УДК 691.175

© А. А. Черныш, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет)

E-mail: a.chernysh1954@mail.ru

© С. Н. Яковлев, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого)

E-mail: stannik59@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-126-131

© A. A. Chernych, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State Maritime
Technical University)

E-mail: a.chernysh1954@mail.ru

© S. N. Yakovlev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg Polytechnic University
of Peter the Great)

E-mail: stannik59@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ВИБРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMATION OF VIBRATION-ISOLATING POLYURETHANE ELASTOMERS APPLICABLE IN CONSTRUCTION

Приведено обоснование актуальности замены резины на полиуретановые эластомеры. Дано описание нагружающего устройства для изучения вопросов деформативности полиуретановых образцов. Подробно описано явление, связанное со взаимодействием полиуретанового массива с опорными плитами, или так называемый краевой эффект. Представлена зависимость для расчета модуля упругости полиуретанового эластомерного массива в зависимости от условий контактирования на торцах и геометрии массива.

Ключевые слова: полиуретан, виброизоляция зданий, нагружающее устройство, коэффициент формы, модуль упругости изделия.

The article substantiates the relevance of rubber replacement for polyurethane elastomers (resilient materials). A loading device for studying the deformability of polyurethane sample is described. The phenomenon associated with the interaction of polyurethane massif with support plates or the so-called edge effect is highlighted. The paper presents a relationship for calculating the modulus of elasticity of polyurethane elastomeric array, depending on the conditions of contacting at the ends and the geometry of the array.

Keywords: polyurethane, building vibration insulation, loading device, shape factor, modulus of elasticity of the product.

В настоящее время при строительстве зданий и сооружений для защиты их от вибраций, создаваемых движением поездов метрополитена мелкого заложения и трамваями, широко применяются полиуретановые эластомеры, специально разработанные для изготовления амортизаторов. Перспективность виброизоляционных полиуретановых эластомеров для современной промышленности обусловлена тем, что они имеют большой диапазон твердости, эластичности, высокий коэффициент поглощения энергии $\Psi = 0,10 \dots 0,30$, маслобензостойкость и рабочий температурный интервал от -35 до 75 °C [1–3].

Уменьшение амплитуды колебаний амортизируемого объекта достигается благодаря использованию внутреннего трения полиуретанового эластомера. При этом виброизоляционный полиуретановый массив нагревается и рассеивает часть тепловой энергии в окружающее пространство (диссипация). Отличительной особенностью деформирования полиуретановых виброизоляционных эластомеров являются большие, в отличие от металлов, величины относительных деформаций. Деформация полиуретанового эластомера при сжатии может составлять до 30 %, тогда как у металлов это сотые доли процента. Большое влияние на дефор-

мацию полиуретановых эластомеров оказывают геометрические размеры полиуретанового массива и условия взаимодействия этого массива с опорными поверхностями. Вопросы деформирования полиуретановых эластомеров при сжатии изучали многие исследователи, в частности Sheng Li, Marcos Pacheco и другие [4–6].

Целью данной работы является получение эмпирической зависимости для определения деформации сжатия полиуретановых виброизоляционных эластомеров различной геометрической формы. В дальнейшем нам необходимо провести замеры деформации экспериментальных образцов различной формы, размеров и условий взаимодействия полиуретанового массива с опорными плитами и получить простые в использовании эмпирические зависимости для проведения инженерных расчетов.

Величина деформации виброизоляционного полиуретанового массива определяется в основном модулем упругости полиуретана при сжатии. Данная величина определяется в соответствии с ГОСТ 9550–81 на образцах диаметром 32 мм и высотой 38 мм со смазанными торцами и скоростью нагружения не более 0,4 мм/с. Деформация конкретного полиуретанового массива зависит от его геометрических размеров, условий контактирования виброизоляционного массива с опорными плитами и величины относительной деформации.

Для исследования деформативности виброизоляционных массивов и получения соответствующих расчетных эмпирических зависимостей было изготовлено специальное устройство, схема которого приведена на рис. 1. Для экспериментального исследования использовались образцы из полиуретанового эластомера фирмы Synair (США) прямоугольной формы с различным соотношением сторон и цилиндрической формы различных диаметров толщиной 20, 35 и 50 мм твердостью 45 ShA.

При нагружении полиуретановых образцов их площадка контактирования с опорными плитами возрастает до определенной величины. Дальнейшему увеличению площади контакта препятствует трение между торцами полиуретанового массива и опорными плитами. При неизменной площади контактирования с увеличением нагрузки цилиндрическая поверхность

Рис.1. Нагружающее устройство: 1 — основание; 2 — стойка; 3 — кронштейн; 4 — ось; 5 — рычаг; 6 — верхняя опорная плита; 7 — подвес; 8 — груз; 9 — нижняя опорная плита; 10 — полиуретановый образец; 11 — индикатор; 12 — регулировочный винт; 13 — контргайка; 14 — бобышка

образца начинает контактировать с опорными плитами. Схема, поясняющая данное явление, представлена на рис. 2.

