

УДК 541.64:539(2+3)

СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ РЕЗИН¹

© 2008 г. А. Л. Свистков*, В. Lauke**

*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук
614013 Пермь, ул. Ак. Королева, 1

**Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.
Hohe Straße 6, 01069 Dresden, Germany

Высказана гипотеза о том, что при деформировании резин происходит сползание полимерных цепей со слоев около частиц наполнителя в зазоры между включениями и формирование там высоко прочных волокон из полимера в одноосно-ориентированном состоянии. В результате происходит повышение на порядок макроскопической прочности эластомеров при одновременном увеличении деформаций в момент разрыва по сравнению с эластомером без наполнителя. Расположенные близко в исходном образце агрегаты частиц технического углерода при удлинении материала расходятся на очень большие расстояния. Соединяющие их волокна при этом должны в несколько десятков раз увеличить свою длину. Предложена математическая модель, учитывающая эти процессы. Показано, что система определяющих уравнений позволяет с хорошей точностью моделировать вязкоупругое поведение резин и эффект размягчения Маллинза в условиях конечных деформаций.

ВВЕДЕНИЕ

Наполненные техническим углеродом резины во многих случаях являются эластомерными нанокомпозитами, которые широко используются в промышленности и имеют огромное практическое значение. Форма частиц наполнителя близка к сферической. Диаметры частиц от 10 до 30 нм. Частицы технического углерода легко агрегируются. Более ста лет назад исследователи обратили внимание на необычное влияние наполнителя на механические свойства материала. Было отмечено, что введение активного наполнителя в некристаллизующийся эластомер на порядок повышает его прочность. Одновременно при этом увеличиваются деформации, при которых происходит прорастание макроразрыва [1]. Несмотря на долгую историю изучения резин, до сих пор нет адекватного понимания процессов на структурном уровне, формирующих такое поведение материала.

Многие исследователи полагают, что это объясняется существованием нанослоев с особыми свойствами около наночастиц наполнителя [2]. Можно наблюдать появление связанного каучука на частицах наполнителя после вымывания несшитого эластомера активными наполнителями, что свидетельствует о наличии сильного взаимодействия полимера с частицами технического углерода. Но не только формирование слоев происходит в материале. В вершине макроразрыва можно видеть волокна, которые соединяют его края [3]. Полимерные цепи в волокнах ориентированы. Это может быть кристаллическое или аморфное ориентированное состояние полимера [4]. Именно формирование и исчезновение ориентированных областей лежит в основе появления гистерезисных явлений в материале при циклическом деформировании [5, 6].

Гипотеза о том, что формирование волокон при деформировании резин объясняет особенности их механического поведения, высказана в работе [7]. Для их образования недостаточно материала, находящегося в стеклообразном состоянии около частиц наполнителя. Слои полимера в таком состоянии имеют толщину не более 2 нм. Фукахори выдвинул гипотезу о том, что около первого слоя полимера находится второй с особыми

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Пермского департамента промышленности и природопользования (код проекта 07-08-96017), гранта CRDF и Министерства образования РФ REC-009, гранта DFG-FOR 597 и гранта государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-8055.2006.1).

E-mail: svistkov@icmm.ru (Свистков Александр Львович).

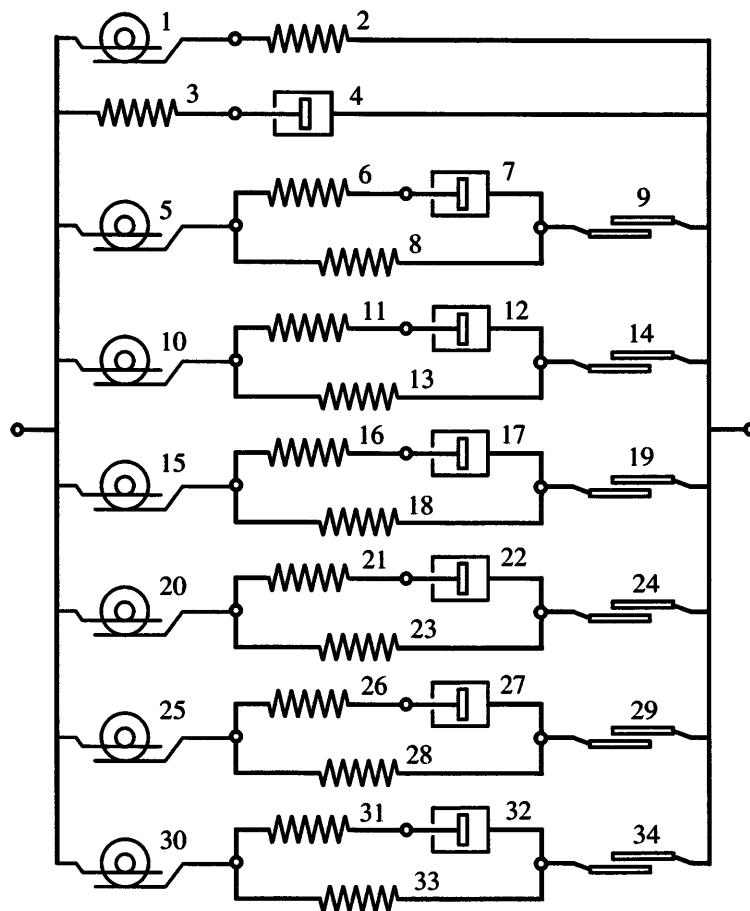


Рис. 1. Модель, используемая для расчетов.

