

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 53.087.44

DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-95-103

<https://elibrary.ru/LWRKKP>

Независимость равновесного состояния размягченного эластомерного нанокompозита при одноосном нагружении от способа размягчения материала

Владимир Васильевич Шадрин^{1,2}¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия²Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
shadrin@icmm.ru

Аннотация. Для создания математической модели эластомерного материала требуется описать его равновесную кривую. Такую кривую можно получить путем очень медленно-го растяжения или по точкам релаксации напряжений при заданной деформации. Проведены экспериментальные исследования эластомеров, влияния их релаксации напряжений при 100 % деформации от скорости растяжения. Целью исследования явилось определить, может ли скорость растяжения материала отразиться на равновесном состоянии нанокompозита. Испытывались бутадиен-нитрильный каучук, наполненный 40 массовыми частями технического углерода и бутадиен-стирольный каучук, наполненный 50 массовыми частями техуглерода. Образцы растягивались до 100 % деформации со скоростями 10, 100, 1200 %/мин и проводилась выдержка в течение 120 мин. Проведено растяжение-сжатие образца до 100 % в количестве 200 циклов с последующей выдержкой при максимальной деформации 120 мин. Установлено, что скорость растяжения влияет на релаксацию только в начальном этапе выдержки по времени – до 15 мин – потом кривые релаксации напряжений совпадают. При циклическом испытании падение напряжений в максимальной точке деформации происходит очень медленно и до конца не совпадает с кривой релаксации. При дальнейшей временной выдержке кривая падения напряжения совпадает с кривой релаксации. Такое поведение эластомеров связано с их вязкоупругостью и с накоплением повреждений при релаксации напряжений при максимальной деформации и при циклических испытаниях.

Ключевые слова: напряжение; деформация; циклическая деформация; релаксация напряжений; выдержка по времени; скорость растяжения, эффект размягчения Маллинза

Для цитирования: Шадрин В.В. Независимость равновесного состояния размягченного эластомерного нанокompозита при одноосном нагружении от способа размягчения материала // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2024. Вып.4(67). С. 95–103. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-95-103. <https://elibrary.ru/LWRKKP>.

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания ПФИЦ УрО РАН. Регистрационный номер: АААА-А20-120022590044-7.

Статья поступила в редакцию 11.10.2024; одобрена после рецензирования 30.11.2024; принята к публикации 09.12.2024.



Эта работа © 2024 Шадрин В.В. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MECHANICS

Research article

The Equilibrium State of the Softened Elastomeric Nanocomposite under Uniaxial Loading and its Independence From the Method of Material Softening

Vladimir. V. Shadrin^{1,2}¹Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia²Perm State University, Perm, Russia

shadrin@icmm.ru

Abstract. For a mathematical model of an elastomeric material, the researcher must describe its equilibrium curve. This curve can be obtained by very slow stretching or by stress relaxation points at a given deformation. Experimental studies of filled elastomers and the effect of stress relaxation at 100% deformation from the stretching rate were conducted. The aim of the study was to determine how the stretching rate of the material affects the equilibrium state of the nanocomposite. Tests were performed for the specimens of butadiene-nitrile rubber containing 40 parts by weight of black carbon and butadiene-styrene rubber containing 50 parts by weight of black carbon. The specimens were stretched to the strain of 100 % at the rates of 10, 100, 1200 %/min and then aged for 2 hours. The specimens were subjected to tensile-compressive loads up to the strain of 100 % during 200-cycle test, and then were aged at maximum strain for 2 hours. It was found that the tensile rate affects the stress relaxation only at the early stage of aging – up to 15 minutes – after which the stress relaxation curves coincide. In cyclic testing, a decrease in the stress magnitude at the point of maximum strain is very slow and does not coincide with the relaxation curves, but with increasing time of holding one can observe a complete coincidence of the stress and relaxation curves. Such behavior of elastomers is due to their viscoelasticity and the accumulation of damage during stress relaxation at maximum deformation and cyclic testing.

