сдвига полиуретана, МПа; Φ — фактор формы.

Аналогичное выражение приведено в работе [6] для резин.

Как следует из формулы (9), с увеличением высоты детали при неизменном поперечном размере, т. е. с уменьшением фактора формы, уменьшается и модуль упругости изделия $G_{\text{изд}}$. Это объясняется тем, что с увеличением высоты детали ее деформация происходит не только за счет сдвига, но и за счет поперечного изгиба.

Для экспериментальных замеров деформации использовались амортизаторы с твердостью полиуретанового массива 65, 75, 85 ShA.

Из эксперимента следует небольшое различие в деформативности полиуретанов различной твердости. Мягкие полиуретаны более склонны

к поперечному изгибу, нежели твердые. Это явление будем учитывать коэффициентом деформативности при сдвиге

$$K_{\text{деф сд}} = 0,5 + 0,0052 \text{ ShA}. \quad (10)$$

Аналогичные зависимости приведены в работах [7, 8].

Окончательно для определения модуля сдвига изделия имеем выражение

$$G_{\text{изд}} = \frac{G_{\text{сд}}}{1 + \frac{1}{28\Phi^2}} (0,5 + 0,0052 \text{ ShA}). \quad (11)$$

При проведении инженерных расчетов полиуретановых деталей на сдвиг зависимость между напряжениями и деформацией может приниматься линейной до значительных величин γ , равных 0,6–0,7. Однако график $G(\gamma)$ показывает незначительное снижение модуля сдвига с увеличением деформации (рис. 3)

Незначительное снижение модуля упругости при сдвиге можно не учитывать при обычных инженерных расчетах. При этом ошибка в определении жесткости деталей в пределах статического сдвига $\gamma = 0,3–0,4$ не превышает 2–5 % для полиуретана твердостью 75–85 ShA.

Замеры деформативности полиуретана при сдвиге показали характерное соответствие между модулем упругости при сжатии и модулем упругости при сдвиге, описываемое зависимостью (7). В соответствии с экспериментальными замерами можно принимать модуль сдвига рав-

ным одной трети от начального модуля упругости при сжатии:

$$G = 1/3E, \quad (12)$$

где E — модуль упругости при сжатии, МПа.

С учетом линейной зависимости $F(\gamma)$ и постоянства модуля сдвига определение деформации полиуретановых деталей может производиться на основе зависимости, вытекающей из закона Гука, как это следует из рис.1 и соотношений (1) и (2):

$$\Delta h = \gamma H = \frac{FH}{G_{\text{изд}} S}; \quad (13)$$

где F — нагрузка, приложенная к детали, Н; H — высота детали, мм; $G_{\text{изд}}$ — модуль упругости изделия, МПа определяемый по формуле (11); S — площадь поперечного сечения детали по плоскости сдвига, мм².

При выборе допустимых напряжений для полиуретановых деталей [9], работающих при статических нагрузках, которые вызывают деформацию сдвига, можно исходить из допустимых относительных деформаций, в пределах которых имеет место чистый сдвиг. Чистый сдвиг характеризуется наличием только касательных напряжений, при этом сохраняются форма и размеры поперечного сечения во всех плоскостях, параллельных плоскости сдвига.

Выводы и рекомендации по проектированию

Для полиуретанов, используемых для изготовления амортизаторов, эластичных шарниров и других аналогичных деталей, величина относительного сдвига может достигать максимальных величин $\gamma = 0,6–0,7$, как, например, у амортизаторов при пуске или остановке двигателя. Учитывая высокую стабильность физико-механических свойств полиуретана, прочность крепления полиуретанового массива к металлу при полимеризации, а также основываясь на опыте расчетов, изготовления и эксплуатации полиуретано-металлических деталей, можно рекомендовать в качестве допустимых относительных деформаций сдвига следующие величины:

для деталей, испытывающих только статическую нагрузку, — $[\gamma] = 0,5–0,6$;

для деталей, испытывающих статическую нагрузку со случайными или регулярными кратковременными динамическими нагрузками, следующими с интервалом по времени, — $[\gamma] = 0,35–0,45$;

