

УДК 541.64:539.3

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕРНИСТОГО КОМПОЗИТА С ВЫСОКОЭЛАСТИЧНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОЙ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ МАТРИЦЕЙ¹

© 2002 г. О. К. Гаринин

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

Поступила в редакцию 17.04.2001 г.

Принята в печать 08.10.2001 г.

Предложена модель высокоэластичного зернистого композитного материала, в явном виде связывающая его механические свойства и прочность со структурными характеристиками при больших упругих деформациях. Исследованы процессы накопления поврежденности и определены эффективные прочностные характеристики для систем с различной концентрацией наполнителя и разной прочностью матрицы. Построены соответствующие кривые растяжения.

ВВЕДЕНИЕ

Дисперсно наполненные эластомерные композиты представляют собой сложные иерархические структурно-неоднородные материалы, состоящие из смеси случайно расположенных жестких шарообразных частиц и мягкой эластомерной матрицы. Их промышленными аналогами можно считать резины различного назначения, полимеры, содержащие зернистый наполнитель, твердые ракетные топлива и т.п. Такие материалы характеризуются сложным механическим поведением, которое обусловлено разными по природе обратимыми и необратимыми структурными изменениями, происходящими при их деформировании. Поэтому понимание сути и значимости внутренних механизмов, формирующих эффективное поведение композита, является задачей первостепенного значения.

К наиболее интересным особенностям исследуемых материалов можно отнести их способность накапливать при деформировании значительную внутреннюю поврежденность, сохраняя без заметных потерь свою работоспособность. Несмотря на широкую и давнюю известность этого эффекта [1],

достаточно разработанных феноменологических описаний, учитывающих кинетику явления, насколько известно автору, не создано. Цель данной работы заключается в построении имитационной численной модели, способной в явном виде связать механические свойства и прочность наполненного эластомера с происходящими в нем процессами накопления и развития поврежденности (вплоть до полного разрушения). Рассматривается случай больших упругих деформаций.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В основе модели лежит принцип физической дискретизации, согласно которому сложные реальные полевые взаимодействия между структурными неоднородностями заменяются на эквивалентные (и более простые) реакции в соответствующих дискретно-механических аналогах [2, 3]. При деформировании гетерогенных систем типа мягкая матрица–жесткий наполнитель основная нагрузка приходится на матричные прослойки между включениями [4], поэтому сложную реальную композитную структуру разбивали на простые (континуальные) элементы вида включение–матричная прослойка–включение, а ее деформирование рассматривали как процесс их взаимодействия. Композит представляли в виде ограниченной области, содержащей конечное число жестких недеформируемых включений, которые в произвольном

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Департамента образования и науки администрации Пермской области (грант 01-01-96486).

E-mail: gar@icmm.ru (Гаринин Олег Константинович).

порядке располагались в упругой, повреждаемой деформированием матрице. Каждый континуальный структурный элемент, состоящий из двух частиц и прослойки между ними, заменяли на соответствующий дискретный аналог в виде упругого стержня с шарнирными узлами в центрах включений – т.е. рассматривали только центральное взаимодействие узлов. Такое допущение сделано на основании того, что при упругом взаимодействии близко расположенных жестких сфер основная энергия деформации накапливается вследствие раздвижения или сближения частиц вдоль межцентровой линии, а не за счет их сдвига или кручения [5]. Это позволило вдвое уменьшить число неизвестных степеней свободы, приходящихся на один узел (с 6 до 3), и тем самым значительно упростить вычисления (сохранив приемлемую точность аппроксимации). Механические характеристики стержневого элемента определяли из условия эквивалентности энергии деформации в аппроксимируемой и аппроксимирующей системах. В результате физической дискретизации получали пространственную стержневую систему, в которой каждый k -й узел соответствовал k -му включению, а стержневой элемент (i, j) – континуальному структурному элементу, содержащему i -тую и j -тую частицы (рис. 1).

Метод физической дискретизации был успешно использован при создании структурно-механической модели, описывающей поведение наполненных зернистых композитов при малых линейно упругих деформациях [4, 5]. Представляется, что при соответствующей доработке, этот метод можно распространить на случай больших упругих деформаций.

