

С. Б. РАТНЕР, С. Т. БУТЛО

ВЛИЯНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ЧАСТОТНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫНОСЛИВОСТИ ПЛАСТМАСС

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 23 II 1971)

С позиций кинетической концепции разрушения суммирование повреждений приводит к правилу аддитивности времен, по которому должно соблюдаться равенство долговечностей в случае непрерывного и прерывного нагружения, если учитывать лишь время нахождения тела под нагрузкой (¹). В соответствии с этим повышение частоты должно приводить к пропорциональному росту выносливости, т. е. числа циклов нагрузки до разрушения N .

Однако при циклическом нагружении возможны существенные отклонения от правила аддитивности, выражающиеся в уменьшении циклической долговечности τ_c по сравнению со статической τ_s (^{2, 3}). Это уменьшение долговечности при циклических нагрузках объясняют влиянием разогрева (общего и локального), а также усилением роли неблагоприятных структурных изменений и локальных перенапряжений.

Заметим, что в связи со степенью отклонений от правила аддитивности времен, возможны четыре типа частотной зависимости выносливости (рис. 1). В крайнем случае (рис. 1а), когда правило аддитивности соблюдается, циклическая долговечность не зависит от частоты и совпадает со статической, а выносливость пропорциональна частоте, как это было показано на примере волокон и пленочных материалов при небольшой частоте и повышенной температуре (³).

Небольшие отклонения от правила аддитивности времен приводят к тому, что выносливость при повышении частоты растет не пропорционально ей, а слабее (рис. 1б). С усилением отклонений возможен случай (рис. 1в), при котором выносливость не зависит от частоты, а циклическая долговечность обратно пропорциональна частоте. Этот случай, экспериментально обнаруженный для пластмасс (⁵), иногда тоже считают крайним, причем делаются попытки (⁶) найти зависимость выносливости от циклическости нагружения, вследствие чего время действия нагрузки будто бы несущественно.

Рис. 1. Связь разрушающего напряжения (σ) с долговечностью (τ) и выносливостью (N) при вариации частоты. Сплошные линии — ω_1 , штриховые ω_2 ; $\omega_1 > \omega_2$

Этот случай интересен для практики, ибо появляется возможность формирования испытаний на выносливость, однако при повышении частоты усиление отклонений может не только скомпенсировать положительное влияние уменьшения времени нагрузки в каждом цикле, но и привести к снижению выносливости с ростом частоты (рис. 1г).

Этот случай интересен для практики, ибо появляется возможность формирования испытаний на выносливость, однако при повышении частоты усиление отклонений может не только скомпенсировать положительное влияние уменьшения времени нагрузки в каждом цикле, но и привести к снижению выносливости с ростом частоты (рис. 1г).

Поэтому мы считаем, что принципиально различно лишь соблюдение правила аддитивности (рис. 1а) и отклонение от этого правила (1б, в, г).

Поскольку указанные выше факторы, обуславливающие отклонения от правила аддитивности времен, имеют релаксационную природу, ясно, что степень их влияния должна зависеть от любых факторов, определяющих темп релаксационных процессов: условий испытания (температуры, напряжения и др.) и структурных факторов (пластификации, ориентации и др.).

Правило аддитивности времен должно соблюдаться, если релаксационные процессы не играют роли, т. е. протекают слишком быстро или слишком медленно. Существенные отклонения от этого правила (в том числе и случай в) возможны, если время релаксации будет сопоставимо с периодом цикла. Напротив, представления об особой роли числа циклов допускают лишь случай в. При этом независимость выносливости от частоты должна была бы наблюдаться даже при широкой вариации факторов, определяющих темп релаксационных процессов.

Для решения вопроса о действительной роли времени и числа циклов нагружения была экспериментально изучена частотная зависимость выносливости ряда пластмасс при вариации условий испытания и структурных факторов, оказывающих значительное влияние на темп релаксации.

