

Временная специфика циклического сопротивления эластомерных нанокомпозитов*

С.Е. ЕВЛАМПИЕВА

Институт механики сплошных сред УрО РАН

e-mail: evl@icmm.ru

В.В. МОШЕВ

e-mail: moshev@icmm.ru

Предложена математическая модель циклических испытаний эластомерных нанокомпозитов, учитывающая особенности их релаксационного поведения. Получены гистерезисные кривые для различных условий циклического нагружения.

Эластомерные композиты, типичным представителем, которых является саженатолненный каучук, характеризуются весьма сложным механическим поведением. Их циклическое поведение до сих пор не нашло удовлетворительного структурного объяснения [1]-[5]. Анализируя литературные данные, можно предположить, что сложное механическое поведение рассматриваемых материалов следует рассматривать как результат совместного действия нескольких структурных механизмов таких как собственная вязкоупругость матриц, микроотрывы матрицы от поверхности частиц наполнителя, миграция пластификатора.

Рассматриваемая структурная ячейка в исходном состоянии (рис. 1.) представляется двумя подложками длиной D (частицами наполнителя), разделенными промежутком длиной Lg , определяющим концентрацию наполнителя. На подложках располагается упругая пружина (молекула каучука), сорбированная поверхностью частиц.

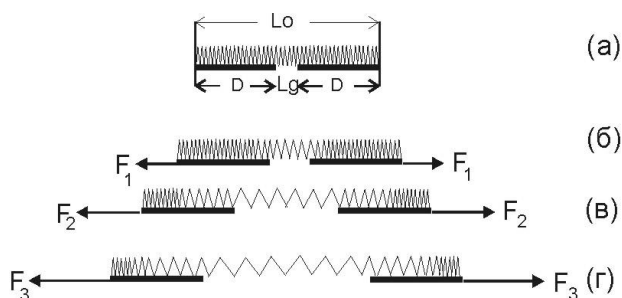


Рис. 1. Схема структурной ячейки

Сорбция каучука наноразмерными частицами наполнителя исключает возможность отрыва молекул каучука от поверхности частиц (подложек), но допускает скольжение молекул (пружины) вдоль поверхности частиц (подложек) [1, 5], [6]-[11].

Деформирование модели представляется раздвижением или сближением подложек. Когда промежуток между подложками увеличивают, растягивая модель, пружина в

*Работа выполнена по программе фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН "Трибологические и прочностные свойства структурированных материалов и поверхностных слоев" № 09-Т-1-1006.

промежутке между подложками начинает упруго сопротивляться. Это усилие приводит к соскальзыванию части пружины с подложек в зазор между ними. Соскальзыванию препятствуют сорбционные связи пружины с поверхностью подложки, разрыв которых требует приложения усилия, которое в дальнейшем отождествляется с межфазным трением между пружинной (каучуковой матрицей) и поверхностью подложки (поверхностью частицы).

Сопротивление пружины в незаторможенном состоянии, отображающее типичную упругость макромолекул при растяжении представляется формулой [11]

$$\lambda = \lambda_m(Cthf - 1/f) + 1.0,$$

где λ - удлинение цепи при заданной безразмерной силе f , λ_m - максимальная длина цепи при разрыве. Это выражение характеризуется постоянным начальным модулем упругости, нелинейно возрастающим по мере растяжения.

Предполагается, что пружина удерживается на поверхности подложек силой межфазного трения. Многочисленные опытные данные [12] позволяют принять зависимость этой силы трения f от скорости скольжения V в форме степенной зависимости

$$f = kV^m,$$

где V - сопротивление трения на единицу длины контакта, V - скорость скольжения, k и m - эмпирические константы.

Рисунок 2 демонстрирует зависимость усилий и деформаций в модели при ее растяжении со скоростью $W = 2.0$. При растяжении максимальное усилие пружина испытывает в промежутке между подложками. Этому усилию противостоит равное по величине сопротивление, накопленное трением на подложках.

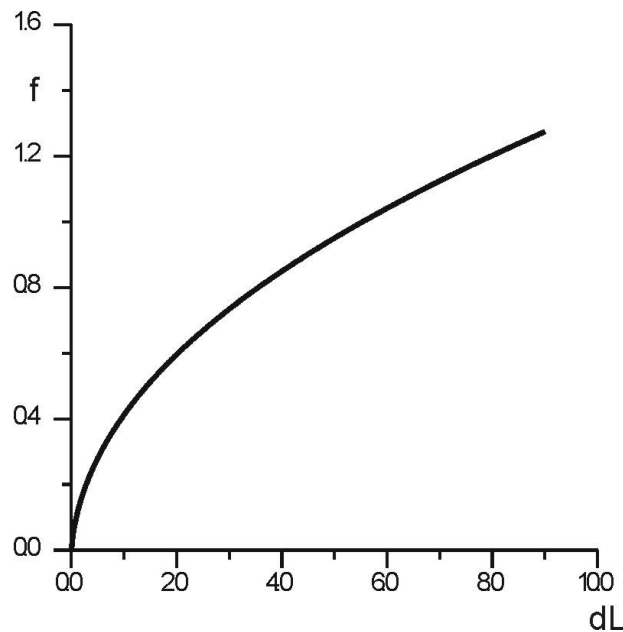


Рис. 2. Кривая растяжения

Конструкция модели, представленная на рис. 1, учитывает упругость пружины, силу трения пружины относительно подложки в зависимости от скорости скольжения, геометрическую характеристику системы, режим деформирования модели.

