

Г. М. БАРТЕНЕВ

О ЗАКОНАХ ОДНОМЕРНОГО СЖАТИЯ И РАСТЯЖЕНИЯ РЕЗИНЫ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 5 IV 1952)

1. Одномерная (одноосная) деформация сжатия — основной вид деформации резины в эксплуатации. Растяжение значительно реже встречается в эксплуатации, но зато часто применяется при испытаниях резины и исследованиях ее механических свойств.

В наших работах (1) был получен и проверен экспериментально (при растяжении) следующий закон для одномерной равновесной деформации ненаполненной резины:

$$\sigma = E_{\infty}(\lambda - 1) = E_{\infty}\varepsilon, \quad (1)$$

где σ — истинное напряжение; E_{∞} — равновесный высокоэластический модуль; λ — деформация, равная относительной длине (L/L_0); ε — деформация, равная относительному удлинению. Уточненный расчет показывает, что закон (1) охватывает как растяжение, так и сжатие с единым модулем E_{∞} , пропорциональным абсолютной температуре. Формула (1) теоретически приложима для малых и средних растяжений (до предела пропорциональности) и для всех сжатий. Она получена для высокоэластического состояния резины, когда чисто упругой составляющей деформации (связанной с изменением средних расстояний между частицами) можно пренебречь. При низких температурах, в застеклованном состоянии высокоэластическая составляющая деформации исчезает, и вместо (1) мы имеем закон Гука с модулем упругости E_0 большим, чем E_{∞} , на 3 порядка.

В настоящей работе мы не ставим целью детальное рассмотрение особенностей одномерной деформации резины при всех температурах и режимах деформации. Ниже рассматривается только высокоэластическое состояние резины при равновесном, статическом и частично динамическом режимах деформации.

Значение теоретического закона (1), полученного для простой системы (ненаполненная резина) и равновесного режима деформации, заключается в том, что аналогичный закон пропорциональности практически наблюдается и для более сложных систем и для других режимов деформации. При этом замечательно, что предел пропорциональности в большинстве случаев лежит дальше, чем деформации, применяемые в эксплуатации. Из сказанного следует, что для резины имеет место вообще

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2)$$

где высокоэластический модуль E является характеристикой материала и режима деформации*. Экспериментальное обоснование этих положений дается ниже.

* Тогда как E_{∞} является константой материала.

2. Определения и обозначения. Резина более сложный материал, чем обычные твердые тела. Она отличается от простых тел не только двойственной природой упругих свойств, но и сильно выраженным релаксационным характером деформации. Неравновесная часть напряжения составляет заметную величину по отношению к равновесному напряжению. Рассмотрим кривую релаксации напряжения (см. рис. 1). Напряжение падает с выходом на слабо линейную зависимость, наличие которой объясняется деструктурирующим действием окислительных процессов. С выходом на линейный участок релаксация цепей каучука. В отсутствие химических процессов линейный участок кривой был бы расположен параллельно оси абсцисс (DD') и его ордината (точка D) отвечала бы равновесному напряжению. На самом деле точка D соответствует условно-

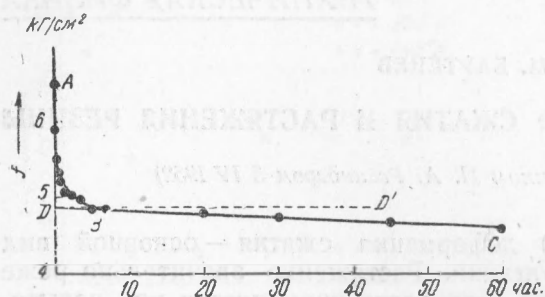


Рис. 1. Кривая релаксации напряжения ненаполненной резины при 30% сжатия. f — условное напряжение, рассчитанное на начальное сечение

равновесному напряжению и условно-равновесному модулю E_{∞} . Условно-равновесное напряжение определяется той же формулой (1).

Под статической деформацией условимся понимать деформацию, постоянную во времени. Статической деформации резины соответствует непрерывный ряд напряжений, изменяющийся со временем (кривая релаксации). В отсутствие химических процессов равновесное состояние является предельным случаем статической деформации.

3. Статическая деформация. Нами установлено, что статическая и, в частности, условно-равновесная деформация растяжения резины подчиняется формулам (1) или (2). Предел пропорциональности для мягких резин составляет 200—300% растяжения, а для наполненных снижается до 50%. Ниже приводятся результаты, полученные, главным образом, для деформации сжатия. Исследования проводились на резинах из бутадиенстирольного каучука. Образцы имели цилиндрическую форму. При несмазанных торцах сжатый образец принимал бочкообразную форму. При смазанных торцах „бочка“ устранялась, и до 50% сжатия наблюдалось практически чистое сжатие. Все результаты приводятся для чистого сжатия.

