

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОВЫХ МАРК ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Введение. Применение полимерных материалов, в том числе эластомеров, непрерывно увеличивается, причем такая тенденция наблюдается и в машиностроении, и в строительстве, и на транспорте. Это объясняется уникальными качествами эластомеров в плане их прочности, пластичности, энергоемкости и других свойств, определяющих их применение. Наиболее перспективными эластомерами считаются литьевые конструкционные полиуретаны, использование которых расширяется наиболее быстро.

Постановка проблемы. Единственным сдерживающим фактором для более широкого применения полиуретановых эластомеров является недостаточность исследования механических характеристик, особенно для новых марок полиуретанов. К этим материалам можно отнести полиуретаны серий vibrathane, adiprene и, отдельно, новый морозостойкий adiprene.

Анализ последних исследований и публикаций. Растущее применение эластомеров в металлургическом оборудовании освещено в трудах [1-7]. Использование эластомеров в качестве упругих элементов амортизаторов различных машин рассмотрено в работах [8-14]. Некоторые особенности резины как конструкционного материала изложены в статьях [15, 16]. Механические характеристики эластомеров определялись в работах [17-20]. Вопросы релаксации усилий в эластомерах изучены в работах [21-24].

Цели статьи. Определить модуль продольной упругости, коэффициент рассеяния энергии, коэффициент ужесточения для новых марок полиуретановых эластомеров серий vibrathane и adiprene, а также исследовать релаксацию в этих материалах и предложить методы ее уменьшения.

Методика проведенных исследований. Эластомеры испытывались в два этапа. Первый этап включал испытания образцов на сжатие в лабораторных условиях. Образцы представляли собой цилиндры с размерами $d = 40$ мм; $h = 40$ мм. Влияние трения на торцах сжимаемых элементов учитывалось коэффициентом формы, который определялся по формуле [9]

$$\Phi = \frac{F}{F_0} = \frac{\pi d^2}{4 \cdot \pi d \cdot h} = \frac{d}{4h}, \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения образца;

F_0 – площадь свободной боковой поверхности образца.

$$\text{Для принятых размеров образца получим } \Phi = \frac{40}{4 \cdot 40} = 0,25.$$

Это дает коэффициент ужесточения

$$\gamma = 1 + \chi \cdot \Phi^2 = 1 + 0,8 \cdot 0,25^2 = 1,05, \quad (2)$$

где χ – коэффициент закрепления торцов УЭ (образца) $0 \leq \chi \leq 1,0$.

При свободном сухом контакте полиуретана со сталью $0,6 \leq \chi \leq 0,8$. В нашем случае было принято $\chi = 0,8$. Принятые размеры образца приводят к увеличению его жесткости на 5,0%, что вполне допустимо. Если торцевые поверхности смазаны, то эффект ужесточения уменьшается в два раза. В то же время, для образцов с

принятым соотношением размеров отсутствует потеря устойчивости при сжатии. Можно считать, что принятая схема испытаний обеспечивает для образца осевое сжатие (что соответствует напряженному состоянию упругих элементов (УЭ) большинства амортизаторов). Поэтому расчетные зависимости (например, для определения нормального модуля упругости при сжатии) взяты для случая одноосного сжатия.

При испытаниях записывались диаграммы сжатия, по которым затем определялись механические характеристики, в первую очередь, нормальный модуль упругости при сжатии E_c . Определение E_c выполнялось по формуле

$$E_c = \frac{N_c \cdot h}{\Delta h' \cdot F}, \quad (3)$$

где N_c – нагрузка, соответствующая относительной деформации $\epsilon = 0,2$, что составляет в абсолютных величинах $\Delta h = 8$ мм;

$\Delta h' = \Delta h - \Delta h_m$ – абсолютная фактическая деформация образца;

Δh_m – деформация испытательной машины при нагрузке N_c .

Величина Δh_m легко получается экспериментально при работе машины в режиме сжатия и отсутствии образца. Жесткость эластомера возрастает с увеличением коэффициента трения. Предельное (максимальное) значение модуля упругости соответствует объемному модулю упругости. Это значение составляет $E_{\max} = K_v = 3000 \dots 3200 \text{ МПа}$ и практически постоянно для всех эластомеров. Оно найдено в оригинальных опытах на полиуретановых образцах. В этих опытах (рис. 1) удалось исключить влияние испытательной машины (пресса ПР-500 с максимальной силой 5000 кН) и применяемых приспособлений на полученные результаты. Значения объемного модуля упругости использовались в дальнейшем для наиболее точного определения коэффициента Пуассона из известного в теории упругости выражения

$$K_v = \frac{E_c}{3(1 - 2 \cdot \mu)}. \quad (4)$$

Испытания эластомеров выполнялись на машине МИ-20УМ (рис. 2). Основные технические характеристики этой испытательной машины приведены в табл. 1.

Полученные значения μ оказались больше, чем справочные ($\mu \approx 0,47$), и для полиуретанов различной жесткости составляют $\mu = 0,485 \dots 0,499$. Условия испытания образцов – лабораторные, $t = 20^\circ\text{C}$, нагружение образцов – статическое. При таком нагружении происходит релаксация напряжений; петля гистерезиса фиксирует релаксацию. Если скорость увеличивать, то релаксация уменьшается, а жесткость нарастает.

Испытания для всех материалов проводились со скоростью движения захвата от 2,5 мм/мин до 60 мм/мин, что соответствовало скорости деформации $0,104 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. При этом обнаруживалась предельная скорость деформации, увеличение которой уже не вызывало повышения жесткости. Эту наибольшую жесткость отражал динамический модуль упругости.