Для описания механического и прочностного поведения континуального структурного элемента, использовали структурную ячейку композита в виде упругого цилиндра (эластомер) с жесткой сферой (частица наполнителя) в центре. Высота цилиндра равнялась его диаметру, а разность между диаметрами ячейки и вложенного в нее включения – зазору между соседними включениями. К торцам цилиндра вдоль его оси прикладывали растягивающие перемещения. При этом торцы должны были оставаться плоскими и без перекосов, а боковая поверхность при смещении сохранять цилиндрическую форму (такие граничные условия соответствуют одноосному растяжению набора из плотно упакованных одинаковых ячеек). Из соображений симметрии (рис. 2а), не трудно убедиться что континуальный структурный элемент, состоящий из частиц одного размера, и структурная ячейка полностью идентичны с точки зрения механического поведения. Расчеты

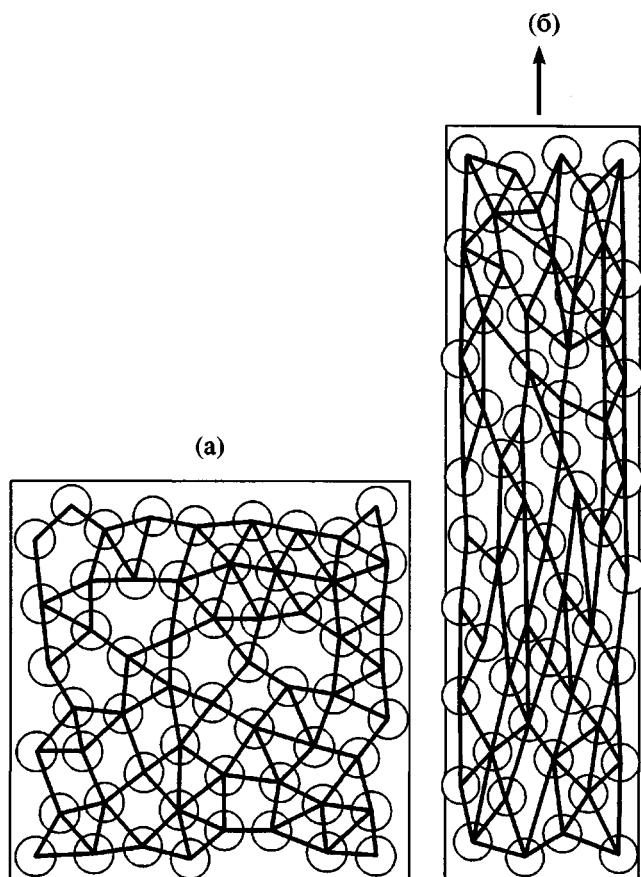


Рис. 1. Пример случайной структуры наполненного эластомера после физической дискретизации (плоская реализация) до (а) и после деформации (б).

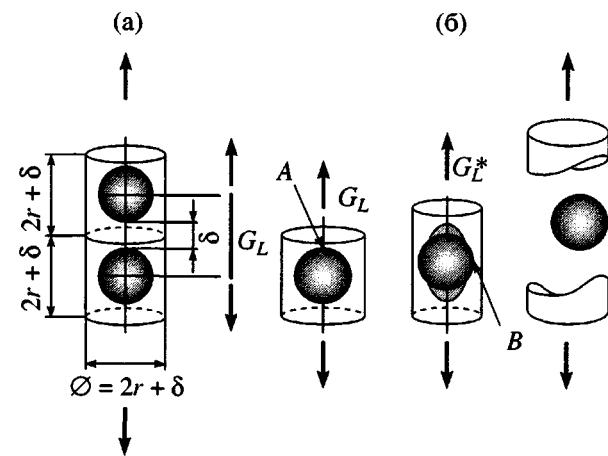


Рис. 2. Схема перехода от структурной ячейки (континуального структурного элемента) композита к дискретному механическому аналогу в виде упругого стержня (а) и различные стадии “жизненного цикла” структурной ячейки при ее растяжении (б).

одноосного растяжения структурной ячейки в условиях больших деформаций были проделаны в работах [6–8]. При этом рассматривали только равновесные стационарные процессы. Включение считалось неразрушающим и абсолютно жестким, а матрица несжимаемой (т.е. ее коэффициент Пуассона при малых деформациях принимался равным 0.5). Механическое поведение связующего описывали неогуковым потенциалом $W = E_m(I_1 - 3)/6$, где E_m – модуль Юнга матрицы, рассчитанный для малых упругих деформаций, I_1 – первый инвариант тензора меры деформации Коши–Грина.

Деформацию аппроксимирующего стержневого элемента ε_L определяли как отношение перемещений его узлов к длине в ненагруженном состоянии. Начальную жесткость стержневого элемента G_L (отношение силы F , возникающей при растяжении–сжатии стержневого элемента, к его деформации ε_L) задавали по формуле [4, 5]

$$G_L = 19.87E_m r^2 (\delta/r)^{0.15 \ln(\delta/r) - 0.08} \quad (1)$$

(r – радиус частицы, δ – зазор).

