

УДК 620.178.3:621:678.6

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С. Б. РАТНЕР, С. Г. АГАМАЛЯН, С. Т. БУГЛО, А. В. СТИНСКАС

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ УСТАЛОСТНОЙ КРИВОЙ ДЛЯ ПЛАСТМАСС

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 26 X 1971)

Согласно кинетической концепции разрушения твердых тел (<sup>1, 2</sup>) долговечность  $\tau$  падает с нагрузкой  $\sigma$  по закону

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{u_0 - \gamma \sigma}{RT}. \quad (1)$$

При циклическом нагружении долговечность материала характеризуют его выносливостью  $N$ , т. е. числом циклов деформации до разрушения образца при заданной амплитуде напряжения  $\sigma_0$ . В соответствии с принципом суммирования нарушений, усталостная выносливость эквивалентна статической долговечности, причем  $N = \omega \tau$ , где  $\omega$  — частота нагружения. Поэтому зависимость  $\sigma_0 - \lg N$  должна быть линейной.

Однако обычно зависимость  $\sigma_0(\lg N)$  для пластмасс нелинейна. Это может быть обусловлено неодинаковым гистерезисным разогревом материала на разных уровнях циклической нагрузки (<sup>3</sup>). Более того, различна качественная зависимость разогрева от напряжения. Поэтому сложный вид имеет и связь долговечности (выносливости) от напряжения, выраженная так называемой усталостной кривой Велера. Рассмотрим форму этой кривой, выделив на ней участки, отвечающие тому или иному закону разогрева.

Теоретически и экспериментально было показано (<sup>4</sup>), что возможны три основных вида кинетики гистерезисного разогрева пластмасс, схематически изображенные на рис. 1б. При больших и малых нагрузках разогрев материала сравнительно невелик (кривые I и III). А именно, при малых нагрузках разогрев стабилизируется (кривая III) \*, причем величина равновесного разогрева  $\Delta T$  зависит от приложенного напряжения как (<sup>6</sup>)

$$\Delta T \sim \sigma_0^{2\alpha}, \quad (2)$$

$\alpha$  — константа материала,  $\alpha > 1$ .

Учитывая, что температура образца  $T = T_0 + \Delta T$  ( $T_0$  — его первоначальная температура, равная температуре окружающей среды) и подставляя (2) в (1), можно ожидать, что в условиях стационарного разогрева истинная зависимость  $\sigma_0(\lg N)$  будет отклоняться от изотермической прямой \*\*, соответствующей формуле (1), причем это отклонение будет тем больше, чем выше напряжение (рис. 1а, зона III).

\* Известны и другие разновидности кинетики разогрева. Для полимерных материалов разного типа обнаружен слабый непрерывный рост температуры разогрева (<sup>7-10</sup>), причем называют различные причины этого явления: изменение диссипативных свойств материалов в процессе циклического нагружения («деградация») (<sup>9, 11</sup>), протекание химических реакций (<sup>8</sup>), уменьшение живого сечения образца, т. е. падение модуля (<sup>10</sup>) и др. Наблюдались и противоположные случаи: уменьшение разогрева вследствие процессов упорядочения структуры материала и повышения его модуля (<sup>12, 13</sup>). Естественно, что возможна комбинация этих эффектов и их взаимная компенсация. Поэтому обычно наблюдаются случаи, когда повышение температуры разогрева со временем пренебрежимо мало, как это имеет место для чистых пластмасс (<sup>3, 4</sup>), рассматриваемых в данной работе, а также для резин при воздействии на них звуковых частот (<sup>14</sup>).

\*\* В действительности, выносливость определяется локальными температурами, которые неизвестны. Однако для качественной оценки отклонения от изотермы можно использовать формулу (2). Вместе с тем, даже в условиях полной изотермичности совпадение динамической и статической долговечностей бывает лишь в особых случаях (<sup>2</sup>).

