

УДК 678.01:539.37

В. В. Мозгалёв, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ);**Н. Р. Прокопчук**, доктор химических наук, профессор,
член-корреспондент НАН Беларуси, заведующий кафедрой (БГТУ);**В. А. Рудницкий**, доктор технических наук, профессор
(Институт прикладной физики НАН Беларуси)**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
НА СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ**

Как правило, проводя измерения по существующим методикам, мы получаем определенное значение какого-либо показателя материала при конкретно заданных условиях испытания и не имеем представления, как он будет себя вести при других условиях испытаний (скорости, величине деформации, температуре и т. д.).

В работе рассмотрено влияния скорости и величины деформации на свойства эластомеров путем использования результатов статического метода испытаний резин на растяжение и метода динамического вдавливания. На основании проведенных исследований с большой вероятностью можно предполагать, что в обоих случаях имеет место эффект снижения напряжения, а значит, и модуля упругости наполненных резин различных марок с увеличением величины деформации.

As a rule, measuring by existing techniques, we obtain define value of mechanical parameter of material under particularly set conditions of test, and we have no representation as myself will conduct at other test specifications (speed, value of deformation, temperature, etc.).

In work it is considered influences of speed and value of deformation on properties of rubbers, by use of results of a static test method of rubbers on a stretching, and a method of dynamic cave-in. On the basis of the spent researches, with a high probability it is possible to assume, that in both cases the effect of a voltage reduction, so also the module of the elasticity, the filled rubbers of various marks with increase value of deformation takes place.

Введение. Существует большое количество различных методик испытаний эластомеров, основанных на определении упругогистерезисных, прочностных, усталостнопрочностных, а также упругорелаксационных свойств. При этом по времени измерения данные методики можно условно разделить на динамические и статические (квазистатические).

Как правило, проводя измерения по существующим методикам, мы получаем определенное значение какого-либо показателя материала при конкретно заданных условиях испытания и не имеем представления, как он будет себя вести при других условиях испытаний (скорости, величине деформации, температуре и т. д.).

В данной работе рассматривается влияние скорости и величины деформации (нестесненного сжатия либо растяжения) на модуль упругости эластомеров, в частности резин.

Основная часть. Согласно теоретической зависимости, с увеличением времени воздействия на эластомер модуль упругости уменьшается. Данная зависимость схематично представлена на рис. 1.

Аналогичная зависимость наблюдается при проведении экспериментов на растяжение для резин в координатах σ (напряжение при растяжении, МПа) от ε (величина деформации, %) при температурах ниже температуры (T) стеклования и выше температуры выхода на плато

высокоэластичности (рис. 2). Чем выше скорость деформации, тем более высокое значение имеет напряжение при растяжении при условии постоянства температуры.

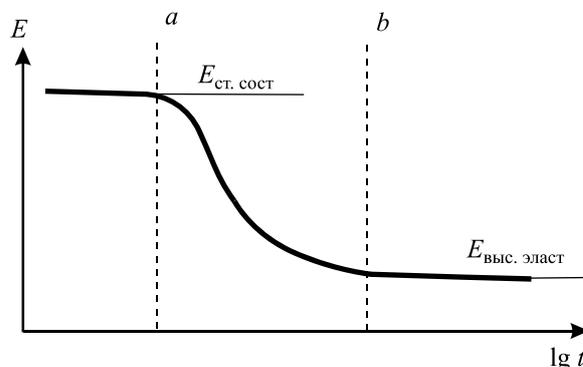


Рис. 1. Зависимость модуля упругости (E) от логарифма времени воздействия ($\lg t$): $E_{\text{ст. сост}}$ — модуль упругости в стеклообразном состоянии; $E_{\text{выс. эласт}}$ — модуль упругости в высокоэластичном состоянии; линии a и b — условные границы перехода из стеклообразного состояния в переходное состояние и из переходного состояния в состояние высокоэластичности соответственно

Данная зависимость подтверждается при проведении экспериментов на растяжение для различных марок резин на аппаратуре Tensometr 2020 фирмы INSTRON при скоростях от 10 до 500 мм/мин при температуре 20°C.