На рис. 2 показаны кривые равновесной и статической деформации резин. Из опытов следует: 1) статическая деформация сжатия и растяжения подчиняется закону (2); 2) зависимость между напряжением f , рассчитанным на начальное сечение, и деформацией имеет нелинейный характер*; 3) высокоэластический модуль кратковременной статиче-

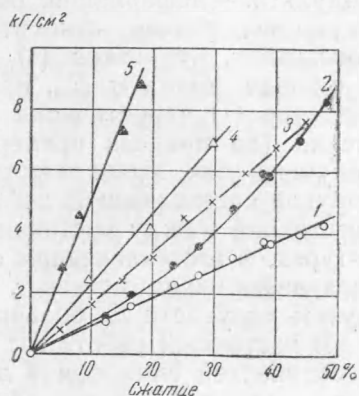


Рис. 2. Зависимость между сжатием и напряжением: 1 — истинным; 2 — условным для равновесной деформации ненаполненной резины; 3 — истинным для статической 5-минутной деформации ненаполненной резины; 4 и 5 — истинным для 24-часовой статической деформации резин, наполненных мелом (32 объемн. %/о) и сажей (22 объемн. %/о)

* Для резины с технической точностью $\sigma = \lambda f$.

ской деформации значительно отличается от модуля длительной статической деформации.

Как видно из рис. 1, условно-равновесный модуль ненаполненной резины численно равен одному из статических модулей. Длительный статический модуль соответствует состояниям, для которых имеет место дополнительная релаксация цепей вследствие химических процессов. Период релаксации цепей гораздо меньше, чем время „химической“ релаксации. Поэтому длительная статическая деформация подчиняется закону (1) тем лучше, чем медленнее протекают химические процессы.

Формула (1) показывает, что равновесное сжатие и растяжение резины характеризуется одной материальной константой E_{∞} . Практическое значение этого факта заключается в том, что модуль резины, работающей на сжатие, можно определять более удобным способом — испытанием на растяжение. Между тем, Трелор (2), пользуясь данными по двумерному растяжению, показал, что между модулями при одноосном растяжении и сжатии имеется значительное расхождение. Как показал Трелор, для материала, подчиняющегося закону деформации Уолла, существует во всей области сжатия следующая связь между сжимающим напряжением f и двумерным натяжением t :

$$f = -t/\lambda^2, \quad (3)$$

где λ — относительная толщина двумерно деформированной пластинки резины. В связи с тем, что резина подчиняется закону (1), а не закону Уолла, это соотношение справедливо только для небольших сжатий.

Результаты наших опытов (совместно с Н. М. Новиковой) приведены на рис. 3.

Кривая равновесной деформации ненаполненной резины и кривая длительной статической деформации наполненной резины без излома переходят от сжатия к растяжению. Аналогичный результат получен для 10-минутной деформации.

Из приведенных данных следует: 1) формула (2) описывает полностью одноосную статическую деформацию резины; 2) статические и равновесные модули резины при сжатии и растяжении совпадают; 3) соотношение (3) дает хорошее приближение при сжатиях менее 30%.

4. Динамическая деформация. Динамическая деформация подразделяется на периодическую и непериодическую. Примером последней служит деформация резины с заданной скоростью растяжения (см. рис. 4). С увеличением скорости растяжения пропорциональность между напряжением и деформацией сохраняется, но модуль растет. Увеличение динамического модуля объясняется тем, что с увеличением скорости деформации возрастает внутреннее трение.

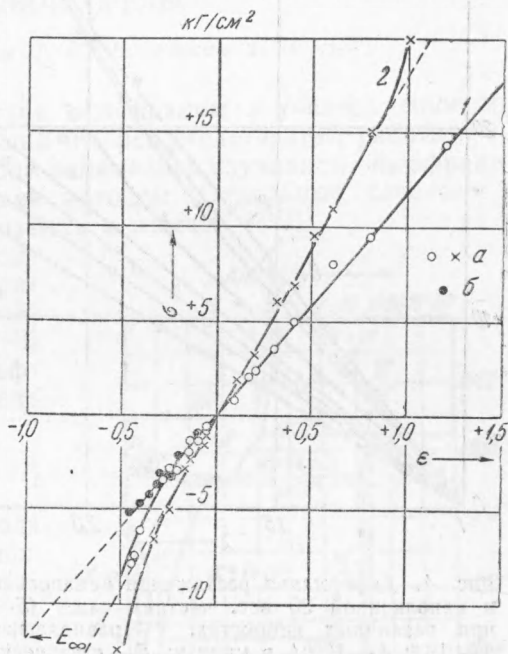


Рис. 3. Одномерная деформация: 1 — равновесная для ненаполненной резины, 2 — длительная статическая для наполненной резины (30 вес. частей сажи); температура 70°. *a* — данные в области сжатия рассчитаны из двумерного растяжения, *б* — из опытов по одномерному сжатию