При больших нагрузках разогрев также невелик, так как он не успевает возрасти до значительной величины, прежде чем образец разрушится за несколько циклов нагружения. С понижением нагрузки выносливость образца, т. е. число циклов нагружения, возрастает, а, следовательно, разогрев становится более существенным. Должно обнаруживаться отклонение  $\sigma_0(\lg N)$  от изотермы тем больше, чем больше разогрев, т. е. количество циклов деформации (рис. 1а, зона I).

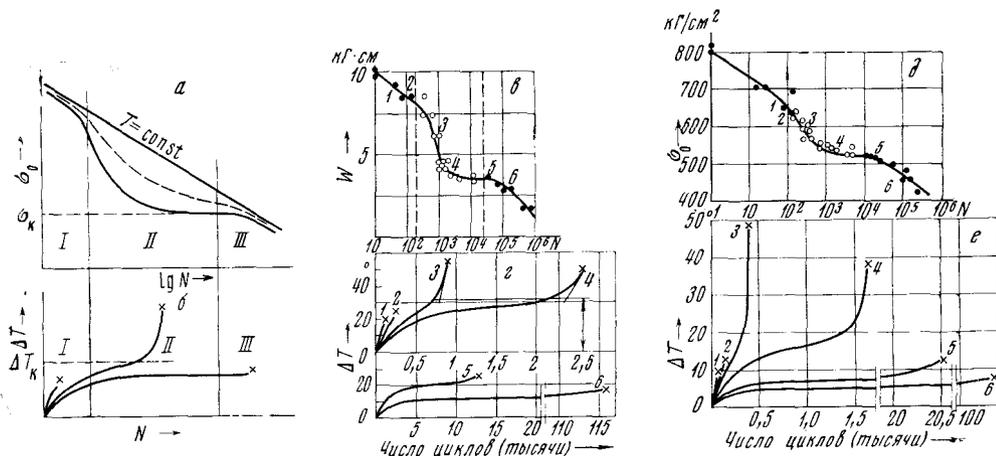


Рис. 1. Кривые разогрева (б, г, е) и соответствующие участки усталостной кривой (а, в, д). а, б — схема; в — е — опытные данные для полиформальдегида при пульсирующем растяжении ( $\omega = 7,5$  гц;  $T_0 = 20^\circ \text{C}$ ) в режиме  $W = \text{const}$  (в, г) и  $\sigma_0 = \text{const}$  (д, е). Светлые точки — тепловое; темные — механическое разрушение. Цифры 1–6 на рис. 1в и д отвечают разрушению при разогреве, кинетика которого показана на рис. г и е соответственно

Общим для этих двух случаев циклического нагружения является хрупкий характер разрушения образца, которое наступает вследствие прорастания магистральной трещины, подобно тому как это происходит и при статическом нагружении. Такие виды усталостного разрушения в квазизотермических условиях названы механическими<sup>(3)</sup>. Сходство механического разрушения с разрушением под действием статической нагрузки проявляется при фрактографическом изучении характера поверхностей разрушенных образцов<sup>(3, 5)</sup>. Изломы образцов, относящиеся к механическим видам, состоят из двух зон: гладкой зоны прорастания и развития усталостной трещины и шероховатой зоны долома, рис. 2а, г (зона I на рис. 1) и рис. 2в, е (зона III).

Часто зоны I и III сливаются (пунктирная кривая на рис. 1а), образуя кривую механического разрушения, отклонение которой от изотермы определяется не только разогревом, но и перенапряжениями, характерными для периодического нагружения.

В отличие от этих двух режимов разогрева (рис. 1б, I, III), кинетика разогрева при промежуточных нагрузках (рис. 1б, II) характеризуется скачкообразным подъемом температуры, что приводит к размягчению термопластов. При этом поверхность изломов разрушенных образцов шероховата из-за большого количества подплавленных областей и тяжелей и носит четко выраженный пластический характер (рис. 2б, д), резко отличаясь от поверхности изломов при механическом разрушении. Такой вид усталостного разрушения, происходящего в квазиadiaбатических условиях, назван тепловым<sup>(3)</sup>. При этом выносливость отвечает времени нарастания температуры до ее критического значения; это время определяется не прочностными свойствами материала ( $\sigma_0, \tau_0$ ), а соотношением между теплоотводом и теплоприходом. Поскольку последний связан кро-