При этом в зависимости от типа каучука, типа и количества наполнителей, пластификаторов и т. д. данная зависимость проявляется в большей или меньшей степени.

Приведенные на рис. 2 кривые, соответствующие времени воздействия, находящемуся на кривой зависимости модуля упругости (рис. 1) в области линии *b*, относятся к квазистатическому методу растяжения. Однако для проведения более обобщенного вывода о влиянии скорости деформации на модуль упругости резин требуется сравнение результатов квазистатического метода с динамическим (время воздействия в области линии *a* на рис. 1), при котором скорость деформации значительно выше.

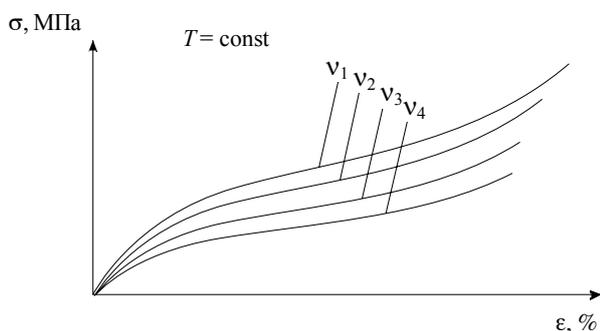


Рис. 2. Кривые зависимости напряжения от деформации при различных скоростях растяжения ($v_1 > v_2 > v_3 > v_4$) и постоянной температуре ($T = \text{const}$)

Деформирование эластомерного материала во время удара есть термодинамически необратимый процесс, поскольку релаксационные процессы, происходящие в эластомерных материалах, не успевают привести его в равновесное состояние. Наличие этих процессов обуславливают диссипацию (потери) энергии удара, переходящую, в конце концов, в тепло. Поскольку деформирование эластомеров при ударе связано с релаксационными процессами, которые по своей природе более медленные по сравнению со скоростью деформирования, то возникает дополнительная сила сопротивления вдавливанию при ударе. Непосредственно учет такой дополнительной силы предусматривается в нелинейной полуэмпирической модели, в основу которой положено достаточно общее выражение для контактной силы при динамическом ударном индентировании вязкоупругого материала [1]:

$$P = P_y + P_v, \quad (1)$$

где P_y – упругая составляющая контактного усилия, P_v – вязкая составляющая силы сопротивления вдавливанию индентора.

При этом упругая составляющая контактного усилия подчиняется закону Герца:

$$P_y = \frac{4E_{\text{дин}}}{3(1-\mu^2)} \sqrt{R} \alpha^{3/2}. \quad (2)$$

В отличие от классического закона Герца в этом уравнении модуль упругости $E_{\text{дин}}$ является динамическим модулем, который, будучи функцией химического состава и структуры материала, также сильно зависит от времени удара. Работа, совершаемая упругой составляющей силы, потерь не дает, и если бы было только упругое вдавливание, то коэффициент восстановления скорости равнялся бы единице, однако, как показывает эксперимент, для реальных материалов это далеко не так.

Потери обуславливает вторая «вязкая» составляющая силы в уравнении (1), которая зависит непосредственно от вязкости η (Па·с) и скорости внедрения v (м/с). В общем виде выражение для вязкой компоненты силы имеет следующий вид [1]:

$$P_v = g(\alpha)v, \quad (3)$$

где $g(\alpha)$ – произвольная положительная функция; v – текущая скорость вдавливания, численно равная производной по времени от глубины вдавливания: $v = \alpha'$.

В этом случае формула (1) запишется в виде

$$P = \frac{4E_{\text{дин}}}{3(1-\mu^2)} \sqrt{R} \alpha^{3/2} + g(\alpha)v. \quad (4)$$

Из приведенных выше зависимостей следует, что на сопротивление вдавливанию P оказывает влияние как глубина, так и скорость внедрения индентора, причем интенсивность влияния глубины внедрения характеризуется величиной модуля упругости $E_{\text{дин}}$, а влияние скорости обуславливается вязкостью материала [2]. Как видим, условия проведения эксперимента оказывают влияние на модуль упругости, в основном, по причине различных значений времени нагружения. Проведенные нами исследования резин различных марок методом динамического вдавливания при предударных скоростях индентора в диапазоне 0,2–1 м/с и массами от 2,45 до 10,20 г схематично представлены на рис. 3, где показано изменение динамического модуля упругости от максимальной глубины вдавливания индентора.