свойствами. В результате общая толщина двух слоев около наночастиц наполнителя может достигать 10 нм. Согласно его гипотезе из второго слоя и формируются волокна, определяющие особенности механического поведения резин [8].

В данной работе предложена структурно-феноменологическая модель, которая не только описывает механическое поведение среды, но и принимает во внимание физические процессы наnanoуровне материала.

МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ РЕЗИНЫ

Используем для описания механического поведения резины схему на рис. 1. Прежде чем остановится на физическом смысле выражений, коротко перечислим основные уравнения и правила их объединения в систему.

1. Каждой точке на схеме ставится в соответствие тензор скоростей деформации этой точки, играющий роль тензорного параметра, необходимого для построения математической модели.

2. Упругим, вязким и пластическим элементам на схеме ставятся в соответствие тензоры напряжений Коши и тензоры скоростей деформации этих элементов.

3. Каждому трансмиссионному элементу ставятся в соответствие тензоры напряжений Коши для левой и правой точек этого элемента.

4. Тензор скоростей деформации левой точки схемы совпадает с тензором скоростей деформации среды D , а тензор скоростей деформации правой точки равен нулю.

5. Тензор скоростей деформации упругих, вязких и пластических элементов вычисляется как разность между тензорами скоростей деформации левых и правых точек этих элементов.

6. Материал полагается несжимаемым. След любого из используемых тензоров скоростей деформации в модели равен нулю.

7. Тензор напряжений Коши среды \mathbf{T} равен сумме тензоров напряжений Коши упругих, вязких, пластических элементов и левых точек трансмиссионных элементов, соединенных с левой точкой схемы.

8. Сумма тензоров напряжений Коши упругих, вязких, пластических и правых точек трансмиссионных элементов, соединенных слева с любой из внутренних точек схемы, равна сумме тензоров напряжений Коши упругих, вязких, пластических и левых точек трансмиссионных элементов, соединенных с этой точкой справа.

Мы рассматриваем в этой работе изотермические процессы. Для описания механического поведения элементов на схеме предлагается использовать хорошо известные уравнения механики деформируемых тел. Так, для вычисления тензоров напряжений Коши \mathbf{T}_i в упругих элементах мы использовали массовую плотность свободной энергии среды f , которая является функцией кратностей удлинений упругих элементов $f = f(\dots, \lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}, \lambda_3^{(i)}, \dots)$ где $\lambda_1^{(i)}, \lambda_2^{(i)}, \lambda_3^{(i)}$ – кратности удлинений i -го упругого элемента.

Резина является несжимаемым материалом. Поэтому всюду в уравнениях девиатор тензора напряжений Коши i -го упругого элемента вычисляется по формуле нелинейной теории упругости

$$\text{dev} \mathbf{T}_i = \text{dev} \left(\rho \sum_{k=1}^3 \lambda_k^{(i)} \frac{\partial f}{\partial \lambda_k^{(i)}} \mathbf{n}_k^{(i)} \otimes \mathbf{n}_k^{(i)} \right),$$

$$\text{dev}(\cdot) = (\cdot) - \frac{1}{3} \text{tr}(\cdot)$$

Здесь ρ – плотность массы среды, $\mathbf{n}_1^{(i)}, \mathbf{n}_2^{(i)}, \mathbf{n}_3^{(i)}$ – ортонормированная тройка собственных векторов тензора растяжений $\mathbf{V}_i = \lambda_1^{(i)} \mathbf{n}_1^{(i)} \otimes \mathbf{n}_1^{(i)} + \lambda_2^{(i)} \mathbf{n}_2^{(i)} \otimes \mathbf{n}_2^{(i)} + \lambda_3^{(i)} \mathbf{n}_3^{(i)} \otimes \mathbf{n}_3^{(i)}$ этого упругого элемента.

Для i -го упругого элемента материальную производную по времени от тензора растяжения $\dot{\mathbf{V}}_i$ вычисляли по формуле

$$\frac{2}{v_k} \mathbf{Y}_i^{0.5} \mathbf{D}_i \mathbf{Y}_i^{0.5} = \dot{\mathbf{Y}}_i - \mathbf{Y}_i \mathbf{W}_R^T - \mathbf{W}_R \mathbf{Y}_i$$

$$(\mathbf{W}_R = \dot{\mathbf{R}} \mathbf{R}^T), \quad (1)$$

где $\mathbf{Y}_i = \mathbf{V}_i^{\frac{v_k}{2}}$, $v_k > 0$, \mathbf{R} – тензор поворота в полярном разложении $\mathbf{F} = \mathbf{VR}$ деформационного градиента среды \mathbf{F} на левый тензор растяжения \mathbf{V} и поворот \mathbf{R} , v_k – передаточное число k -го трансмиссионного элемента, который соединяется с рассматриваемым упругим элементом слева. Известные формулы теории упругости нелинейных сред для скоростей изменения во времени кратностей удлинения i -го упругого элемента

$$\dot{\lambda}_k^{(i)} = \lambda_k^{(i)} \mathbf{n}_k^{(i)} \otimes \mathbf{n}_k^{(i)} \cdot \mathbf{D}_i \quad (k = 1, 2, 3)$$

и скорости совершения работы в этом элементе

$$\mathbf{T}_i \cdot \mathbf{D}_i = \rho \sum_{k=1}^3 \frac{\partial f}{\partial \lambda_k^{(i)}} \dot{\lambda}_k^{(i)}$$

являются следствиями уравнения (1) в случае, когда параметр v_k является константой $v_k = \text{const}$. В общем случае параметры v_k могут быть убывающими во времени функциями. Их удобно использовать для учета роста поврежденности среды.