Многочисленные экспериментальные работы [9–15] свидетельствуют о существовании трех основных типов микроповреждений, возникающих в наполненных эластомерах. Во-первых, образование в матрице поперечных трещин; во-вторых, отделение материала связующего от частиц наполнителя с образованием пор; в-третьих, возникновение разрывов в уже отслоенной матрице. Для высокоэластичных матриц первичные повреждения обычно наблюдаются в виде отслоений матрицы от частиц. Появление поперечных трещин внутри матричной фазы более характерно для слабо эластичных материалов с хорошей адгезией на границах раздела фаз. Исходя из этого, механическое поведение структурного элемента в процессе его жизненного цикла можно разделить на несколько этапов (рис. 2б). Изначально поверхность частицы полностью скреплена с упругой матрицей (первая стадия). По мере растяжения напряжения в матрице нарастают и какой-то критический момент в районе полюсов сферы (точка А на рис. 2б) возникает отслоение. Между матрицей и частицей образуются вакуоли, ориентированные в направлении оси растяжения (вторая стадия). Предполагалось, что в обоих полюсах включения отслоение зарождается и развивается одинаковым образом.

Возникновение отслоения в структурном элементе (первичное повреждение) не означает, что он сразу и полностью утратил свою несущую способность. Появление вакуолей вызывает разгрузку матричных прослоек, т.е. ослабление действую-

щих там градиентов напряжений. Жесткость элемента падает, но он продолжает сопротивляться дальнейшему растяжению вплоть до возникновения в нем вторичного повреждения (третья, заключительная стадия жизненного цикла). Под вторичным повреждением понимали разрушение матрицы в наиболее растянутой экваториальной зоне (точка В на рис. 2б) вследствие появления там поперечных трещин.

Для повреждаемой деформированием эластомерной матрицы постулировали две критических характеристики: во-первых, разрывная деформация матрицы при одноосном растяжении ε_m^b как критерий возникновения в ней поперечных трещин (вторичных повреждений); во-вторых, предельное среднее растягивающее напряжение σ_m^b как мера гидростатического сопротивления по-рообразованию (т.е. первичных повреждений).

В зависимости от особенностей химического строения чистого эластомера значение ε_m^b может варьироваться в широком диапазоне (вплоть до 1000%).

Что касается параметра σ_m^b , то здесь ситуация несколько сложнее. Существует по крайней мере два различных механизма, провоцирующие возникновения отслоения – дезадгезионный и декогезионный. Дезадгезионное отслоение имеет место в системах, в которых прочность материала матрицы выше прочности скрепления связующего и наполнителя. В этом случае обычно постулируется, что на поверхностях частиц существуют микроскопические дефекты скрепления (микропоры), которых невозможно избежать в реальных промышленных условиях. Подобное допущение позволяет воспользоваться подходом Гриффитса, и считать, что отслоение начнет распространяться, когда накопленная в матрице упругая энергия растяжения станет достаточной для создания новой поверхности раздела [16, 17].

Если разрывная прочность матрицы ниже адгезионной прочности на границах раздела фаз, то скорее всего будет действовать декогезионный механизм возникновения и развития отслоения. В работах [9, 10] показано, что в момент, когда растягивающие гидростатические напряжения вблизи полюса частицы достигают значения модуля Юнга чистого эластомера или около того, в толще матрицы появляются микроскопически малые полости, инициируя начало декогезионного отслоения. При этом разрыв идет вдоль тонкого слоя матрицы, прилегающего к частице, а не по самой поверхности раздела фаз. Экспериментально установлено, что

пороговая прочность разрыва углеводородного эластомера согласуется с модулем Юнга и лежит в диапазоне от $5/6 E_m$ [18] до E_m [19]. В дальнейшем при расчетах рассматривали только декогезионный механизм возникновения вакуоли. Было принято, что в ячейке произойдет первичное отслоение, если гидростатическое растягивающее напряжение в полюсе включения (точка A на рис. 2б) превысит модуль Юнга матрицы

$$\sigma_m^b > E_m \quad (2)$$

Для простоты расчетов считали, что весь процесс отслоения (от зарождения вакуоли до полного отлипания матрицы от включения) происходит достаточно быстро, и начальная жесткость стержневого элемента G_L сразу падает до некоторого нового значения G_L^* , которое определялось из того же решения [6–8].

В качестве критерия окончательного разрушения структурного элемента было принято условие максимума главных растягивающих деформаций ε_m в отслоившейся матрице в ее наиболее деформированной части (точка B на рис. 2б)

$$\varepsilon_m > \varepsilon_m^b \quad (3)$$

На основании известного решения краевой задачи о распределении гидростатических напряжений в структурной ячейке композита при ее растяжении [6–8] для условий (2) и (3) были установлены зависимости между соответствующими критическими деформациями структурного элемента и его геометрическими и упругими характеристиками.

