

УДК 678:539.736

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.077>

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В ЭЛАСТОМЕРАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ

¹Дырда В.И., ²Гребенюк С.Н., ³Сокол С.П., ⁴Слободян С.Б., ¹Агальцов Г.Н.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Запорожский национальный университет, ³Днепровский аграрно-экономический университет,

⁴Подольский государственный аграрно-технический университет

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТИВ У ЕЛАСТОМЕРАХ ПІД ЧАС ТРИВАЛОГО ЦИКЛІЧНОГО РУЙНУВАННЯ

¹Дирда В.І., ²Гребенюк С.М., ³Сокол С.П., ⁴Слободян С.Б., ¹Агальцов Г.М.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Запорізький національний університет, ³Дніпровський аграрно-економічний університет, ⁴Подільський державний аграрно-технічний університет

SOME PROBLEMS OF INVESTIGATION OF NONLINEAR EFFECTS IN ELASTOMERS WITH LONG CYCLIC DESTRUCTION

¹Dyrda V.I., ²Grebennyuk S.M., ³Sokol S.P., ⁴Slobodian S.B., ¹Ahaltsov H.M.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine, ²Zaporizhzhya National University, ³Dnipro State Agrarian and Economic University, ⁴State Agrarian and Engineering University in Podilia

Аннотация. В эластомерах (резилах, полиуретанах) различают геометрическую нелинейность, вызванную формой образца или асимметричностью приложения нагрузки, и физическую нелинейность, вызванную в основном разрушением и рекомбинацией наполненной структуры. Последняя форма нелинейности хорошо известна технологам и широко используется в инженерной практике: при наполнении резины техническим углеродом или другими наполнителями (текстильные волокна, медные шарики и т.д.) нелинейность механических характеристик её резко возрастает. Нелинейные эффекты в наполненных эластомерах выражаются в основном в зависимости модуля сдвига и коэффициента диссипации энергии от амплитуды деформации. При очень малых деформациях резина обладает повышенной жёсткостью, по мере увеличения деформации её эластичность возрастает. Явление это известно как эффект Маллинза и объясняется тиксотропией, т.е. разрушением и рекомбинацией наполненной структуры. Для слабонаполненных резин тиксотропия практически не наблюдается. Традиционно считается, что такие резины относятся к линейным, и эта линейность соблюдается на протяжении всего времени эксплуатации. То есть, считается, что в линейных резинах на всем протяжении их циклического деформирования вплоть до отказа образцов сохраняется линейная зависимость основных информативных параметров и резина полностью подчиняется закону Гука.

Вместе с тем, на основании многочисленных и продолжительных экспериментальных исследований слабо-наполненных резин при их длительном циклическом нагружении установлена закономерность, заключающаяся в том, что резины с изначально линейными механическими характеристиками при фазовом скачкообразном переходе от метастабильного состояния к лабильному приобретают существенно нелинейные свойства.

Такая закономерность была подтверждена экспериментально при изучении механизма циклического разрушения слабонаполненной резины: в изначальном состоянии в диапазоне относительных деформаций сдвига 0-40 % резина подчинялась закону Гука, т.е. обладала линейными свойствами основных информативных параметров – модуля сдвига и коэффициента диссипации энергии. Показано, что в такой резине при переходе от метастабильного состояния (постепенно-кинетического характера разрушения) к лабильному изначально линейные механические характеристики приобретают существенно нелинейный характер.

Объяснение этому находится в рамках термодинамики необратимых процессов. С термодинамической точки зрения эластомеры в процессе длительного циклического нагружения находятся в метастабильном состоянии, т.е. в сильнонеравновесном состоянии; для таких систем устойчивость обеспечивается ростом диссипации энергии, что и наблюдается экспериментально. При этом процесс разрушения эластомеров, как эволюционный по своей сущности, характеризуется следующим: наличием автокаталитического механизма роста повреждений, что является основой сильной неравновесности процесса разрушения и эволюции материала; отсутствием периодичности автокаталитического процесса, что обеспечивает однонаправленную эволюцию материала.

Ключевые слова: эластомер, амплитудные эффекты, диссипация энергии, модуль сдвига, фазовый переход, циклическое разрушение

Экспериментальное определение амплитудных зависимостей механических параметров резин

К таким зависимостям относятся, прежде всего, условно-равновесного модуля сдвига G_∞ , динамического модуля сдвига G_δ и коэффициента диссипации энергии ψ от амплитуды относительного сдвига γ , полученные при различном времени циклического разрушения образцов [1, 2].

Для получения таких зависимостей были проведены довольно продолжительные экспериментальные исследования: партия элементов сдвига типа БРМ102 (128 образцов; блоки резинометаллические; размер резинового элемента $50 \times 100 \times 200$ мм) из резины 51-1562 (слабонаполненная резина, наполнение техуглеродом 5 масс.ч.) испытывалась в течение 35000 часов, т.е. более 6 лет.

Эпизодически ряд образцов подвергался комплексу физико-механических испытаний для определения реологических параметров. Регистрация таких параметров осуществлялась вплоть до отказа образцов; для элементов сдвига типа БРМ испытания продолжались и после отказа образцов: из резинового массива вырезались модельные образцы, которые доразрушались на специальных стендах.