Девиатор тензора напряжений Коши j -го вязкого элемента вычисляли по формуле теории нелинейной вязкой жидкости

$$\text{dev} \mathbf{T}_j = 2\eta_j \mathbf{D}_j,$$

где коэффициент сдвиговой вязкости является неотрицательной функцией параметров состояния $\eta_j \geq 0$.

Девиатор тензора напряжений Коши пластического элемента определяли по формуле теории пластического течения

$$\mathbf{D}_n = \sqrt{\frac{\mathbf{D}_n \cdot \mathbf{D}_n}{\text{dev} \mathbf{T}_n \text{dev} \mathbf{T}_n}} \text{dev} \mathbf{T}_n \quad (2)$$

(n – номер пластического элемента). Для моделирования процесса пластического течения необходимо исключить неопределенность в выражении (2). Для этого предложено использовать математическое выражение, которое связывает тензор

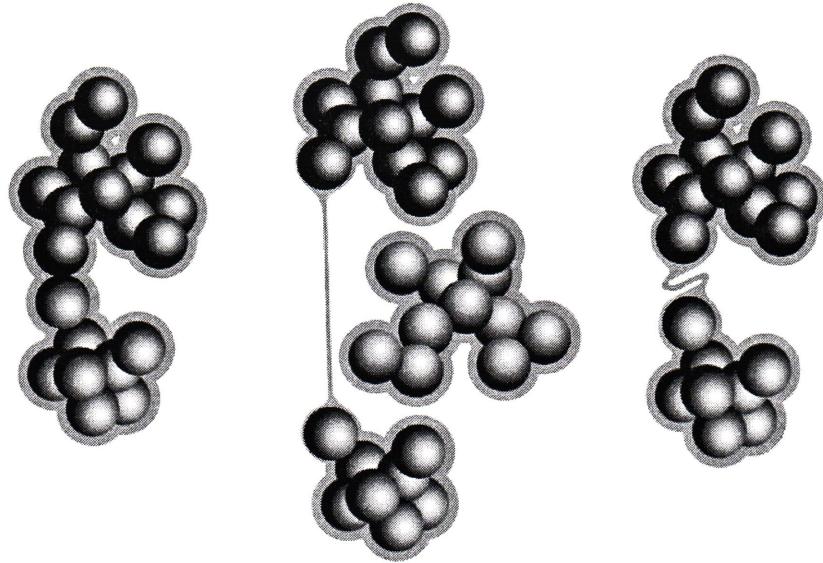


Рис. 2. Формирование волокон из слоев частиц наполнителя при растяжении материала и провисание волокон при снятии внешней нагрузки.

скоростей деформации пластического элемента с тензором скоростей деформации среды:

$$\sqrt{\mathbf{D}_n \cdot \mathbf{D}_n} = \kappa_n \sqrt{\operatorname{dev} \mathbf{D} \cdot \operatorname{dev} \mathbf{D}}$$

Символом κ_n обозначена неотрицательная функция параметров состояния. При осуществлении расчетов мы полагали, что пластическое течение возможно только при условии

$$\max \operatorname{inv}(\mathbf{T}_n) = \operatorname{inv}(\mathbf{T}_n), \quad (3)$$

где

$$\operatorname{inv}(\mathbf{T}_n) = \sqrt{\operatorname{dev} \mathbf{T}_n \cdot \operatorname{dev} \mathbf{T}_n},$$

т.е. когда инвариант напряжений в соответствующем пластическом элементе равен максимальному его значению в рассматриваемом элементе за всю историю деформирования среды.

Трансмиссионный элемент служит в модели для увеличения тензора скорости деформации в v_k раз при соответствующем уменьшении тензора напряжений Коши

$$\mathbf{T}_k^{\text{left}} = v_k \mathbf{T}_k^{\text{right}}, \quad \mathbf{D}_k^{\text{left}} = \frac{1}{v_k} \mathbf{D}_k^{\text{right}}$$

Здесь v_k – неотрицательная функция параметров состояния среды (передаточное число), k – номер трансмиссионного элемента.

Введение в модель трансмиссионных элементов объясняется желанием как можно точнее отразить процессы в реальном материале. С одной стороны, их использование может позволить добиться более высокой точности описания механического поведения материала, с другой – у нас появляется возможность понять и количественно оценить роль процессов на структурном уровне среды. Агрегаты частиц технического углерода в резинах в начальном состоянии касаются друг друга и формируют в эластомере жесткий каркас. Нами высказана гипотеза о том, что при деформировании материала происходит сползание полимерных цепей со слоев около частиц наполнителя в зазоры между агрегатами и формирование там высокопрочных волокон из полимера в односторонне ориентированном состоянии (рис. 2). В результате происходит повышение на порядок макроскопической прочности эластомеров при одновременном увеличении деформаций в момент разрыва по сравнению с материалом без наполнителя. Близкие агрегаты частиц технического углерода при двухкратном удлинении материала становятся далекими, а при четырехкратном – расходятся на очень большие расстояния. Соединяющие их волокна при этом должны в несколько десятков раз увеличить свою длину. Учесть такое поведение волокон в модели позволяют трансмиссионные элементы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим моделирование поведения резины на примере анализа результатов испытания трех образцов. Каждый из них проходит пять циклов деформирования и после этого – еще один с большей амплитудой. В качестве максимальных значений для амплитуд циклов выбраны следующие значения кратностей удлинений: $\lambda = 1.25, 1.75, 2.25$ и 2.7 . По абсолютной величине скорость изменения во времени кратности удлинения материала равна $|\dot{\lambda}| = 1 \text{ мин}^{-1}$. Знак у этой величины положителен, если материал растягивается, и отрицательный, если происходит снятие нагрузки. Разгрузка материала осуществляется до нулевого значения напряжений. Поиск необходимых для модели констант осуществляли при выполнении пяти последовательных шагов.

