

УДК_53.08

Особенности использования модели вязкоупругого материала в программном комплексе ANSYS

А. Г. Пелевин^{1,2}, В. В. Шадрин²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
pelevin@icmm.ru

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук
Россия, 614013, г. Пермь, ул. акад. Королева, 1
shadrin@icmm.ru

Приведен эксперимент на одноосное циклическое растяжение с нарастающей амплитудой наполненного эластомерного материала. Такие материалы обладают сложными механизмами механического поведения, кроме упругости здесь присутствуют вязкоупругость и эффект размягчения Маллинза. По данным эксперимента в программном комплексе ANSYS построена математическая модель вязкоупругого материала с эффектом размягчения. Показано, что совместное использование гиперупругой модели Огдена, модели размягчения Огдена–Роксбурга и вязкоупругой модели Прони в программном комплексе ANSYS достаточно точно описывает механическое поведение материала для кратности удлинения 2.

Ключевые слова: *ansys; гиперупругость; вязкоупругость; полимеры; циклическая деформация.*

DOI: 10.17072/1993-0550-2021-3-52-57

Введение

Программный комплекс ANSYS используется при проектировании изделий, конструкций и инженерных систем. Материалы, которые изначально присутствуют в библиотеке ANSYS, не всегда удовлетворяют требованиям проектируемых объектов, поэтому в ANSYS существует возможность добавления новых материалов.

Для определения механических свойств материала используют данные экспериментов на растяжение, сжатие, сдвиг в зависимости от условий использования. С помощью комбинации моделей в ANSYS и подбора параметров можно описать данные эксперимента, в результате будет получена "цифровая копия" исследуемого материала в ANSYS.

Далее можно использовать полученный материал для дальнейшего проектирования.

Например, в работе [1], с помощью эксперимента на сжатие и последующей обработки данных в пакете ANSYS, получены гиперупругие характеристики для материала конвейерной ленты (резиноподобный материал). В работе [2] с помощью реологических экспериментов и последующие программной обработки в пакете ANSYS, получены зависимости вязкости от температуры и скорости сдвига для полимерного материала на основе полиэтилена. В работе [3], с помощью численного моделирования в ANSYS, показано влияние наполнителя на напряженное состояние в полимерном композите.

В работе [4] показана численная симуляция в ANSYS для вязкоупругих материалов при динамических нагрузках.

В работе [5] по результатам одноосных экспериментов на растяжение резины найдены параметры гиперупругости материала, а также параметры, описывающие эффект размягчения Патрикеева–Маллинза. Полученные в работе константы были использованы для численного моделирования механического поведения колеса автомобиля при резком торможении.

Результаты данной работы хорошо коррелируют с практическим опытом. В работе [6] показано описание в ANSYS вязкоупругих свойств с температурными зависимостями для полимерного материала. Полученные параметры были использованы для численного моделирования изготовления термоусаживаемой трубки.

Большой интерес для нефтяной, газовой и шинной промышленности имеют полимерные эластомерные материалы типа полиуретанов, полиэтиленов и резин. Эти материалы имеют сложное механическое поведение [7–10], которое требуется описать для дальнейшего использования в программных инженерных пакетах.

Как показано в работе [11], эффект Маллинза в наполненных эластомерах объясняется не столько накоплением повреждений в материале при его удлинении, сколько вязкоупругим механизмом. Например, при деформации до 50 % накопление повреждений вовсе отсутствует. Гистерезис вызван именно вязкоупругостью материала, которая при комнатной температуре не всегда полностью реализуется из-за того, что матрица материала очень медленно возвращается в исходное состояние при снятии нагрузки. Этим вызваны остаточные деформации при циклическом растяжении материала.

В данной работе показано совместное использование трех моделей в ANSYS (гиперупругой модели Огдена, модели размягчения Огдена–Роксбурга и вязкоупругой модели Прони) для описания механического поведения резинового материала.

В результате для модели материала получено 13 параметров. Параметры рассчитаны по данным эксперимента на циклическое растяжение с релаксацией напряжений и достаточно точно определяют механические свойства материала при растяжении до кратности удлинения 2 и могут быть использованы для дальнейшего проектирования изделий, работающих в условиях растяжения.