Keywords: *stress; strain; cyclic strain; stress relaxation; aging, tensile strain rate, Mullins softening effect*

For citation: V. V., Shadrin (2024), "The Equilibrium State of the Softened Elastomeric Nanocomposite under Uniaxial Loading and its Independence From the Method of Material Softening", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 4(67), pp. 95-103. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-95-103. <https://elibrary.ru/LWRKKP>.

Acknowledgments: the work was performed within the framework of the state order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject no. AAAA-A20-120022590044-7).

The article was submitted 11.10.2024; approved after reviewing 30.11.2024; accepted for publication 09.12.2024

Введение

В математических моделях эластомеров, как правило, присутствуют механизмы вязкоупругого поведения. Предложены различные математические модели, и продолжают появляться новые определяющие уравнения по описанию поведения эластомерных композитных материалов [1–8]. Для феноменологических моделей важно выделить и описать упругую составляющую свойств материала. В работе [9] предложен метод нахождения точек равновесной кривой из экспериментальных данных, используя циклическое растяжение с разными скоростями и вложенными циклами. Здесь, после первого цикла растяжения-разгрузки, когда материал максимально размягчился, проводятся циклические испытания, когда последующие циклы нагружаются до меньших деформаций от максимальной и производится выдержка по времени в точках заданной деформации.

В результате временной выдержки в материале падают напряжения до постоянной величины. При разгрузке разгрузочные деформации образца с каждым последующим циклом делают нарастающими с определенным шагом, и также делается временная выдержка. В этих точках разгрузки структура материала частично возвращается в исходное состояние и напряжения возрастают. Так определяются равновесные точки материала после релаксации напряжений в результате временных выдержках при растяжениях и разгрузках.

Известно, что в вязкоупругих материалах напряжения при растяжении зависят от скорости: чем скорость выше, тем выше кривая растяжения [10–14]. Такое поведение связано с перестройкой структуры материала, которая при больших скоростях растяжения не успевает осуществиться при больших скоростях. Размягчение материала связано с накоплением повреждений и с перестройкой структуры материала, которая не полностью осуществилась в результате разгрузки – эффект Маллинза [15, 16].

Для определения других характеристик, таких, как размягчение материала, гистерезисные потери, остаточная деформация, используются различные виды циклического нагружения – многократное циклическое нагружение [17], циклическое растяжение с нарастающей амплитудой [18] или сложное циклическое с уменьшающейся амплитудой деформации, по сравнению с предыдущим нагружением и с увеличивающейся амплитудой разгрузки [19]. В работе исследовано многократное циклическое деформирование до заданной величины для нахождения точки равновесной кривой на последнем цикле растяжения.

Целью работы является показать, что при некоторой временной выдержке кривые релаксации напряжений совпадают и не зависят от скоростей растяжения.

Программы механических испытаний

В процессе испытания использовались резины на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-18СНТ, наполненного 40 массовыми частями (м.ч.) технического углерода и бутадиен-стирольного каучука СКМС-30АРК, наполненного 50 м.ч. техуглерода.

Образцы изготавливались в виде колец, чтобы исключить выползание из захватов. Испытания проводились на уникальном четырехвекторном испытательном стенде фирмы Zwick/Roell. Деформация отслеживалась по перемещению меток с помощью видеодатчика VideoXtens.

Образцы растягивались с разными скоростями – 10, 100 и 1200 %/мин – до 100 % деформации. При этой деформации проводилась выдержка по времени 120 мин, и фиксировалось падение напряжений.

Проведено исследование графика падения напряжений при циклическом испытании бутадиен-стирольного образца до деформации 100 % при 200 циклах испытания. При растяжении последним циклом образец фиксировался при 100 % деформации тоже на 120 мин для получения кривой релаксации напряжений.

Эксперименты и обсуждение результатов

На рис. 1 и 2 представлены графики релаксации напряжений при разных скоростях растяжения резин из бутадиен-нитрильного каучука СКН-18СНТ + технического углерода (ТУ) 40 массовых частей (м. ч.) и бутадиен-стирольного каучука СКМС-30АРК + ТУ 50 м. ч. Здесь по оси Y – истинное напряжение σ – усилие, деленное на истинную площадь поперечного сечения:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 + \varepsilon / 100),$$

где $\sigma_0 = F/S_0$ – относительное напряжение (F – сила, S_0 – начальная площадь поперечного сечения), ε – деформация в %.

