

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ФОРМ ТЕРМИЧЕСКОГО УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ НАГРУЖЕНИЯ

Н.Н.ЯКИМЕНКО

Институт механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины

Проведено експериментально-теоретическе дослідження термічного усталостного руйнування прямокутної призми з надрезом при ультразвукових частотах нагрівання

В рамках зв'язаної задачі термов'язкоупругості розглядається вібророзогрів прямокутної призми з надрезом при ультразвуковому нагріванні розтягнення – сжаття.

Матеріалом призми являється аморфний термопластический полімер – поліметилметакрилат (ПММА).

Исследование состоит из двух частей – теоретической и экспериментальной.

В первой части проводится численное моделирование процесса. Геометрия образца показана на рис.1. В расчетах использовались следующие значения параметров: $h = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $a = 10,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,

$p = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $r = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\alpha = 60^\circ$, где r - радиус закругления вершины надреза.

Механическое состояние тела рассматривается как плоско деформированное (в плоскости xOy).

Постановка задачі включає рівняння колибаний і теплопровідності

$$\text{div} \tilde{\sigma} + \rho \omega^2 \tilde{u} = 0, \tag{1}$$

$$C \dot{\theta} = \text{div}(k \text{grad} \theta) + \bar{D}', \tag{2}$$

определяющие уравнения

$$\tilde{s} = 2\tilde{G}\tilde{\epsilon}, \quad \tilde{\sigma}_{kk} = 3\tilde{K}\tilde{\epsilon}_{kk}, \quad \bar{D}' = 0,5\beta\omega \text{Im}(\tilde{\sigma} : \tilde{\epsilon}^*). \tag{3}$$

граничные и начальное условие

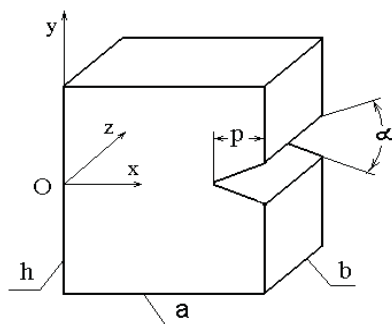


Рис.1

$$\begin{aligned}
 \tilde{u}_y = u_0, \quad \tilde{\sigma}_{xy} = 0, \quad \theta = \theta_c & \quad \text{при } y = h/2, \\
 \tilde{u}_y = 0, \quad \tilde{\sigma}_{xy} = 0, \quad \theta = \theta_c & \quad \text{при } y = -h/2, \\
 \tilde{\sigma}_{ij}n_j = 0, \quad -k\theta_{,i} = \alpha(\theta - \theta_c) & \quad \text{на } S, \\
 \theta = \theta_c & \quad \text{при } t = 0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь θ_c - температура окружающей среды, равная начальной.

Расчет проводился для следующих значений параметров нагружения:

$$u_0 = 18 \text{ мкм}, \quad f = \omega / 2\pi = 20 \text{ кГц}.$$

В расчете используются экспериментальные зависимости физико – механических характеристик материала от температуры [1].

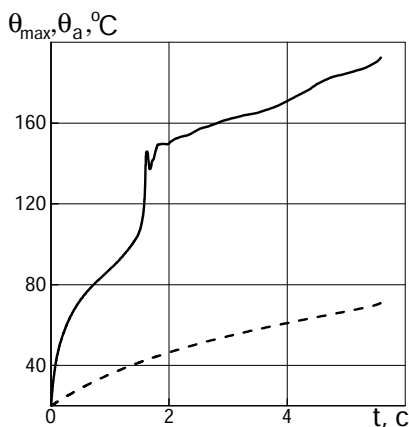


Рис. 2

Эволюция температуры показано на рис. 2. Здесь кривая 1 отвечает максимальной по объему, а кривая 2 – средне объемной температурам. Различие кривых есть мера локализации температурного поля. Максимальная температура достигается в вершине надреза. На кривой 1 четко выделяются две стадии процесса. Первая из них реализуется в интервале $0 < t < 1.7 \text{ с}$ и имеет вид, характерный для закритического режима разогрева [2]. Она заканчивается по достижении температуры плавления, для которой принимается значение $\theta_{liq} = 135^{\circ}\text{C}$.

Пологий участок $t > 1.7 \text{ с}$ отвечает состоянию расплава.

Кинетика термической усталостной трещины (ТУТ) включает 2 этапа. Первый этап – инкубационный. Он начинается с момента приложения нагрузки и заканчивается в момент времени t_{inc} достижения в вершине трещины условной температуры плавления $\theta = \theta_{liq}$. В адиабатическом процессе это время, за которое диссипированная энергия производит теплоту, равную энтальпии плавления

$$\Delta H = \int_{\theta_c}^{\theta_{liq}} c_V(\theta) d\theta = D' \cdot t_{inc}.$$

В режиме закритического разогрева при значительной закритичности время инкубации будет практически совпадать со временем достижения критической

температури $t_{inc} \cong t_{crit}$, после чего наступает второй – кинетический – этап распространения трещины вглубь тела и его разрушения.