Гистерезисный цикл образуется при растяжении и сокращении модели как зависимость усилия от амплитуды деформации. При растяжении левую подложку фиксируют, правую отодвигают с заданной скоростью W . Из рисунка 1 следует, что растяжение модели представляет по существу увеличение начального промежутка между подложками. Этот процесс удлиняет свободную часть пружины, усилие в которой вызывает сползание части пружины с подложек до установления равновесия между заторможенной и свободной частями пружины.

Сокращение модели, обычно с той же скоростью, уменьшает промежуток между подложками и усилие в свободной части пружины, что приводит к возврату части свободной пружины в зону трения на подложки.

Специфика релаксационного цикла определяется взаимодействием двух скоростных процессов: заданной скоростью растяжения и сокращения модели (константа W) и трением при скольжении пружины вдоль подложки (константы k и m).

В дальнейшем в качестве типичных приняты следующие константы $W = 2.0$, $k = 0.15$, $m = 0.15$, $Lg = 1.0$, $dL = 9.0$ (приращение длины пружины), которые хорошо отображают наблюдаемые в опытах формы релаксационных гистерезисных петель.

Варьирование отдельными структурными параметрами позволяет установить их индивидуальное влияние на поведение модели в целом.

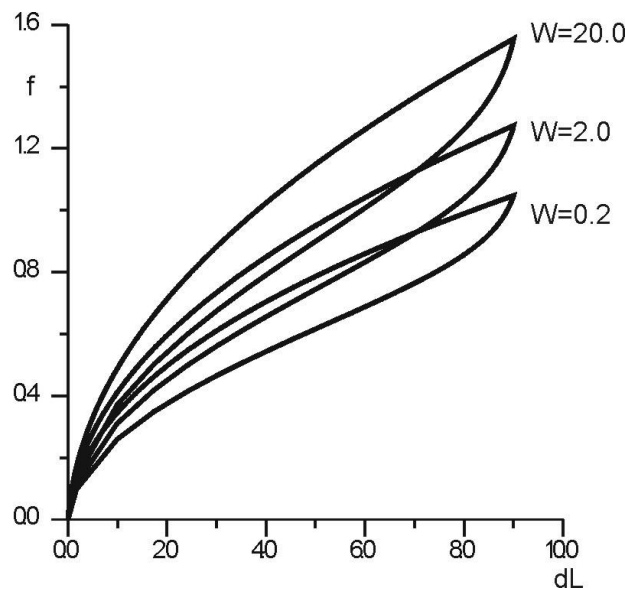


Рис. 3. Цикл для разных скоростей растяжения и сжатия

Рисунок 3 демонстрирует гистерезисные петли, рассчитанные для различных скоростей деформации. Повышение W ($W = 0.2$, $W = 2.0$ и $W = 20.0$) делает гистерезисные петли шире и выше.

Из рисунка 4 видно как видоизменяется форма кривых растяжения при одинаковой скорости растяжения $W = 2.0$, но уменьшенной скорости сокращения W при одинаково выбранных значениях констант.

Изменение промежутка между подложками моделирует изменение концентрации наполнителя в композитной системе. Рисунок 5 показывает, как изменяется форма гистерезисной петли с увеличением промежутка между подложками с изменением концентрации наполнителя, что подтверждается многочисленными опытными данными.

