

Обмен опытом

УДК 620.171.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПЛАСТМАСС
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В РЕЖИМЕ ЗАДАВАЕМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Статья поступила 16 мая 2014 г.

Выносливость материалов в большинстве случаев изучают при трех основных режимах испытаний: задаваемых нагрузке, деформации либо энергии деформации [1, 2]. В данной статье рассмотрена связь между первыми двумя режимами испытаний. При испытаниях в режиме задаваемой нагрузки обычно строят кривую Веллера в координатах $N_p - \sigma$, где N_p — число циклов до разрушения образца; σ — максимальное задаваемое напряжение, а при испытаниях в режиме задаваемой деформации — аналог кривой Веллера в координатах $N_p - \varepsilon$, где ε — максимальная деформация за цикл. Экспериментальное определение усилий, возникающих при циклических деформациях, в этом случае может осложняться инерционными силами от движущихся механизмов испытательного оборудования и вибрациями. При испытаниях на выносливость по схеме плоского поперечного изгиба в режиме задаваемых деформаций обычно не рассматриваются вопросы о передаче изгибающего момента без нарушения условий поперечного изгиба [3], в частности, появления продольной компоненты напряжений от сил трения, возникающих при зажиме концов образца.

Метод испытания пластмасс на выносливость. На рис. 1, а показана схема размещения образца 1 в нейтральном положении — между тремя опорами — на оборудовании для проведения испытаний. Средняя опора 2 (неподвижная) состоит из пары штифтов диа-

метром d_1 , между которыми образец располагается без натяга (зазор не должен превышать 0,05 мм), две крайние опоры 3 — подвижные, каждая из них образована парой штифтов диаметром d_2 , которые могут совершать синхронные колебания с амплитудой A в поперечном направлении к оси образца z , толкая его концы вверх-вниз. Между штифтами опор 3 и образцом имеется технологический зазор δ , необходимый для устранения зажима концов образца, что исключает возникновение продольных усилий и обеспечивает выполнение условий прямого поперечного изгиба. Такая схема позволяет наблюдать область образца (между штифтами неподвижной опоры 2), в которой возникает и развивается магистральная трещина.

На рис. 1, б показаны образец 1 в положении максимального прогиба, а также эпюра изгибающих моментов.

Сущность предлагаемого метода испытаний заключается в следующем. По задаваемой амплитуде A колебаний подвижных опор 3 и зазору δ вычисляется максимальный прогиб $v_{\max}$ образца, определяется усталостная деформация $\varepsilon_{\max}$ и строится зависимость $\varepsilon_{\max}$ от $\lg N_p$. Для получения кривой выносливости в координатах $\sigma_{\max} - \lg N_p$ используется зависимость $\sigma_{\max} = f_2(\varepsilon_{\max})$, для выявления которой проводятся тарировочные квазистатические испытания образцов в режиме «мгновенного нагружения». Для этого обра-