Шаг 1. Принимаем во внимание работу только связующего в резине. Его поведение в модели определяют первый и второй элементы на схеме механического поведения материала (рис. 1). Полагаем, что упругие свойства эластомера при деформировании среды не меняются. Для их моделирования использовали потенциал

$$w = w_2 = c_2^a \left(\sum_{i=1}^3 (\lambda_i^{(2)})^2 - 3 \right) + c_2^b \left(\left(\sum_{i=1}^3 (\lambda_i^{(2)})^{-1} - 3 \right) \right)$$

Всюду в формулах подстрочные индексы у констант и математических выражений соответствуют номерам элементов, к которым они относятся.

Разрушение агломератов и частичное разрушение агрегатов частиц технического углерода моделировали изменением передаточного числа в трансмиссионном элементе с номером один.

$$v_1 = v_1^0 (1 + \beta_1 \exp(-\gamma_1 \max I_V)),$$

где инвариант деформаций материала вычисляли по формуле

$$I_V = \sqrt{3 \operatorname{tr}(\mathbf{V}^2) - \operatorname{tr}(\mathbf{V})^2}$$

Значение начального передаточного числа задавали, исходя из структурных представлений о связи между макроскопическим и структурным уровнем $v_1^0 = 1.5$. Остальные три константы c_2^a ,

c_2^b , β_1 , γ_1 находили из требования наилучшего описания экспериментальных данных для пятых циклов деформирования образцов. При этом не принимали во внимание поведение материала при больших значениях λ на рассматриваемых циклах, т.е. поведение резины в состояниях, когда решающую роль начинают играть высокопрочные волокна. Об этом речь пойдет позже. При выборе констант рассматривали только начальные и средние участки циклов на кривых деформирования. Результаты расчета представлены на рис. 3. Точками на графике обозначены только пятые циклы деформирования образцов. Сплошной линией показана теоретическая кривая трехкратного растяжения и снятия нагрузки с увеличивающейся амплитудой. По оси абсцисс отложена кратность удлинения резины λ , по оси ординат – отношение растягивающей силы F к начальному сечению образца S_0 .

Шаг 2. Добавляем вязкоупругое поведение материалу. Для этого достаточно включить в работу третий и четвертый элементы на схеме механического поведения. Они начнут работать, как только в выражении свободной энергии появится еще одно слагаемое $w = w_2 + w_3$, где $w_3 = c_3 \left(\sum_{i=1}^3 (\lambda_i^{(3)})^2 - 3 \right)$. Изменение коэффициента сдвиговой вязкости определяли выражением $\mu_4 = \mu_4^0 \exp(\gamma_4 I_V)$. Экспоненциальная зависимость выбрана с целью более точного описания экспериментальных данных. На втором шаге определяли значения трех констант c_3 , μ_4^0 , γ_4 . Результаты расчета показаны на рис. 4.

Шаг 3. Добавим в модель учет процесса формирования высокопрочных волокон в резине при ее деформировании. Считаем, что волокна формируются в результате пластического течения полимера из слоев около частиц технического углерода в зазоры между агрегатами частиц. Анализ сетки наполнителя в резине привел к выводу, что около каждого агрегата формируется примерно шесть связей с соседними агрегатами [9]. Учитываем это в модели. Механические свойства всех волокон одни и те же. Отличие состоит только в передаточных числах трансмиссионных элементов. Такой прием позволяет принять во внимание, что в зависимости от взаимного расположения

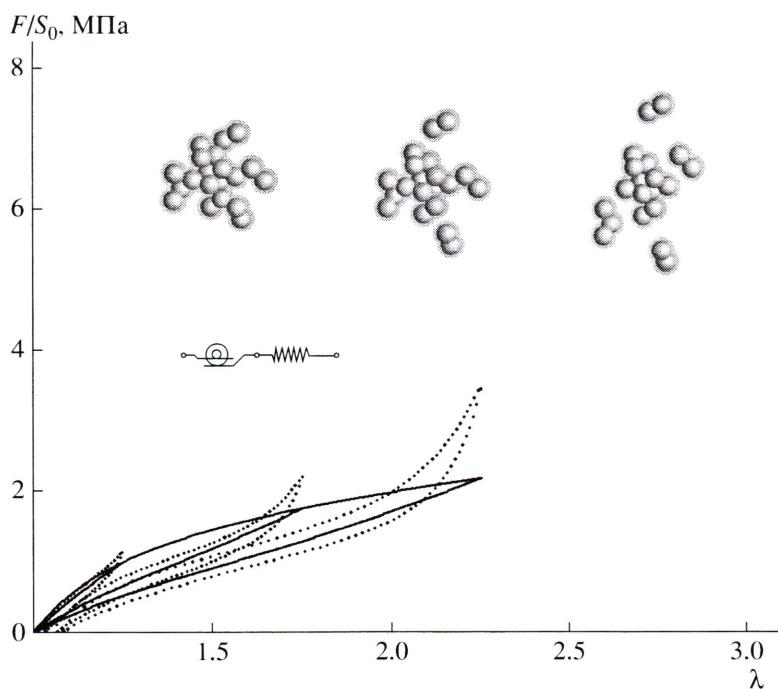


Рис. 3. Сравнение теоретического расчета поведения материала в циклах с увеличивающейся амплитудой с экспериментальными данными поведения образцов на пятых циклах деформирования, полученное на первом шаге математического моделирования.