Как видно из рис. 3, характер изменения модуля упругости не однозначен. Для некоторых резин наблюдается увеличение модуля упругости, а для других – уменьшение. Объяснений приведенным данным может быть несколько. Рассмотрим влияние вязкости материала. Увеличение глубины вдавливания происходит вследствие большей величины предударной скорости, а значит, меньшим временем удара,

что приводит к увеличению динамического модуля упругости в соответствии с рис. 1. Этим можно объяснить ход кривых 1–4.

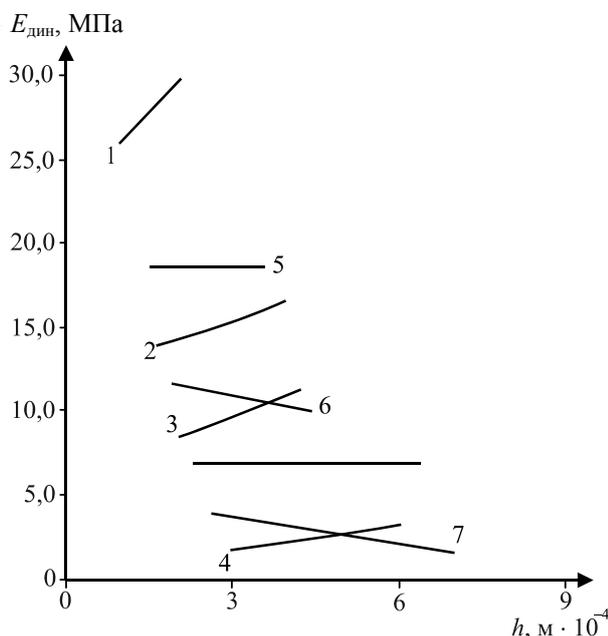


Рис. 3. Зависимости модуля упругости E от глубины вдавливания h

Однако для кривых 5–7 наблюдается уменьшение динамического модуля с увеличением величины деформации. Данный факт говорит о том, что для данных резин модуль упругости зависит не только от скорости деформирования (рис. 1), но и от величины самой деформации.

На поведение резин при деформации влияют тип каучука, качественный и количественный состав ингредиентов, наличие физических и химических связей в структуре, а также ряд других факторов. Несомненно, одно из наиболее значительных влияний на свойства резин оказывают наполнители. Существует ряд работ зарубежных ученых, в которых исследуется влияние активных наполнителей на механические свойства резин при динамическом нагружении при маленьких амплитудах. В работах показано, что в наполненной резине динамический модуль сдвига уменьшается при воздействии динамической нагрузки с растущей амплитудой, в то время как в ненаполненной резине он не изменяется. Наибольший эффект при этом наблюдается в области деформаций от 0,1 до 10%. Данный эффект принято называть «эффектом Пейна» [3]. Через вариацию таких параметров, как температура, количество наполнителя, его марка, частота механического воздействия и т. д., разработано несколько теорий, объясняющих данный эффект. Одна из теорий – теория Пейна, объясняет эффект крушением трехмерной структуры частицы наполнителя. Другая теория – теория пе-

ременной плотности, видит причину эффекта Пейна не в изменениях структуры фазы наполнителя, а во взаимодействии между наполнителем и полимерной матрицей.

Поскольку модуль сдвига и модуль упругости связаны между собой, а поведение динамического модуля упругости (рис. 3) исследовалось в области деформаций, в которой имеет место эффект влияния наполнителя на модуль сдвига, то можно с уверенностью говорить о единой природе наблюдаемых процессов.