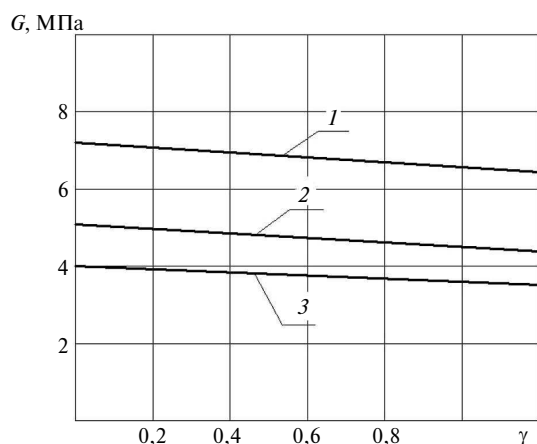


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига полиуретана от величины относительной деформации при твердости 85 (1); 75 (2) и 65 (3) ShA

для деталей, испытывающих постоянные динамические нагрузки, — $[\gamma] = 0,15-0,25$.

Величина относительных допустимых деформаций сдвига следует из экспериментальных замеров деформации полиуретанового массива (в частности до $\gamma = 0,5-0,6$ зависимость линейна), а также опыта расчетов, изготовления и эксплуатации полиуретано-металлических деталей.

Принимая указанные допустимые относительные деформации в качестве основы расчета и имея для полиуретана каждой твердости свой модуль упругости G , можно определить допустимое напряжение сдвига $[\tau]$ по формуле $[\tau] = G[\gamma]$.

При окончательном выборе γ в указанных выше пределах необходимо принимать более высокие значения γ для мягких высокоэластичных полиуретанов, а меньшие значения γ — для полиуретанов повышенной твердости. Исходя из указанных соображений величины допустимых напряжений, которые можно использовать при расчетах полиуретановых и полиуретано-металлических деталей, представлены в таблице.

Аналогичные качественно соотношения допустимых напряжений для резин приведены в работе [10].

Располагая величиной допустимого напряжения, проектирование полиуретановых деталей по заданной жесткости $C = \frac{GS}{H}$ можно производить в следующем порядке.

Исходя из опытов расчета и эксплуатации полиуретано-металлических деталей выбираем полиуретан определенной твердости, с помо-

щью приведенной выше таблицы принимаем допустимое напряжение, соответствующее характеру действующей нагрузки, и определяем относительную деформацию сдвига

$$\gamma = \frac{\tau}{G},$$

Далее исходя из конструктивных соображений принимаем либо площадь сечения детали в плоскости сдвига, либо высоту детали или ее абсолютный сдвиг. Если по конструктивным соображениям удобнее задаваться высотой детали или абсолютным сдвигом, то на основании зависимости $\gamma = \Delta h/H$ при известном относительном сдвиге определяем обе эти величины.

После того как станет известно H , определяем площадь плоскости сдвига по формуле $S = \frac{cH}{G}$ и далее, задаваясь одним из размеров a или b , находим второй из них. Рекомендуется принимать $a = b$ или $a = 2b$ (в последнем случае следует располагать полиуретано-металлическую деталь таким образом, чтобы сдвигающая сила была параллельна большей стороне основания).

Если из конструктивных соображений удобнее задаваться размерами основания a и b , т. е. площадью плоскости сдвига S , то сначала определяем абсолютный сдвиг детали по формуле $\Delta h = \frac{GS\gamma}{c}$, а затем — высоту как $H = \Delta h/\gamma$. Точно так же по заданной жесткости c можно определять размер детали произвольной формы, работающей на сдвиг.

Допустимые напряжения сдвига для различных видов полиуретанов

Твердость полиуретана по Шору, ShA	Модуль сдвига, МПа	Допустимые касательные напряжения, МПа, в разных вариантах деформаций				
		Сдвиг при статической нагрузке	Сдвиг при статическом нагружении с эпизодическими динамическими нагрузками	Сдвиг при постоянных динамических нагрузках	Сдвиг с поворотом*	Сдвиг с кручением**
65±1	4	2,4	1,8	1,0	1,3	1,1
75±1	5	2,8	2,0	1,0	1,4	1,2
85±1	7	3,5	2,4	1,0	1,5	1,3

Примечания: * сдвиг с поворотом характерен для работы сайлент-блока;

