

В. Е. ГУЛЬ

К ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

(Представлено академиком В. А. Каргиным 2 III 1954)

Зависимость прочности от скорости деформации или от длительности пребывания исследуемого материала в напряженном состоянии отмечалась неоднократно (¹⁻⁵). Как справедливо указывает С. Н. Журков (⁵), влияние временного фактора на прочность трудно совместить с представлением о разрыве, который наступает критическим образом.

В настоящее время различают две стадии разрыва: медленный рост трещины и затем быстрое ее прорастание через весь образец. Скорость роста трещины в первой стадии зависит от нагрузки, температуры и среды.

В предыдущем сообщении (⁶) был рассмотрен молекулярно-кинетический механизм разрушения высокополимеров под действием внешней силы. Зависимость прочности материала от скорости деформации и температуры была представлена в виде

$$\ln(P - P_x) = \ln P_0 v + \frac{U}{R} \frac{1}{T}, \quad (1)$$

где P — значение прочности; P_x — прочность связей главных химических валентностей, разрушающихся при разрыве образца; $P_0 = \frac{E}{l} \tau_0$; v — скорость деформации образца; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; E — модуль упругости; l — длина; τ_0 и U — постоянные.

Для тех материалов, для которых $P_x \ll P$, уравнение (1) упрощается:

$$\ln P = \ln P_0 v + \frac{U}{R} \frac{1}{T}. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) дают математическое описание картины, согласно которой деформирующая нагрузка распределяется на связи главных химических валентностей и на связи между частицами материала, осуществляемые за счет когезионных сил. Последние неустойчивы во времени и разрушаются с большей или меньшей частотой, зависящей от температуры и напряжения. Противодействуют деформирующей нагрузке в смысле увеличения прочности только те связи, которые не разрушаются за время деформации. Поэтому прочность материала зависит от скорости деформации.

В известных условиях решающую роль в определении прочности могут играть также силы химической природы, например при определении прочности вулканизата, если скорость деформации невелика. В таких случаях существенное влияние на прочность материала может оказывать протекание химических реакций.

Развитые выше представления о механизме разрыва резин, повидимому, следует применять к областям, в которых имеет место рост трещин. Рост трещин должен наблюдаться при любой нагрузке материала. Разрушение пространственной структуры химических связей при нагрузках меньше суммарной прочности связей протекает крайне медленно. Оно происходит под действием химических реакций, активируемых приложенной нагрузкой. Связи молекулярного взаимодействия разрушаются вследствие флуктуаций энергии теплового движения и перемещаются в направлении приложенной нагрузки. Это процесс чисто физический, и он протекает более или менее интенсивно в зависимости от величины нагрузки. Как бы ни была мала приложенная нагрузка, разрастание трещин должно иметь место, если часть нагрузки распределяется на связи молекулярного взаимодействия или химические связи неустойчивы во времени.

Наблюдавшаяся рядом исследователей (^{1,3,4}) зависимость времени сопротивления разрыву от напряжения, как известно, достаточно точно описывается эмпирической формулой Голланда и Тернера (¹):

$$\lg \tau = a - \gamma \lg P, \quad (3)$$

где τ — время сопротивления разрыву или так называемое разрывное время; a и γ — постоянные для данного материала и формы образцов величины; P — наблюдаемая прочность.

Для частного случая больших разрывных времен и малых нагрузок эта зависимость была выведена теоретически Г. М. Бартеневым (³). Наблюдаемая экспериментально зависимость вытекает также из развиваемых нами представлений, не требующих вышеупомянутых ограничений.