При испытаниях образцов, кроме жесткости, получали и параметры внутреннего трения, один из которых – коэффициент рассеяния энергии ψ – легко определяется по полученным диаграммам сжатия. Он равен отношению площади петли гистерезиса к площади диаграммы сжатия [24].



Рис. 1. Устройство для определения объемного модуля упругости эластомеров в испытательной машине ПР-500



Рис. 2. Малогабаритная настольная испытательная машина МИ-20УМ

Таблица 1
Основные технические характеристики испытательной машины МИ-20УМ

Наибольшая предельная нагрузка, кН	20
Ширина рабочего пространства, мм	175
Рабочий ход активного захвата, мм	310
Диапазон скоростей перемещения активного захвата, мм/мин	От 0,5 до 60
Потребляемая мощность, Вт	300
Габариты, мм	680-480-200
Масса, кг	60

$$\psi = \frac{\int_0^{\lambda_{\max}} N_1 \cdot dx - \int_0^{\lambda_{\max}} N_2 \cdot dx}{\int_0^{\lambda_{\max}} N_1 \cdot dx} \cdot 100\% . \quad (5)$$

Исследовалась также кратковременная релаксация образцов из полиуретанов. Такие испытания проводятся оперативно и позволяют дать сравнительную оценку реологическим характеристикам эластомеров. Во время этих испытаний движение траверсы прекращается при достижении $\varepsilon_0 = 20\%$, то есть $\Delta h = 8$ мм. Нагрузка, которую при этом испытывает образец, фиксируется как N_0 . Затем фиксируются нагрузки $N_1 \dots N_{10}$, постепенно уменьшающиеся через 1 мин, затем N_{15} , N_{20} , N_{25} , N_{30} через 5 мин, и затем N_{40} , N_{50} , N_{60} через 10 мин. По полученным точкам в координатах «сила – время» строят кривую релаксации. Конечный результат – уменьшение нагрузки в % за время 60 мин.

Сложным для эластомеров оказывается вопрос исследования их прочности и назначения для них допускаемых напряжений. В практике эксплуатации устройств с полиуретановыми УЭ встречаются различные варианты выхода из строя (разрушения) этих элементов. Это разрушение от перегрева, от высокого уровня эквивалентных напряжений, от остаточных деформаций. Последний вид разрушения наиболее распространен при эксплуатации крупных полиуретановых амортизаторов.

Исходя из этого, желательно для полиуретановых образцов определять ту предельную деформацию, которая еще не приводит к изменению размера $\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_y^c$. Для удобства измерения можно систему настроить так, чтобы испытания прекращались при появлении малой фиксированной деформации (например, $\varepsilon = 0,5\%$) с последующим наблюдением и фиксацией времени исчезновения деформации. Эту полностью исчезающую деформацию можно обозначить ε_y^c и назвать упругой деформацией при сжатии. Ее можно найти, меняя силу сжатия и измеряя размер h образца до и после нагружения.

Полученное значение ε_y^c можно использовать как предельное для нахождения допускаемого напряжения. Оно может быть найдено по формуле

$$[\sigma] = \frac{E}{n_\varepsilon} \varepsilon_y^c , \quad (6)$$

где n_ϵ – коэффициент запаса прочности, выбираемый для данного материала и условий работы [14, 16].

Такой подход к выбору допускаемого напряжения может быть сохранен и в случае отклонений от закона Гука. Тогда следует под величиной E понимать секущий модуль упругости.

При определении или выборе энергетических характеристик материалов следует иметь в виду, что они не являются общепризнанными характеристиками. По физическому смыслу энергетической характеристикой материала является удельная энергоёмкость на единицу объема или массы материала. Графически это площадь диаграммы в координатах $\sigma - \epsilon$. Такая площадь может быть получена на диаграммном аппарате; она должна отражать удельную энергоёмкость. Если нужна энергоёмкость изделия, образца, УЭ, то она может быть найдена как площадь диаграммы сжатия этого изделия. Наиболее надежный путь установления фактической энергоёмкости – это запись диаграммы сжатия. В лабораторных условиях она выполнялась на испытательной машине ПР-500 с максимальной силой 5000 кН. Диаграммы сжатия могут записываться в трех диапазонах по нагрузке – 1000, 2500, 5000 кН, а по оси деформации – в масштабе 1:1 и 20:1.

Материалы и результаты исследования. В данной работе проводились исследования пяти образцов полиуретана: два образца из материала vibrathane, с твердостью ShA 65 и ShA 85, два образца твердых полиуретанов adiprene A16 и B16 с твердостью ShA 95, и один образец морозостойкого полиуретана adiprene L 100M с твердостью ShA 90. Исследования выполнялись с записью диаграммы сжатия в координатах « $P - \lambda$ ».

Первая серия экспериментов состояла в определении нормального модуля упругости при сжатии статической нагрузкой. При испытаниях записывались диаграммы сжатия. Результаты представлены на рис. 3.

Кроме характеристик жесткости, из проведенного эксперимента были получены и параметры внутреннего трения, например, коэффициент рассеяния энергии ψ , который представляет собой (в процентах) долю рассеянной энергии от общей затраченной за один цикл нагружения. Найденные по диаграммам модули упругости представлены в табл. 2.

