

$$-\frac{I_2(r) \left[ \omega_2'(r, \gamma, \mu, \xi) - \omega_2(r) \right]^2}{2T_2(r)} \left\{ + \frac{\rho_2^0 r \kappa \varepsilon_0}{2\rho_2 T_2(r)} [E_1^2 + E_2^2(r) + E_3^2(\mu)] + \right. \\ \left. + \frac{\rho_2^0 \kappa \mu_0}{2\rho_2 T_2(r)} [H_1^2 + H_2^2(r) + H_3^2(\mu)] + \frac{\rho_2^0 r}{T_2(r)} [\mu_0 m_2(r) H_2^*(r) + p_2(r) E_2^*(r)] \right\}.$$

Экспериментальные исследования [6, 7] показали зависимость процесса измельчения в ЭМП от прочности частиц дисперсной фазы, энергии мелящих тел и энергии электромагнитного поля, что согласуется со структурой полученных выражений (6.2), (6.3) для движущих сил.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. и др. Движение полидисперсной двухфазной смеси с учетом дробления включений // ТОХТ.— 1983.— Т. 17, № 3.
2. Кафаров В. В., Дорохов И. И., Арутюнов С. Ю. Системный анализ процессов химической технологии // Процессы измельчения и сменения сыпучих материалов.— М.: Наука, 1985.
3. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.
4. Тэй К. Т. К вопросу об электродинамике движущихся сред // ТИИЭР.— 1964.— Т. 52, № 3.
5. Fano V. M., Chu L. T., Adler R. V. Electromagnetic fields, energy and forces.— N. Y.: Wiley, 1960.— Selection A 1.5.1.
6. Власов В. А., Котлярова Н. Б. Оптимальные условия измельчения материалов в электромагнитном аппарате // Стекло и керамика.— 1984.— № 3.
7. Абросимов В. А., Кузнецов Ю. Н. и др. Новый метод диспергирования пигментных суспензий // Лакокрасочные материалы и их применение.— 1980.— № 4.

Поступила 6/V 1987 г.

УДК 620.172 : 620.171.3

### О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Б. И. Абашкин, И. Х. Забиоров, Е. Ф. Крапивина, В. И. Семенов  
(Москва)

Изучению влияния температуры на откольную прочность конструкционных материалов посвящен ряд работ. В связи с определенными техническими трудностями, возникающими при осуществлении интенсивного ударного нагружения и проведении необходимых измерений в условиях высоких температур, в [1] не учитывалось влияние температуры предварительного нагрева на вид уравнения состояния, а в [2] указывалось на незначительность снижения значений давлений и растягивающих напряжений за счет изменения свойств материалов при высоких температурах.

В данной работе приведена формула оценки динамической жесткости для материала по известному его коэффициенту теплового расширения и предложена экспериментальная методика получения этой зависимости для любого материала путем исследования откольного разрушения при соударении холодного и горячего образцов в газовой пушке, а также приведены результаты сопоставления расчетов и экспериментов для алюминиевого сплава АМг6.

При экспериментальном изучении температурной зависимости откольной прочности материалов по схеме высокоскоростного соударения ударника с горячей мишенью из рассматриваемого материала возникает необходимость определения слабо возрастающей функции температуры

$$(1) \quad f(T) = \frac{Z_0}{Z_T} = \frac{(1 + 3\alpha T) C_0}{(1 + 3\alpha T_0) C_T} \simeq (1 + 3\alpha \Delta T) \frac{C_0}{C_T} \simeq \frac{C_v}{C_T},$$

где введены обозначения для динамической жесткости (импеданса)  $Z = \rho C$ , разности температур  $\Delta T = T - T_0$ , линейного коэффициента теплового расширения  $\alpha$ , скорости плоской продольной упругой волны в материале  $C = [E(1 - \nu)/\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)]^{1/2}$ ,  $\rho$ ,  $E$ ,  $\nu$  — плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона, индексом нуль отмечены величины при температуре 20 °С.