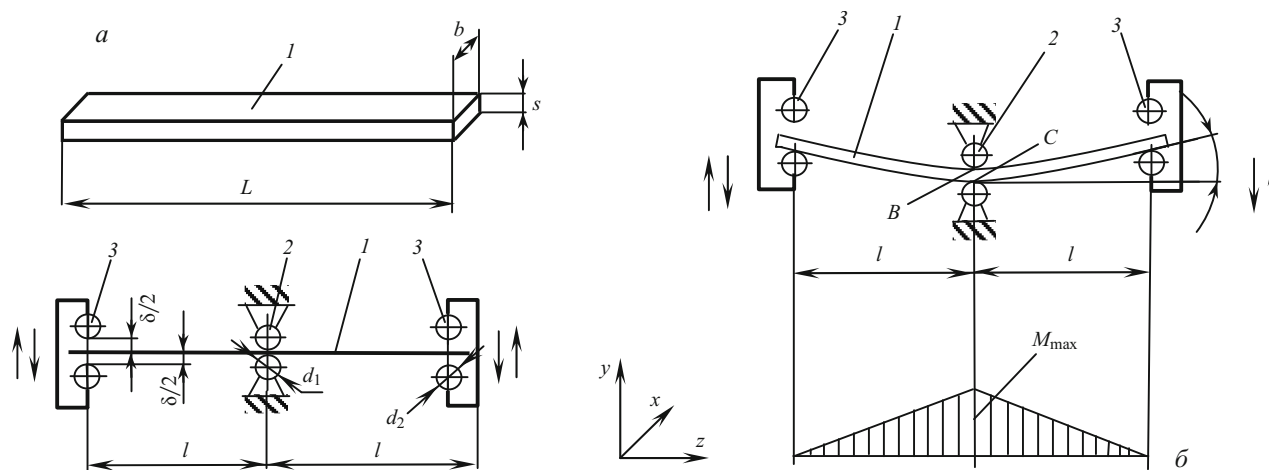


Рис. 1. Схема испытания образца на выносливость

зец быстро, но без удара нагружается поперечной силой с замером возникающих прогибов, причем время нагружения не должно превышать одной секунды. В экспериментах использовался пластометр фирмы Toyoseiki (Япония).

Тарировочные эксперименты проводили следующим образом. Образец устанавливали на опоры рабочего стола пластометра. Через рычажную систему и шток пластометра к середине образца прикладывали фиксированную нагрузку P и индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм измеряли его прогиб $v_{\max}$. По прогибу $v_{\max}$ рассчитывали деформацию $\varepsilon_{\max}$, а по нагрузке P — напряжение $\sigma_{\max}$ в «опасном сечении» образца. Далее определяли параметры: модуль Юнга E в законе Гука и константы c и n нелинейно-упругой модели деформирования $\sigma = c\varepsilon^n$.

При циклическом нагружении в условиях поперечного изгиба «опасное сечение» располагается между штифтами опоры 2, а экстремальные значения напряжений возникают в точках B и C , расположенных на поверхности образца (см. рис. 1, б). Например, в точке C возникает растягивающее напряжение σ_z ($\sigma_x = 0$ и $\sigma_y = 0$), в точке B — сжимающее напряжение σ_z от изгиба и сжимающее напряжение σ_y от контакта с неподвижным штифтом ($\sigma_x = 0$). Через полпериода напряжения в точках B и C сменяются. На основании проведенных исследований (в данной статье их результаты не приводятся) при $d_1 = 6$ мм установлено, что разность главных экстремальных напряжений, возникающих в точках «опасного сечения», наиболее удаленных от места контакта образца со штифтом (точка C на рис. 1, б), более чем в два раза превышает контактные (т.е. сжимающие) напряжения σ_y , поэтому последние при испытаниях не учитываются.

Расчет максимальных деформаций и напряжений в образце. Максимальный прогиб образца

$$v_{\max} = A - \delta/2. \quad (1)$$

Связь напряжений и деформаций описывается степенным законом

$$\sigma_z = c\varepsilon_z^n. \quad (2)$$

При малых перемещениях в условиях прямого поперечного изгиба балки из материала, подчиняюще-

гося степенному закону, максимальные напряжения и деформации могут быть рассчитаны по формулам

$$\sigma_{\max} = \frac{(n+2)Pl}{bs^2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\max} = v_{\max} \frac{(2n+1)s}{2nl^2}. \quad (4)$$

Если материал образца подчиняется закону Гука, то формулы (3) и (4) будут иметь следующий вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{3Pl}{bs^2}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\max} = v_{\max} \frac{3s}{2l^2}. \quad (6)$$

Для испытаний на выносливость использовали следующие материалы: поликарбонаты марок PC-007, Udel и Makrolon (ненаполненные); поликарбонат марки ПК-М-2, наполненный фторопластом-42 и двуокисью титана; полиамид ПА610-Л-Г5, наполненный 5 % графита. Испытания проводили на стандартных образцах в виде призм по ГОСТ 4647–69. Образцы размером $h \times s \times h = 80 \times 4 \times 10$ мм изготавливались из термопластов методом литья под давлением. Условия испытаний приведены ниже.

$T, ^\circ\text{C}$	$f, \text{Гц}$	$l, \text{мм}$	$\delta, \text{мм}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$
22	5	25	2,8	6	8

В табл. 1 приведены модуль Юнга, константы степенного закона, а также среднеквадратические отклонения s_r и s_c , полученные в режиме «мгновенного» нагружения. Обработка проводилась с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [6]. Законом Гука могут быть описаны механические свойства поликарбонатов Udel и Makrolon, для остальных пластмасс целесообразнее использовать степенной закон.

Для проведения испытаний на выносливость в режиме задаваемых деформаций использовали прибор типа AS-110 (Венгрия). На нем возвратно-поступательные перемещения подвижной траверсы с опорами 3 (см. рис. 1) осуществляются от кривошипно-шатунного механизма. Имеется возможность регулировки амплитуды перемещений, которая измерялась с помощью рейсмуса с погрешностью $\pm 0,05$ мм.