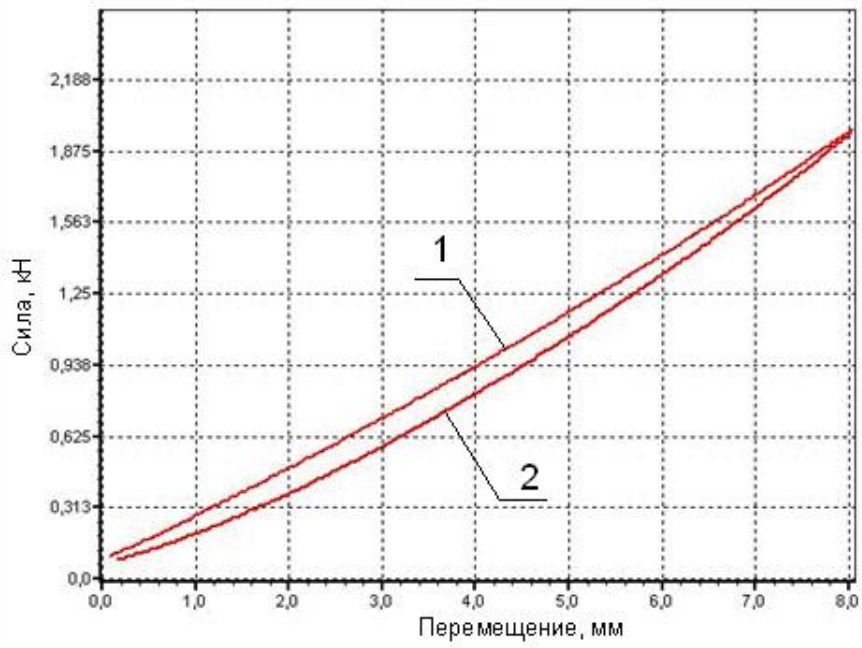
Таблица 2
Механические характеристики конструкционных полиуретанов

Материал	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент рассеяния энергии ψ , %	Коэффициент ужесточения γ	Потери нагрузки при релаксации, % за 60 мин.
V8000 ShA 65	7,5	8,0	1,10	5,2
V8000 ShA 85	20,0	20,0	1,12	12,1
A16 ShA 95	43,8	45,0	1,14	18,5
B16 ShA 95	33,8	50,0	1,14	25,6
Adiprene L100M ShA 90	9,5	12,0	1,09	13,0

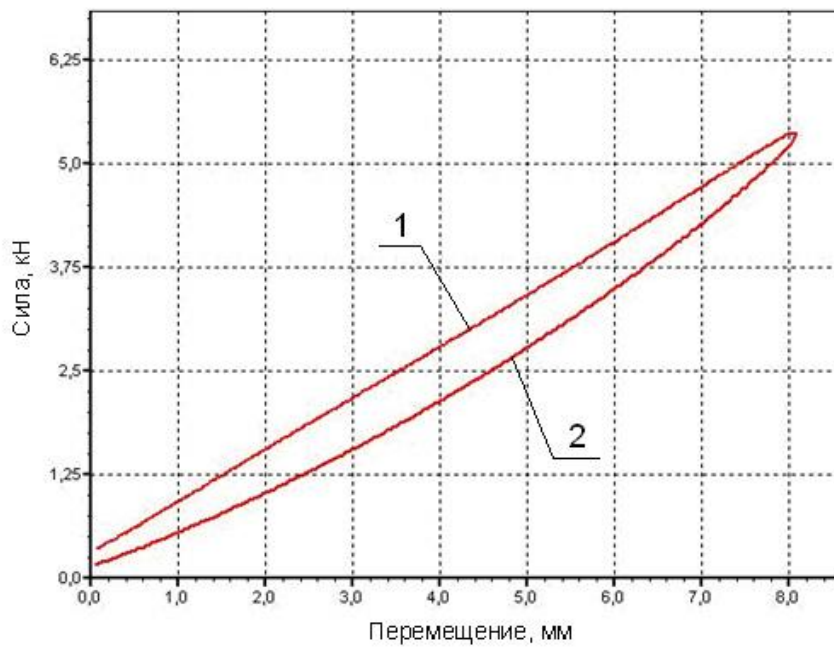
Полученные значения ψ для пяти образцов также приведены в табл. 2. Этот параметр изменяется в пределах от 8% до 50%.

Третья серия экспериментов имела цель установить зависимость жесткости материалов от скорости нагружения. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

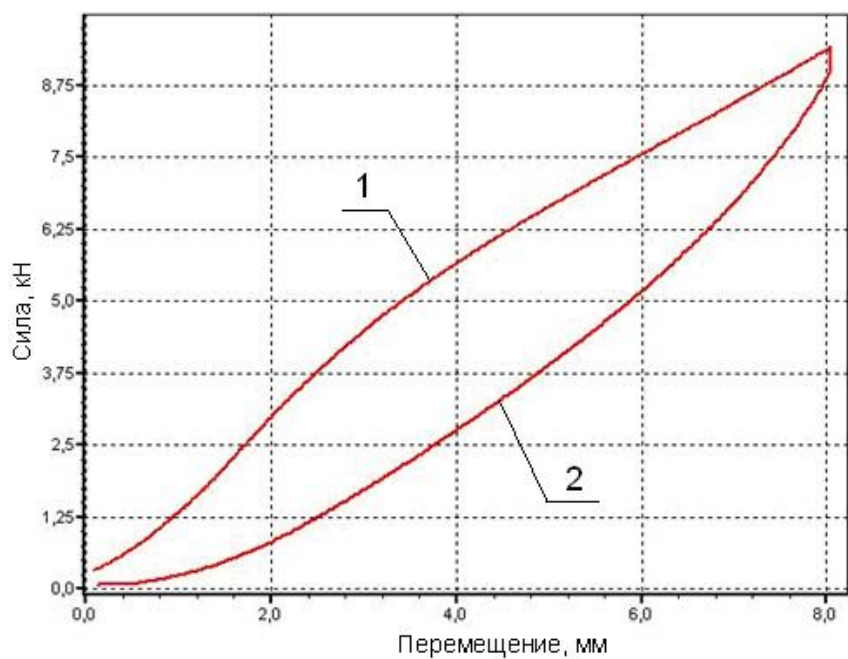
По результатам испытаний можно сделать вывод об экспоненциальном характере возрастания модуля упругости, что позволяет ввести для эластомеров новую механическую характеристику – динамический модуль упругости E_d , который больше статического и может быть представлен в виде