Известно, что при нагреве модуль упругости уменьшается. Так, для алюминиевого сплава АК-4 [3] при 200 °С он составляет  $0,86E_0$ , а при 250 °С —  $0,82E_0$ . Выполненные авторами экспериментальные оценки скорости распространения ультразвуковых волн показали уменьшение скорости на  $\sim 13\%$  при 200 °С и на  $\sim 16\%$  при 250 °С. При больших нагревах прямые ультразвуковые измерения серийными дефектоскопами невозможны из-за ограниченной термостойкости пьезопреобразователей.

В [4] для многих металлов отмечено постоянство величины отношения коэффициента теплового расширения к относительному температурному коэффициенту модуля упругости  $\alpha \left/ \frac{d \ln E}{dT} \right. \approx -0,04$ , откуда можно получить близкий к экспоненциальному закон уменьшения модуля упругости при нагреве

$$(2) \quad E(T)/E_0 \approx \exp \left[ -25 \int_{T_0}^T \alpha(T) dT \right].$$

Исходя из значения  $\alpha \approx 22 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для сплава АК-4 [3], при  $T = 200 \text{ °C}$  по (2) можно найти  $E(T)/E_0 = 0,89$ , что неплохо согласуется с вышеприведенными данными из [3]. В предположении атермичности коэффициента Пуассона в упругой области выразим температурную зависимость динамической жесткости (1) как экспоненциальный закон возрастания функции

$$(3) \quad f(T) \approx \exp \left[ 12,5 \int_{T_0}^T \alpha(T) dT \right] \approx \exp(2,9 \cdot 10^{-4} \Delta T),$$

где последнее равенство соответствует алюминиевым сплавам при вышеуказанном значении  $\alpha$ . При использовании зависимости (3) необходимо иметь в виду отличие  $\alpha$  для различных сплавов и возможные изменения  $\alpha$  при нагреве.

Основная цель предпринятого исследования заключалась в экспериментальной отработке откольной методики получения данных о зависимости  $f(T)$ . В случае соударения холодных образца и ударника со скоростью  $V_0$  в толстой мишени возникает откол толщиной  $\delta_0 = h_1$  под действием растягивающего напряжения  $\sigma_0 = (1/2)Z_0V_0$  в течение времени  $\tau_0 = 2h_1/C_0$  ( $h_1$  — толщина ударника). При ударе холодной мишенью толщиной  $H_2$  со скоростью  $V_2$  по горячему тонкому ударнику в летящей мишени возникает откол толщиной  $\delta_2 = h_1 f(T)$  от воздействия напряжения  $\sigma_2 = Z_0V_2/[1 + f(T)]$  в течение времени  $\tau_2 = 2h_1 f(T)/C_0$ . При произвольной временной зависимости откольной прочности при нормальной температуре  $\psi(\tau) = \sigma(\tau)/\sigma(1)$ , где  $\sigma(1)$  — значение откольной прочности при длительности растяжения  $\tau = 1$  мкс, получаем основные функциональные соотношения  $\Phi(f) = \varphi(T)$ ,  $\Phi(f) = (1 + f)\psi(f\tau)/\psi(\tau_0) - 1$ ,  $\varphi(T) = 2V_2(T)/V_0 - 1$  для определения температурной зависимости  $f(T)$  по экспериментально найденным критическим скоростям возникновения откола в холодной мишени при холодном ( $V = V_0$ ) и горячем ( $V = V_2$ ) ударнике. В частном случае временной зависимости в форме Журкова  $\psi(\tau) = 1 - A \lg \tau = 1 - 0,0315 \lg \tau$  для алюминиевых сплавов имеем  $\Phi(f) = f - A/(1 - \lg \tau_0) \cdot (1 + f) \lg f \approx f - 0,0315(1 + f) \lg f \approx f$ , т. е. получаем простую формулу  $f(T) = V_2(T)/V_0 - 1$  для нахождения температурной зависимости динамической жесткости материала (при  $A \ll 1$ ) по измеренным критическим скоростям  $V_2 \geq V_0$  возникновения откола в холодной мишени при соударении с горячим ударником различной температуры.