Данное явление ранее в применении к резинам называли краевым эффектом. Оно объясняет увеличение жесткости виброизоляционного полиуретанового массива при сжатии. В том случае, когда сжимающие полиуретан плиты гладкие и смазаны, очевидно, что краевой эффект будет отсутствовать. При этих условиях определяют модуль упругости при сжатии для каждого конкретного полиуретанового эластомера определенной твердости. Максимальный краевой эффект будет, очевидно, при полимеризации виброизоляционного полиуретанового массива к опорным пластинам (случай для амортизаторов).

Третьим, наиболее распространенным случаем использования виброизоляционных поли-

Рис. 2. Схема деформирования полиуретанового массива с опорными плитами: 1 — нижняя плита; 2 — полиуретановый массив; 3 — верхняя плита

уретановых эластомеров является их применение в промышленном и гражданском строительстве для виброизоляции фундаментов зданий. Для имитации шероховатости цементно-бетонной поверхности были изготовлены опорные металлические плиты с шероховатостью поверхности $Ra = 1,25$ мкм.

Влияние краевого эффекта при деформировании полиуретанового массива учитывается благодаря введению понятия модуля упругости изделия $E_{изд}$, который учитывает форму и размеры полиуретанового массива.

С учетом вышесказанного была разработана методика по определению деформативности полиуретанового эластомера, которая включает следующие шаги:

- изготавливаем образцы согласно ГОСТ 9550–81 и образцы прямоугольной формы твердостью 45 ShA;
- помещая грузы на подвес, фиксируем осадку образца с помощью индикатора, в качестве рабочего диапазона нагружения нами принят диапазон от 0 до 0,25ε с интервалом 0,05ε;
- для получения более достоверных экспериментальных данных каждое измерение деформаций проводим на трех образцах выбранного геометрического размера и твердости;
- полученные экспериментальные данные обрабатываем методами математической статистики и получаем искомые эмпирические зависимости по определению осадки полиуретанового массива различной геометрической формы.

Для выявления влияния краевого эффекта на величину деформации виброизоляционного массива были выполнены экспериментальные замеры с разными видами контактирования полиуретана и опорных плит. Полностью охваты-

вают все типы реальных конструкций следующие виды контактирования эластомерного массива и плит:

- деформация полиуретанового массива между гладкими, смазанными опорными плитами;
- деформация полиуретанового массива между опорными плитами, имеющими шероховатость $R_a = 1,25$ мкм, имитирующими шероховатость цементно-бетонного покрытия;
- деформация полиуретанового массива амортизатора, когда полиуретановый виброизоляционный массив полимеризуется с пластинами в литевой форме.

На рис. 3 представлена зависимость между нагрузкой и относительной деформацией образца твердостью 45 ShA.

Анализируя представленные экспериментальные данные, можно отметить:

- В случае контакта полиуретанового массива со смазанными плитами краевого эффект отсутствует полностью и $K_{\text{тор}} = 1$.
- В случае контакта полиуретанового массива с плитами шероховатостью $Ra = 1,25$ мкм появляется заметное ужесточение образца и $K_{\text{тор } Ra = 1,25} = 1,07$.
- Для типичного амортизатора, когда виброизоляционный массив соединен с опорными пластинами при помощи полимеризации, $K_{\text{тор.полимер}} = 1,12$.

Анализ результатов позволяет констатировать, что краевого эффект изменяется в небольших пределах.

Более значительное влияние на деформацию виброизоляционного полиуретанового массива оказывает его геометрия. Существует значительное количество работ [7–9], в которых показано

Рис. 3. Зависимость между нагрузкой и относительной деформацией образца: 1 — с закрепленными торцами; 2 — с торцами шероховатостью $Ra = 1,25$ мкм; 3 — с гладкими торцами при смазке глицерином

увеличение жесткости экспериментального образца с уменьшением его высоты.

Увеличение модуля упругости изделия с физической точки зрения можно объяснить переходом от деформации сжатия к объемной деформации. При этом уместно напомнить, что согласно общей теории упругости модуль объемной деформации материала на три порядка больше, чем модуль одноосного сжатия.

Увеличение жесткости эластомеров с ростом величины относительной деформации полиуретанового массива обычно оценивают фактором формы Φ . Величину данного коэффициента рассчитывают как отношение нагруженной площади образца к свободной для деформирования площади. В данном случае нагруженной поверхностью считаются плоскости соприкосновения с полиуретановым массивом, к которому приложена внешняя нагрузка. Свободной площадью считается та поверхность, которая может расширяться при внешнем нагружении.