Временные зависимости динамического модуля сдвига и коэффициента диссипации энергии показаны на рис. 1 и рис. 2. Эти зависимости достаточно полно характеризуют структурные изменения, происходящие в резиновом массиве при длительном циклическом разрушении.

Данные для отношения текущего значения динамического модуля $G_\delta(t)$ к его первоначальному значению $G_\delta^*(t=0)$ на рис. 1 получены для партии БРМ102 из резины 51-1562 при гармоническом сдвиге с амплитудой 10,5 мм ($\gamma = 0,21$) при частоте 11,2 Гц.

Как видно, модуль изменяется по экспоненциальному закону, что характерно для процессов структурирования. Для резины эти изменения тем существеннее, чем выше степень наполнения резины техническим углеродом и больше температура диссипативного разогрева.

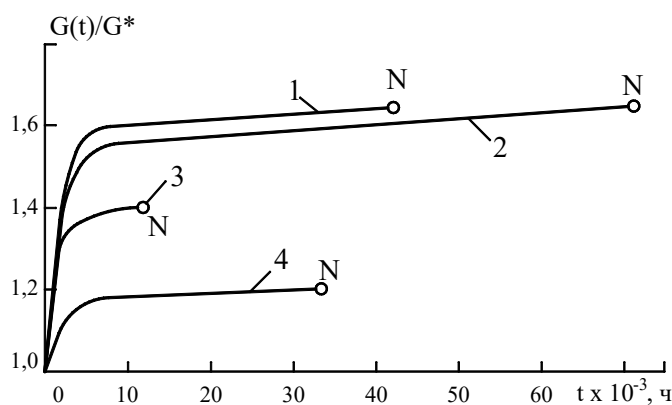


Рисунок 1 – Статистически обработанные временные изменения динамического модуля сдвига

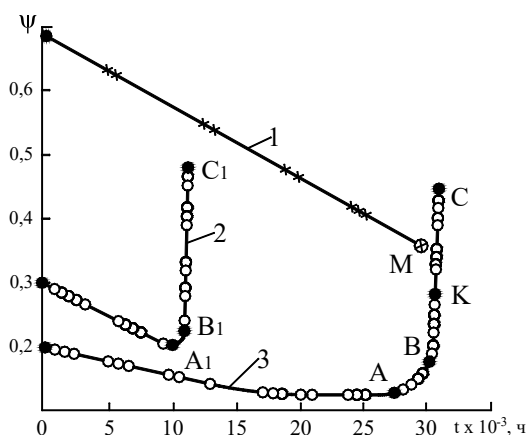


Рисунок 2 – Статистически обработанные зависимости коэффициента диссипации энергии от времени наработки для БРМ102 из резины 51-1562

Коэффициент диссипации энергии имел более сложную временную зависимость. На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости $\psi(t)$ для трех наиболее характерных марок резин. Точка A на кривой соответствует времени появления на свободной поверхности резины видимых усталостных трещин, точка B – времени интенсивного роста магистральных трещин. Далее эксперименты были продолжены вплоть до отказа образцов, т. е. до такого состояния, когда магистральные трещины пересекали образец от металла до металла. Регистрируемые при этом механические характеристики лишь с определенными допущениями можно отнести к материалу; более справедливо считать их присущими конструкции, так как глубокие магистральные трещины вносили некоторое искажение (впрочем, довольно незначительное, находящееся в пределах точности эксперимента) в полученные результаты. Тем не менее, экспериментальные точки были нанесены на кривую $\psi(t)$. Чтобы судить о параметрах материала, точка C была получена следующим образом. Из разрушенных деталей механическим способом вырезались элементы, например, размером $40 \times 50 \times 80$ мм, приклеивались к металлической арматуре и разрушались при деформациях сдвига $0,21$, соответствующих исходным образцам.

Как видно, временная зависимость коэффициента диссипации имеет довольно сложный характер. Если пренебречь диссипацией от разрушения наполнителя и эффекта Маллинза, что вполне допустимо для исследуемых малонаполненных резин (особенно типа 51-1562), то суммарную диссипацию $\Sigma\psi$ можно представить в виде $\Sigma\psi = \psi_m + \psi_p$, где ψ_m – диссипация от вязкоупругости, т. е. молекулярная диссипация; ψ_p – диссипация от разрушения. Рассматривая зависимость $\psi(t)$ с этих позиций, падение значений ψ до точки A можно объяснить уменьшением внутренней вязкости за счёт старения материала, понимая под этим весь комплекс изменений структуры резины за счёт протекающих физико-химических процессов, которые корректно могут быть учтены лишь с феноменологических позиций. Дальнейшее увеличение ψ связано с ростом доли диссипации от поврежденности материала, которая в начале как бы компенсирует уменьшение молекулярной диссипации, образуя на кривой $\psi(t)$ некоторое плато, а затем за счёт лабильного роста микроповреждений и диссипации энергии возле них изменяет характер этой кривой, увеличивая ψ вплоть до отказа образцов.