Расчетная схема одноосного растяжения модельного образца состояла в следующем.

Сначала, численно генерировали геометрическую структуру заданного фракционного состава со случайным (или регулярным) расположением частиц (методика геометрического синтеза случайных структур различной концентрации подробно изложена, например, в работах [4, 5]). В этой структуре “вырезали” кубический мезоэлемент представительных размеров и производили его физическую дискретизацию. Вблизи каждой из сторон мезоэлемента выделяли достаточно тонкий граничный слой (порядка характерного размера частицы). Узлы, попавшие в нижний граничный слой, неподвижно закрепляли, а тем, что оказались в верхнем, задавали пошаговые вертикальные растягивающие перемещения. При этом боковые грани мезоэлемента смешали так, чтобы обеспечить неизменность общего объема структуры, т.е. несжимаемость стержневой системы

(отображающей наполненный композит с несжимаемой эластомерной матрицей) моделировалась за счет выбора соответствующих граничных условий. Во избежание искажений в напряженном состоянии, обусловленных влиянием границы, граничным узлам разрешалось произвольно скользить в параллельной своей грани плоскости.

На каждом шаге нагружения осуществляли следующие действия.

1. Все узлы мезоэлемента смешали в соответствии с выбранным значением приращения макродеформации, пропорционально их удалению от нижней грани.

2. Далее методом локальных итераций, который будет описан ниже, искали уточненные координаты узлов, отвечающие новому положению равновесия.

3. В уравновешенной системе находили самый напряженный цельный структурный элемент и проверяли его на возможность появления первичного повреждения. В случае выполнения условия (2) жесткость стержневого элемента уменьшали до величины G_L^* , а структуру вновь уравновешивали, согласно процедуре 2. В противном случае среди всех уже “отслоенных” структурных элементов производили поиск самого перегруженного, который в свою очередь проверяли на предмет возможного окончательного разрушения (3), и если таковое происходило, опять проводили глобальную балансировку всей структуры. Процедуру 3 повторяли до тех пор, пока в мезоэлементе не оставалось перегруженных элементов или пока не происходило его глобального разрушения.

4. В окончательно сбалансированной системе вычисляли усилие реакции и другие характеристики, описывающие ее текущее состояние. Общее растягивающее усилие определяли как сумму проекций сил, действующих во всех структурных элементах, пересеченных перпендикулярным вытяжке сечением, на направление этой вытяжки.

Процесс пошагового нагружения продолжали до тех пор, пока модельный “образец” не разделялся на две независимые друг от друга части.

МЕТОД ЛОКАЛЬНЫХ ИТЕРАЦИЙ

Проблема поиска равновесия в нелинейно упругих стержневых системах с перестраиваемой при больших деформациях структурой требует своего особого подхода по нескольким причинам. Во-первых, при больших вытяжках стержневая структура становится существенно анизотропной, а это плохо сказывается на устойчивости

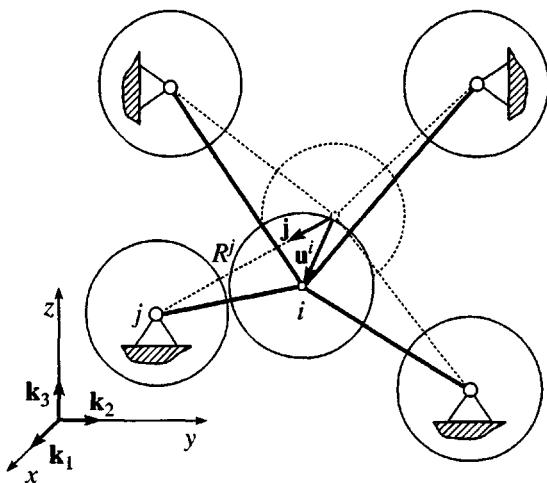


Рис. 3. Расчетная схема поиска локального равновесия i -го узла.

стандартных алгоритмов даже для линейно упругих систем. Во-вторых, всегда существуют и чисто вычислительные проблемы, обусловленные нелинейностью механического поведения отдельных структурных элементов и возможностью изменения их свойств в процессе нагружения. Предлагаемый ниже метод локальных итераций позволяет достаточно успешно преодолеть эти трудности для случая нелинейно упругих сильно деформируемых неоднородных стержневых систем. В его основе лежит идея о возможности линеаризации локального физического уравнения равновесия для каждого отдельного узла структуры и сходимости итерационного процесса поиска равновесия всей системы при последовательном обходе узлов.