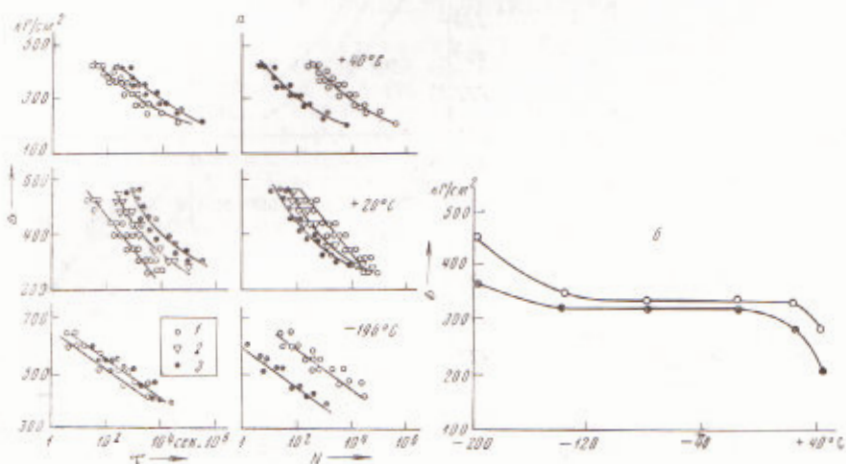


Рис. 2. Роль температуры при усталостном разрушении полистирола. а — зависимость долговечности и выносливости от частоты при различных температурах; б — зависимость разрушающего напряжения от температуры при $N = 10^4$ циклов. 1 — 450; 2 — 22; 3 — 1,5 cm^2/min

Роль температуры видна из данных, представленных на рис. 2а. В условиях опытов средний разогрев не превышал 2° . Видно, что при 20°C выносливость слабо зависит от частоты, т. е. отклонения от правила аддитивности времен значительны. Однако уже повышение до 40° привело почти к соблюдению этого правила вследствие ускорения релаксационных процессов. К аналогичному эффекту приводит и сильное понижение температуры, подавляющее релаксацию.

Кроме этих результатов, представления о роли релаксационных осложняющих факторов подтверждает также факт атермичности усталостной прочности (⁷), обусловленный, по-видимому, тем, что при изменении температуры, как и при вариации частоты, конкурируют прочностной и релаксационный факторы — прочность при повышении температуры падает, а выравнивание перенапряжений улучшается. В итоге усталостная прочность мало меняется, что и создает видимость ее атермичности. Это явление наблюдалось примерно в том же температурном интервале, в котором выносливость почти не зависит от частоты (рис. 2б). В этом проявляется извест-

пый принцип температурно-временной эквивалентности. Этот принцип проявляется и в некотором смещении области атермичности при уменьшении частоты в сторону пониженных температур.

Роль асимметрии цикла. От асимметрии цикла должны существенно зависеть условия протекания процессов выравнивания локальных перенапряжений. При пульсирующем растяжении (коэффициент асимметрии $r = 0$) эти условия должны быть благоприятнее, чем при симметричном цикле растяжения — сжатия ($r = -1$). Это обусловлено тем, что при $r = -1$ возможно усиление как локальных разогревов —

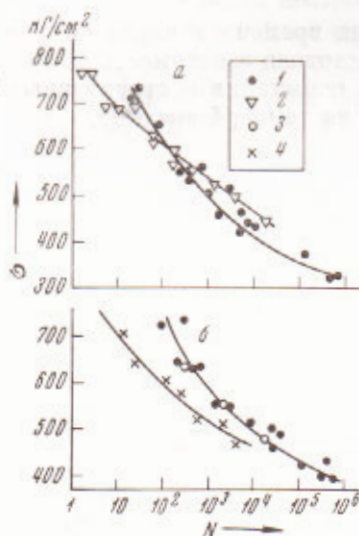


Рис. 3. Роль асимметрии цикла при усталостном разрушении оргстекла ($T = 30^\circ$) при $r = -1$ (а) и $r = 0$ (б). 1 — 690, 2 — 12 ц/мин (данные (6)); 3 — 450; 4 — 1,5 ц/мин (наши данные)