** сдвиг с кручением характерен для работы амортизаторов-шайб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Datta J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2010. Vol. 42. P. 117–127.
2. **Maity M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent, *Journal of Elastomers and Plastics*. 2001. Vol. 33. P. 211–224.
3. **Rek V.** Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters // *Journal of Elastomers and Plastics*. Octobre 2003. Vol. 35. P. 311–323.
4. **Аношин Г.В., Державец Ю.А., Сивчиков С.В., Яковлев С.Н.** Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния колес с массивным упругим ободом методом конечного элемента // *Машиностроение и автоматизация производства: Межвузовский сб.* Вып. 15. СПб.: Изд-во СЗПИ, 1999. С. 35–40.
5. **Державец А.Ю., Яковлев С.Н.** Предотвращение автоколебаний при финишной обработке металло-эластомерных деталей. // *Сб.: Проблемы машиноведения и машиностроения*. СПб.: Изд-во СЗПИ, 2000. С. 27–32.
6. **Бартенев, Г.М., Зайцева В.Д.** О влиянии коэффициента формы на деформацию и морозостойкость резины // *Каучук и резина*. 1962. №12. С. 16–18.
7. **Zhang H.** Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers, *Journal of Elastomers and Plastics*, April 2008 40:161–177
8. **Rek V.** Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2006. Vol. 38. P. 105–118.
9. **Яковлев С.Н.** Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. СПб.: Реноме, 2013. 176 с.: ил.
10. **Потураев В.Н.** Резиновые детали машин. М.: Машиностроение, 1966. 304с.
11. **Григорьев Е.Т.** Расчет и конструирование резиновых амортизаторов. М.: Mashgiz, 1960. 164 с.
12. **Райт П., Камминг А.** Полиуретановые эластомеры. М.: Химия, 1973. 304с.
13. **Огибалов Л.М.** Конструкционные полимеры. М.: Изд-во МГУ, 1972. 322 с.

REFERENCES

1. **Datta J.** Synthesis and Investigation of Glycolysates and Obtained Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. March. 2010. Vol. 42. P. 117–127.
2. **Maity M.** Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent. *Journal of Elastomers and Plastics*. July 2001. Vol. 33. P. 211–224.
3. **Rek V.** Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters. *Journal of Elastomers and Plastics*. October. 2003. Vol. 35. P. 311–323.
4. **Anoshin G.V., Derzhavets Yu.A., Sivchikov S.V., Yakovlev S.N.** utochnenniy raschet napriazhenno-deformirovannogo sostoyaniia koles s massivnym uprugim obodom metodom konechnogo elementa. *Mashinostroenie i avtomatizatsiya proizvodstva. Mezhvuzovskiy sb.* Vyp. 15. SPb.: Izd-vo SZPI, 1999. S. 35–40. (rus.)
5. **Derzhavets A.Yu., Yakovlev S.N.** Predotvrashchenie avtokolebaniy pri finishnoy obrabotke metallo-elastomernykh detaley. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya.*— SPb.: Izd-vo SZPI, 2000. S. 27–32. (rus.)
6. **Bartenev G.M., Zaytseva V.D.** O vliianii koeffitsienta formy na deformatsiyu i morozostoikost' reziny. *Kauchuk i rezina*. 1962. №12. S. 16–18.
7. **Zhang H.** Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. April 2008. Vol. 40. P. 161–177.
8. **Rek V.** Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*. April, 2006. Vol. 38. P. 105–118.
9. **Yakovlev S.N.** Proektirovanie i osnovy tekhnologii detaley mashin iz poliuretana. SPb.: Renome, 2013. 176 s.: il.
10. **Poturaev V.N.** Rezinovye detali mashin. М.: Mashinostroenie, 1966. 304 s. (rus.)
11. **Grigoryev Ye.T.** Raschet i konstruirovaniye rezinovykh amortizatorov. М.: Mashgiz, 1960. 164 s. (rus.)
12. **Rayt P. Kamming A.** Poliuretananovyye elastomery М.: Khimiya, 1973.— 304 s. (rus.)
13. **Ogibalov L.M.** Konstruktsionnyye polimery. М.: Izd-vo MGU, 1972. 322 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАЗУРИН Валерий Леонидович — аспирант кафедры автоматизации технологических комплексов и процессов института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: valmazurin@rambler.ru

AUTHOR

MAZURIN Valeriy L. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya St.; 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: valmazurin@rambler.ru