Эксперимент на одноосное циклическое растяжение

В качестве материала для исследования была использована резина в составе: каучук СКС-30-АРК, наполненный 30% технического углерода марки N330.

Из листа полимерного эластомерного материала были вырублены плоские образцы с лопатками (галтели – скругления при переходе от прямоугольной части образца к лопаткам) по стандарту ISO 527-2 5A.

На рис. 1 представлен эскиз образца.

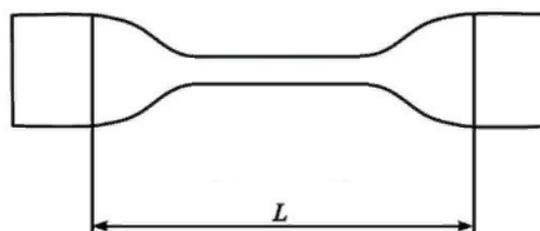


Рис. 1. Эскиз плоского образца; $L=50$ мм – рабочая длина, расстояние между захватами разрывной машины

Здесь за рабочую часть принимаем расстояние между захватами $L=50$ мм. Сечение образца – 2×4 мм². Скорость удлинения 14.2 мм/мин.

С полученными образцами были проведены испытания на одноосное циклическое растяжение с нарастающей деформацией. Испытания проводили на испытательной разрывной машине FS-100СТ.

Эксперимент состоял из шести циклов растяжения. Первый цикл – растяжение до удлинения $\lambda=1.5$, выдержка в течение 10 мин, затем разгрузка до начального состояния и вновь выдержки в течение 10 мин.

При следующем цикле растяжения-выдержки-сжатия-выдержки амплитуду растяжения увеличивали на 0.5 от амплитуды предыдущего цикла. Всего было сделано 6 циклов.

Такой эксперимент позволяет проследить не только вязкоупругое поведение при разных максимальных деформациях, но и динамику развития размягчения в материале.

В результате эксперимента (рис. 2, 3) получено три величины: время измерения, кратность удлинения λ образца и инженерные напряжения – F/S_0 .

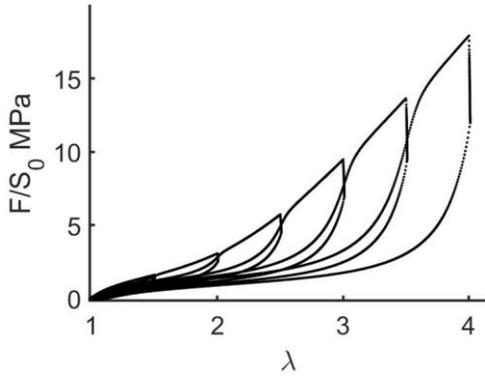


Рис. 2. График Кратность удлинения – Инженерные напряжения

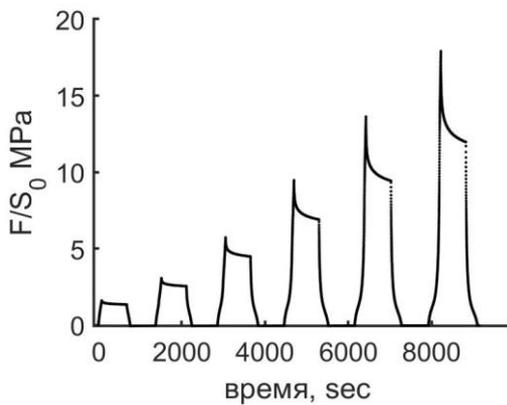


Рис. 3. График Время – Инженерные напряжения

Модель эксперимента в ANSYS

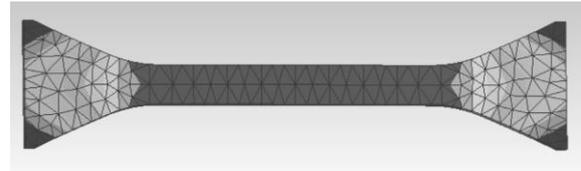
При описании механического поведения резинового образца в программе ANSYS, были смоделированы два цикла эксперимента. Каждый цикл моделировался отдельно и имеет свой набор параметров.