В принципе можно считать, что, начиная с момента деформирования элемента и до его отказа, идёт конкурирующий процесс между разрушением и сопротивлением материала этому разрушению, проявляющийся в уменьшении молекулярной диссипации и увеличении диссипации от разрушения. При экспериментальных исследованиях фиксируется суммарная диссипация по петле гистерезиса, и разделить эти процессы на сегодняшний день не представляется возможным.

Поврежденность материала довольно существенно влияет на механические характеристики резины. Динамический модуль сдвига растёт вплоть до появления магистральных трещин (рис. 3), а затем с их ростом резко уменьшается. Точка B на кривой $G \sim t/t^*$ соответствует времени отказа образца. Следует подчеркнуть, что в последнем случае речь идёт не о модуле резины, а о модуле

конструкции и более правильно говорить о жёсткости резинового элемента с магистральными трещинами. Такому же состоянию соответствуют точки *A* и *B* на кривой $\psi \sim t/t^*$. Величины коэффициента диссипации энергии на отрезке *AK* получены для резиновых образцов с глубокими магистральными трещинами; точка *C* получена для модельных образцов, вырезанных из разрушенных БРМ102. Для этих же модельных образцов были получены и значения коэффициента диссипации на отрезке *КС*; эти значения фиксировались во времени циклического разрушения образцов, примерно в течение 350 часов, что составляет около 0,1 % от их долговечности. Затемнённая область соответствует времени вероятностного появления усталостных трещин для партии БРМ102 из резины 51-1562.

Коэффициент диссипации, как следует из приведённых графиков, структурно-чувствительная величина, и по его изменениям можно судить о кинетике физико-механических процессов, протекающих в резине при длительном циклическом утомлении. В феноменологическом смысле коэффициент диссипации может служить критерием разрушения; резкое его увеличение является признаком глобального разрушения системы, т.е. появления магистральных трещин. Зная кинетику изменения $\psi(t)$, можно с инженерной точностью прогнозировать долговечность конструкции.

На всем протяжении циклического разрушения элементов типа БРМ102 из резины 51-1562 образцы подвергались исследованиям амплитудной зависимости основных информативных параметров G_∞ и ψ при строго фиксированных величинах относительного сдвига от 0 до 0,28 и рабочей частоте 11,2 Гц. Результаты этих исследований представлены на рис. 4 и рис. 5. Как видно, вплоть до наработки $t = 31000$ часов между механическими параметрами G_∞ и ψ наблюдалась четкая линейной зависимости. Магистральные трещины практически не изменяли линейности зависимости;

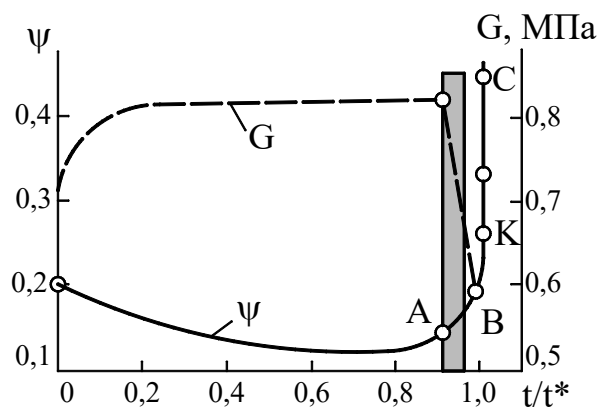


Рисунок 3 – Временные зависимости динамического модуля сдвига и коэффициента диссипации для резины 51-1562

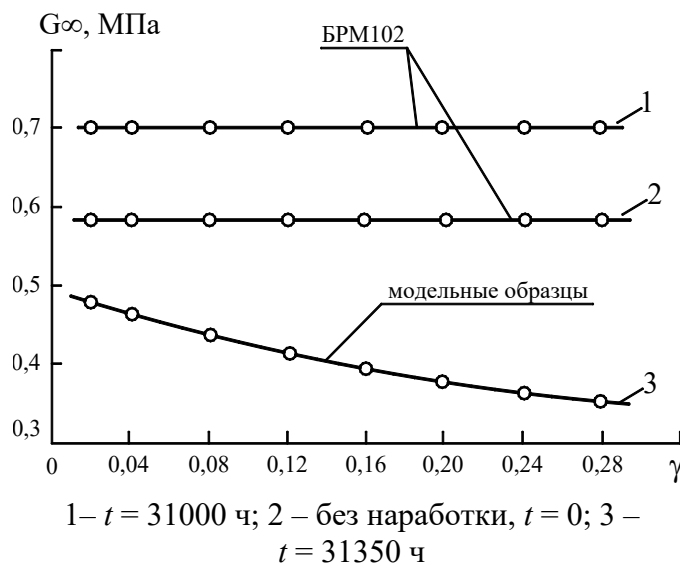


Рисунок 4 – Статистически обработанные амплитудные зависимости условно-равновесного модуля сдвига $G(\gamma)$ для резины 51-1562 (БРМ102)

это утверждение справедливо, по крайней мере, в рамках точности эксперимента. Это свидетельствует о том, что материал имел предкритический уровень накопления повреждений и до скачка, т.е. до фазового перехода от постепенно-кинетического характера разрушения резины к лабильному (можно сказать и от локального разрушения к глобальному) оставалось немного времени.