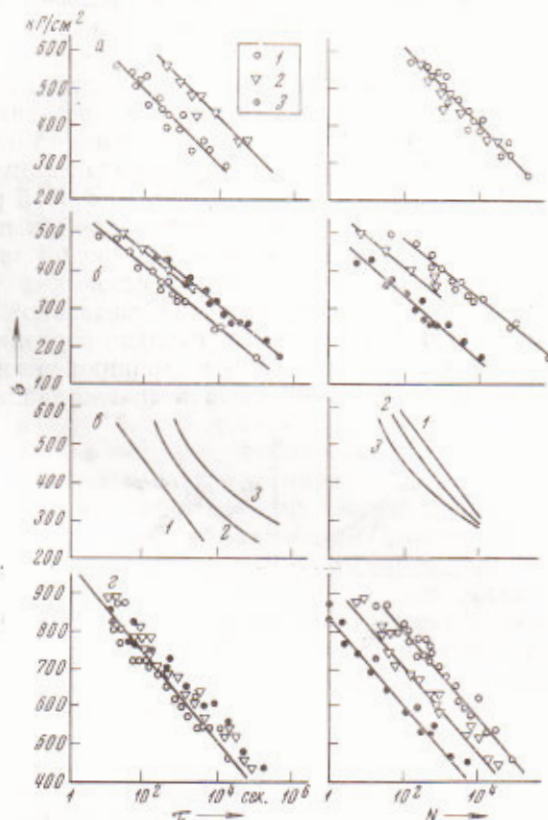


Рис. 4. Роль пластификации (а, б) и ориентации (в, г) при усталостном разрушении: а — непластифицированное и б — пластифицированное оргстекло (ПММА + 20% ДБФ); в — неориентированный (по данным рис. 2а $T = 20^\circ \text{C}$) и г — ориентированный полистирол. 1 — 450; 2 — 22; 3 — 1,5 ц/мин

из-за дополнительного тепловыделения при сжатии, так и перенапряжений — из-за дезориентации не только при разгрузке (8), но и в течение полупериода сжатия. Оба фактора могут привести к увеличению отклонений от правила аддитивности при $r = -1$. Это подтверждает сравнение наших данных для ПММА, полученных при $r = 0$ с результатами работы (6), полученными для того же материала при $r = -1$ (рис. 3). Видно, что при $r = 0$ выносливость значительно повышается с ростом частоты, а при $r = -1$ в области пониженных напряжений даже падает (случай г, рис. 1).

Таким образом, характер частотной зависимости выносливости зависит от условий испытания, определяющих темп релаксации.

Пластификация, как известно, действует аналогично повышению температуры, ускоряя релаксационные процессы. Поэтому, если повышение температуры приводит к усилению аддитивности времен, то к тому же может привести и его пластификация. Это подтвердили опыты с ПММА (рис. 4 а, б).

Ориентация повышает межмолекулярное взаимодействие и благодаря этому затрудняет релаксацию, т. е. (противоположно пластификации)

влияет аналогично понижению температуры. Однако ориентационная вытяжка приводит и к существенному «залечиванию» имеющихся дефектов и к стабилизации структуры. При достаточно больших степенях вытяжки влияние этих факторов должно преобладать. Это подтверждают данные, полученные для материалов с высокой степенью ориентации (полимерных волокон и пленок), свидетельствующие об усилении аддитивности времен в результате предварительной вытяжки (¹). Аналогичный эффект мы наблюдали при вариации частоты для массивных образцов, предварительно подвергнутых ориентационной вытяжке на 15% (рис. 4 в, г).

В совокупности полученные результаты показывают, что характер частотной зависимости существенно зависит от условий нагружения и структурных факторов, определяющих темп релаксации, что противоречит представлениям об особой роли числа циклов нагружения. Напротив, они свидетельствуют о преобладающей роли релаксационных осложняющих факторов, приводящей к отклонениям от правила аддитивности времен. Соблюдение этого правила возможно лишь, если релаксационные процессы не играют роли, т. е. протекают слишком быстро или слишком медленно.

Научно-исследовательский институт
пластических масс

Поступило
1 X 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. Н. Журков, Э. Е. Томашевский, В сборн. Некоторые проблемы прочности твердого тела, Изд. АН СССР, 1959, стр. 68. ² Г. М. Бартецев, Б. И. Папшин и др., Изв. АН СССР, ОТН, № 6, 176 (1960). ³ В. Р. Регель, А. М. Лексовский, ФТТ, 4, 949 (1961). ⁴ В. Р. Регель, А. М. Лексовский, Механика полимеров, № 1 (1969). ⁵ С. Б. Ратнер, С. Г. Агамалян, Пластич. массы, № 12 (1967). ⁶ И. Н. Иванова, Кандидатская диссертация, Л., 1968. ⁷ С. Г. Агамалян, С. Б. Ратнер, С. Т. Бугло, Сборн. Инженерная механика полимеров и применение пластмасс в промышленности, Тбилиси, 1969, стр. 107. ⁸ И. В. Разумовская, Ю. Г. Корабельников и др., Механика полимеров, № 4 (1969).