Иллюстрация данному явлению представлена на рис. 4.

Для прямоугольных образцов фактор формы Φ равен

$$\Phi = \frac{ab}{2(a+b)H}, \quad (1)$$

где a и b — размеры боковых сторон, мм; H — высота образца, мм.

На основании экспериментальных замеров деформации прямоугольных полиуретановых

образцов было получено выражение для коэффициента ужесточения $K_{\text{ужест.прям}}$, который является функцией коэффициента формы Φ . Для прямоугольных образцов $K_{\text{ужест.прям}} = 1 + 0,16\Phi^{1,04}$, при этом коэффициент формы Φ изменяется в диапазоне от 0,4 до 10.

Кроме того, для прямоугольных образцов равной площади с различным соотношением сторон основания были произведены дополнительно замеры деформативности и на их основании выработаны рекомендации по соотношению сторон a/b основания прямоугольника.

Наибольшей жесткостью обладают образцы квадратной формы. Для предупреждения необоснованного снижения жесткости прямоугольных образцов рекомендуется не превышать соотношение сторон a/b более чем в четыре раза и учитывать это явление при проектировании элементов виброизоляции промышленного оборудования.

Это явление, очевидно, связано с увеличением площади боковой поверхности у прямоугольных образцов в сравнении с квадратными. В частности, для квадратного образца площадью $S = 6000$ мм² и высотой $H = 20$ мм при коэффициенте формы $\Phi = 0,97$ коэффициент ужесточения $K_{\text{ужест.прям}} = 1,16$. Для прямоугольного образца такой же площади со сторонами 150 и 40 мм коэффициент формы $\Phi = 0,79$, а коэффициент

Рис. 4. Схема нагружения виброизоляционной полиуретановой пластины: 1 — фундамент; 2 — виброизоляционная полиуретановая пластина; 3 — бетонная стяжка

ужесточения $K_{ужест.прям} = 1,13$. Как видно, разница составляет 3 %.

Для практически применяемых в строительстве полиуретановых виброизоляционных плит размером 700 на 700 мм разница составит 16 %, а это уже значительная величина, которая влияет на величину модуля упругости изделия при сжатии.

Для виброизоляторов, имеющих цилиндрическую форму, фактор формы Φ равен

$$\Phi = \frac{D}{4H}, \quad (2)$$

где D — диаметр образца, мм; H — высота образца, мм.

По результатам экспериментального исследования было получено выражение для коэффициента ужесточения $K_{ужест.цил}$ образцов цилиндрической формы в зависимости от коэффициента формы Φ :

$$K_{ужест.цил} = 1 + 0,13\Phi^{1,03}, \quad (3)$$

где Φ — коэффициент формы.

При этом коэффициент формы Φ изменяется в диапазоне от 0,15 до 7. Здесь уместно заметить, что стандартные образцы, которые используются при определении величины модуля упругости, при сжатии имеют коэффициент формы $\Phi = 0,2$.

В определенных случаях, когда требуются довольно большие рабочие деформации, очень важно сохранить устойчивость полиуретанового массива при сжатии.

По данным нескольких исследователей [10, 11], изучавших вопросы потери устойчивости виброизоляционного массива амортизаторов при сжатии, важно, чтобы высота эластомерного массива амортизатора не превышала поперечный размер более чем в 1,7 раза. В противном случае появляется опасность потери устойчивости виброизоляционного массива при сжатии.

Принимая во внимание все сказанное, для определения модуля упругости изделия можно использовать следующее выражение:

$$E_{изд} = E_{ст0} K_{тор} K_{ужест}, \quad (4)$$

где $E_{ст0}$ — начальный модуль упругости эластомера при сжатии, МПа; $K_{тор}$ — коэффициент, учитывающий краевой эффект; $K_{ужест}$ — коэффициент ужесточения, учитывающий геометрические размеры виброизоляционного массива.

На основании проведенных экспериментальных исследований, можно утверждать, что для

рабочих относительных деформаций сжатия виброизоляционного полиуретанового массива в пределах 20 % справедливо следующее выражение:

$$F = \frac{S\delta E_{изд}}{H}, \quad (5)$$

где S — площадь поперечного сечения, мм²; δ — осадка виброизоляционного массива, мм; $E_{изд}$ — модуль упругости виброизоляционного массива, МПа; H — высота виброизоляционного массива, мм.