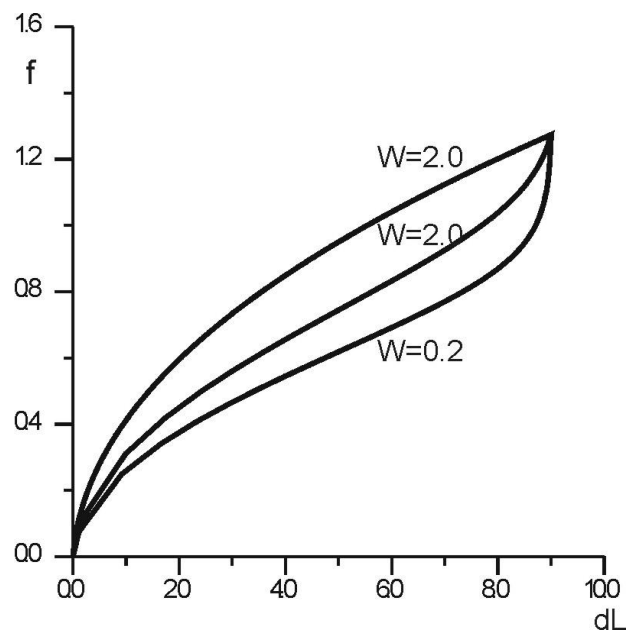


Рис. 4. Циклы при разных скоростях сокращения

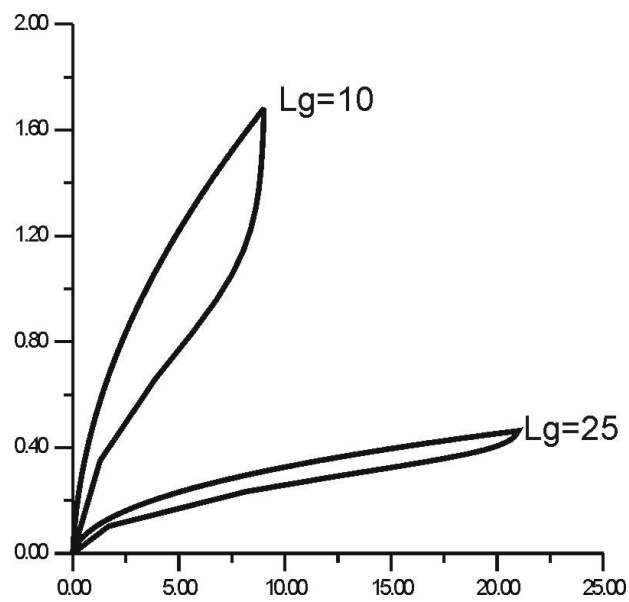


Рис. 5. Циклы при разных концентрациях наполнения

Модель релаксационных циклов объясняет влияние микроструктурных особенностей нанокомпозитов на форму релаксационных циклов. С этой точки зрения, она может оказаться полезной для разработчиков новых нанокомпозитных материалов.

В то же время, представленный материал можно рассматривать как составную часть будущей уточненной структурной модели, способной принимать во внимание некоторые другие важные особенности, например, учитывать наличие трения покоя.

Заключение

1. Предложена математическая модель циклических испытаний эластомерных нанокомпозитов, учитывающая особенности их релаксационного поведения.

2. Получены гистерезисные кривые для различных условий циклического нагружения, которые воспроизводят опытные данные.

3. Модель может оказаться полезной для материаловедов, создающих нанокомпозиты с заданными механическими свойствами.

Список литературы

- [1] KRAUS G. Reinforcement of elastomers by carbon black // *Angew. Makromol. Chem.* 1977. N. 60/61. P. 215–248.
- [2] MULLINS L. Softening of rubber by deformation // *Rub. Chem. Technol.* 1969. N. 42. P. 339–362.
- [3] PAYNE A.R., WHITTAKER R.E. Effect of vulcanization on the low-strain dynamic properties of filled rubbers // *J. Appl. Polym. Sci.* 1972. N 16. P. 1191–1212.
- [4] VOET A. Reinforcement of elastomers by fillers: Review of period 1967-1976 // *J. Polym. Sci. Macromol. Reviews.* 1980. N. 15. P. 327–373.
- [5] EDWARDS D.C. Polymer-filler interactions in rubber reinforcement // *J. Mater. Sci.* 1990. N. 25. P. 4175–4185.
- [6] ALEXANDROV A.P., LAZURKIN J.S. Strength of amorphous and crystallizing rubber polymers // *Doklady Akadem. Nauk USSR.* 1944. № 45. С. 308–311.
- [7] DANNENBERG E.M. Molecular slippage mechanism of reinforcement // *Trans. Inst. Rub. Ind.* 1966. N. 42. P. 26–42.
- [8] RIGBI Z. Reinforcement of rubber by carbon black // *Adv. Polym. Sci.* 1980. N. 36. P. 21–68.
- [9] SOOS I. Charakterisierung des Verstärkungseffektes von Füllstoffen aufgrund der Auswertung der Spannungs-Deformations-Kurve // *GAK.* 1984. N. 37. P. 232–238, 300–303, 509–512.
- [10] MEDALIA A.I. Effect of carbon black on ultimate properties of rubber vulcanizates // *Rubber Chem. Technol.* 1987. N. 60. P. 45–61.
- [11] TRELOAR L.R.G. *The Physics of Rubber Elasticity.* 2nd Ed. Clarendon Press. Oxford, 1958. 322 с.
- [12] КОВРОВ В.Н., МОШЕВ В.В. Механический гистерезис в резинах и его связь с прочностью // Структурно-механическое исследование композиционных материалов и конструкций. 1984. С. 19–22.