Пусть требуется найти положение локального равновесия для некоторого i -го узла, т.е. когда все остальные непосредственно связанные с ним j -ые узлы ($j = 1, \dots, N$ – одновременно и номер элемента, содержащего узлы i и j) считаются на данный момент неподвижно закрепленными (рис. 3). Штриховыми линиями показано текущее положение структурных элементов, сплошными – искомое. Соответствующее уравнение локального равновесия запишем в виде

$$\sum_{j=1}^N F^j(u^i) \cos(k_n, j) = \sum_{j=1}^N F_n^j(u^i) = 0, \quad (4)$$

где $F^j(u^i)$ – усилие, действующее в j -м структурном элементе; k_n и j – направляющие векторы n -й координатной оси и j -го элемента соответственно; F_n^j – проекция усилия в j -м стержневом элементе на n -тую ось координат; $u^i = u_n^i k_n$ – искомый вектор перемещений, переводящий i -й узел в положение локального равновесия. Пусть также R_0^j – исходная длина j -го структурного элемента, а R^j – текущее расстояние между i -м и j -м узлами. Выражение (4) – это система уравнений, в общем случае нелинейных относительно u_n^i . Если считать, что i -й узел находится достаточно близко от положения равновесия, то, разлагая $F_n^j(u^i)$ в ряд Тейлора по компонентам u_m^i и отбрасывая нелинейные члены ряда, можно получить систему линейных уравнений, решение которой даст искомые перемещения.

Процедура локального уравновешивания производится поочередно для каждого из узлов стержневой системы, за исключением тех, положение которых считается известным. Этот цикл повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто глобальное равновесие всей стержневой структуры, которое определялось в соответствии с условием

$$\varepsilon_W = \frac{W_i - W_{i-1}}{W_i} < \varepsilon_W^{\min}, \quad (5)$$

где ε_W – относительное расхождение по минимизируемой в процессе итерационного уравновешивания потенциальной энергии деформации стержневой системы; W_i и W_{i-1} – значения энергии на i -м и $(i-1)$ -м шагах итерационного процесса локального уравновешивания узлов, ε_W^{\min} – минимальное значение невязки, удовлетворяющее условию сходимости.

ПРОБЛЕМА ИСКЛЮЧЕННОГО ОБЪЕМА

Для абсолютно жесткого наполнителя перестройка моделирующей композит стержневой структуры при ее деформации должна происходить так, чтобы исключить пересечение объемов контактирующих включений. С точки зрения отдельно взятого структурного элемента это ограничение означает, что его узлы не могут сближаться на расстояние, меньшее суммы радиусов образующих его частиц (рис. 2а), поэтому механическое поведение стержневого элемента, в зависимости от того, насколько близко подошли частицы друг к другу, описывалось по-разному. Введем следующие обозначе-

ния: $R_0^j \equiv R_0 = r_1 + r_2 + \delta$ – длина j -го структурного элемента в свободном состоянии (r_1 и r_2 – радиусы частиц, δ – исходный зазор между ними, далее индекс j , где можно по смыслу, пропускаем); $R_* = r_1 + r_2$ – предельная длина стержневого элемента, допускаемая при его сжатии; $R = R_0 + u_R$ – текущая длина стержневого элемента (u_R – его абсолютное удлинение); $\lambda = R/R_0$ – относительное удлинение стержневого элемента, $\varepsilon_L = \lambda - 1$ – его деформация. Зависимость F от λ определяли в соответствии с выражением (6). Схематично эта связь показана на рис. 4.

$$\begin{aligned} F(\lambda) = & \\ & \left. \begin{array}{l} F_1 = G(\lambda - 1), \quad \lambda_\alpha < \lambda \\ F_2 = \frac{A(\lambda - \lambda_\alpha)}{R_0^{\gamma-1}(\lambda - \lambda_*)^\gamma} + G(\lambda_\alpha - 1), \quad \lambda_\beta < \lambda \leq \lambda_\alpha \\ F_3 = B(\lambda - \lambda_\beta) + F_2(\lambda_\beta), \quad \lambda_* < \lambda \leq \lambda_\beta \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

где G – текущая жесткость стержня ($G = G_L$, G_L^* , $G_L^*/10^4$ в зависимости от того, на какой стадии повреждения находится стержневой элемент); λ_α и λ_β – границы диапазона, в пределах которого действует нелинейная сила отталкивания $F_2(\lambda)$; γ – мера интенсивности “загиба” кривой $F_2(\lambda)$; $\lambda_* = R_*/R_0$ – предельно возможное относительное сжатие стержневого элемента, при котором происходит касание частиц. A и B – константы гладкого (до первых производных) сопряжения кривых F_1 с F_2 и F_2 с F_3

$$\begin{aligned} A &= GR_0^{\gamma-1}(\lambda_\alpha - \lambda_*)^\gamma \\ B &= \frac{A}{R_0^{\gamma-1}(\lambda_\beta - \lambda_*)^\gamma} \left[1 - \gamma \frac{\lambda_\beta - \lambda_\alpha}{\lambda_\beta - \lambda_*} \right] \end{aligned}$$

