

Г. М. БАРТЕНЕВ и В. И. НОВИКОВ

О МОДУЛЯХ РЕЗИНЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 18 VI 1953)

1. Изучение статических деформаций резины имеет практическое значение для расчетов разнообразных уплотнительных и амортизационных прокладок, широко применяемых в технике. Ниже под статическими деформациями (в узком смысле) понимаются деформации, поддерживаемые в процессе эксплуатации постоянными. Статическая деформация резины является простейшим случаем неравновесного деформированного состояния резины, а равновесная — лишь частным случаем статической деформации, когда время $t \rightarrow \infty$. Статической деформации резины не соответствует какое-либо одно значение напряжения. Вследствие процесса релаксации напряжение с течением времени уменьшается, асимптотически приближаясь к равновесному.

2. В механике упругих тел термины статическая и равновесная деформация обычно означают одно и то же. Эти понятия часто приобретают неопределенное значение в связи с двойным смыслом слова «деформация», так как деформация может пониматься и как величина и как процесс. Если деформация понимается как процесс (растяжение, сжатие и др.), то равновесная и статическая деформации означают одно и то же, хотя в строгом смысле слова термин «статика» не применим к процессу. Если деформация понимается как величина, то термины равновесная и статическая деформация приобретают иной смысл и не означают одно и то же.

Причина того, что это обстоятельство до сих пор не подчеркивалось в механике, кроется в слабо выраженном релаксационном характере деформации в твердых упругих телах. В этих телах ниже предела упругости деформация устанавливается после приложения нагрузки практически мгновенно, и статическая деформация соответствует одному (равновесному) значению напряжения. У резины релаксационные процессы выражены очень сильно, а равновесие достигается не сразу. Поэтому для резины целесообразно разделить термины статическая и равновесная деформация, а под деформацией при определении этих понятий понимать величину, а не процесс.

3. Если изобразить графически для чистого сжатия зависимость между статическими деформациями и соответствующими истинными напряжениями, отнесенными к одному и тому же времени наблюдения, то, как было показано (¹), эта зависимость следует закону $\sigma = E\epsilon$, где E — статический модуль резины, стремящийся при $t \rightarrow \infty$ к равновесному модулю E_∞ . Кривая статических деформаций, выражающая эту зависимость между напряжением и деформацией, является изохроной, поскольку все точки кривой относятся к одному времени наблюдения. Изохрона не является кривой, отражающей процесс деформации, поскольку все

точки на этой кривой изображают одновременное напряженное состояние резины при различных по величине деформациях.

Эти результаты относятся к чистому сжатию. Однако детали из резины при наличии трения или прочного сцепления по опорным сжимающим поверхностям испытывают сложное сжатие. При таком сжатии боковая (свободная) поверхность образца или изделия образует «бочку». Его напряженное состояние, в отличие от чистого сжатия не может характеризоваться одним значением напряжения. Но для практического расчета осевой деформации образца можно ввести некоторое «расчетное напряжение», определяемое следующим образом. Пусть ε — деформация образца, равная относительно сжатию его; $\lambda (= L/L_0)$ —

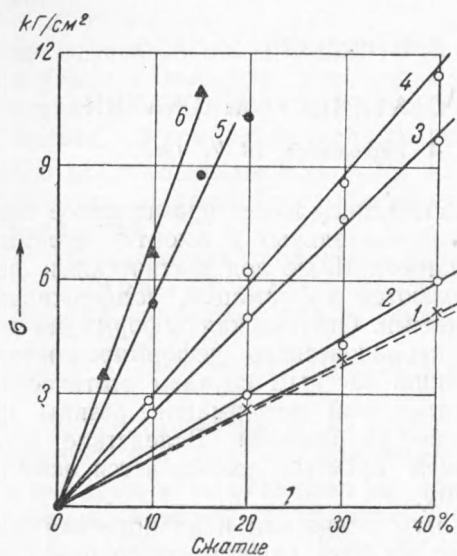


Рис. 1. Зависимость между напряжением и сжатием при статических деформациях образцов из ненаполненной (1—4) и наполненной (5—6) резины, со смазкой (1—2) и без смазки (3—6), с коэффициентами формы 0,20 (1) и 0,96 (2—6) и временем релаксации 10 мин. (4, 6) и 24 часа (1—3, 5) при 20°. Пунктирная линия — чистое статическое сжатие ненаполненной резины (24 часа)

Под коэффициентом формы Φ принято понимать отношение площадей поперечного сечения и боковой поверхности образца или изделия. Для цилиндрических образцов $\Phi = R_0/2L_0$, где R_0 — радиус, L_0 — высота образца.