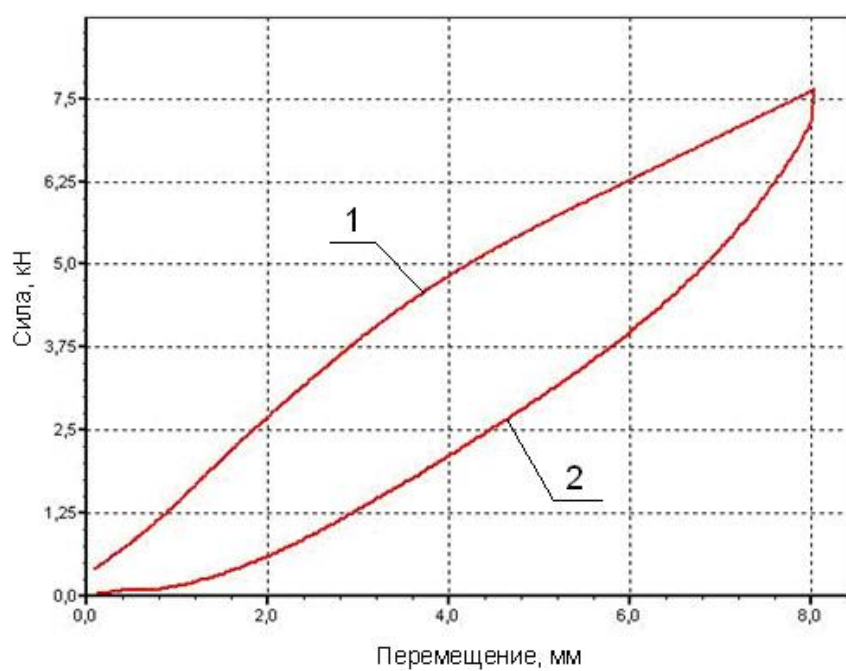
a) vibrathane 8000 ShA 65;



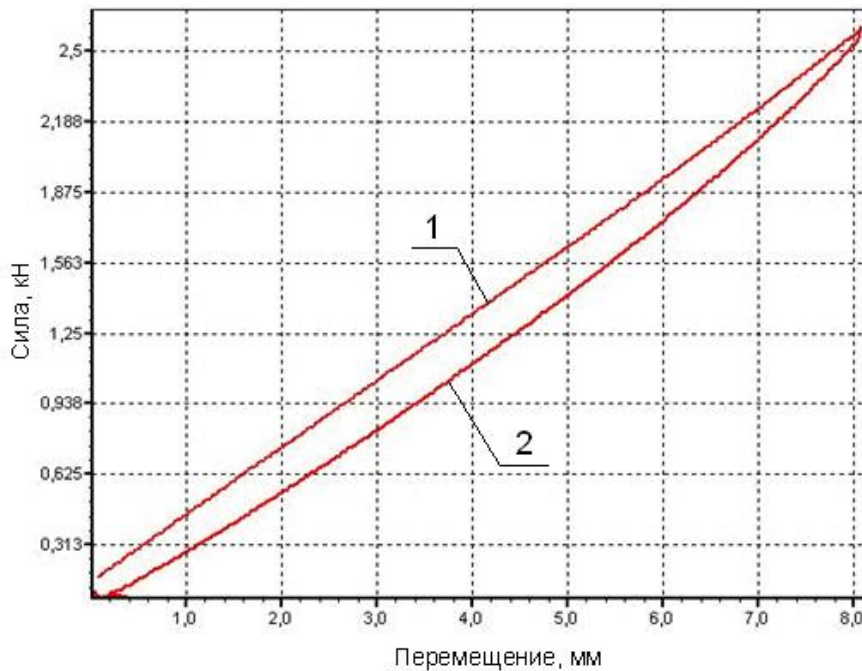
б) vibrathane 8000 ShA 85;



в) adiprene A16 ShA 95;



г) adiprene B16 ShA 95;



д) морозостойкий adiprene L100M ShA 90

Рис. 3. Диаграммы сжатия полиуретановых образцов:
1 – нагружение; 2 – разгрузка.

$$E_d = E \cdot \gamma, \quad (7)$$

где γ – коэффициент ужесточения материала; его значения представлены в табл. 2.