Таблица 1. Модуль Юнга, константы степенного закона и среднеквадратические отклонения для зависимости $\sigma_{\max} = f(\varepsilon_{\max})$

Материал	Закон Гука		Степенной закон		
	$E, \text{МПа}$	s_r	$c, \text{МПа}$	n	s_c
PC-007	2505,7	0,193	4370,3	1,1092	0,047
Udel	2593,1	0,094	3112,0	1,0364	0,066
Makrolon	2513,4	0,067	2405,3	0,9915	0,059
ПК-М2	2591,8	0,208	5753,3	1,1550	0,087
ПА 610-Л-Г5	2233,4	0,157	1107,1	0,8277	0,126

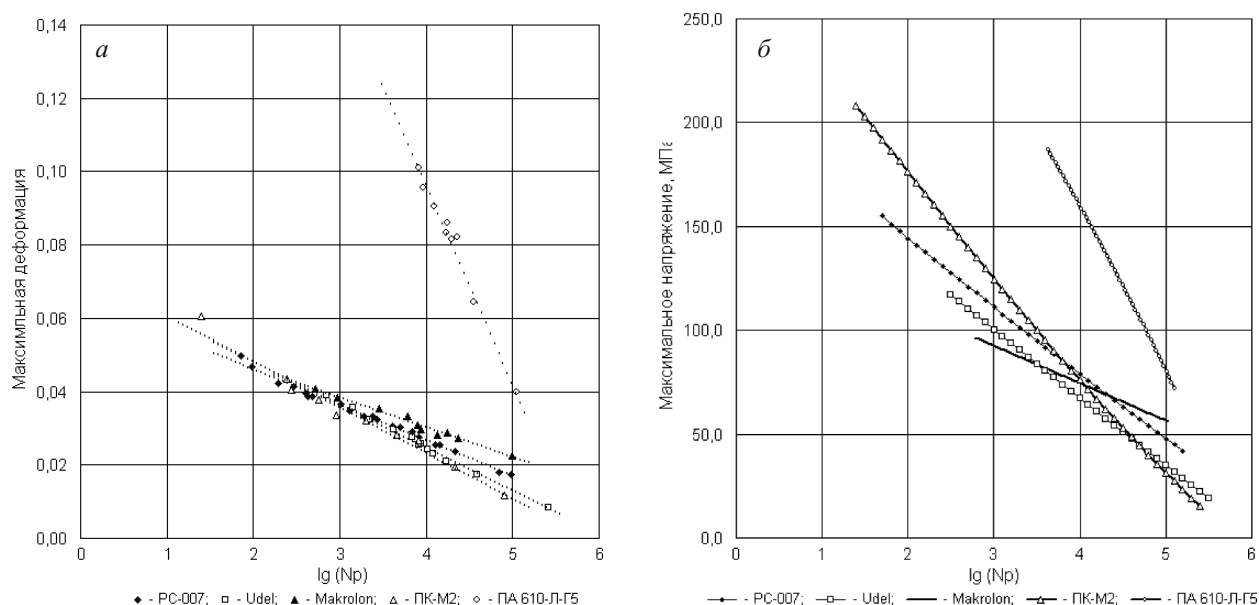


Рис. 2. Зависимости деформаций $\varepsilon_{\max}$ и напряжений $\sigma_{\max}$ от $\lg N_p$: а — экспериментальные зависимости $\varepsilon_{\max}$ от $\lg N_p$, рассчитанные по уравнению (4), и аппроксимирующие прямые, найденные по уравнению (9); б — аппроксимирующие зависимости $\sigma_{\max}$ от $\lg N_p$, рассчитанные по уравнению (10)

Экспериментальные данные на выносливость были получены в виде зависимости между задаваемой величиной прогиба $v_{\max}$ и числом циклов N_p , которое определяли по формуле $N_p = \tau_p f$, где τ_p — время от начала испытания до момента разрушения; f — частота колебаний. При этих испытаниях наблюдались два вида разрушения образца: при малых деформациях ε разрушение имело хрупкий характер, а при больших — оно начиналось в виде надрыва поверхностных слоев образца и постепенно распространялось на его внутренние слои, причем испытания прекращали, когда в малой окрестности «опасного сечения» образца оставалась гибкая перемычка толщиной примерно $s/4$.