Поэтому в дальнейшем, чтобы избежать влияния эффекта конструкции, для которой характерна геометрическая

нелинейность, испытания были продолжены на модельных образцах при адекватных условиях нагружения (частота 11,2 Гц, относительный сдвиг 0,21).

Так были получены данные, представленные на рис. 3 отрезком линии ВКС. Всего было испытано 12 пар образцов сдвига с размером по резине $50 \times 40 \times 25$ мм; испытания продолжались вплоть до их отказа, т.е. до появления магистральных трещин. Долговечность партии образцов была в пределах $370 \div 460$ часов.

Все образцы были исследованы на наличие амплитудных эффектов при величинах относительного сдвига $\gamma = 0 \div 0,28$. Как видно из рис. 4 и рис. 5 для модельных образцов с наработкой резины $t = 31350$ часов наблюдалась строгая амплитудная зависимость основных информативных параметров G_∞ и ψ .

На рис. 5 показаны амплитудные зависимости коэффициента диссипации энергии. Как видно, вплоть до времени разрушения БРМ102 $t = 31000$ ч эти зависимости были линейными (кривые 3, 4, 5); при $t = 31250$ зависимость $\psi \sim \gamma$ стала слабонелинейной (кривая 2) и для $t = 31350$ (кривая 1) амплитудная зависимость $\psi \sim \gamma$ стала существенно нелинейной.

Испытаниям подлежали образцы без явных магистральных усталостных трещин на свободной поверхности резины; часть из образцов расчленялась для установления отсутствия макроповреждений резинового массива. Такой отбор образцов позволял избежать влияния геометрической нелинейности. Постановка экспериментальных исследований была направлена на получение механических характеристик не столько конструкции БРМ102, сколько резины.

Следует подчеркнуть, что используя в качестве образцов только элементы типа БРМ102, экспериментально затруднительно добиться равномерного распределения поврежденности в резинового массиве; благодаря эффекту локальности в элементе всегда будут очаги с максимальной поврежденностью, в которых и будут зарождаться магистральные трещины. Поэтому и были использованы

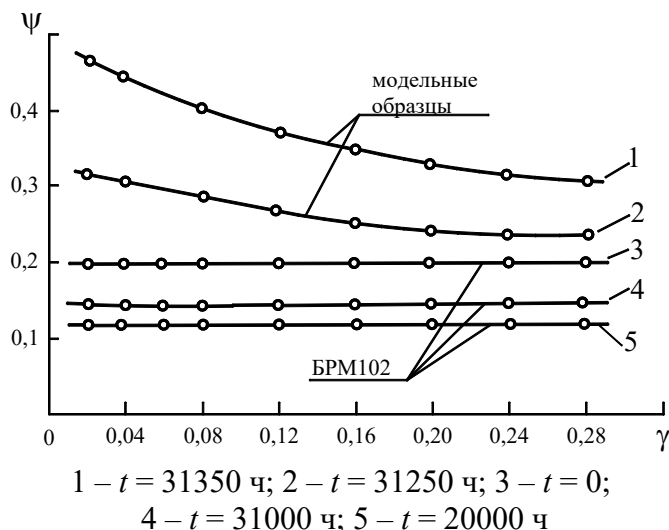


Рисунок 5 – Статистически обработанные амплитудные зависимости коэффициента диссипации энергии $\psi(\gamma)$ для резины 51-1562 (БРМ102)

модельные образцы, вырезанные из разрушенных магистральными трещинами элементов БРМ102, при доразрушении которых удалось исследовать фазовый переход от постепенно-кинетического метастабильного разрушения к лабильному. Длительность этого перехода незначительна по сравнению с долговечностью исходного образца: 250÷400 часов по сравнению с 31000÷35000 часов. Однако именно в этот период происходило скачкообразное изменение структуры материала, а, следовательно, и изменение его физико-механических характеристик: будучи линейными на всем протяжении существования образцов они скачкообразно приобретали сугубо нелинейные свойства. Такой фазовый переход не противоречит термодинамике необратимых нелинейных процессов, основные положения которой в рассматриваемом контексте изложены выше.

Таким образом можно констатировать следующее: экспериментально установлена закономерность скачкообразного фазового перехода метастабильного состояния резины к лабильному, заключающаяся в том, что изначально линейные механические характеристики резины приобретают нелинейный характер.

Обсуждение результатов

Для объяснения причин фазового перехода, т.е. скачкообразного перехода от метастабильного состояния системы к лабильному, и перехода от структуры материала с линейными свойствами к структуре с нелинейными, используем некоторые основные положения термодинамики необратимых нелинейных процессов.

Онзагером [3] было показано, что в области линейно неравновесных процессов имеет место вариационный принцип нелинейного рассеяния энергии (максимальной диссипации). Пригожин установил, что стационарные процессы характеризуются минимумом возникновения энтропии. В разное время Циглером и Дьярматти были предложены новые формулировки принципа минимального рассеяния энергии. Кроме того, было показано, что в отличие от принципа Онзагера принцип Пригожина справедлив только для стационарных процессов и в этом случае эквивалентен принципу наименьшего рассеяния энергии. Таким образом, наиболее общим вариационным принципом термодинамики необратимых процессов является принцип наименьшего рассеяния энергии.