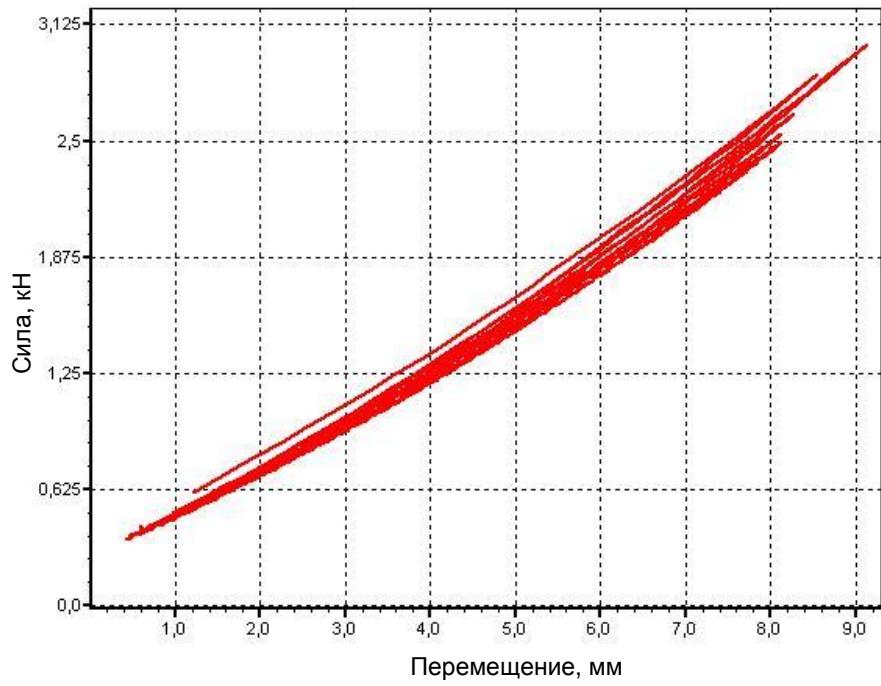
В четвертой серии опытов исследовалась кратковременная релаксация образцов полиуретанов. Начальная их деформация составляла $\epsilon_0 = 20\%$. На рис. 5 представлены графики релаксации, построенные по замерам во времени.

Для уменьшения абсолютной величины релаксации опробованы варианты повторного нагружения образца до первоначальной нагрузки через 30 мин. и через каждые 15 мин. с общим временем 60 мин. Результаты испытаний представлены на

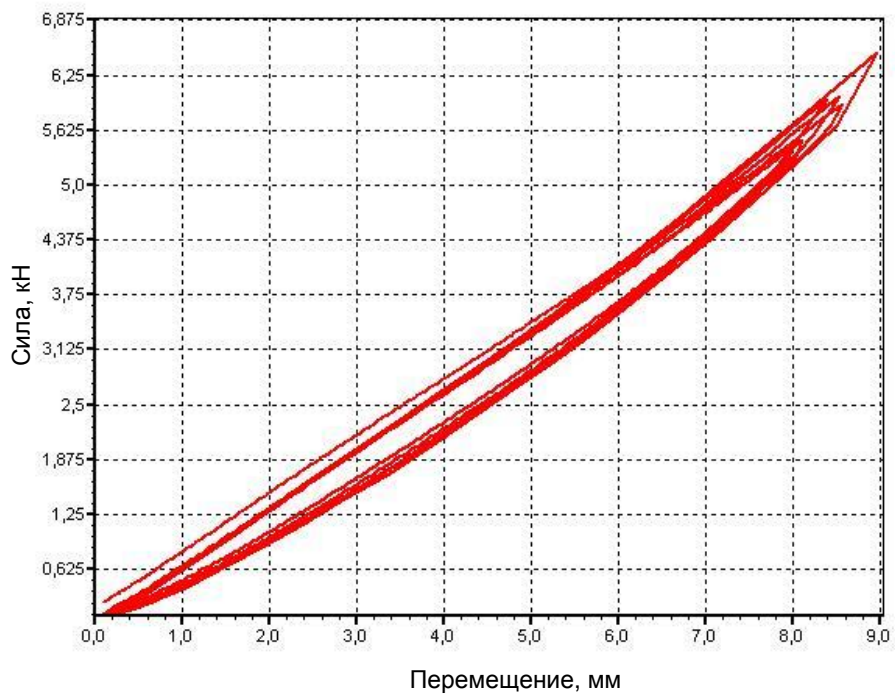
рис. 6. При этом вычислялись потери нагрузки в процентах $\frac{P_0 - P_{60}}{P_0} \cdot 100\%$. Ре-

зультаты этих вычислений представлены в табл. 2.

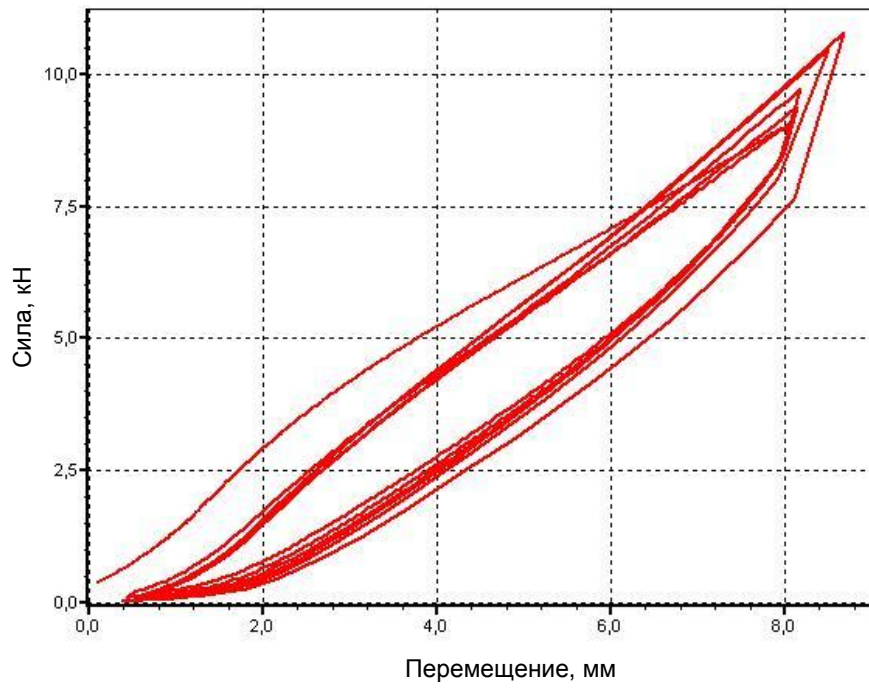
Проведенные исследования позволяют подобрать нужный эластомер для конкретного изделия – амортизатора, упругой муфты, демпфера и так далее. Варианты повторных нагружений могут применяться в предварительно напряженных амортизаторах для поддержания на требуемом уровне силы предварительного нагружения. К таким объектам можно отнести амортизаторы станинных роликов и роликов рольгангов, поглощающие аппараты железнодорожных вагонов и другие устройства, требующие либо точного сохранения размеров, либо повышенной энергоемкости при ограниченных габаритах.