Для того чтобы это показать, необходимо в уравнении (2) выразить скорость как функцию времени разрыва. Вид этой зависимости будет определяться в первую очередь методом испытания и свойствами материала. Так например, если материал деформируется с постоянной скоростью до момента разрыва, то

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{\Delta l}{\tau} = \text{const.} \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получаем:

$$\ln P = \ln P'_0 \frac{\Delta l}{\tau} + \frac{U}{R} \frac{1}{T} \quad (5)$$

или

$$\ln \tau = \ln P'_0 \Delta l - \ln P + \frac{U}{R} \frac{1}{T}. \quad (6)$$

Аналогичная зависимость между $\ln \tau$ и $\ln P$ должна иметь место если материал растягивается с постоянной скоростью до некоторого значения деформирующей нагрузки, которая в дальнейшем сохраняется постоянной до момента разрыва образца. Такой способ испытания был применен Голландом и Тернером (¹) и Престоном (³). В этом случае зависимость скорости деформации от τ не может быть выражена формулой (6). Скорость деформации сначала в течение некоторого сравнительно небольшого промежутка времени сохраняла постоянное значение, а затем резко уменьшалась. В дальнейшем, в зависимости от природы испытываемого материала, скорость деформации будет определяться скоростью пластической деформации (например стекло) или скоростью достижения равновесного значения высокоэластической деформации (например резина). Возможны также и иные случаи.

Представляет интерес рассмотреть с точки зрения развиваемых нами представлений, какова должна быть зависимость между τ и P в случае осуществления испытания методами, принятыми в работах Голланда и Тернера, Престона и др.

В соответствии с описанными ими методами деформация в период нагружения резко возрастает, а затем продолжает развиваться очень медленно по сравнению с периодом нагружения. Таким образом скорость деформации, определяемая в период нагружения каким-то конечным значением, затем резко падает до сравнительно малого посто-

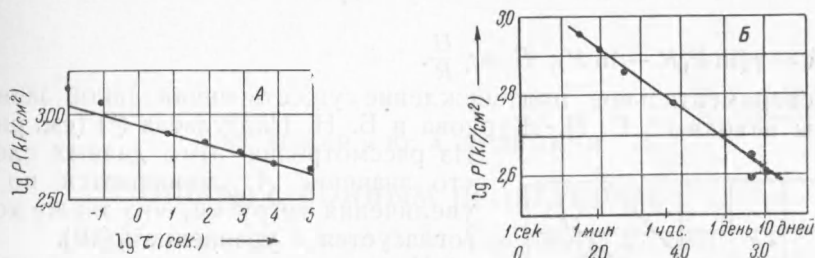


Рис. 1. Зависимость P от τ . А — по данным Престона ⁽³⁾ для разрыва стеклянных стержней; Б — по данным Голланда и Тернера ⁽¹⁾ для разрыва стеклянных пластинок

янного значения. Если определять среднеинтегральные значения скорости деформации за различные промежутки времени, то можно получить зависимость $v = f(\tau)$, которая имеет вид:

$$v = \frac{K}{\tau^n}, \quad (7)$$

где K и n — постоянные.

Подставляя (7) в (2), получаем:

$$\ln P = \ln P_0 K - n \ln \tau + \frac{U}{R} \frac{1}{T} \quad (8)$$

или

$$\ln \tau = a - \gamma \ln P, \quad (9)$$

где

$$a = \gamma \left(\ln P_0 K + \frac{U}{RT} \right), \quad \gamma = \frac{1}{n}.$$

На рис. 1 приведены температурные данные Престона и Голланда и Тернера, которые подтверждают справедливость зависимости (9).

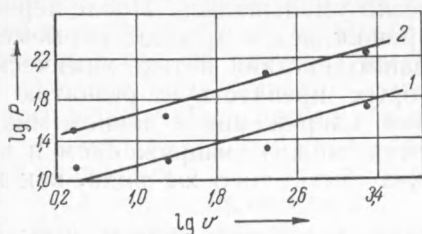


Рис. 2. Зависимость логарифма сопротивления разрыву от логарифма скорости растяжения по Догадкину и Сандомирскому ⁽²⁾. 1 — 20° ; 2 — 80°

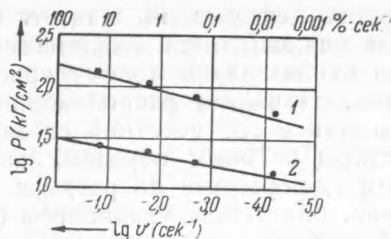


Рис. 3. Зависимость логарифма сопротивления разрыву от логарифма скорости растяжения по Бартеневу ⁽⁴⁾. 1 — истинная прочность; 2 — условная прочность

Как уже упоминалось выше, в случае деформации с постоянным значением скорости до момента разрыва имеет место соотношение (2). На рис. 2 и 3 приведены экспериментальные данные Б. А. Догадкина и Д. М. Сандомирского ⁽²⁾, впервые обнаруживших экспериментально существование этой зависимости, а также более поздние данные, опубликованные Бартеневым. Эти данные хорошо согласуются с зависимостью (2).