Особенностью распределений является наличие максимумов полевых величин в малой окрестности вершины ТУТ. Для напряжения и диссипативной функции эти максимумы локальные. Максимум деформации достигается в самой вершине. Концентрация деформации характеризуется коэффициентом $k_\varepsilon = \max_{0 < x \leq x_c} |\tilde{\varepsilon}_y(x,0)/\varepsilon_0|$, где x_c – координата вершины ТУТ, ε_0 – отсчетная деформация, $\varepsilon_0 = u_0/h$.

Важной деталью является то, что при $t \geq 2c$ эти значения относительно стабилизируются в окрестности величины $k_\varepsilon \approx 7-8$.

Более полно пространственно – временная картина виброразогрева иллюстрируется эволюцией изотерм на рис.3. Цифры сверху обозначают моменты времени. Важность этих результатов состоит в том, что они могут быть сопоставлены с экспериментальными данными и использованы для обоснования закона распространения ТУТ.

Вторая часть работы посвящена экспериментальному исследованию виброразогрева образцов на установке для ультразвуковой сварки фирмы «Branson».

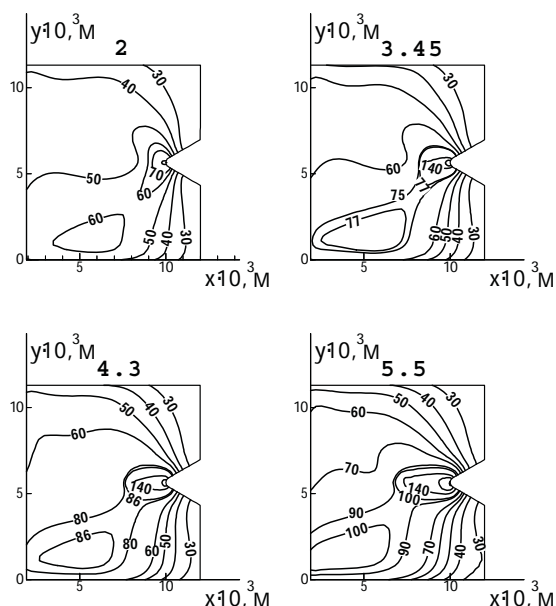


Рис. 3

Конкретные размеры образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ образца	17	29	27	25
α , град	60°	60°	60°	60°
$p \cdot 10^3$ м	2	2	2	2
$a \cdot 10^3$ м	10,2	10,2	10,1	10,1
$b \cdot 10^3$ м	10,4	11,5	11,5	11,5
$h \cdot 10^3$ м	10,4	11,3	11,3	11,3

Условия нагружения образцов характеризуются значениями статического поджатия P , амплитудой колебаний волновода u_0 и временем нагружения t_n , которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

№ образца	17	29	27	25
$P \cdot 10 \text{ МПа}$	60	110	100	80
$u_0 \cdot 10^6 \text{ м}$	20	18	18	18
$t_n, \text{ с}$	1,65	1,85	2,09	2,35

Фотографии образцов с номерами, приведенными в таблице 2, в том же порядке представлены на рис. 5а-г (вид сбоку) и 6а-г (вид со стороны надреза).

Начальная стадия формирования ТУТ визуализируется на образце №17. Области вязкотекучего состояния ($\theta \approx 120^\circ \text{ C}$) идентифицируются в виде помутненных эллипсов в окрестности острия надреза на боковых гранях (рис.5а). В этих областях размягченный и выдавленный материал образует бугорки. В образце наблюдается механическая усталостная трещина (МУТ) от зоны расплава к нижнему торцу. Ее геометрия хорошо просматривается со стороны надреза. Видно, что она инициализировалась и проросла до нижней грани в областях, прилегающих к боковым граням. В центре она проросла лишь до половины (рис.6а).

Следующая стадия процесса иллюстрируется на образце №29 (рис.5б и 6б). На этом этапе область расплава существенно продвинулась вглубь. Высота бугорков выдавленного расплава на боковых гранях заметно увеличилась вследствие роста его температуры (рис.5б). Здесь же отчетливо видна МУТ в начальной стадии развития.