Принцип Онзагера как наиболее общий для неравновесных процессов в приложении к разрушению эластомеров можно сформулировать следующим образом: процесс разрушения протекает таким образом, что система стремится минимально диссипировать энергию внешнего воздействия.

Принцип минимума производства энтропии позволяет сформулировать критерий эволюции, означающий, что система будет эволюционировать к стационарному неравновесному состоянию. При этом следует учитывать, что линейная область является экстраполяцией равновесного режима и в ней наблюдается флуктуационная устойчивость эластомера.

Ситуация качественно изменяется при переходе системы в область нелинейных неравновесных процессов, т.е. в область сильнонеравновесной термодинамики. В этой области уже не существует такой общей функции Ляпунова, какой являлось производство энтропии для линейных процессов. Более того, за

счет внешних источников может происходить усиление флуктуации термодинамических величин, и тогда исчерпывающее описание системы невозможно провести без привлечения макроскопических величин.

Как показали Гленсдорф и Пригожин [4] для сильнонеравновесных процессов справедливо равенство

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \delta^2 S = \sum_i \delta I_i \delta X_i.$$

Здесь величина, стоящая в правой части, получила название избытка производства энтропии; δI_i и δX_i – отклонения величин I_i и X_i от своих значений в стационарном состоянии. В этом случае величина избытка производства энтропии не имеет определенного знака. Этот факт способствует возникновению нестационарных процессов в области сильной неравновесности. Для таких состояний системы характерно образование диссипативных структур.

Для систем, находящихся в сильнонеравновесном состоянии, Пригожиным и Гленсдорфом был сформулирован критерий устойчивости сущность его в следующем: производная по времени отклонения энтропии от равновесного состояния таких систем должна быть положительной. Таким образом, рост диссипации энергии со временем обеспечивает устойчивость сильнонеравновесных систем, и сами системы становятся всё более упорядоченными. Это и наблюдалось в исследуемой резине 51-1562 при длительном циклическом разрушении: термодинамическая система (элемент БРМ102) после 31000 часов наработки обладала высокой степенью поврежденности и поэтому находилась в сильнонеравновесном (метастабильном) состоянии. Для повышения устойчивости системы материал диссипировал большое количество энергии и, соответственно, коэффициент диссипации резко возростал (рис. 13, кривая 3).

Большие возможности для образования структур дают автокаталитические реакции. Автокаталитические процессы занимают центральное место в теории сильнонеравновесных систем [3, 5, 6].

Автокаталитический механизм лежит в основе механики разрушения материалов. Действительно, при разрушении имеющаяся в материале поврежденность ускоряет процесс дальнейшего повреждения. Следовательно, разрушение материалов является сильнонеравновесным термодинамическим процессом автокаталитического типа. В целом процесс разрушения эластомеров как эволюционный по своей сущности удовлетворяет двум основным требованиям: наличию автокаталитического механизма роста повреждений, что является основой сильной неравновесности процесса разрушения и эволюции материала; отсутствию периодичности автокаталитического процесса, что обеспечивает однонаправленную эволюцию материала.

Рассмотрим некоторые общие аспекты теории динамических систем с поврежденностью в контексте исследований процессов разрушения эластомеров.

Сильнонеравновесные состояния возникают тогда, когда динамика процессов имеет нелинейный характер. Эбелинг по этому поводу отмечает, что при больших отклонениях от равновесия, описываемых нелинейными уравнениями, возможно существование нескольких стационарных решений. Исследуя их

устойчивость, можно найти решение, которое имеет физический смысл, т.е. устойчиво по отношению к флуктуациям. Нестабильные состояния, напротив, характеризуются увеличением флуктуации (усилением), и система стремится перейти в новое стабильное состояние. Конечное состояние вполне может обладать более высокой степенью упорядоченности и соответственно более низкой симметрией.

В механике разрушения эластомеров бифуркация имеет место при переходе постепенно-кинетического этапа разрушения к лабильному разрушению, зачастую связанного с появлением магистральной трещины, причём этот переход физически обуславливается потерей устойчивости материала по отношению к определенным флуктуациям, которые, усиливаясь за счёт внешних и внутренних источников и диссипируя их энергию, являются основной физической причиной разрушения. Физической причиной бифуркации является действие в системе флуктуаций, устойчивость к которым теряет система, а так как флуктуации носят случайный характер, то в точке бифуркаций возрастает роль случайных факторов. Известная роль случайных дефектов в механике разрушения эластомеров находит своё качественное объяснение в рамках концепции бифуркаций. Взаимосвязь случайного и закономерного для диссипативных структур отмечалась в работах Пригожина. Он указывал, что эволюция таких структур могла бы проходить через ряд неустойчивостей, возникающих вследствие флуктуаций определенных типов (стохастических элементов), с последующей детерминистической эволюцией к новому типу режима. Порядок через флуктуации в этом случае всегда подразумевает как макро-, так и микроскопические элементы, следовательно, как случай, так и закон [3].