Ввиду произвольного характера расположения частиц наполнителя в матрице, каждый структурный элемент должен иметь свой характерный набор значений R_0 , R_* , λ_α и λ_β , причем если R_0 и R_* получались автоматически при генерации композитной структуры, то для унификации определения параметров λ_α и λ_β использовали обобщенные безразмерные коэффициенты k_α и k_β

$$\begin{aligned} \lambda_\alpha &= [R_* + k_\alpha(R_0 - R_*)]/R_0 \\ \lambda_\beta &= [R_* + k_\beta(R_0 - R_*)]/R_0 \end{aligned} \quad (7)$$

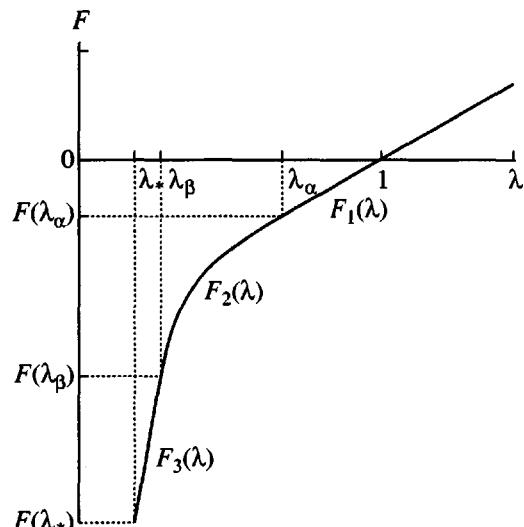


Рис. 4. Схематическая зависимость между силой, действующей в стержневом элементе, и его удлинением.

Проведенные исследования показали, что надежная сходимость метода локальных итераций (во всем диапазоне концентраций наполнителя) при соблюдении ограничений на взаимопроникновение частиц обеспечивается при $k_\alpha \in [0.20, 0.30]$, $k_\beta \in [0.08, 0.12]$, и $\gamma = 1$.

Ограничение минимального расстояния между концами стержневого элемента, конечно, не решает полностью проблему исключенного объема, так как в структуре возможны также и пересечения “несоседних” включений, т. е. не входящих в один элемент. Непосредственная численная проверка показала, что даже при высоких наполнениях число пересечений между “несоседними” включениями относительно невелико и им можно пренебречь.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью изложенного выше подхода было проведено численное моделирование процессов развития поврежденности в наполненных эластомерах (вплоть до полного разрушения). Рассматривали трехмерные случайные структуры с различным наполнением φ и различной деформативной прочностью матрицы. Каждый модельный “образец” содержал примерно от 600 до 1000 включений, что соответствует (в зависимости от φ) 2500–5500 структурным элементам. Приращение

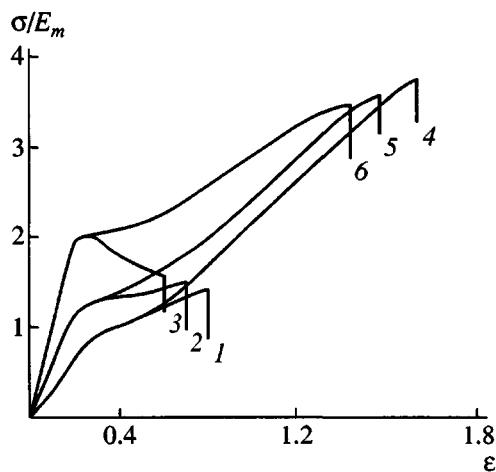


Рис. 5. Зависимость истинных напряжений от деформации для композитных систем с разным наполнением ϕ и деформативной прочностью матрицы ϵ_m^b . Пояснения в тексте.

растягивающей деформации “образца” вели с шагом $\Delta\epsilon = 0.2\%$. Значение ϵ_w^{\min} в выражении (5) задавали равным 10^{-5} . Требуемая сходимость при поиске положения равновесия стержневой системы методом локальных итераций достигалась в диапазоне от 2 итераций (если на данном шаге не происходило никаких повреждений) до ~ 50 – 100 (когда структура находилась в неустойчивом предразрывном состоянии).