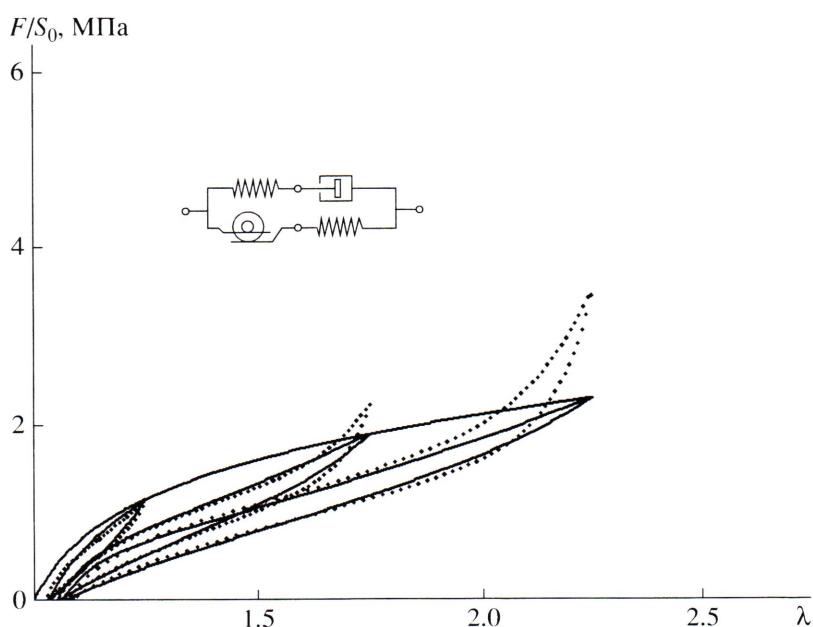


Рис. 4. Сравнение теоретического расчета с экспериментальными данными на втором шаге математического моделирования.

жения агрегатов длина волокон может очень существенно различаться.

На третьем шаге построения модели мы рассмотрели только пластические свойства процесса

формирования волокон. С этой целью добавили в потенциал свободной энергии еще шесть слагаемых

$$w = w_2 + w_3 + (w_8 + w_{13} + w_{18} + w_{23} + w_{28} + w_{33}),$$

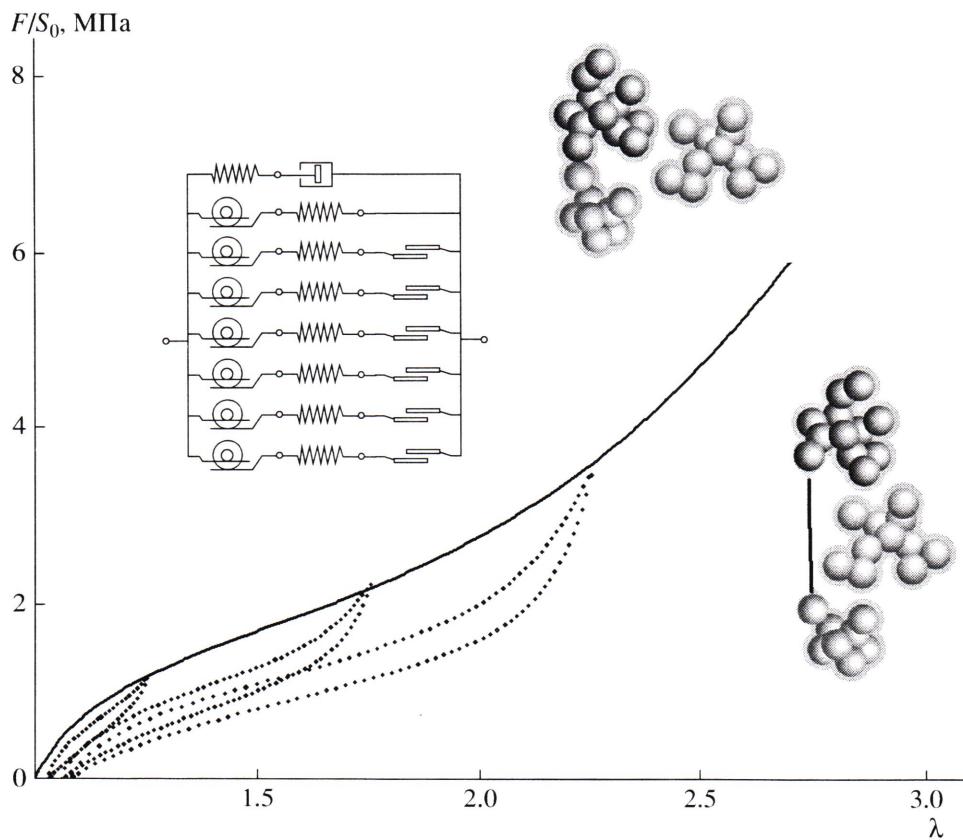


Рис. 5. Сравнение теоретического расчета с экспериментальными данными на третьем шаге математического моделирования.

каждое из которых вычисляли по формуле

$$w_j = \begin{cases} c_{plast} \xi_j & \text{при } \xi_j > 0 \\ 0 & \text{при } \xi_j \leq 0, \end{cases}$$

где $\xi_j = ((\lambda_1^{(j)})^2 - 1)((\lambda_2^{(j)})^2 - 1)((\lambda_3^{(j)})^2 - 1)$. Индекс j в формуле принимает значение 8, 13, 18, 23, 28 и 33. Ненулевые значения у слагаемых w_j бывают в случае, когда только одна из кратностей удлинения соответствующего упругого элемента больше единицы. С помощью такого приема мы учитываем, что возникающие волокна работают только на растяжение и при сжатии просто складываются, не оказывая сопротивления (рис. 2).