Для более удобного сравнения кривых графики со скоростью растяжения 10 %/мин сдвинут влево на 9.5 мин (рис. 1, 2).

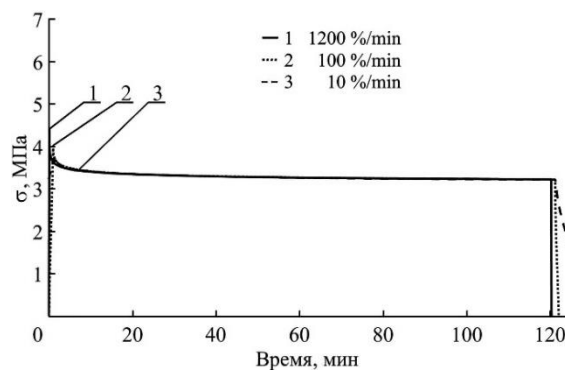


Рис. 1. Графики релаксации напряжений резины из бутадиен-нитрильного каучука + ТУ 40 м. ч. при деформации 100 %; 1 – скорость растяжения 1200 %/мин, 2 – скорость 100 %/мин, 3 – скорость 10 %/мин

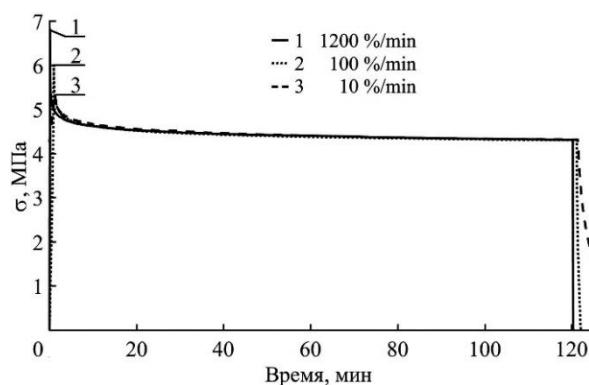


Рис. 2. Графики релаксации напряжений резины из бутадиен-стирольного каучука + ТУ 50 м. ч. при деформации 100 %; 1 – скорость растяжения 1200 %/мин, 2 – скорость 100 %/мин, 3 – скорость 10 %/мин

Эксперимент показал, что при больших скоростях вязкоупругая составляющая эластомеров не успевает сработать до конца, и графики растяжения проходят выше, чем при медленных скоростях. В результате, при достижении 100 %-ной деформации, напряжение заметно выше при скорости нагружения 1200 %/мин, чем при скоростях 100 %/мин или 10 %/мин. Однако кривые релаксации материала, при растяжении с разными скоростями, быстро совпадают и уже при 10 мин выдержки сливаются. При 120 мин выдержки кривые релаксации становятся почти горизонтальными, падение напряжений очень медленно продолжается в связи с накоплением в материале микрповреждений. Можно считать, что напряжение при 120 мин выдержки – это точка равновесной кривой материала, т. е. точка, в которой завершилась диссипативная составляющая, вязкоупругость полностью реализовалась.

Можно объяснить появление вязкоупругой составляющей в наполненных эластомерах при растяжении скольжением растягивающихся полимерных волокон вдоль частиц наполнителя. В ненаполненных эластомерах вязкоупругость отсутствует.

При растяжении вязкоупругая составляющая имеет некую скорость, зависящую от скорости растяжения – вынужденная вязкоупругость. При разгрузке образца происходит процесс обратного скольжения полимерных волокон, возвращение их в начальное состояние. Но этот процесс мало зависит от скорости разгрузки – естественная вязкоупругость, скорость которой отличается от скорости во время растяжения [20]. При обычных температурах окружающей среды подвижность молекул недостаточно высокая и они не до конца возвращаются в исходное состояние. В механике это называется остаточной деформацией. Однако при нагреве материала, например, до +70 °С подвижность полимерных молекул увеличивается, и материал может полностью восстановить свою первоначальную структуру и свои свойства [21]. Более полное восстановление свойств может происходить при и комнатной температуре, но при очень длительном времени отдыха [21]. При появлении микрповреждений полного восстановления структуры и механических свойств в материале не происходит.

В наших экспериментах напряжение при выдержке 120 мин отличается от выдержки 15 мин на 6.0 %, в случае выдержки 20 мин. отличие на 4.9 % и не зависит от скорости деформации. Такие погрешности определения точки равновесной кривой весьма небольшие и соответствуют погрешности эксперимента. Это показывает, что выдержка по времени в течение 15–20 мин является эффективным способом исключить влияние вязкоупругости в точках остановки деформации при любой скорости растяжения.

На рис. 3 приведен график циклической деформации до 200 раз со скоростью 100 %/мин бутадиен-стирольной резины, наполненной техническим углеродом 50 массовых частей. Это типичный график циклического нагружения, когда после первого цикла происходит размягчение материала, потом графики циклического растяжения стабилизируются, но с каждым новым циклом кривые немного опускаются вниз, процесс размягчения продолжается. Здесь скорость вязкоупругой составляющей материала при его растяжении стабилизируется, как и стабилизируется скорость восстановления структуры при разгрузке. Одновременно происходит накопление повреждений. Но, при многократном нагружении до заданной деформации, вязкоупругая составляющая постепенно реализуется и стремится к нулю.

Нижняя кривая разгрузки на рис. 3 соответствует разгрузке материала после релаксации напряжений при выдержке 120 мин в последнем растяжении.

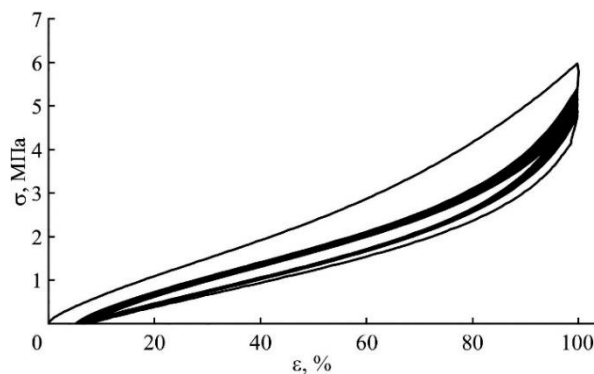


Рис. 3. График 200-кратного растяжения до деформации 100 % бутадиен-стирольного каучука + ТУ 50 м.ч.

На рис. 4 представлены два графика релаксации напряжений – один после разового растяжения, другой – после циклического деформирования 200 раз. В обоих случаях деформация составляла 100 %, скорость растяжения – 100 %/мин.

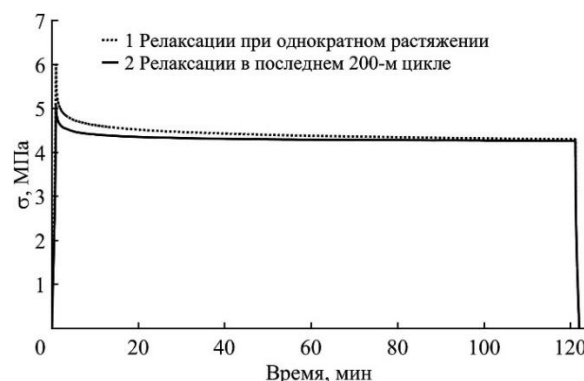


Рис. 4. Кривые релаксации напряжений резины из бутадиен-стирольного каучука + ТУ 50 м.ч.; 1 – после 200 циклов деформации последнее растяжение до 100 %, 2 – после однократного растяжения до 100 %

Из графиков видно, что через 120 мин релаксации обе кривые совпадают. Однако 200 циклов деформации недостаточно, чтобы вязкоупругая компонента полностью реализовалась, и материал пришел в равновесное состояние. Такое состояние наступает через 10 мин временной выдержки при заданной деформации.

Циклический эксперимент показывает, что для достижения равновесной точки напряжения количество циклов должно быть существенно больше 200. Менее трудоемко находить эту точку при однократной деформации с последующей выдержкой по времени с достаточной точностью 15–20 мин.

Заключение

Данное исследование по определению равновесной точки напряжения при заданной деформации показало, что скорость испытания мало влияет на кривую релаксации напряжений и через 10 мин кривые релаксации при разных скоростях растяжения практически совпадают. Погрешность напряжений при выдержке 15 мин составляет 6.0 % по сравнению с напряжениями при 120 мин выдержки, при выдержке 20 мин погрешность – 4.9 %.

При испытании по программе растяжение-сжатие с количеством 200 циклов максимальное напряжение при последнем растяжении приближается к равновесной точке, но так и не достигает ее. Для ее достижения требуется еще большее количество циклов. Определение равновесных точек таким способом трудоемко и нецелесообразно.

Для определения точки равновесной кривой для заданной деформации вполне достаточно производить выдержку по времени в количестве 15–20 мин. За это время вязкоупругая составляющая практически реализуется с допустимой погрешностью.

Список источников

1. Chaimoon K., Chindaprasirt P. An anisotropic hyperelastic model with an application to soft tissues // European Journal of Mechanics / A Solids. 2019. Vol. 78. P. 103845. URL: doi:10.1016/j.euromechsol.2019.103845 (дата обращения: 10.10.2024).

2. *Külcü I.D.* A hyperelastic constitutive model for rubber-like materials // *Archive of Applied Mechanics*. 2020. Vol. 90. P. 615–622. URL: doi:10.1007/s00419-019-01629-7 (дата обращения: 10.10.2024).
3. *Zhan L., Wang S., Qu S., Steinmann P., Xiao R.* A general continuum damage model for soft composites // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2023. Vol. 175, Is. 3. P. 105290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2023.105290> (дата обращения: 10.10.2024).
4. *Xiang Y., Zhong D., Rudykh S., Zhou H., Qu, S., & Yang, W.* A Review of Physically Based and Thermodynamically Based Constitutive Models for Soft Materials // *Journal of Applied Mechanics*. 2020. Vol. 87, no. 11. P. 110801. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4047776> (дата обращения: 10.10.2024).
5. *Akbari R., Morovati V., Dargazany R.* Reverse physically motivated frameworks for investigation of strain energy function in rubber-like elasticity // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2022. Vol. 221. P. 107110. URL: doi:10.1016/j.ijmecsci.2022.107110 (дата обращения: 10.10.2024).
6. *Zhu P., Zhong Z.* Constitutive modelling for the mullins effect with permanent set and induced anisotropy in particle-filled rubbers // *Applied Mathematical Modelling*. 2021. Vol. 97. P. 19–35. URL: doi: 10.1016/j.apm.2021.03.031 (дата обращения: 10.10.2024).
7. *Zhong D., Xiang Y., Yin T., Yu H., Qu S., Yang W.* A physically-based damage model for soft elastomeric materials with anisotropic Mullins effect // *International Journal of Solids and Structure*. 2019. Vol. 176–177. P. 121–134. URL: doi: 10.1016/j.ijsolstr.2019.05.018 (дата обращения: 10.10.2024).
8. *Fazekas B., Goda T.J.* Constitutive modelling of rubbers: Mullins effect, residual strain, time-temperature dependence // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 210. P. 106735. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106735> (дата обращения: 10.10.2024).
9. *Shadrin V.V., Svistkov A.L., Mokhireva K.A., Garishin O.K.* Peculiarities of using dumbbell specimens made of elastomeric materials subject to finite deformation in complex loading tests // *J. Letters on Materials*. 2023 Vol. 13, no. 1. P. 56–61. URL: https://lettersonmaterials.com/Upload/Journals/42127/56-61_u.pdf (дата обращения: 10.10.2024).
10. *Zhou J, Jiang L, Khayat R.E.* A micro-macro constitutive model for finite-deformation viscoelasticity of elastomers with nonlinear viscosity // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2018. Vol. 110. P. 137–154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2017.09.016> (дата обращения: 10.10.2024).
11. *Wei W., Yuan Y., Igarashi A., Zhu H., Luo K.* Generalized hyper-viscoelastic modeling and experimental characterization of unfilled and carbon black filled natural rubber for civil structural applications // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 253. P. 119211. URL: doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119211.
12. *Ricker A., Gierig M., Wriggers P.* Multiplicative, Non-Newtonian Viscoelasticity Models for Rubber Materials and Brain Tissues: Numerical Treatment and Comparative Studies // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2023. Vol. 30. P. 2889–2927. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09889-x> (дата обращения: 10.10.2024).
13. *Annarasa V., Popov A.A., De Focatiis D.S.A.* A phenomenological constitutive model for the viscoelastic deformation of elastomers // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2020. Vol. 24. P. 463–479. URL: <https://doi.org/10.1007/s11043-020-09452-2> (дата обращения: 10.10.2024).
14. *Anssari-Benam A., Hossain M.* A pseudo-hyperelastic model incorporating the rate effects for isotropic rubber-like materials // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2023. p. 105347. URL: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2023.105347> (дата обращения: 10.10.2024).
15. *Mullins L., Tobin N.R.* Stress softening in rubber vulcanizates. Part I. Use of a strain amplification factor to describe the elastic behavior of filler reinforced vulcanized rubber // *J. Appl.*

- Polym. Sci. 1965. Vol. 9, no. 9. P. 2993–3009. URL: <https://doi.org/10.1002/app.1965.070090906> (дата обращения: 10.10.2024).
16. Harwood J.A.C., Mullins L., Payne A.R. Stress softening in natural rubber vulcanizates. Part II. Stress softening effects in pure gum and filler loaded rubbers // *J. Appl. Polym. Sci.* 1965. Vol. 9, no. 9. P. 3011–3021. URL: <https://doi.org/10.1002/app.1965.070090907> (дата обращения: 10.10.2024).
17. Rickaby S.R., Scott N.H. A cyclic stress softening model for the Mullins effect // *International Journal of Solids and Structures*. Elsevier. 2013. Vol. 50. P. 111–120. URL: www.elsevier.com/locate/ijsolstr (дата обращения: 10.10.2024).
18. Diani J., Brieu M., Gilormini P. Observation and modeling of the anisotropic visco-hyperelastick behavior of a rubberlike material // *International Journal of Solids and Structures*. Elsevier. 2006. V. 43. P. 3044–3056. URL: www.elsevier.com/locate/ijsolstr (дата обращения: 10.10.2024).
19. Netzker C., Husnu D., Kaliske M. An anochronic plasticity formulation for filled rubber // *International Journal of Solids and Structures*. Elsevier. 2010. Vol. 47. P. 2371–2379. URL: www.elsevier.com/locate/ijsolstr (дата обращения: 10.10.2024).
20. Kislitsyn V.D., Svistkov A.L., Mokhireva K.A., Shadrin V.V. Determination of the inelastic behavior of viscoelastic materials using the new thermodynamic model // *AIP Conference Proceedings* 2627, Is. 1, 030002 (2023) URL: <https://doi.org/10.1063/5.0119254> (дата обращения: 10.10.2024).
21. Shadrin V.V. Recovery of the mechanical properties of rubber under thermal treatment // *Polymer Science*. 2005. Ser. B. Vol. 47, no. 7–8. P. 220–222. URL: https://www.researchgate.net/publication/280315559_Recovery_of_the_mechanical_properties_of_rubber_under_thermal_treatment_Polymer_Science_Ser_B_2005_-_V_47_No_7-8_-_P_220-222 (дата обращения: 10.10.2024).

References

1. Chaimoon, K., Chindaprasirt, P. (2019), "An anisotropic hyperelastic model with an application to soft tissues", *European Journal of Mechanics / A Solids*, vol. 78, p. 103845.
2. Külçü, I.D. (2020), "A hyperelastic constitutive model for rubber-like materials", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 90, pp. 615–622.
3. Zhan, L., Wang, S., Qu, S., Steinmann, P. and Xiao, R. (2023), "A general continuum damage model for soft composites", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 175, is. 3, p. 105290.
4. Xiang, Y., Zhong, D., Rudykh, S., Zhou, H., Qu, S., & Yang, W. (2020) "A Review of Physically Based and Thermodynamically Based Constitutive Models for Soft Materials", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 87, no. 11. p. 110801.
5. Akbari, R., Morovati, V. and Dargazany, R. (2022), "Reverse physically motivated frameworks for investigation of strain energy function in rubber-like elasticity", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 221, p. 107110.
6. Zhu, P., Zhong, Z. (2021), "Constitutive modelling for the mullins effect with permanent set and induced anisotropy in particle-filled rubbers", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 97, pp. 19–35.
7. Zhong, D., Xiang, Y., Yin, T., Yu, H., Qu, S. and Yang, W. (2019) "A physically-based damage model for soft elastomeric materials with anisotropic Mullins effect", *International Journal of Solids and Structure*, vol. 176–177, pp. 121–134.
8. Fazekas, B., Goda, T.J. (2021), "Constitutive modelling of rubbers: Mullins effect, residual strain, time-temperature dependence", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 210, p. 106735.
9. Shadrin, V.V., Svistkov, A.L., Mokhireva, K.A. and Garishin, O.K. (2023), "Peculiarities of using dumbbell specimens made of elastomeric materials subject to finite deformation in complex loading tests", *J. Letters on Materials*, vol. 13, no. 1, pp. 56–61.

10. Zhou, J, Jiang, L. and Khayat, R.E. (2018), "A micro-macro constitutive model for finite-deformation viscoelasticity of elastomers with nonlinear viscosity", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 110, pp. 137–154.
11. Wei, W., Yuan, Y., Igarashi, A., Zhu, H. and Luo, K. (2020), "Generalized hyper-viscoelastic modeling and experimental characterization of unfilled and carbon black filled natural rubber for civil structural applications", *Construction and Building Materials*, vol. 253, p. 119211.
12. Ricker, A., Gierig, M. and Wriggers, P. (2023), "Multiplicative, Non-Newtonian Viscoelasticity Models for Rubber Materials and Brain Tissues: Numerical Treatment and Comparative Studies", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 30, pp. 2889–2927.
13. Annarasa, V., Popov, A.A., and De Focatiis, D.S.A. (2020), "A phenomenological constitutive model for the viscoelastic deformation of elastomers", *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 24, pp. 463–479.
14. Anssari-Benam, A., Hossain, M. (2023), "A pseudo-hyperelastic model incorporating the rate effects for isotropic rubber-like materials", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, p. 105347.
15. Mullins, L., Tobin, N.R. (1965) "Stress softening in rubber vulcanizates. Part I. Use of a strain amplification factor to describe the elastic behavior of filler reinforced vulcanized rubber", *J. Appl. Polym. Sci.* vol. 9, no. 9, pp. 2993–3009.
16. Harwood, J.A.C., Mullins, L. and Payne, A.R. (1965), "Stress softening in natural rubber vulcanizates", Part II. Stress softening effects in pure gum and filler loaded rubbers", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 9, no. 9, pp. 3011–3021.
17. Rickaby, S.R., Scott, N.H. (2013), "A cyclic stress softening model for the Mullins effect", *International Journal of Solids and Structures. Elsevier*, vol. 50, pp. 111–120.
18. Diani, J., Brieu, M. and Gilormini, P. (2006), "Observation and modeling of the anisotropic visco-hyperelastic behavior of a rubberlike material", *International Journal of Solids and Structures. Elsevier*, vol. 43, pp. 3044–3056.
19. Netzker, C., Husnu, D. and Kaliske, M. (2010) "An anochronic plasticity formulation for filled rubber", *International Journal of Solids and Structures. Elsevier*, vol. 47, pp. 2371–2379.
20. Kislitsyn, V.D., Svistkov, A.L., Mokhireva, K.A. and Shadrin, V.V. (2023) "Determination of the inelastic behavior of viscoelastic materials using the new thermodynamic model", *AIP Conference Proceedings 2627, Issue 1, 030002*.
21. Shadrin, V.V. (2005) "Recovery of the mechanical properties of rubber under thermal treatment", *Polymer Science Ser. B*, vol. 47, no. 7–8, pp. 220–222.

Информация об авторе:

В. В. Шадрин – ведущий инженер, Институт механики сплошных сред УрО РАН (614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), инженер, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15), AuthorID 10927.

Information about the author:

V. V. Shadrin – Leading Engineer, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS (1, Ac. Koroleva St., Perm, Russia, 614013), Engineer, Perm State University (15, Bukireva St., Perm, Russia, 614068), AuthorID: 10927.