ме условий нагружения также и с упруго-гистерезисными свойствами материала, то именно они и определяют выносливость и усталостную прочность при тепловом разрушении (3). Для термопластов это означает, что непрерывный разогрев материала резко меняет его структуру и быстрый рост  $\gamma$  приводит к истощению механической долговечности, см. формулу (1). При тепловом разрушении кривая  $\sigma_0(\lg N)$  асимптотически стремится к некоторому пределу  $\sigma_b$ , ниже которого тепловое разрушение не реализуется (3). На рис. 1а это схематически изображено зоной II.

Чтобы показать, что тепловое разрушение термопластов вызывается именно взрывоподобным ростом температуры, а не механическим действием нагрузки, мы провели специальные опыты, в которых осу-

ществляли обдув образца струей воздуха. На рис. 3а видно, что в тех случаях, когда на стадии резкого подъема температуры давали сильный обдув, температура снижалась и разрушение не наступало. При этом остальные условия опыта — напряжение, частота — оставались неизменными. По прекращении обдува температура разогрева резко возрастала и, если вновь не давали обдув, то происходило тепловое разрушение образца. Рис. 3б получен при несколько измененных условиях опыта: на стадии подъема температуры также давали обдув, но силу струи воздуха затем регулировали таким образом, чтобы температура образца оставалась неизменной (в данном случае — примерно 60°С). Гладкая поверхность разрушенного в этих условиях образца (рис. 2, а, в) свидетельствует о механическом характере разрушения. Эти опыты показали, что тепловое разрушение происходит из-за накопления тепла вследствие механических потерь, а механическое разрушение — из-за накопления нарушений под действием нагрузки.

Таким образом, тепловое разрушение — это особое явление, специфика которого выражается в существовании среднего участка на усталостной кривой. Это видно на рис. 1, где даны принципиальная схема и ее экспериментальное подтверждение.

Научно-исследовательский институт пластмасс  
Научно-производственное объединение «Пластик»  
Москва

Поступило  
7 X 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. Н. Журков, Вестн. АН СССР, 78, № 11 (1957). <sup>2</sup> В. Р. Регель, А. М. Лексовский, Механика полимеров, № 1 (1969). <sup>3</sup> С. Б. Ратнер, В. И. Коробов, С. Г. Агамалян, Физ.-хим. и мех. матер., № 1, 58 (1967); № 1, 88 (1969); Пластич. массы, № 1, 68 (1968). <sup>4</sup> С. Б. Ратнер, В. И. Коробов, ДАН, 161, № 4 (1965); Механика полимеров, № 3, 98 (1965). <sup>5</sup> О. Ф. Киреевко, А. М. Лексовский, В. Р. Регель, Механика полимеров, № 1 (1966). <sup>6</sup> С. Б. Ратнер, А. В. Стинская, Механика полимеров, № 1 (1967). <sup>7</sup> В. Lazan, A. Jorgiadis, Symp. of Plast. ASTM, 66, (1944). <sup>8</sup> В. Е. Гуль, Д. Л. Федюкин, Б. А. Догадкин, Колл. журн., № 11 (1953). <sup>9</sup> Р. Шапери, Д. Кенти, Ракетная техника и космонавтика, № 2 (1966). <sup>10</sup> П. П. Олдырев, В. П. Тамуж, Механика полимеров, № 5 (1967). <sup>11</sup> Д. Торми, С. Бриттон, Ракетная техника и космонавтика, № 8 (1963). <sup>12</sup> В. Г. Савкин, В. А. Белый и др., Механика полимеров, № 6 (1966). <sup>13</sup> О. Ф. Киреевко, А. М. Лексовский, В. Р. Регель, Механика полимеров, № 3 (1968). <sup>14</sup> С. Л. Скалозуб, Кандидатская диссертация, Рига, 1970. <sup>15</sup> В. А. Шерстнев, Кандидатская диссертация, Л., 1970.