В ANSYS Workbench ("Transient Structural") построена модель эксперимента. На рис. 4 можно увидеть два расчета в ANSYS для кратности удлинения $\lambda = 1.5$ при разной дискретизации области.

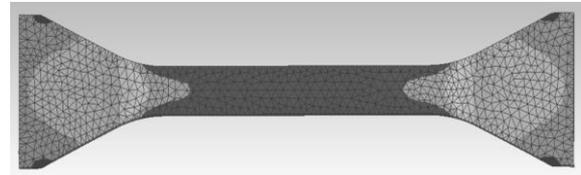
Все расчеты при подборе параметров модели сначала производились на самой крупной возможной сетке (рис. 4, а), при которой шел расчет.

Далее результаты уточнялись на мелкой сетке (рис. 4, б).

Здесь левая лопатка имела фиксированное закрепление и оставалась неподвижной, правая – перемещалась вместе с захватом, так же, как и осуществлялось в эксперименте.



а



б

Рис. 4. Фото расчета в ANSYS для кратности удлинения $\lambda = 1.5$ для разной дискретизации

В качестве модели материала в ANSYS (Engineering Data) была выбрана комбинация трех моделей:

1) гиперупругая модель Огдена 2-го порядка, где формула упругого потенциала выбрана для несжимаемой среды ($\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$):

$$w_{\text{ogden}} = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3)$$

где $N=2$, а параметры μ_p и α_p показаны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры гиперупругой модели Огдена 2-го порядка

индекс, p	μ_p , МПа	α_p
первый цикл эксперимента		
1	5	0,5
2	1,25	2,7
второй цикл эксперимента		
1	0,383	0,5
2	1,73	3,3

2) модель Огдена–Роксбурга для учета эффекта размягчения Маллинза; которая в нашем случае записывалась в виде

$$W = \eta W_1 + \varphi(\eta),$$

где $W_1 = -w_{\text{ogden}}$; $\varphi(\eta)$ определяется из дифференциального уравнения $\partial\varphi/\partial\eta = -W_1$; а параметр размягчения $\eta \in (0, 1]$, является безразмерным, его значение вычисляется по формуле

$$\eta = \begin{cases} 1, & [W_1 = W_{\text{max}}] \\ 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erf}\left(\frac{W_{\text{max}} - W_1}{m\beta W_{\text{max}}}\right), & [W_1 < W_{\text{max}}] \end{cases},$$

$\eta=1$, когда $W_1=W_{\text{max}}$, и соответствует состоянию материала, в котором отсутствует размягчение; параметры r, m, β показаны в табл. 2.

Таблица 2. Параметры модели Огдена–Роксбурга для учета эффекта размягчения Маллинза

r	m , МН·М	β
первый цикл и второй цикл эксперимента		
20	0,1	0,1

3) вязкоупругая модель Прони для сдвиговой релаксации. В нашем случае формулу для модели можно записать в виде

$$\mu(t) = \mu_{\infty} + \sum_{i=1}^M \mu_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

где $\mu(t)$ – текущий упругий модуль вязкоупругого материала в текущий момент времени t ; μ_{∞} – это долгосрочный модуль, соответствующий полностью отрелаксированному материалу, μ_i – значения упругого модуля в фиксированный момент релаксации τ_i , $M=3$ – количество различных времен релаксации.

Параметры μ_i и τ_i показаны в табл. 3.

Таблица 3. Параметры вязкоупругой модели Прони для сдвиговой релаксации

индекс, i	μ_i относительный модуль, МПа	τ_i время релаксации, сек.
первый цикл эксперимента		
1	0,45	5
2	0,07	35
3	0,05	400
второй цикл эксперимента		
1	0,6	5
2	0,06	35
3	0,04	400

В качестве расчетных данных ANSYS использовали: передвижение края образца (имитация движения захватов), истинные нормальные напряжения по оси растяжения, взятые из узла в середине образца.

Подбор параметров модели осуществляли с критерием наилучшей сходимости расчетных данных ANSYS и экспериментальных данных.

Анализ результатов

На рис. 5, 6, 7, 8 показано сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Из рис. 5 и 6 видно, что математическая модель, построенная в ANSYS, достаточно точно описывает экспериментальные данные для первого цикла эксперимента.

Из рис. 7 и 8 видно, что математическая модель, построенная в ANSYS, достаточно

точно описывает экспериментальные данные для второго цикла эксперимента на участке нагрузки и выдержки по времени, а при разгрузке накапливается расхождение с экспериментом.

Это может говорить о том, что вязкость в исследуемом материале на этапе нагрузки отличается от вязкости на этапе разгрузки.

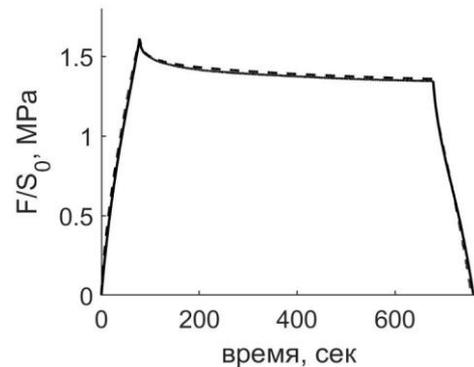


Рис. 5. Кривая F/S_0 в зависимости от времени эксперимента; черная линия – экспериментальные данные, черная пунктирная – расчетная кривая в программе ANSYS

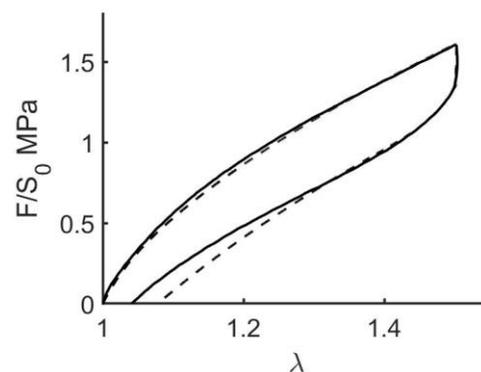


Рис. 6. Кривая F/S_0 в зависимости от λ образца; черная линия – экспериментальные данные первого цикла эксперимента, черная пунктирная – расчетная кривая в программе ANSYS для первого цикла эксперимента

Если проанализировать материальные константы для гиперупругости (табл. 1), можно заметить, что для второго цикла эксперимента сильно возрастают нелинейные свойства.

Если проанализировать материальные константы для вязкоупругой модели Прони (табл. 2), можно заметить увеличение быстрых времен релаксации и уменьшение медленных времен для второго цикла эксперимента.

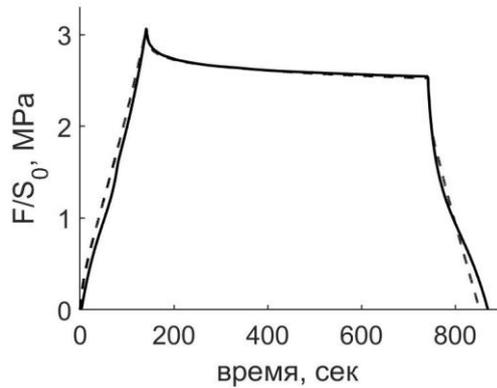


Рис. 7. Кривая F/S_0 в зависимости от времени эксперимента; черная линия – экспериментальные данные, черная пунктирная – расчетная кривая в программе ANSYS для второго цикла эксперимента

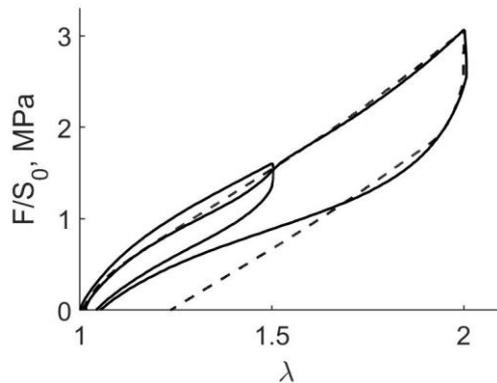


Рис. 8. Кривая F/S_0 в зависимости от λ образца; черная линия – экспериментальные данные первого и второго цикла, черная пунктирная – расчетная кривая в программе ANSYS для второго цикла эксперимента

Выводы

В ANSYS построена механическая модель резины, состоящая из комбинации гиперупругой модели Огдена, модели размягчения Огдена–Роксбурга и вязкоупругой модели Прони.