Таким образом, закономерности разрушения эластомеров носят ярко выраженный нелинейный характер. Нелинейные уравнения, как известно, имеют множество решений даже для заданных граничных внешних условий. Каждое такое решение представляет собой определенную кинетику процесса разрушения. Однако это не означает, что разрушение при заданных условиях может происходить по различным законам. Реализуется кинетика, наиболее устойчивая к флуктуационным отклонениям термодинамических величин. Устойчивой в заданных условиях нагружения будет кинетика $X(t)$, для которой малое отклонение $\delta X(t)$ вызовет приращение продукции энтропии $\delta S(t)$, удовлетворяющее критериальному условию Пригожина.

При непрерывном изменении параметров разрушения установившаяся кинетика может потерять свою устойчивость, и тогда произойдёт скачкообразное изменение закономерности разрушения. Точки в фазовом пространстве внешних параметров разрушения, при которых происходит скачкообразное изменение кинетики, являются точками бифуркаций решений нелинейных уравнений разрушения. Физически прохождение через точки бифуркаций означает качественное изменение в согласованном поведении отдельных макроскопических систем. Усилие внешнего нагружения означает усиление скорректированности в поведении подсистем и ускорение процесса разрушения.

Таким образом, кинетика разрушения эластомера во времени может проходить через ряд последовательных бифуркаций.

Практическим проявлением такого скачкообразного изменения кинетики является переход от постепенно-кинетического, т.е. метастабильного, характера разрушения эластомера к лабильному. Согласно Пригожину [4], для любой системы, претерпевающей бифуркации, обнаруживается единство детерминистического и случайного элементов. Между точками бифуркаций поведение системы носит детерминистический характер.

В самих же точках бифуркаций существенно возрастает роль флуктуаций, причём выбор дальнейшего пути развития происходит флуктуационным, случайным образом.

Примером такого скачкообразного изменения характера разрушения является изначально линейная резина 51-1562: изменение линейных свойств основных информативных параметров G_∞ и ψ на нелинейные служит показателем изменений самого механизма разрушения – переход от постепенно кинетического характера (метастабильного) к лабильному. При таком переходе от локального разрушения к глобальному параметры динамической системы G и ψ претерпевают существенные изменения. На упрощённой схеме (рис. 6) точкам A и M и времени t_1 соответствует появление магистральных трещин в резиновом массиве элемента; точкам B и N и времени t_2 соответствует переход метастабильной системы в лабильное; затемнённая область соответствует некоторому переходному периоду, когда появляются и растут магистральные трещины, а диссипация энергии резко возрастает. В этом переходном периоде система становится сильно-неравновесной и её устойчивость поддерживается в основном ростом диссипации энергии. В дальнейшем при испытании на разрушение модельных образцов, вырезанных из БРМ102 процесс повторяется: в локальных областях материала происходит накопление и слияние микрповрежденностей, возле которых диссипируется большое количество энергии, и коэффициент диссипации резко возрастает. Точкам L , K и C и времени t^* на рис. 6 соответствует начало глобального разрушения модельного образца, т.е. появление и рост магистральных трещин. Модельный образец как динамическая система становится сильно-неравновесным, и её устойчивость также будет поддерживаться ростом диссипации энергии вплоть до разрушения системы (см. линия KC на рис. 2, кривая 3) вследствие роста магистральных трещин.

Именно на такой стадии поврежденности системы (в данном конкретном случае резины 51-1562) и происходит фазовый переход, т.е. скачкообразный переход от метастабильного состояния системы к лабильному. В механическом смысле это выражается в переходе от структуры с линейными характеристиками к структуре с сугубо нелинейными характеристиками.

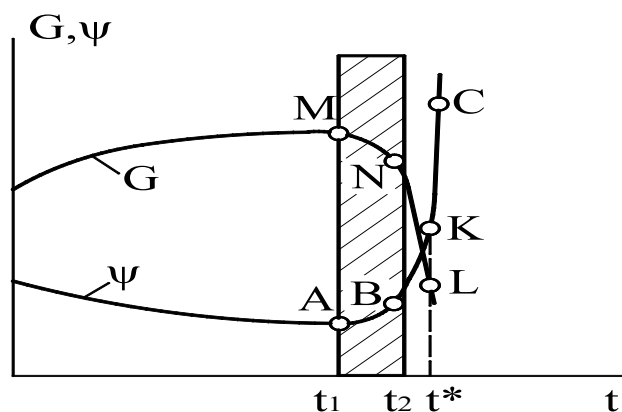


Рисунок 6 – Изменение физико-механических характеристик эластомера при разрушении

Если из разрушенного модельного образца вырезать ещё меньшей по размеру модельный образец и доразрушить его, то основные механизмы процесса будут повторяться; структура будет становиться всё более нелинейной, а сам процесс разрушения всё более будет соответствовать механизму разрушения не конструкции, а материала.