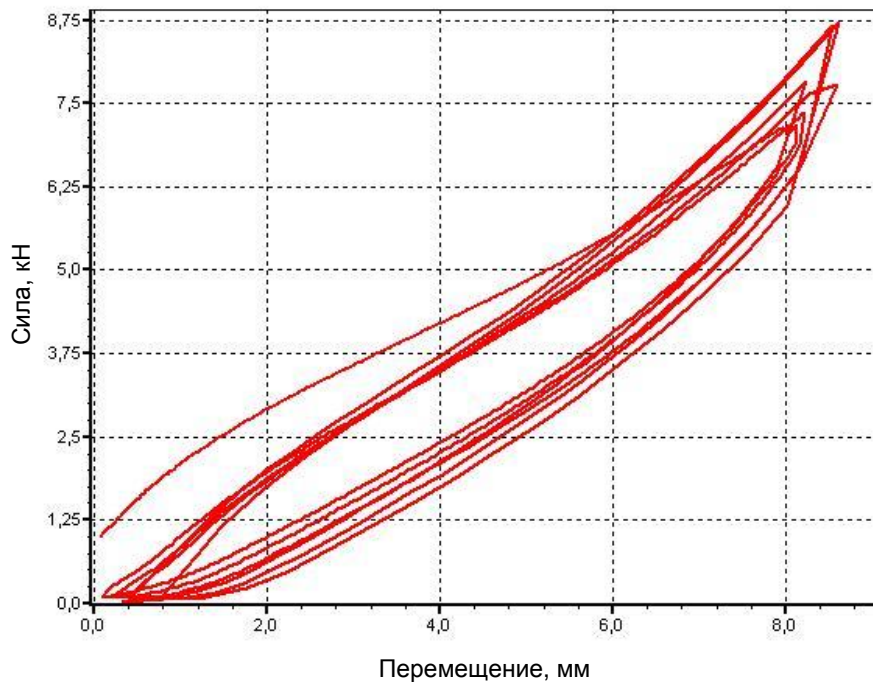
a) vibrathane 8000 ShA 65;



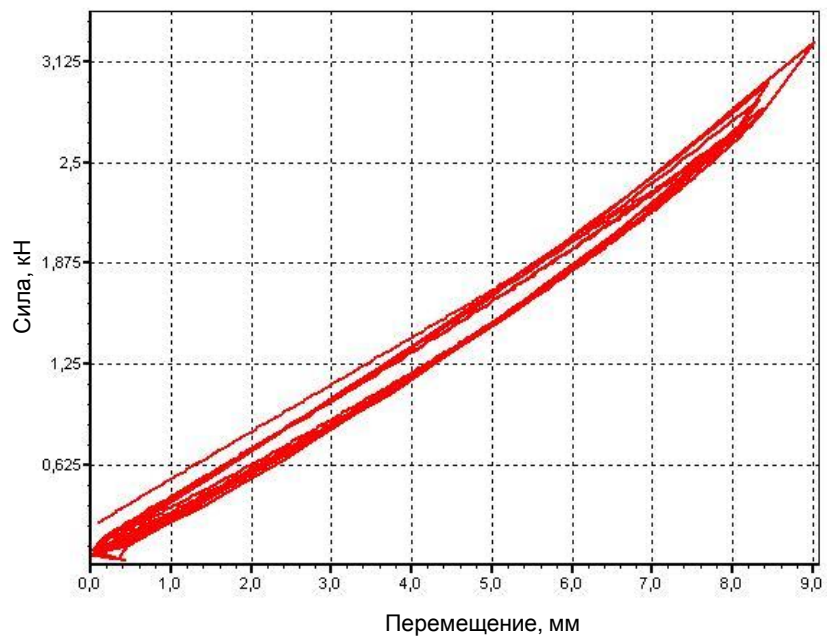
б) vibrathane 8000 ShA 85;



в) adiprene A16 ShA 95;

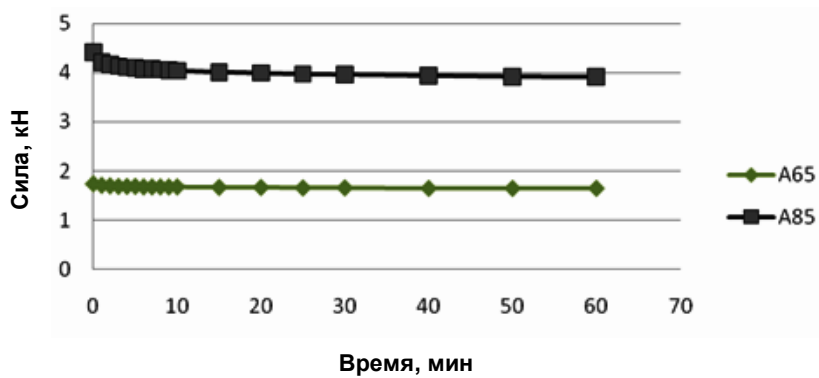


г) adiprene B16 ShA 95;