Рассчитаны 13 параметров для этой модели в ANSYS, что позволяет достаточно точно описывать механическое поведение вязкоупругого материала для кратности удлинения 1,5 и 2.

Полученные материальные константы для гиперупругости показывают увеличение нелинейных свойств в материале с увеличением кратности удлинения.

Полученные материальные константы для вязкоупругости показывают увеличение быстрых времен релаксации и уменьшение медленных времен релаксации с увеличением кратности удлинения в материале.

Список литературы

1. Пешков С.В. Определение специальных характеристик элементных составляющих конвейерных лент // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 1 (77). С. 136–138.
2. Лобов С.А., Казаков А.В. Исследование вязкости полимера в зависимости от температуры и скорости сдвига // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 18–21.
3. Кочнева Н.М., Гуляев А.В. Исследование влияния модуля связующего материала и степени наполнения на механические свойства дисперсно-наполненного полимера // XII Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. тр. в 4 т. 2019. С. 687–689.
4. Panchenko S.P. Numerical simulation of viscoelastic materials // Наука та прогрес транспорту. 2014. № 5 (53). С. 157–165.
5. Соколов А.К., Свистков А.Л., Комар Л.А., Шадрин В.В., Терпугов В.Н. Проявление эффекта размягчения материала в изменении напряженно-деформированного состояния шины // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. Т. 9, № 3. С. 358–365.
6. Сметанников О.Ю., Фасхутдинова Ю.Б., Субботин Е.В. Исследование средствами ansys эффекта памяти формы в изделиях из сшитого полиэтилена // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13, № 2. С. 134–149.
7. Beliaev A.Yu., Svistkov A.L., Iziumov R.I., Osorgina I.V., Kondyurin K.V., Bilek M.M., McKenzie D. Modelling of the mechanical behavior of a polyurethane finger interphalangeal joint endoprosthesis after surface modification by ion implantation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 123. Article ID 012001.
8. Guseva M.A., Gerasin V.A., Garishin O.K., Shadrin V.V., Plekhov O.A., Pawlak A. Thermal effects under elastic and plastic deformation of polyethylene // Polymer. Elsevier Ltd. 2015. Vol. 56. P. 416–427.

9. Sokolov A.K., Svistkov A.L., Shadrin V.V., Terpigov V.N. Influence of the Mullins effect on the stress–strain state of design at the example of calculation of deformation field in tyre // International Journal of Non-Linear Mechanics–Elsevier Ltd. 2018. Vol. 104. P. 67–74.
10. Garishin O.K., Shadrin V.V., Kornev Yu.V. Mechanical studies of rubber micro- and nanocomposites promising for the tire industry. Uniaxial and biaxial tests // Materials Physics and Mechanics. 2019. Vol. 42, № 4. P. 445–454.
11. Shadrin V.V. Recovery of the mechanical properties of rubber under thermal treatment / Polymer Science (Ser. B). 2005. Vol. 47, № 7–8. P. 220–222.

Features of using the viscoelastic material model in the ANSYS software package

A. G. Pelevin^{1,2}, V. V. Shadrin²

¹ Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

pelevin@icmm.ru

² Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science

1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia

shadrin@icmm.ru

The paper presents an experiment on uniaxial cyclic stretching with increasing amplitude of a filled elastomeric material. Such materials have complex mechanisms of mechanical behavior, in addition to elasticity, there are viscoelasticity and the Mullins softening effect. According to the experimental data, a mathematical model of a viscoelastic material with a softening effect is constructed in the ANSYS software package. It is shown that the combined use of the Ogden hyperelastic model, the Ogden–Roxburgh softening model, and the Prony viscoelastic model in the ANSYS software package accurately describes the mechanical behavior of the material for a multiplicity of elongation 2.

Keywords: *ansys; hyperelasticity; viscoelasticity; polymers; cyclic deformation.*