Основной целью данной работы является: показать применимость понятия модуля к образцу или изделию при сложном сжатии, установить зависимость этого модуля от коэффициента формы в простейших случаях.

4. Исследовались ненаполненная и наполненная (50 в. ч. сажи) резины из каучука СКС-30 с твердостью по Шору, соответственно равной 45 и 70. Образцы цилиндрической формы имели диаметр 8 мм и высоту от 10 до 2 мм, что соответствовало изменению коэффициента формы от 0,2 до 1. Процесс сжатия образцов до заданного значения происходил в течение 3 сек., а первый отсчет силы, соответствующей данному сжатию, производился через 5 мин. Предварительный процесс сжатия образца можно считать «мгновенным», так как $t \gg 3$ сек.

На рис. 1 приведены зависимости между напряжением и сжатием для образцов обеих резин с $\Phi = 0,96$ для времен релаксации 10 мин. и

относительная высота деформированного образца; f — нагрузка, рассчитанная на начальное сечение (удельная нагрузка). Тогда расчетное напряжение σ может быть определено по формуле $\sigma = \lambda f$. Она вытекает из постоянства объема резины при деформации.

Термин «напряжение» в указанном смысле применяется в дальнейшем для характеристики деформированного состояния образца или изделия. Коэффициент пропорциональности между «напряжением» и деформацией образца назовем модулем сложного сжатия $E_{сж}$ (или модулем образца), в отличие от модуля чистого сжатия E (или модуля резины). Предыдущие исследователи не пользовались понятием о модуле в указанном выше смысле и поэтому не рассмотрели возможности его применения к изделиям.

Известно (2⁵), что при сухом трении скольжение резины по опорным поверхностям при сжатии практически отсутствует и что сопротивление сжатию зависит от коэффициента формы образца или изделия, возрастая с увеличением последнего.

24 часа. Как и при простом сжатии, здесь наблюдается пропорциональность между «напряжением» и деформацией. По мере уменьшения коэффициента формы прямая 3 изменяет наклон, приближаясь к пунктирной линии, являющейся изохроной чистого сжатия для 24-часовых статических деформаций. При этом статический модуль образца $E_{сж}$, определяемый из наклона прямых, уменьшается стремясь к статическому модулю резины E .

Из рис. 2 следует, что модуль образца линейно зависит от коэффициента формы как для 10-минутной, так и для 24-часовой статической деформации. Экстраполяция на ось координат $\Phi = 0$ дает значения $E = 14,6$ кг/см² и $E = 12,5$ кг/см². Для наполненной резины наблюдаются аналогичные зависимости, но при этом модули полученные экстраполяцией, больше примерно в 3 раза. Значения, полученные экстраполяцией в обоих случаях, были приняты нами в качестве модулей резины.

Из рис. 3 видно, что отношение модуля образца к модулю резины зависит только от коэффициента формы и не зависит, следовательно, ни от времени деформации*, ни от жесткости резины. Зависимость модуля образца от коэффициента формы имеет следующий вид

$$E_{сж} = E(1 + a\Phi), \quad (1)$$

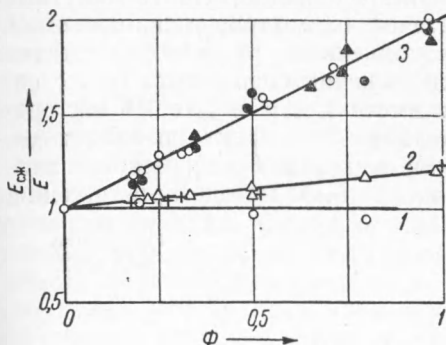


Рис. 3. Зависимость между отношением модуля образца к модулю резины и коэффициентом формы для: 1 — чистого сжатия, 2 — сжатия со смазкой, 3 — сжатия без смазки наполненной и наполненной резины для 10 мин. и 24 часа релаксации (данные совпадают)

резины (кривые 1 и 2 на рис. 1). Смазка (глицерин) не приводит к полному скольжению; зависимость модуля сжатия образца от коэффициента

* Это указывает на то, что характер релаксации в простом и сложном напряженном состоянии одинаков.