Для определения жесткости виброизоляционных полиуретановых пластин при осевом сжатии можно рекомендовать следующую формулу:

$$c = \frac{SE_{изд}}{H}. \quad (6)$$

Осадку полиуретанового виброизоляционного массива можно определить по формуле

$$\delta = \frac{FH}{SE_{изд}}. \quad (7)$$

Точное определение осадки необходимо для монтажа инженерного оборудования в промышленном и гражданском строительстве, а также при установке производственного оборудования на виброизоляторах. Смещение входного и выходного валов современных силовых агрегатов, установленные стандартами, допускается не более 0,05 мм.

В заключение необходимо отметить, что осадка полиуретанового виброизоляционного массива имеет зависимость, мало отличающуюся от линейной в пределах 20 % деформации. При этом не рекомендуется превышать величину относительной деформации в 20 %, так как при дальнейшем увеличении деформации полиуретанового массива растет частота собственных колебаний системы агрегат–полиуретан, что приводит к заметному снижению эффективности виброизоляции.

Библиографический список

1. Trimbach J. Schutz von dienhaltigen Elastomeren gegen Ozonrisse // Gummi. Fasern. Kunststoffe. 2015. No. 1. Pp. 38–45.
2. Wrobel D., Franssen O. Die Zukunft baut auf Siliconelastomere // Gummi. Fasern. Kunststoffe. 2016. No. 4. Pp. 47–55.

3. Яковлев С. Н. Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. СПб.: Реноме, 2013. 176 с.

4. Marcos Pacheco F. M. Thermal, Chemical, and Morphological Characterization of Microcellular Polyurethane Elastomers // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2009. Vol. 41. No. 4. Pp. 323–338.

5. Sheng Li. Effect of Elastomer on Flame Retardancy, Thermal Degradation, and Mechanical Properties of Intumescent Flame-Retardant Polyethylene // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2011. Vol. 43. No. 6. Pp. 257–273.

6. Yakovlev S. N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes // *Russian Engineering Research*. 2016. No. 4. Pp. 255–257.

7. Krencieski M. A., Zhang H. Neues Konzept verbessert Lebensdaueranalysen von Elastomerbauteilen // *Gummi. Fasern. Kunststoffe*. 2015. No. 4. Pp. 37–45.

8. Janusz Datta, Ewa Glawinska. Chemical modifications of natural oils and examples of their usage for polyurethane synthesis // *Journal of Elastomers and Plastics*. 2014. Vol. 45. No. 1. Pp. 30–41.

9. Ленетов В. А., Юрцев Л. Н. Расчеты и проектирование резиновых изделий. Л.: Химия, 1977. 408 с.

10. Райт П. Полиуретановые эластомеры. М.: Химия, 1973. 304 с.

11. Neise E., Zepp C. Optische Deformationsanalyse von Fahrzeugreifen. Dynamische Reifenanalyse // *Gummi. Fasern. Kunststoffe*. 2013. No. 1. Pp. 23–30.

References

1. Trimbach J. Schutz von dienhaltigen Elastomeren gegen Ozonrisse. *Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 2015, no. 1, pp. 38–45.

2. Wrobel D., Franssen O. Die Zukunft baut auf Siliconelastomere. *Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 2016, no. 4, pp. 47–55.

3. Yakovlev S. N. *Proektirovanie i osnovy tekhnologii detalej mashin iz poliuretana* [Design and technology basis of polyurethane machine parts]. St. Petersburg, Renome Publ., 2013, 176 p.

4. Marcos Pacheco F. M. Thermal, Chemical, and Morphological Characterization of Microcellular Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2009, vol. 41, no. 4, pp. 323–338.

5. Sheng Li. Effect of Elastomer on Flame Retardancy, Thermal Degradation, and Mechanical Properties of Intumescent Flame-Retardant Polyethylene. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2011, vol. 43, no. 6, pp. 257–273.

6. Yakovlev S. N. Dynamic Hardening of Structural Polyurethanes. *Russian Engineering Research*, 2016, no. 4, pp. 255–257.

7. Krencieski M. A., Zhang H. Neues Konzept verbessert Lebensdaueranalysen von Elastomerbauteilen. *Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 2015, no. 4, pp. 37–45.

8. Janusz Datta, Ewa Glawinska. Chemical modifications of natural oils and examples of their usage for polyurethane synthesis. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2014, vol. 45, no. 1, pp. 30–41.

9. Lepetov V. A., Yurcev L. N. *Raschety i proektirovanie rezinovykh izdelij* [Calculations and designing of rubber products]. Leningrad, Khimiya Publ., 1977, 408 p.

10. Rayt P. *Poliuretanovye ehlastomery* [Polyurethane elastomers]. Moscow, Khimiya Publ., 1973, 304 p.

11. Neise E., Zepp C. Optische Deformationsanalyse von Fahrzeugreifen. Dynamische Reifenanalyse. *Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 2013, no. 1, pp. 23–30.