Поведение пластических элементов в модели описывали с помощью величины

$$\kappa_k = \kappa_{plast} \exp(-\gamma_{plast} \max I_V^2)$$

в случае выполнения равенства (3) и $\kappa_k = 0$ во всех других случаях. В формуле индекс k принимает

значения 9, 14, 19, 24, 29 и 34. Быстрое убывание параметра κ_k при увеличении деформации материала означает, что пластическое течение все более и более затруднено и может практически остановиться. Слои материала уменьшаются при движении полимерных цепей из них в зазоры. В какой-то момент времени почти весь полимер из слоев уходит на формирование волокон. Рост волокон прекращается.

Передаточные числа трансмиссионных элементов берем из приближенной оценки возможного их значения. В расчетах были использованы следующие числа: $v_5 = 1.8$, $v_{10} = 1.95$, $v_{15} = 2.1$, $v_{20} = 2.25$, $v_{25} = 2.4$, $v_{30} = 2.55$. Недостающие три значения параметров C_{plast} , κ_{plast} и γ_{plast} получили из условия наиболее точного описания экспериментальных данных (рис. 5). Волокна никак не могут изменить поведение среды на пятом цикле в области малых и средних значений кратности удлинения, поскольку они участвуют в формировании напряжений в материале только в растянутом состоянии. Поэтому значения констант c_{plast} , κ_{plast} и

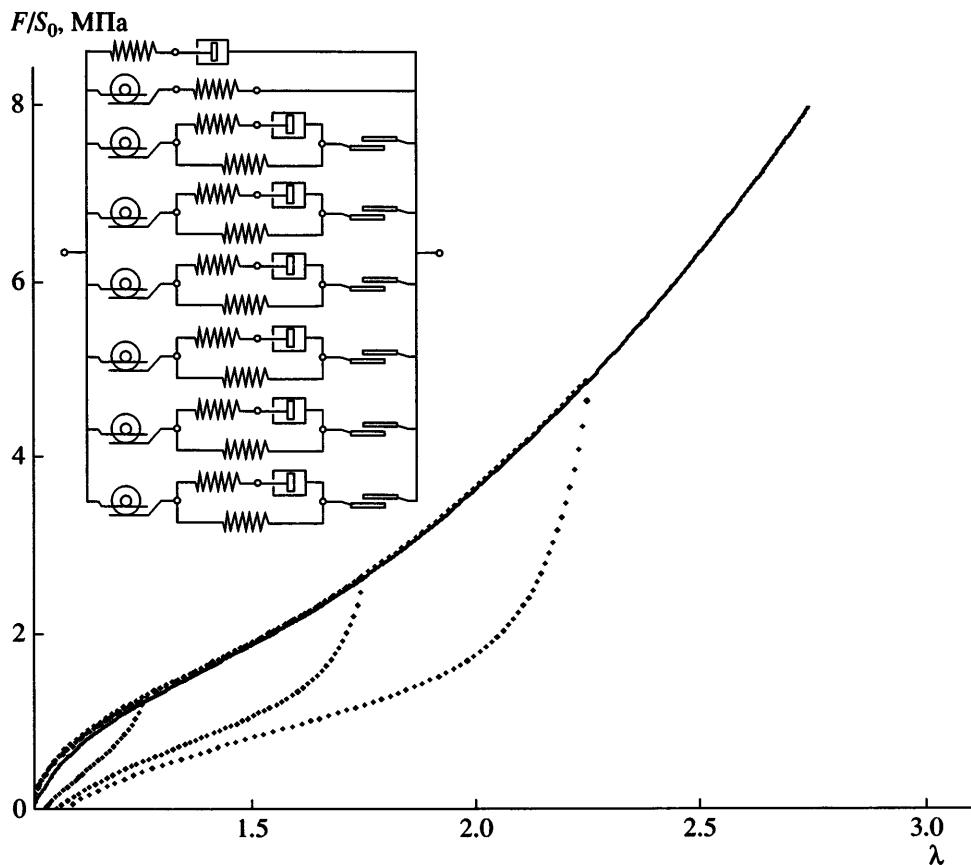


Рис. 6. Сравнение теоретического расчета кривой однократного растяжения материала с экспериментальными данными поведения образцов на первых циклах деформирования, полученное на четвертом шаге математического моделирования.

γ_{plast} находили из расчетов кривой однократного растяжения материала. Константы были подобраны таким образом, чтобы теоретическая кривая прошла через значения инженерных напряжений при максимальной деформации образцов на рассматриваемых циклах. Это означает, что для нахождения констант мы использовали экспериментальные данные, соответствующие тем состояниям резины, в которых все волокна находились в максимально растянутых состояниях.