Дополнительную информацию дают эксперименты по соударению ступенчатых образцов (рис. 1), когда возможен откол в толстых полудисках не только летящей холодной мишени, но и покоящегося горячего ударника толщиной  $\delta_1 = h_2/f(T)$  от воздействия напряжения  $\sigma = Z_0V_1/[1 + f(T)]$  в течение времени  $\tau = 2h_2/C_0$ . Следовательно, в летящей холодной мишени толщина возникающего откола  $\delta_2$  больше, а в покоящемся горячем ударнике  $\delta_1$  меньше, чем при соударении холодных образцов.

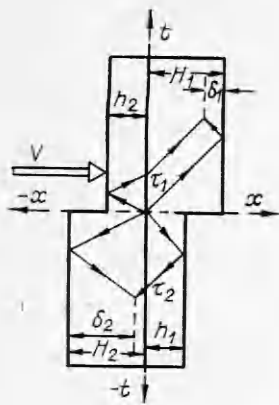


Рис. 1

Этот качественный эффект наблюдался в экспериментах со ступенчатыми образцами из алюминиевого сплава АМгб. Однако вследствие недостаточной четкости границы откольной трещины количественное определение слабой зависимости  $f(T)$  по соотношениям  $f(T) = \delta_2(T)/h_1 = h_2/\delta_1(T)$  в данном случае затруднительно.

Эксперименты проводились в газовой пушке, аналогичной описанной в [5]. Схема проведения экспериментов показана на рис. 2. Исследуемые образцы представляли собой плоские или ступенчатые диски диаметром 48 мм, толщиной  $2h_{1,2} = H_{1,2} = 8$  мм.

Образец 3, закрепленный на разгонном поршне из пенопласта 2, разгонялся в стволе газовой пушки 1 калибром 50 мм. Нагрев образца 9, установленного в державке 8, производился при верхнем положении поршня пневмопривода 4 лучистым тепловым потоком от двух спиральных нихромовых нагревателей 12 суммарной мощностью 1,2 кВт·А (10 А, 60 В), смонтированных на термостойких изоляторах 11 в корпусе 13. Нагрев и соударение осуществлялись в вакуумной камере 14, из которой газ был отведен через отверстие 15. Температура образца контролировалась с помощью термопары 10 вплоть до момента соударения образцов. Время нагревания образца до температуры 400 °С составляло примерно 30 мин. Неоднородность температуры по толщине образца в момент нагружения не превышала 1 К. После достижения требуемой температуры образца производилось заполнение камеры высокого давления газом до необходимого давления для получения заданной скорости метания поршня 2. Путем подачи газа с помощью электропневмоклапана в полость над поршнем 4 осуществлялось опускание поршня вниз, который через систему «шатун 5 — коромысло 6 — тяга 7» поднимал державку из нагревательного устройства до совмещения оси образца 9 с осью канала ствола. При этом срабатывал концевой выключатель, подающий сигнал на производство выстрела. В каждом эксперименте производилось измерение скорости соударения на трех базах с помощью датчиков 16 специальной фотоэлектрической системы. Погрешность измерения скорости соударения не превышала 2 %. После соударения образцы улавливались на поршне из пенопласта в тормозном стволе (на схеме не показан). Извлеченные из тормозного ствола образцы разрезались по диаметру, изготавливался шлиф и с помощью измерительного микроскопа МИ-1 определялся факт наличия или отсутствия откольной трещины.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные в координатах  $T$ ,  $f(T) = 2V/V_0 - 1$ , с учетом значения  $V_0 = 173$  м/с, полученного в серии