Представляет интерес рассмотрение зависимости времени разрыва τ от температуры испытания. Согласно формуле (8), должна существовать линейная зависимость между $\ln \tau$ и $1/T$, т. е. зависимость вида

$$\ln \tau = A + B \frac{1}{T}, \quad (10)$$

где $A = \gamma(\ln P_0 K - \ln P)$; $B = \gamma \frac{U}{R}$.

Экспериментальное подтверждение существования такой зависимости мы находим у С. Н. Журкова и Б. Н. Нарзулаева⁽⁵⁾ (см. рис. 4).

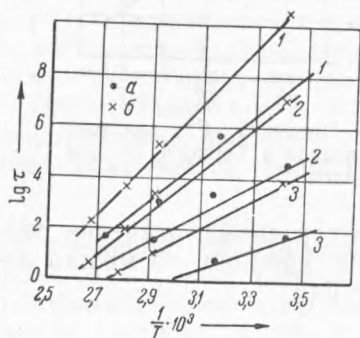


Рис. 4. Температурная зависимость долговечности при постоянном напряжении для полистирола (а) и целлулоида (б) по Журкову⁽⁵⁾. 1 — $\sigma = 2$ кг/мм²; 2 — $\sigma = 4$ кг/мм²; 3 — $\sigma = 6$ кг/мм²

Из рассмотрения этих данных следует, что значение A уменьшается по мере увеличения нагрузки, что также хорошо согласуется с уравнением (10).

Мы полагаем, что приведенные соотношения должны оставаться качественно справедливыми также в тех случаях, когда нагрузка действует не непрерывно, а прикладывается периодически с большей или меньшей частотой. Однако различные режимы деформации требуют различного выражения зависимости $v = f(\tau)$, что, повидимому, может привести к различным зависимостям τ от P .

Для иллюстрации применимости соотношения (2) к случаю разрушения материала под действием многократно повторяющихся деформаций рассмотрим многократное растяжение резины на

машине, обеспечивающей многократное воспроизведение напряжений. В этом случае будет иметь место синусоидальная зависимость нагрузки от времени испытания, а максимальное напряжение за цикл будет сохранять постоянное значение.

Если вместо изменяющейся в течение одного цикла скорости деформации принять ее среднеинтегральное значение, то в первом приближении можно считать, что сначала поддерживалась постоянная скорость деформации, а потом она резко уменьшалась. После первого цикла каждый цикл деформации сопровождается преодолением меньшего числа связей молекулярного взаимодействия и тех химических связей, случайное расположение которых препятствует развитию деформации в соответствии со значением напряжения в данном микроучастке⁽⁷⁾. Таким образом, зависимость между напряжением и временем деформации до разрыва должна быть того же вида, как и в случае, описанном уравнением (9).

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить признательность акад. В. А. Каргину за данные им полезные советы.

Московский институт
тонкой химической технологии
им. М. В. Ломоносова

Поступило
2 III 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. J. Holland, W. E. S. Turner, J. Soc. Glas Techn., **24**, 101, 46 (1940).
- ² Б. А. Догадкин, Д. М. Сандомирский, Колл. журн., **13**, 4 (1951).
- ³ Г. М. Бартенев, ДАН, **71**, 23 (1950). ⁴ Г. М. Бартенев, ДАН, **82**, № 1, 49 (1952). ⁵ С. Н. Журков, Б. Н. Нарзулаев, ЖТФ, **23**, 10 (1953).
- ⁶ В. Е. Гуль, ДАН, **85**, № 1 (1952). ⁷ В. Е. Гуль, Д. Л. Федюкин, Б. А. Догадкин, Колл. журн., **15**, 1, 11 (1953).