Для уменьшения погрешности определения выносливости пластмасс необходимо минимизировать величину технологического зазора δ , для чего предварительно нужно рассчитать угол α поворота концевых участков образца относительно нейтрального положения:

$$\alpha = 3v_{\max}/2l. \quad (7)$$

Минимальный зазор, необходимый для проведения испытаний,

$$\delta = (d + s) \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right). \quad (8)$$

На рис. 2 показаны результаты испытаний на выносливость исследованных пластмасс. Деформации $\varepsilon_{\max}$ и напряжения $\sigma_{\max}$ рассчитывали по нелинейно-упругой модели. Экспериментальные точки зависимости $\varepsilon_{\max} = f(\lg N_p)$ хорошо группируются возле прямых линий, описываемых уравнением

$$\varepsilon_{\max} = a \lg(N_p) + b. \quad (9)$$

Положение этих линий определяли по методу наименьших квадратов [4]. Значения напряжений для нелинейно-упругой модели аппроксимировали степенным законом

$$\sigma_{\max} = c[a \lg(N_p) + b]^n, \quad (10)$$

а для линейно-упругой модели — законом Гука.

Таблица 2. Коэффициенты регрессии, среднеквадратичные отклонения и пределы выносливости пластмасс

Материал	a	b	s_ε	s_σ	$\max \varepsilon_z$	$\max \sigma_z$, МПа
PC-007	-0,01002/-0,00968	0,06774/0,06548	0,0192/0,0180	0,0192/0,0210	0,0176/0,0171	44,2/47,9
Udel	-0,01184/-0,01170	0,07241/0,07157	0,0265/0,0260	0,0265/0,0270	0,0132/0,0131	34,3/34,7
Makrolon	-0,00808/-0,00810	0,06255/0,06271	0,0208/0,0209	0,0208/0,0207	0,0221/0,0222	55,7/55,2
ПК-M-2	-0,01308/-0,01247	0,07666/0,07316	0,0503/0,0500	0,0503/0,0577	0,0113/0,0108	29,2/30,8
ПА610-Л-Г5	-0,05075/-0,05427	0,29334/0,3169	0,0270/0,0269	0,0270/0,0223	0,0396/0,0423	88,4/80,8

Примечание. В числителе приведены данные для линейно-упругой модели, в знаменателе — для нелинейно-упругой модели.

На основе регрессионного анализа рассчитывали (табл. 2) коэффициенты a , b для нелинейно-упругой модели и среднеквадратические отклонения s_ε и s_σ для деформаций и напряжений. Аналогично получали данные для линейно-упругой модели. В качестве базы для контроля выносливости использовали значение $N_p = 10^5$ циклов.

Пределы выносливости по деформациям для ненаполненных поликарбонатов, рассчитанные по линейно-упругой и нелинейно-упругой моделям, различаются незначительно (до 2,8 %), тогда как для наполненного ПК-М2 различие составляет 4,4 %, а для полиамида ПА610-Л-Г5 — 6,8 %.

Для описания пределов выносливости по напряжениям для поликарбонатов Udel и Makrolon может использоваться линейно-упругая модель. Поликарбонат ПК-М-2 имеет слабо выраженные нелинейные свойства, а в поликарбонате РС-007 и полиамиде ПА610-Л-Г5 нелинейность проявляется более значительно и при использовании линейно-упругой модели погрешность составляет 9,4 %.

На оборудовании для испытаний на выносливость при поперечном изгибе должна быть предусмотрена

возможность регулировки величины технологического зазора δ . Для повышения точности следует выбирать минимальное значение зазора δ , рассчитанное по уравнению (8).

Технологические возможности оборудования для испытаний на выносливость можно расширить, уменьшив расстояние $2l$ между подвижными опорами (см. рис. 1) для образцов из гибких материалов или, наоборот, увеличив его для образцов из материалов с пониженной гибкостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 26365–84. Резина. Общие требования к методам усталостных испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1984.
2. ГОСТ 25-502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость. — М.: Изд-во стандартов, 1979.
3. **Шах В.** Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. — СПб.: Изд-во НОТ, 2009. — 727 с.
4. **Шор Я. Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. — М.: Советское радио, 1962. — 552 с.

© **Ю. М. Щербаков, В. Н. Фролов, Ю. А. Скачков**
«Университет машиностроения (МАМИ)»,
Москва, Россия;
e-mail: 02671673@mail.ru