Периодическая деформация представляет собой более сложное явление, поскольку скорость деформации периодически меняется. Это означает, что периодическая деформация не может характеризоваться определенным значением высокоэластического модуля E . Поэтому динамический модуль резины определяют чисто условно либо как отношение амплитуды напряжения к амплитуде деформации (^{3,4}) либо иным способом. Так как средняя скорость деформации изменяется

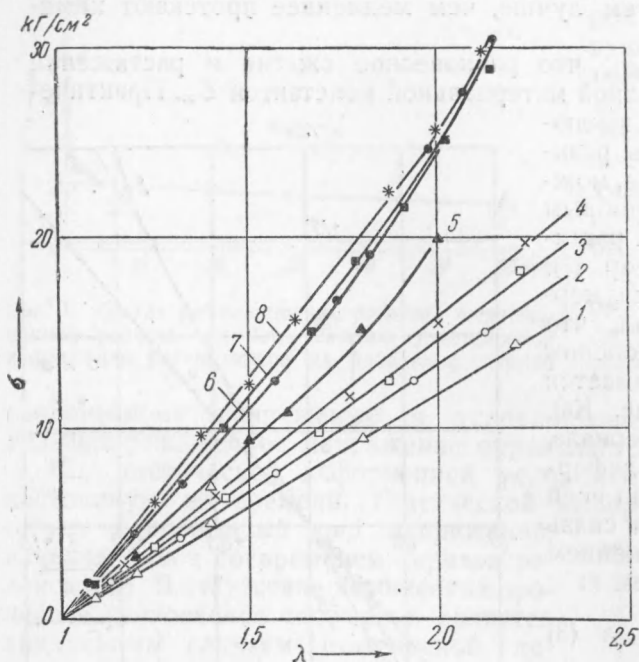


Рис. 4. Деформация растяжения неуплотненной (1—4) и уплотненной 30 вес. частями сажи (5—8) резины при различных скоростях. 1 — равновесная; 2 — 1,7; 3 — 12,6; 4 — 120% в минуту; 5 — статическая; 6 — 2,3; 7 — 16,3; 8 — 128% в минуту

с изменением частоты и амплитуды колебания, то динамический модуль должен зависеть от частоты и амплитуды деформации. Однако чем меньше амплитуда колебаний, тем слабее должна быть зависимость модуля от частоты. Этим объясняется, повидимому, тот факт, что от 15 до 100 гц частотная зависимость не обнаружена (⁵). Явление еще более усложняется, если периодической деформации подвергается статически сжатая резина. Как было показано (⁴), динамический модуль, в отличие от статического, зависит от степени сжатия образца, но незначительно. Динамическая деформация резины должна подвергнуться более детальному анализу.

5. Таким образом, формула (2), как закон деформации резины, имеет широкое применение. Модуль высокоэластической деформации возрастает с увеличением наполнения, с увеличением скорости деформации и с уменьшением времени нагружения. Модуль E является исходной константой для конструкторско-технологических расчетов. В сложных случаях деформации, для расчета модуля упругости изделия, практика использует поправочный коэффициент, зависящий от формы изделия и условий на поверхности. Для технических расчетов можно определять модуль сдвига по формуле $G = \frac{1}{3} E$.

Научно-исследовательский институт
резиновой промышленности

Поступило
20 III 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. М. Барте́нев, ЖТФ, 20, 461 (1950); Колл. журн., 11, 57 (1949). ² Л. Р. Тре́лор, УФН, 28, 279 (1946). ³ Н. Михайлов и С. Поляк, Каучук и резина, № 4—5, 27 (1939). ⁴ Г. М. Барте́нев, Зав. лаб., № 11, 1334 (1949). ⁵ R. B. Staught, Ind. Eng. Chem., 34, 1358 (1942); L. R. G. Treloar, Physics of Rubber Elasticity, Oxford, 1949.