На рис. 5 показаны кривые растяжения для структур с различным наполнением и деформативной прочностью матрицы. Случаю $\epsilon_m^b = 200\%$ соответствуют зависимости 1 ($\phi = 30\%$), 2 ($\phi = 40\%$) и

Значения предельных разрывных деформаций и напряжений в моделируемых композитных системах с различным наполнением и деформативной прочностью матрицы

$\epsilon_m^b, \%$	$\phi, \%$	ϵ^b/ϵ_m^b	$(\Delta\epsilon^b)/\epsilon^b$	σ^b/E_m	$(\Delta\sigma^b)/\sigma^b$
200	30	0.40	0.24	1.40	0.25
	40	0.35	0.26	1.48	0.27
	50	0.30	0.29	1.55	0.30
400	30	0.43	0.14	3.72	0.15
	40	0.39	0.17	3.55	0.19
	50	0.36	0.21	3.45	0.23

3 ($\phi = 50\%$), для композитов с более прочной матрицей ($\epsilon_m^b = 400\%$) кривые растяжения 4 ($\phi = 30\%$), 5 ($\phi = 40\%$) и 6 ($\phi = 50\%$). По оси ординат отложены эффективные истинные напряжения, нормированные по модулю Юнга чистого эластомера σ/E_m , а по оси абсцисс – растягивающая деформация ϵ . Каждая из этих зависимостей – результат обобщения нескольких независимых компьютерных реализаций (не менее 10 на одну усредняющую кривую). На начальных стадиях растяжения (до появления локальных повреждений) различные по геометрии случайные реализации с одинаковыми входными макрохарактеристиками давали практически одинаковые результаты, что свидетельствует о хорошей представительности исследуемых случайных выборок. В дальнейшем расхождение увеличивалось и в предразрывном состоянии достигало максимума, причем для более высоких концентраций наблюдалась тенденция увеличения разброса (как по напряжениям, так и по деформациям). В таблице приведены усредненные значения предельных деформаций моделируемых композитов, отнесенных к разрывной деформации матрицы ϵ^b/ϵ_m^b , их прочности σ^b/E_m , а также относительный разброс по разрывным напряжениям $(\Delta\sigma^b)/\sigma^b$ и деформациям $(\Delta\epsilon^b)/\epsilon^b$. Деформативная прочность наполненных систем по сравнению с чистым эластомером оказалась меньше в ~ 2.5 – 3 раза.

Прочность по напряжению получилась довольно близкой, что не противоречит результатам ряда известных теоретических [7] и экспериментальных исследований, проведенных для композитов с полиуретановой [20] и этиленпропиленовой [21] матрицей.

На рис. 6 представлены обобщенные деформационные зависимости степени отслоения C_d и степени повреждения C_b , соответствующие приведенным выше кривым нагружения (номера кривых относятся к структурам с теми же значениями ϵ_m^b и ϕ , что и на рис. 5). Под C_d и C_b понимали отношения числа имеющихся в структуре элементов с отслоениями и полностью разрушенных элементов к их общему количеству. Согласно расчетам, глобальная потеря несущей способности происходила при весьма малых значениях C_b – всего 8–10%. Максимальная доля отслоенных элементов при этом достигала уровня 20% для систем с $\epsilon_m^b = 200\%$ и 40–50% для случая $\epsilon_m^b = 400\%$.

Сначала, при деформациях до ~ 20 – 30% , первичные (и первые вторичные) локальные повреждения возникали более или менее равномерно по всему

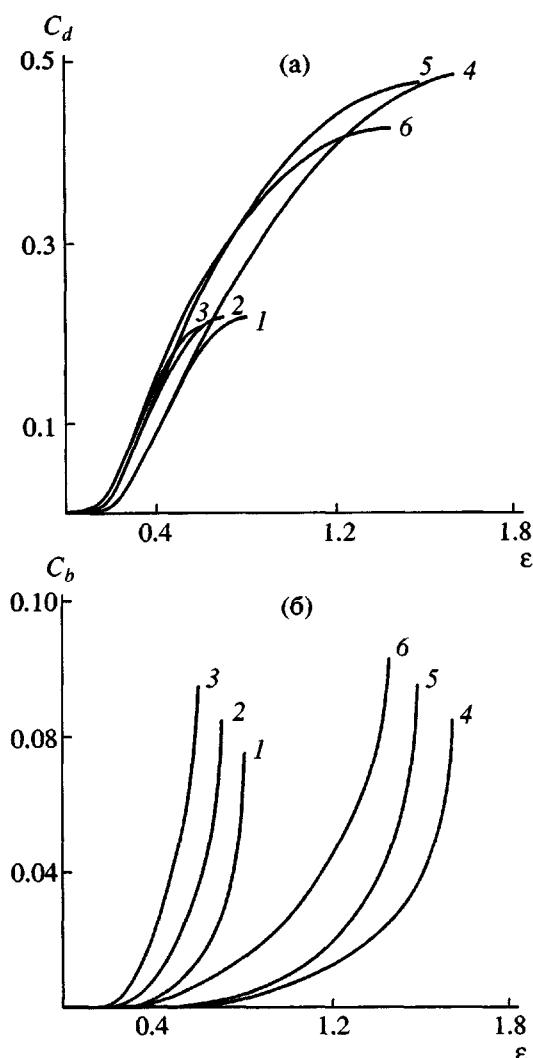


Рис. 6. Деформационные зависимости степени отслоения C_d (а) и степени повреждения C_b (б) для композитных систем с разными φ и ε_m^b . Пояснения в тексте.