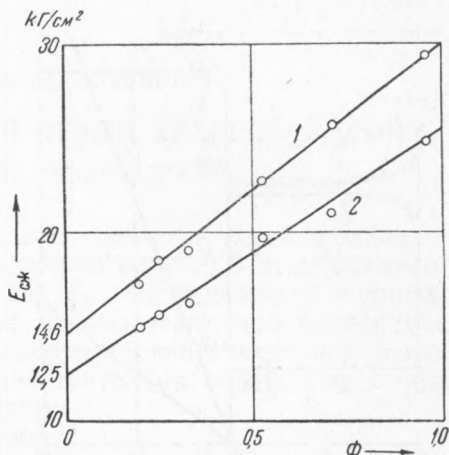


Рис. 2. Зависимость между статическим модулем сжатия образца и коэффициентом формы для 10-минутной (1) и 24-часовой (2) статической деформации ненаполненной резины при 20°

где для сжатия без смазки $a = 1$; E — модуль резины. Модуль $E_{сж}$ является характеристикой жесткости образца при данных условиях сжатия (отсутствие или наличие скольжения, время статической деформации и т. д.). Жесткость образца $E_{сж}$ складывается из жесткости материала E и жесткости формы $E_{сж} - E = Ea\Phi$.

5. Из формулы (1) следует, что с уменьшением коэффициента формы жесткость образца стремится к жесткости самого материала. Введение смазки приводит к такому же эффекту, при этом коэффициент a в формуле (1) уменьшается. Смазка облегчает скольжение резины по опорным поверхностям и создает условия, близкие к чистому сжатию резины

формы имеет также линейный характер, но с меньшим наклоном прямых, чем при испытаниях без смазки. Из рис. 3, 2 следует что в этом случае коэффициент a снижается до 0,2 (т. е. в 5 раз).

6. Искажение боковой поверхности при смазке заметно только вблизи контакта образца с сжимающими опорными поверхностями. Способ предварительного пережатия на 10% в течение 15 мин. устраняет этот эффект. На рис. 4 а приведены кривые релаксации для 30% сжатия двух образцов с $\Phi = 0,2$: одного — при прямом сжатии, другого — после пережатия на 10% в течение 15 мин. Пережатие обеспечивает для 24-часовой статической деформации ненаполненной резины практически однородное напряженное состояние. Полученные этим способом модули (см. рис. 3, 1) близки к значению модуля $E = 12,5$ кг/см², полученному экстраполяцией. Возвращаясь к релаксации при прямом сжатии и учитывая значение коэффициента $a = 0,2$, заметим, что, пользуясь формулой (1), можно найти поправку, необходимую для того, чтобы по напряжению, полученному в опытах со смазкой, определить напряжение, соответствующее однородному сжатию. Эта поправка для образцов $\Phi = 0,2$ составляет 4%.

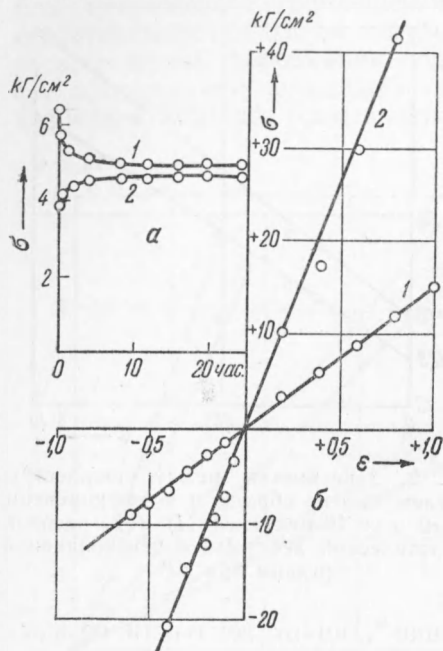


Рис. 4. а — кривые релаксации для 30% деформации сжатия образцов с коэффициентом формы 0,2: 1 — при прямом сжатии, 2 — после пережатия на 10%. б — зависимость между напряжением и деформацией при чистом растяжении (+) и чистом сжатии (—) для 10-минутных статических деформаций ненаполненной (1) и наполненной (2) резины

На рис. 4 б приведены данные для чистого сжатия и растяжения. Каждая точка на графике соответствует отдельному образцу резины. Из рис. 4 б видно, что 10-минутные статические модули ненаполненной и наполненной резины при сжатии и растяжении совпадают. То же самое имеет место и для 24 час. релаксации. Этот факт позволяет характеризовать резину единым статическим модулем E и измерение этого модуля производить более простым и более точным методом растяжения.

Этот факт позволяет характеризовать резину единым статическим модулем E и измерение этого модуля производить более простым и более точным методом растяжения.

характеризовать резину единым статическим модулем E и измерение этого модуля производить более простым и более точным методом растяжения.

Научно-исследовательский институт
резиновой промышленности

Поступило
7 V 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. М. Бартнев, ДАН, 84, 689 (1952). ² W. C. Keys, Mech. Eng., 59, 345 (1937). ³ E. G. Kimmich, India Rubber World, 103, № 3, 45 (1940). ⁴ S. D. Gehman, Rubb. Chem. Techn., 18, 99 (1945). ⁵ В. А. Лепетов, Тр. МИТХТ, в. 4 (1953).