Шаг 4. Добавляем волокнам вязкоупругие свойства. Это означает, что в выражение плотности свободной энергии нужно дописать еще шесть слагаемых:

$$w = w_2 + w_3 + (w_8 + w_{13} + w_{18} + w_{23} + w_{28} + w_{33}) + (w_6 + w_{11} + w_{16} + w_{21} + w_{26} + w_{31}),$$

где

$$w_n = \begin{cases} c_{visco} \xi_n & \text{при } \xi_n > 0 \\ 0 & \text{при } \xi_n \leq 0 \end{cases}$$

$$\xi_n = ((\lambda_1^{(n)})^2 - 1)((\lambda_2^{(n)})^2 - 1)((\lambda_3^{(n)})^2 - 1)$$

Индекс n в формулах принимает значение 6, 11, 16, 21, 26 и 31. Коэффициент сдвиговой вязкости вычисляли по формуле

$$\mu_m = \mu_{visco} \exp(-\gamma_{visco} (\max(\text{inv}(\mathbf{T}_k) - \text{inv}(\mathbf{T}_k)))$$

(\mathbf{T}_k – тензор напряжений в соответствующем пластическом элементе, с которым соединяется рассматриваемый вязкий элемент). Индекс m в формуле принимает значение 7, 12, 17, 22, 27 и 32.

Рассмотрим теоретическую кривую однократного растяжения образца. Поскольку при первом растяжении материала выполняется равенство (3), значение параметра γ_{visco} никак не влияет на результат. Нужно определить на этом шаге толь-

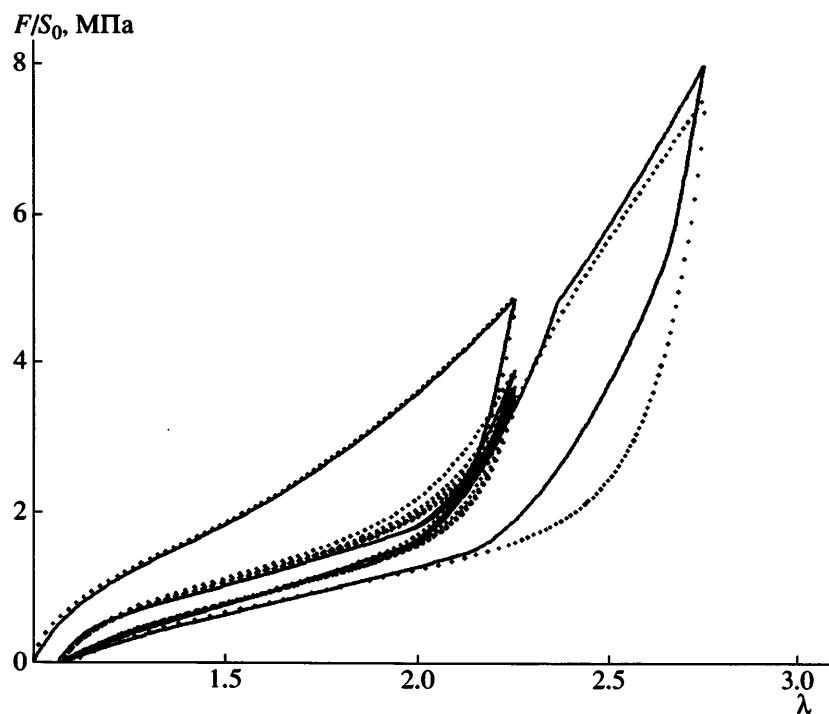


Рис. 7. Сравнение теоретических и экспериментальных данных испытания третьего образца.

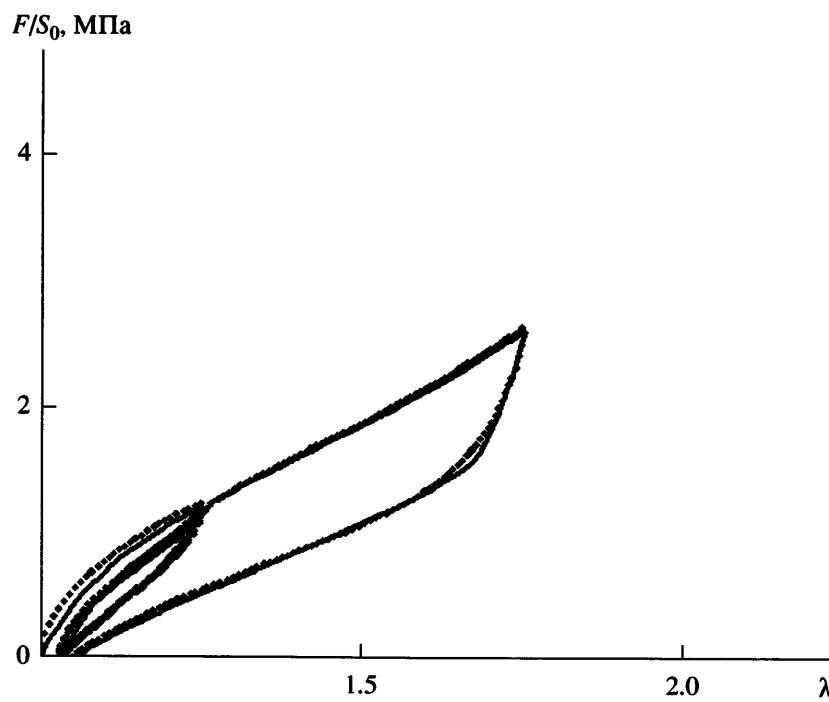


Рис. 8. Сравнение теоретических и экспериментальных данных испытания первого образца.