объему модельного “образца”, остававшегося при этом макрооднородным. Далее характер развития поврежденности постепенно менялся. В структуре появлялись зоны относительного размягчения, в которых в основном и происходило дальнейшее накопление отслоенных и разрушенных элементов. Такие ослабленные уже имеющиеся в них повреждениями области деформировались (по сравнению с другими местами) тем сильнее, чем больше в них возникало повреждений. В конце концов, в “образце” случайным образом выявлялось одно наиболее слабое критическое сечение, в котором в основном и происходило дальнейшее накопление поврежденности вплоть до окончательного разрушения, т.е. наблюдалась потеря упругой устойчивости системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mullins L. // Rub. Chem. Techn. 1969. V. 42. № 1. P. 165.
2. Absi E., Prager W. // Comput. Meth. Appl. Mech. and Eng. 1975. № 6. P. 59.
3. Аргириес Дж.Г. // Теоретическая и прикладная механика / Под. ред. Михайлова Г.К. М.: Мир, 1979. С. 15.
4. Garishin O.C., Moshev V.V. // Int. J. Solids and Structures. 1993. V. 30. № 17. P. 2347.
5. Мошев В.В., Свистков А.Л., Гаршин О.К., Евлампиева С.Е., Роговой А.А., Ковров В.Н., Комар Л.А., Голотина Л.А., Кожевникова Л.Л. Структурные механизмы формирования механических свойств и прочности зернистых полимерных композитов. Екатеринбург: УрО РАН, 1997.
6. Kozhevnikova L.L., Moshev V.V., Rogovoy A.A. // Int. J. Solids and Structures. 1993. V. 30. № 2. P. 237.
7. Moshev V.V., Kozhevnikova L.L. // J. Adhesion. 1996. V. 55. P. 209.
8. Moshev V.V., Kozhevnikova L.L. // J. Adhesion. 1997. V. 62. P. 169.
9. Gent A.N., Park B. // J. Mater. Sci. 1984. V. 19. P. 1947.
10. Oberth A.E., Bruenner R.S. // Trans. Soc. Rheology. 1965. V. 9. P. 165.
11. Farris R.J. // Trans. Soc. Rheology. 1968. V. 12. P. 303.
12. Farris R.J. // Trans. Soc. Rheology. 1968. V. 12. P. 315.
13. Struik C.E., Bree H.W., Schwarzl F.R. // Proc. Int. Rubber Conf. London. 1968. P. 205.
14. Sekhar N., Van der Hoff B.M.E. // J. Appl. Polym. Sci. 1971. V. 15. P. 169.
15. Fedors R.F., Landel R.F. // J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed. 1975. V. 13. P. 579.
16. Kendall K. // J. Phys. D. 1971. V. 4. P. 1186.
17. Gent A. // J. Mater. Sci. 1980. V. 15. P. 2884.
18. Gent A.N. // Rub. Chem. Techn. 1990. V. 63. P. 49.
19. Gent A.N., Tobias R.H. // J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed. 1982. V. 20. P. 2051.
20. Schwarzl F.R., Bree H.W., Nederveen C.J. // Proc. 4 Int. Congr. Rheology. New York, 1965. V. 3. P. 241.
21. Yagh K., Lim C.K., Okuama M., Tschoegl N.W. // Proc. Int. Colloc. Du CNRS. Paris, 1975. № 231. P. 289.

Structural Mechanical Model of a Grainy Composite with a High-Elasticity Deformation-Damageable Matrix

O. K. Garishin

*Institute of Continuum Mechanics, Ural Division, Russian Academy of Sciences,
ul. akademika Koroleva 1, Perm, 614013 Russia*

Abstract—A model of a highly elastic grainy composite material was proposed. The model explicitly describes the relation between the mechanical properties of the composite and its structural characteristics at large elastic deformations. The process of accumulation of damages was studied, and a number of effective strength characteristics for systems with various concentrations of filler particles and various strengths of the matrix were determined. The corresponding stress-strain curves of extension were plotted.