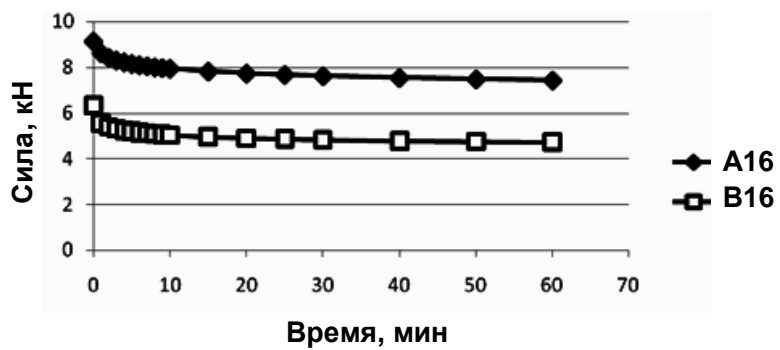


д) морозостойкий adiprene L 100M ShA 90

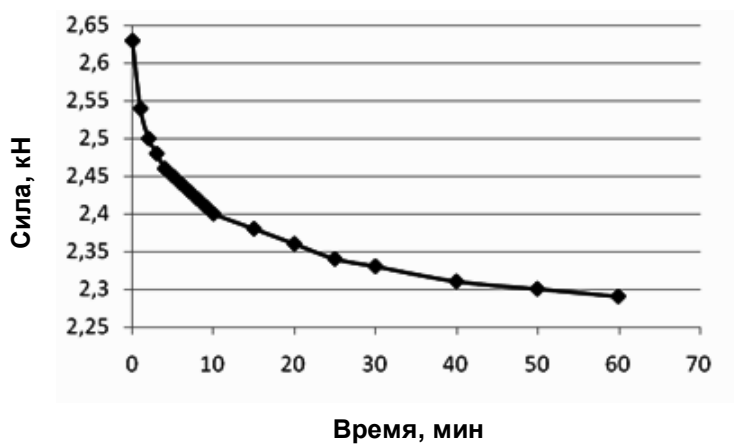
Рис. 4. Зависимость жесткости материала от скорости нагружения



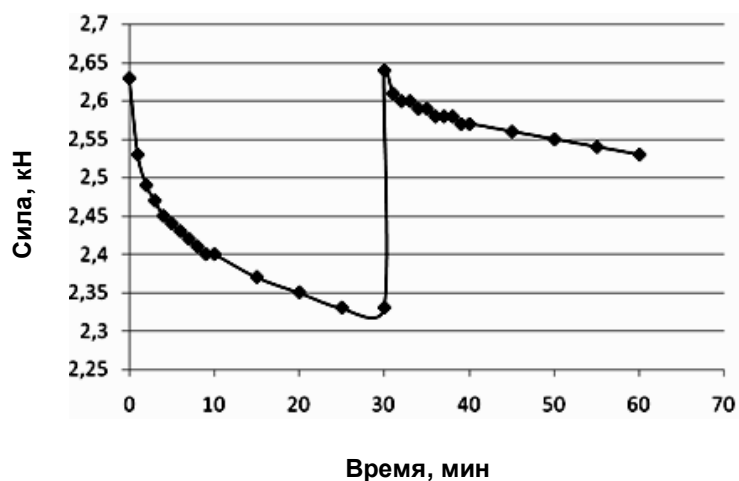
а) vibrathane 8000 ShA 65; ShA 85;



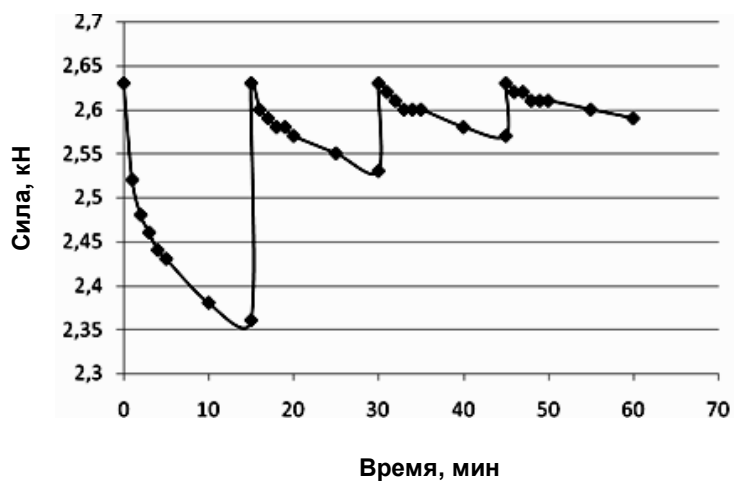
б) adiprene A16 ShA 95; B16 ShA 95;



в) морозостойкий adiprene L 100M ShA 90
Рис. 5. Релаксация в сжатых полиуретановых образцах [24]



а) повторное подгружение через 30 мин;



б) повторное подгружение каждые 15 мин.
Рис. 6. Релаксация силы при последующих подгружениях

ВЫВОДЫ

1. Поставленные в статье цели достигнуты. Определены модуль продольной упругости, коэффициент рассеяния энергии, коэффициент ужесточения для новых марок полиуретановых эластомеров серий vibrathane и adiprene. Исследована релаксация в этих материалах, предложены методы ее уменьшения.
2. Возрастание модуля упругости при увеличении скорости нагружения имеет экспоненциальный характер; это позволяет ввести для эластомеров новую механическую характеристику – динамический модуль упругости, который больше статического.
3. Ужесточение полиуретанов при увеличении скорости нагружения имеет релаксационную природу. При большой скорости нагружения релаксация нагрузок не успевает развиться до существенных величин; деформация при этом остается практически упругой, а петля гистерезиса, характеризующая безвозвратные потери, уменьшается по площади.
4. Применяя прием многократной подгрузки до первоначального уровня, можно уменьшить величину релаксации до 4%, а иногда и до 1,5%.