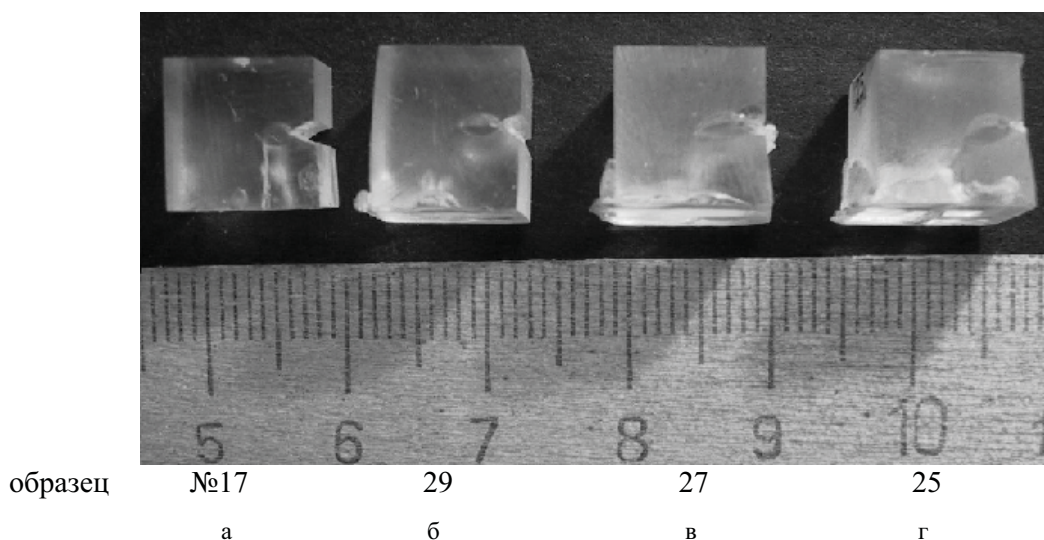
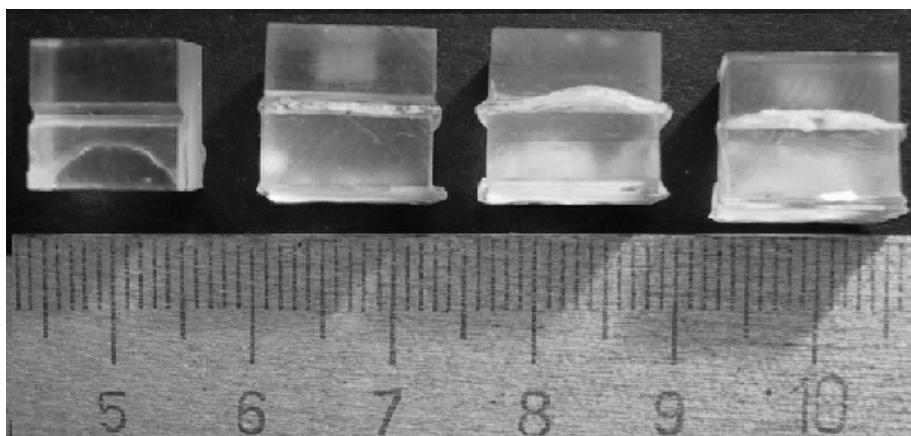


Рис. 5



образец №17 29 27 25
 а б в г

Рис.6

Таким образом, условия для формирования МУТ в окрестности трехгранного угла более благоприятные, чем в окрестности плоского.

Состояние образца в плане позволяет оценить температуру материала. Вспенивание выдавливаемого расплава отвечает температуре деструкции органических стекол $\theta_d = 170-190^\circ\text{C}$ [3]. Начальная стадия этого процесса наблюдается вдоль всей линии надреза (рис.6б).

Закономерности развитой стадии процесса иллюстрируются картиной разрушения образца №27. На рис.5в и 6в показана хорошо сформированная ТУТ, о чем свидетельствует некоторое количество выжатого вспененного материала (рис.6в). Вертикальная МУТ только начинает формироваться на боковых гранях. Налицо изменение направления развития ТУТ путем ее поворота в направлении к МУТ.

Окончательное термомеханическое разрушение иллюстрируется на образце №25 (рис.5г и 6г). Имеются хорошо сформированные тепловая и механическая трещины. Причем, механическая подходит к тепловой под углом $\approx 90^\circ$ и является ее продолжением. В момент окончания УЗ нагрузки нижняя левая четверть образца оказалась практически оторванной от остальной части. Механическая трещина раскрыта. Расстояние между берегами $\approx 0,1\text{мм}$.

Обобщим представленные результаты.

Сценарий усталостного разрушения представляется следующим. Сначала развивается тепловая трещина. По мере уменьшения несущего сечения образца в

плоскости надреза возрастают нагрузки. В результате этого у вершины ТУТ возникает МУТ, которая начинает продвигаться вертикально в направлении нижнего торца. После появления МУТ дальнейшее развитие ТУТ происходит в их взаимодействии. Оно сводится к затягиванию ТУТ в плоскость МУТ, с оплавлением и завариванием берегов МУТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Червинко О.П., Сенченков И.К. Связанное термомеханическое состояние вязкоупругой прямоугольной пластины с надрезом при гармоническом нагружении // Прикл. механика. – 2002. – 38, №2. – С.101-109.
2. Разработка моделей теплового разрушения тел из диссипативных материалов при циклическом нагружении: Отчет о НИР (заключительный) /Институт механики НАН Украины: Рук. д-р физ.-мат. наук В.Г.Карнаухов. - №ГР0197008132. – Киев, 2001. – 79с.
3. Справочник по пластическим массам // М.И.Гарбар и др. – М.: Изд-во Химия 1967. – 462с.