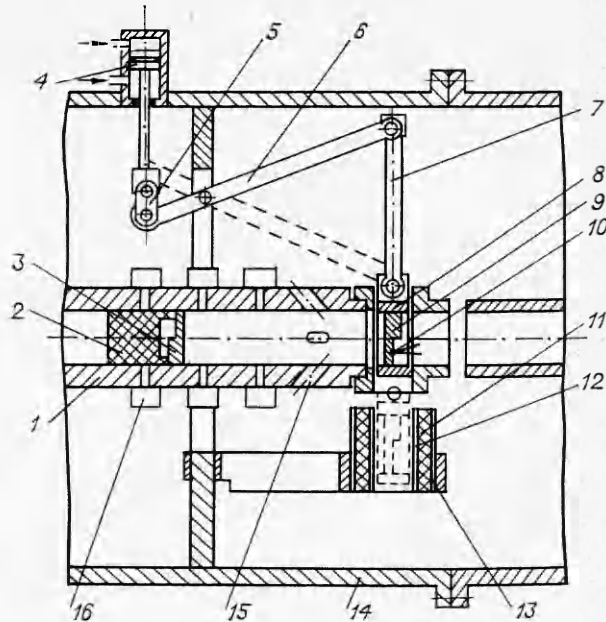
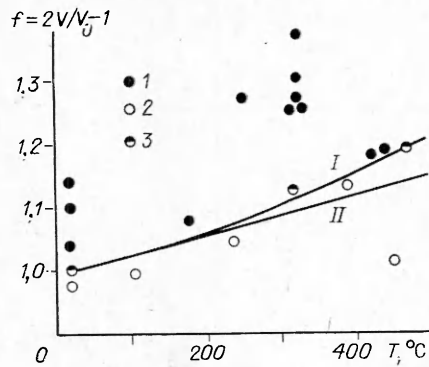


Рис. 2



Р и с. 3

точками *I* (при наличии откола) и *2* (при отсутствии откола) с качественным учетом степени развитости откольной трещины в холодной мишени. Точки *3* отвечают пределу обнаружения откольной трещины. Видно, что расчетная зависимость (3) для динамической жесткости удовлетворительно соответствует экспериментальным данным, так как при максимальной температуре 500 °С расчет (3) дает занижение  $f(T)$  на ~4 % по сравнению с экспериментальным значением.

С учетом полученной зависимости  $f(T)$  на рис. 4 представлены температурные зависимости критических скоростей откола в холодном  $V_2$  и горячем  $V_1$  ступенчатых образцах ( $V_1 \leq V_0 \leq V_2$ ). Приведенное там же сопоставление с экспериментальными данными (значения экспериментальных точек *1* и *2* те же, что и на рис. 3, а точки *3* отвечают отколу только в горячем образце) свидетельствует о применимости расчетных формул для критических скоростей

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{V_0} &= \frac{1+f(T)}{2} \left\{ 1 - \frac{A}{1-A \lg \tau_0} \left[ (\bar{\tau} + \lg \tau_0) \frac{\Delta T}{T} + \frac{T}{T_0} \lg \frac{h_2}{h_1} \right] \right\} \approx \\ &\approx \frac{1+f(T)}{2} \left( 1 - 0,22 \frac{\Delta T}{293} \right), \\ \frac{V_2}{V_0} &= \frac{1+f(T)}{2} \left[ 1 - \frac{A}{1-A \lg \tau_0} \lg f(T) \right] \approx \frac{1+f(T)}{2}, \end{aligned}$$

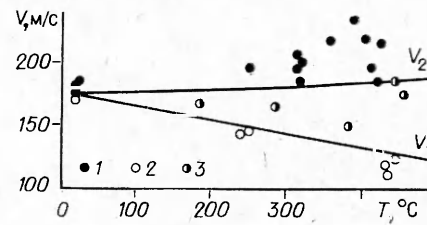
по которым построены кривые  $V_1$  и  $V_2$  рис. 4.

Таким образом, для оценок температурной зависимости динамической жесткости металла в первом приближении можно применять формулу (3), которая (как показано на примере для сплава АМг6) может оказаться достаточным приближением. Дополнительную информацию о рассматриваемой зависимости дает предложенная экспериментальная методика, применимая как к металлам, так и к произвольным материалам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Батьков Ю. В., Новиков С. А. и др. Влияние температуры образца на величину разрушающих напряжений при отколе в алюминиевом сплаве АМг-6 // ПМТФ. — 1979. — № 3.
2. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. Влияние температуры на критические условия откольного разрушения металлов // ПМТФ. — 1980. — № 4.
3. Сидорин И. И., Соловьева Н. И. Алюминий и его сплавы // Справочник машиностроителя. — 3-е изд. — М.: Машиностроение, 1964. — Т. 6.
4. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. — М.: Машиностроение, 1974.
5. Минеев В. Н., Погорелов В. П. и др. Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках // ФГВ. — 1978. — № 3.

Поступила 25/III 1987 г.



Р и с. 4