Перечень ссылок

1. *Большаков В. И.* Новые технические решения в металлургическом оборудовании / *В. И. Большаков* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 4. – С. 10–13.
2. *Артюх Г. В.* Амортизация нагрузок в металлургических машинах / *Г. В. Артюх* // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1999. – Вып. 4. – С. 160–165.
3. *Артюх В. Г.* Нагрузки и перегрузки в металлургических машинах: Монография / *В. Г. Артюх*. – Мариуполь: ПГТУ, 2008. – 246 с.
4. *Артюх В. Г.* Точность предохранителей для металлургических машин: Монография / *В. Г. Артюх*. – Мариуполь: ПГТУ, 2000. – 177 с.
5. Loading Decrease in Metallurgical Machines / *Nabeel S. Gharaibeh, Mohammed I. Matarneh, V. G. Artyukh* // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – № 8(12). – Pp.1461-1464.
6. Current Views on the Detailed Design of Heavily Loaded Components for Rolling Mills / *V. Mazur, V. Artyukh, G. Artyukh, M. Takadzhi* // Engineering Designer. – 2012. – V. 37, № 1. – Pp. 26–29.
7. *Артюх В. Г.* Розвиток теоретичних основ і практика захисту металургійних машин від поломок : 05.05.08 : автореф. дис. ... докт. техн. наук : захищена 15.11.2012 : затв. 01.03.2013 / Артюх Віктор Геннадійович. – Донецьк, 2012. – 34 с.
8. *Большаков В. И.* Резинометаллические детали в металлургическом оборудовании / *В. И. Большаков* // Захист металургійних машин від поломок. – Мариуполь, 2000. – Вып. 5. – С. 133–141.
9. *Потураев В. Н.* Резиновые и резинометаллические детали машин / *В. Н. Потураев*. – М.: Машиностроение, 1966. – 300 с.
10. *Бидерман В. Л.* Вопросы расчета резиновых деталей // Расчеты на прочность / под ред. *С. Д. Пономарева*. – М.: Машгиз, 1958. – Вып. 3. – С. 27.
11. *Бидерман В. Л.* Расчет резино-металлического амортизатора цилиндрической формы с центральным круглым отверстием / *В. Л. Бидерман, Р. Э. Брившанис* // Вопросы динамики и прочности; под ред. *Я. Г. Пановко*. – Вып. X. – Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1963. – 276 с.
12. *Деркасов Г. М.* Исследование резиновых амортизаторов тележек грузовых вагонов / *Г. М. Деркасов* // Вестник ВНИИЖТ. – 1959. – № 5. – С. 40–42.

13. Григорьев Е. Т. Расчет и конструирование резиновых амортизаторов / Е. Т. Григорьев. – М.: Машгиз, 1960. – 160 с.
14. Харитонов А. Т. Механические свойства резино-металлических элементов в поглощающих аппаратах автосцепки / А. Т. Харитонов // Каучук и резина. – 1959. – № 2. – С. 50.
15. Горелик Б. М. Некоторые особенности резины как конструкционного материала // Труды научно-исследовательского института резиновой промышленности. – М.: Госхимиздат, 1955. – Сб. 2. – С. 3–14.
16. Резниковский М.М. Механические свойства резины в условиях динамического нагружения / М.М. Резниковский // Химическая наука и промышленность. – 1959. – № 1. – С. 79.
17. Особенности механических характеристик современных эластомеров / В. Г. Артюх [и др.] // Захист металургійних машин від поломок. – Маріуполь, 2006. – Вип. 9. – С. 131–136.
18. Бартнев Г. М. Зависимость между статическим модулем и твердостью резины / Г. М. Бартнев, И. В. Захаренко // Каучук и резина. – 1958. – № 1. – С. 10–12.
19. Бартнев Г. М. О модулях резины при статическом сжатии / Г. М. Бартнев, В. И. Новиков // Доклады Академии наук СССР. – 1953. – Т. 91, № 5. – С. 1027.
20. Догадкин В. А. Прибор для исследования механических свойств высокоэластичных материалов / В. А. Догадкин, В. Е. Гуль // Заводская лаборатория. – 1950. – Т. 16, № 12. – С. 1517.
21. Артюх Г.В. О стабильности характеристик амортизаторов с упругими элементами из полиуретанов / Г.В. Артюх, В.А. Корчагин, Т.В. Корчагина // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1998. – Вып. 3. – С.163-167.
22. Бартнев Г. М. Реологические свойства резиновых смесей при сдвиге и растяжении / Г. М. Бартнев, И. В. Захаренко // Каучук и резина. – 1961. – № 1. – С. 24.
23. Артюх Г.В. Релаксометр для испытаний полиуретановых амортизаторов / Г.В.Артюх [и др.] // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1998. – Вып. 3. – С.159-162.
24. Choice of Elastomeric Material for Buffer Devices of Metallurgical Equipment / Firas M. F. Al-Quran, M. E. Matarneh, V. G. Artukh // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2012. – № 4(11). – Pp.1585-1589.

Рецензент: д.т.н., проф. Кухарь В.В.

Статья поступила 27.12.2014.