Известно, что в нелинейной системе ничтожные причины при известных обстоятельствах могут произвести значительное действие. По терминологии Томпсона, такое поведение называется катастрофой, или ветвлением решения (бифуркацией). Согласно Шлеглю [7], в таких точках время затухания флуктуаций бесконечно велико. Переход от режима, где имеется одно устойчивое стационарное состояние, к режиму, где нет устойчивых стационарных состояний, в терминологии Томпсона называется катастрофой типа складки.

Временные изменения информативных параметров резины 51-1562 $G(t)$ и $\psi(t)$ носят скачкообразный характер и формально являются катастрофой. Однако следует учитывать, что время фазового перехода от метастабильного состояния системы к лабильному может измеряться десятками и сотнями часов. Разрушение хрупких материалов (горные породы, некоторые металлы, лёд и др.) происходит в течение короткого промежутка времени; эластомеры, благодаря вязкоупругим свойствам и, прежде всего, большой диссипации энергии, не обладают внезапностью отказа. Это ценное свойство таких материалов широко используется в инженерной практике.

Выводы

Установлена закономерность скачкообразного фазового перехода метастабильного состояния эластомеров к лабильному, предшествующего их усталостному разрушению при циклическом нагружении, заключающаяся в том, что изначально линейные механические характеристики эластомеров вследствие нелинейного рассеяния энергии, вызываемого бифуркациями кинетики формирования микроповреждений, приобретают нелинейный характер, и обусловлена проявлением автокаталитического механизма нарастания объёма микроповреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная механика упруго-наследственных сред: в 3 т. / А.Ф. Булат и др. Киев: Наук. думка, 2011. Т. 1: Механика деформирования и разрушения эластомеров. 568 с.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Lysytsya, M.I., Grebenyuk, S.M. (2018). Numerical Simulation of the Stress-Strain State of Thin-Layer Rubber-Metal Vibration Absorber Elements Under Nonlinear Deformation, *Strength of Materials*, 3 (50), 387-395, <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9982-9>
3. Пригожин И., Николис Г. Биологический порядок, структура и неустойчивость. *Успехи физ. наук*. 1973. Вып. 3. С. 517-543.
4. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М.: Мир, 1973. 324 с.
5. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. М.: Наука, 1985. 312 с.
6. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 283 с.
7. Томпсон Я. Неустойчивость и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985. 245 с.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugо-nasledstvennykh sred. Tom 1. Mehanika deformirovaniia i razrusheniia elastomerov* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 1. Mechanics of deforming and breaking down of elastomers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Lysytsya, M.I. and Grebenyuk, S.M. (2018), "Numerical Simulation of the Stress-Strain State of Thin-Layer Rubber-Metal Vibration Absorber Elements Under Nonlinear Deformation", *Strength of Materials*, no. 3 (50), pp. 387-395, <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9982-9>.

3. Prigozhin, I. and Nikolis, G. (1973), "Biological order, structure and instability", *Uspekhi fizicheskikh nauk*, no. 3, pp. 517-543.
4. Glensdorf, P. and Prigozhin, I. (1973), *Termodinamicheskaya teoriya struktury, ustoychivosti i fluktuatsii* [Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations], Mir, Moscow, USSR.
5. Prigozhin, I. (1985), *Ot sushchestvuyushchego k vznikayushchemu: Vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh* [From existing to arising: Time and complexity in the physical sciences], Nauka, Moscow, USSR.
6. Nikolis, G. and Prigozhin, I. (1979), *Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh* [Self-organization in non-equilibrium systems], Mir, Moscow, USSR.
7. Tompson, Ya. (1985), *Neustoychivost i katastrofy v nauke i tekhnike* [Instability and disasters in science and technology], Mir, Moscow, USSR.

Об авторах

Дырда Виталий Илларионович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

Гребенюк Сергей Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой математического анализа Запорожского национального университета (ЗНУ), Запорожье, Украина, gsm1212@ukr.net

Сокол Сергей Петрович, канд. техн. наук, старший преподаватель Днепропетровского государственного аграрно-экономического университета (ДГАЭУ), Днепр, Украина, info@dsau.dp.ua

Слободян Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общетехнических дисциплин и физики, Подольский государственный аграрно-технический университет, Каменец-Подольск, Украина, sergessb75@gmail.com

Агальцов Геннадий Николаевич, инженер, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, ag.gena@gmail.com

About the authors

Dyrda Vitalii Illarionovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Grebenyuk Sergii Mykolayovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of the Department of Mathematical Analysis in Zaporizhzhya National University (ZNU), Zaporizhzhya, Ukraine, gsm1212@ukr.net

Sokol Sergii Petrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Teacher of Dnipro State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine, info@dsau.dp.ua

Slobodyan Sergii Borysovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of General Technical Disciplines and Physics, State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Ukraine, sergessb75@gmail.com

Ahaltsov Hennadii Mykolaiovych, Master of Science, Junior Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, ag.gena@gmail.com