Также известен эффект «размягчения» резин, называемый «эффектом Патрикеева – Маллинса» [4]. Суть данного явления связана со снижением интенсивности увеличения модуля упругости резин при увеличении деформации. Данный эффект наблюдается в области значительных деформаций, которые имеют место при испытании на прочность при растяжении (рис. 2). Для более подробного рассмотрения на рис. 4 показан общий вид кривых растяжения резин различных марок.

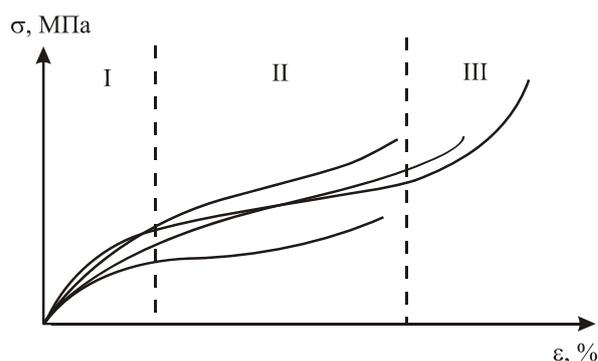


Рис. 4. Кривые деформирования резин различных марок при $v = \text{const}$ и $T = \text{const}$

В начальный момент деформирования (участок I) происходит значительное увеличение напряжения при растяжении. Далее виден перегиб, после которого напряжение увеличивается незначительно в процессе деформирования (участок II), затем наблюдается резкое возрастание напряжения и разрыв.

Как следует из литературных источников, в начальный период времени общее сопротивление системы определяется общим числом связей (химических и физических), поэтому сопротивление резко возрастает, а деформация носит преимущественно упругий характер (участок I). По мере дальнейшего деформирования узлы флуктуационной сетки распадаются (поскольку напряжение не соизмеримо с энергией физических связей), при этом макромолекулы легко изменяют конформацию, ориентируясь в направлении действия силы, а напряжение изменяется незначительно (участок II). Но ориентация, в свою очередь, приводит к

росту числа узлов, образующихся между ориентированными макромолекулами и, следовательно, к росту напряжения, темп которого зависит от плотности физических сшивок, образующихся в условиях ориентации (участок III), что якобы подтверждается тем фактом, что наиболее резкое увеличения напряжения наблюдается у резин на основе кристаллизующихся каучуков.

Как следует из данного рассуждения, степень перестройки структуры за время деформирования определяется скоростью релаксации и условиями деформирования. Чем меньше время релаксации, которое снижается с ростом гибкости и температуры [5], тем большая часть макромолекул примет равновесные конформации и больше разрушится флуктуационных связей за время деформирования, т. е. напряжение уменьшится.

Заключение. В работе рассмотрено влияния скорости и величины деформации на свойства эластомеров путем использования результатов статического метода испытаний резин на растяжение и метода динамического вдавливания. Проведенные исследования показали наличие достаточно сложного механизма изменения модуля упругости, включающего влияние как вязких свойств испытуемых резин, так и структурных изменений в резинах при деформации. На взгляд авторов, проявление эффектов Пейна

и Патрикеева – Маллинса имеет место при испытании резин по большинству методов. Однако наиболее сложной задачей является вычленение данных эффектов из всего многообразия протекаемых при деформировании процессов, а также определение степени влияния каждого из них. Более достоверное описание механизма изменения упругих свойств резин может быть сделано после проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Литература

1. Hunter, S. C. The Hertz problem for a rigid spherical indenter and viscoelastic half-space / S. C. Hunter // J. Mech. Phys. Solids. – 1960. – No. 8. – P. 219–234.
2. Рудницкий, В. А. Испытание эластомерных материалов методами индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 227 с.
3. Payne, A. R. A note on the existence of a yield point in the dynamical modulus of loaded vulcanizates / A. R. Payne // J. Appl. Polym. Sci. – 1959. – Vol. 3. – P. 127.
4. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – М.: Химия, 1968. – 536 с.
5. Тугов, И. И. Химия и физика полимеров / И. И. Тугов, Г. И. Кострыкина – М.: Химия, 1989. – 432 с.

Поступила 25.02.2011