ко две константы – c_{visco} и μ_{visco} . Естественно, что включение новых элементов приведет к повышению напряжений в условиях первого нагружения. В модели появятся дополнительные вязкоупругие

потери, возникающие при деформировании волокон и прилегающих к ним частей связующего. Свойства волокон необходимо задать такими образом, чтобы точно описать поведение среды ре-

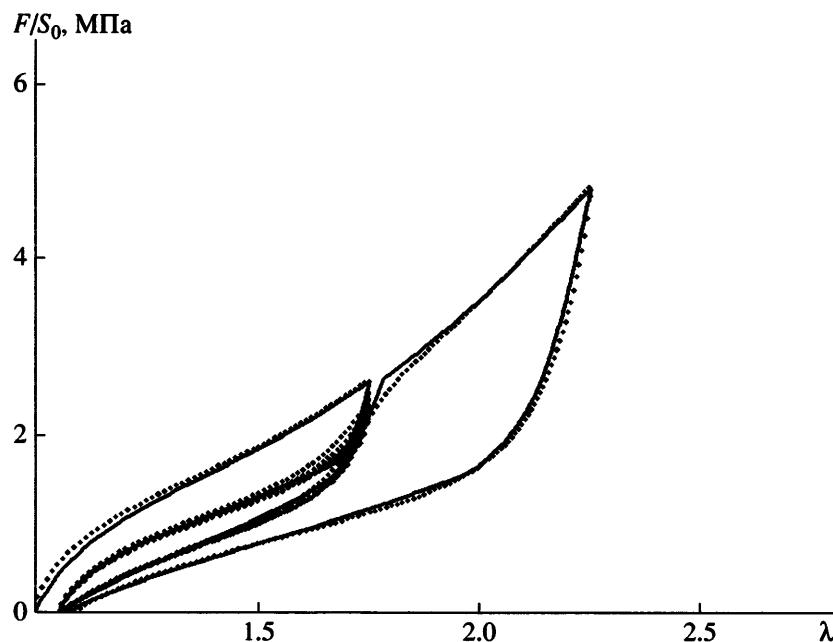


Рис. 9. Сравнение теоретических и экспериментальных данных испытания второго образца.

зины в условиях первого растяжения на первом цикле деформирования каждого образца. Результаты выбора констант c_{visco} и μ_{visco} представлены на рис. 6. Точки на графике – первые циклы деформирования рассматриваемых образцов, сплошная линия – теоретическая кривая растяжения образца до кратности удлинения $\lambda = 2.7$.

Шаг 5. Выбираем значение константы γ_{visco} так, чтобы наиболее точно описать изменение максимальных значений напряжений в пяти циклах деформирования материала для третьего образца. Результаты сравнения полученных теоретических и экспериментальных данных показаны на рис. 7. Видно, что модель учитывает и эффект размягчения Маллинза, и особенности вязкоупругого поведения резины. Используя полученные значения констант, можно определить теоретические кривые поведения материала для первого и второго образцов (рис. 8, 9). Они тоже демонстрируют удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

ВЫВОДЫ

Предложенная в работе структурно-феноменологическая модель позволяет с хорошей точностью воспроизводить в расчетах эффект размягчения Маллинза и вязкоупругое поведение резины. Математические выражения, входящие в

систему определяющих уравнений, учитывают процессы на структурном уровне материала. В работе высказана гипотеза о формировании высокопрочных волокон между агрегатами частиц технического углерода при деформировании резины. Структурно-феноменологическое моделирование поведения материала в условиях циклического деформирования с большой амплитудой свидетельствует о том, что эта гипотеза не противоречит возможному теоретическому описанию. Показано, что нахождение констант модели разбивается на независимые шаги, в каждом из которых определяется малое число констант.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kraus G. // Adv. Polym. Sci. 1971. V. 8. P. 155.
2. Vaia R.A., Wagner H.D. // Mater. Today. 2004. V. 11. P. 32.
3. Le Cam J.-B., Huneau B., Verron E., Gornet L. // Macromolecules. 2004. V. 37. P. 5011.
4. Trabelsi S., Albouy P.-A., Rault J. // Macromolecules. 2003. V. 36. P. 9093.
5. Toki S., Sics I., Ran S., Liu L., Hsiao B.S. // Polymer. 2003. V. 44. P. 6003.
6. Toki S., Sics I., Ran S., Liu L., Hsiao B.S., Murakami S., Tosaka M., Kohjiya S., Poompradub S., Ikeda Y.,

- Tsou A.H. // Rubber Chem. Technol. 2004. V. 77. P. 317.*
- Fukahori Y. // Rubber Chem. Technol. 2003. V. 76. P. 548.*
- Kawabata S., Yamashita Y., Ooyama H., Yoshida S. // Rubber Chem. Technol. 1995. V. 68. P. 311.*
- Morozov I.A., Svistkov A.L., Lauke B., Heinrich G. // Kautsch. Gummi, Kunstst. 2006. V. 59. P. 642.*

Structural–Phenomenological Simulation of the Mechanical Behavior of Rubbers

A. L. Svistkov^a and B. Lauke^b

^a Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Division, Russian Academy of Sciences,
ul. Akademika Koroleva 1, Perm, 614013 Russia

^b Leibniz-Institut für Polymerforschung
Dresden e.V., Hohe strasse 6, 01069 Dresden, Germany
e-mail: svistkov@icmm.ru)@

Abstract—It is hypothesized that, during deformation of rubbers, polymer chains slip off the layers at filler particles into voids between inclusions and high-strength polymer fibers in the uniaxially oriented state are formed in the voids. As a result, the macroscopic strength of elastomers increases by an order of magnitude and the elongation at break simultaneously increases relative to the unfilled elastomer. Aggregates of carbon black particles that occur close to one another in the initial sample depart to very large distances upon stretching the material. The fibers that tie the aggregates must extend their length by a factor of a few tens in this case. A mathematical model that takes into account these processes is proposed. It was shown that the set of constitutive equations makes it possible to simulate with good accuracy both the viscoelastic behavior of rubbers and the Mullins softening effect under finite strain conditions.