Анотація. У еластомерах (гумах, поліуретанах) розрізняють геометричну нелінійність, викликану формою зразка або асиметричністю прикладання навантаження, і фізичну нелінійність, викликану в основному руйнуванням і рекомбінацією наповненою структури. Остання форма нелінійності добре відома технологам і широко використовується в інженерній практиці: при наповненні гуми технічним вуглецем або іншими наповнювачами (текстильні волокна, мідні кульки і т.д.) нелінійність механічних характеристик її різко зростає. Нелінійні ефекти в наповнених еластомерах виражаються в основному в залежності модуля зсуву та коефіцієнта дисипації енергії від амплітуди деформації. При дуже малих деформаціях гума має підвищену жорсткість, зі збільшенням деформації її еластичність зростає. Явище це відомо як ефект Малліна і пояснюється тиксотропією, тобто руйнуванням і рекомбінацією наповненою структури. Для слабонаповнених гум тиксотропія практично не спостерігається. Традиційно вважається, що такі гуми відносяться до лінійних, і ця лінійність виконується протягом всього часу експлуатації. Тобто, вважається, що в лінійних гумах на всьому протязі їх циклічного деформування аж до відмови зразків зберігається лінійна залежність основних інформативних параметрів і гума повністю підкоряється закону Гука.

Разом з тим, на підставі численних і тривалих експериментальних досліджень слабонаповнених гум при їх тривалому циклічному навантаженні встановлена закономірність, яка полягає в тому, що гуми з початково лінійними механічними характеристиками при фазовому стрибкоподібному переході від метастабільного стану до лабільного набувають істотно нелінійних властивостей.

Така закономірність була підтверджена експериментально при вивченні механізму циклічного руйнування слабонаповненої гуми: в первісному стані в діапазоні відносних деформацій зсуву 0-40% гума підпорядковувалася закону Гука, тобто мала лінійні властивості основних інформативних параметрів – модуля зсуву і коефіцієнта дисипації енергії. Показано, що в такій гумі при переході від метастабільного стану (поступово-кінетичного характеру руйнування) до лабільного початково лінійні механічні характеристики набувають істотно нелінійний характер.

Пояснення цьому знаходиться в рамках термодинаміки незворотних процесів. З термодинамічної точки зору еластомери в процесі тривалого циклічного навантаження знаходяться в метастабільному стані, тобто в

сильнонерівноважному стані; для таких систем стійкість забезпечується зростанням дисипації енергії, що і спостерігається експериментально. При цьому процес руйнування еластомерів, як еволюційний по своїй суті, характеризується наступним: наявністю автокаталітичного механізму зростання ушкоджень, що є основою сильної нерівноважності процесу руйнування та еволюції матеріалу; відсутністю періодичності автокаталітичного процесу, що забезпечує односпрямовану еволюцію матеріалу.

Ключові слова: еластомер, амплітудні ефекти, дисипація енергії, модуль зсуву, фазовий перехід, циклічне руйнування

Abstract. In elastomers (rubber, polyurethane), there is a geometric non-linearity caused by the shape of the sample or asymmetric application of the load, and physical non-linearity caused mainly by the destruction and recombination of the filled structure. The latter form of nonlinearity is well known to technologists and is widely used in engineering practice: when filling rubber with technical carbon or other fillers (textile fibers, copper balls, etc.), the nonlinearity of its mechanical characteristics increases abruptly. Nonlinear effects in filled elastomers are expressed mainly in the dependence of shear modulus and energy dissipation coefficient on the amplitude of deformation. With very small deformations, rubber has a high rigidity, as deformation increases, its elasticity increases. This phenomenon is known as the Mullins effect and is explained by thixotropy, i.e. destruction and recombination of the filled structure. For weakly filled rubbers, thixotropy is practically not observed. Traditionally it is thought that such rubbers belong to the linear, and this linearity is maintained throughout the entire period of operation. That is, it is thought that in the linear rubber throughout the cyclic deformation until the failure of the samples, the linear dependence of the main informative parameters is preserved and the rubber completely obeys Hooke's law.

At the same time, on the basis of numerous and long-term experimental studies of lightly-filled rubbers with their long-term cyclic loading, a regularity has been established, namely, that rubber with initially linear mechanical characteristics at a phase jump from the metastable to the labile state acquires significantly non-linear properties.

Such a regularity was confirmed experimentally in the study of the mechanism of cyclic destruction of lightly filled rubber: in the initial state in the range of relative shear deformations of 0-40 %, rubber obeyed Hooke's law, i.e. possessed linear properties of the main informative parameters - shear modulus and energy dissipation coefficient. It is shown that in such a rubber, when moving from a metastable state (gradual-kinetic nature of destruction) to a labile one, initially linear mechanical characteristics become substantially non-linear.

The explanation for this is within the framework of the thermodynamics of irreversible processes. From a thermodynamic point of view, elastomers in the process of long-term cyclic loading are in a metastable state, i.e. in a strongly nonequilibrium state; for such systems, stability is provided by an increase in energy dissipation, which is observed experimentally. Moreover, the process of destruction of elastomers, as evolutionary in its essence, is characterized by the following: the presence of an autocatalytic mechanism for the growth of damage, which is the basis of the strong disequilibrium of the process of destruction and evolution of the material; lack of periodicity of the autocatalytic process, which ensures a unidirectional evolution of the material.

Keywords: elastomer, amplitude effects, energy dissipation, shear modulus, phase transition, cyclic failure

Статья поступила в редакцию 08.02.2019

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко