

05;12

Температурная зависимость откольной прочности и эффект аномальных температур плавления при ударно-волновом нагружении

© Ю.В. Петров, Е.В. Ситникова

Санкт-Петербургский государственный университет
 Научно-исследовательский институт математики и механики,
 198504 Санкт-Петербург, Россия
 e-mail: yp@YP1004.spb.edu

(Поступило в Редакцию 19 ноября 2004 г.)

Исследуются эффекты температурных аномалий при ударно-волновом воздействии на материалы. В работе [1] описано экспериментальное исследование откольного разрушения образцов из поликристаллов и монокристаллов алюминия при различных температурах. Анализ экспериментальных данных для поликристаллического алюминия показал, что сопротивление разрыву мало изменяется с ростом температуры от комнатной до значения, составляющего 90% температуры плавления, и резко падает до нуля с дальнейшим повышением температуры. Для монокристаллов алюминия в эксперименте наблюдался эффект аномально высоких температур, т.е. наблюдалось сохранение высокой прочности в состоянии, где ожидалось плавление при растяжении. На основе критерия инкубационного времени разрушения получено аналитическое выражение для температурной зависимости откольной прочности материалов. Введен новый критерий плавления, связывающий момент фазового перехода с инкубационным периодом плавления, что позволяет дать естественное объяснение эффекту аномальных температур плавления при импульсном воздействии.

Температурная зависимость откольной прочности

Временная зависимость откольной прочности материалов может быть получена на основе критерия инкубационного времени [2–4]. В основе данного критерия лежат принципы структурной макромеханики разрушения и понятие инкубационного времени разрушения, связанного с динамикой подготавливающего разрушение релаксационного процесса. Данный критерий позволяет рассчитывать наблюдаемые в экспериментах по разрушению твердых тел эффекты неустойчивого поведения динамических прочностных характеристик. Временная же зависимость прочности, наблюдаемая в условиях откола, является типичным примером сложного поведения динамической прочности твердых тел.

В случае откольного разрушения критерий инкубационного времени имеет вид

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_C \tau, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ — зависимость от времени локального напряжения в месте разрыва; σ_C — статическая прочность разрушения; τ — инкубационное время разрушения материала, которое может зависеть от температуры T .

В работе [1] измерения проводились в условиях воздействия на образцы плоскими ударными волнами, которые создавались в исследуемых образцах ударом алюминиевой пластины, причем при использовавшемся соотношении толщин ударника и образца форма волновых профилей близка к треугольной. Задача об отражении треугольного импульса сжимающего напряжения от

свободного конца полубесконечного стержня рассмотрена в [2]. Предполагалось, что ось Ox направлена вдоль стержня, который располагается сплава от нуля ($x > 0$). Падающий импульс записывался в виде

$$\sigma_- = -P \left(1 - \frac{ct+x}{ct_i} \right) [H(ct+x) - H(ct+x-ct_i)].$$

Здесь P — амплитуда импульса, t_i — его продолжительность, $H(t)$ — функция Хевисайда, c — максимальная скорость волн. Отраженный от свободного конца профиль напряжения имел вид

$$\sigma_+ = +P \left(1 - \frac{ct+x}{ct_i} \right) [H(ct-x) - H(ct-x-ct_i)].$$

Суммарное напряжение выражалось как $\sigma = \sigma_- + \sigma_+$. Далее для определения разрушающей амплитуды был применен структурно-временной критерий (1). Рассматривались пороговые импульсы, т.е. разрушающие импульсы заданной длительности и минимальной амплитуды. Минимальная для заданной продолжительности t_i разрушающая амплитуда P_* определялась из условия

$$\max_t I = \sigma_C, \quad I = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt'. \quad (2)$$

Получаемые в итоге уравнения, описывающие временную зависимость прочности на всем диапазоне длительностей нагружения с учетом инкубационного времени разрушения, имеют следующий вид:

$$P_* = \begin{cases} \frac{2\sigma_C \tau(T)}{t_i}, & t_i \leq \tau(T), \\ \frac{\sigma_C}{1 - \frac{\tau(T)}{2t_i}}, & t_i \geq \tau(T). \end{cases} \quad (3)$$

	$P_*(15^\circ\text{C}), \text{MPa}$	G, Y	σ_c, MPa	$\tau, \mu\text{s}$
Поликристаллический алюминий	1240	$2.97 \cdot 10^{-14}$	100	0.75
Монокристаллы алюминия	2400	$0.5727 \cdot 10^{-14}$	1000	0.15

В работе [5] было получено аналитическое выражение для температурной зависимости инкубационного времени разрушения и было показано, что инкубационное время может быть выражено через τ_0 -константу, по величине равную периоду валентных колебаний атомов. Учитывая этот результат, предлагается рассматривать температурную зависимость инкубационного времени разрушения в следующем виде:

$$\tau = \tau_0 \frac{G}{kT}, \quad (4)$$

где $k = 1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ — постоянная Больцмана, T — температура, $\tau_0 = 10^{-13} \text{ s}$ — период валентных колебаний атомов в твердом теле (период „элементарной флуктуации“).

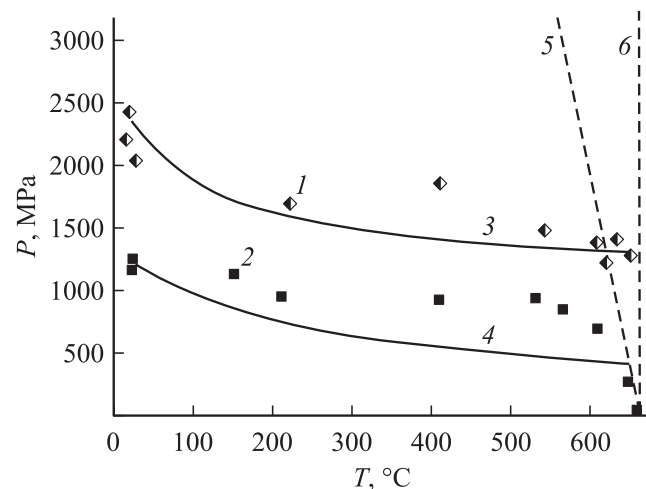
Как известно, kT — это энергия колебательной степени свободы в равновесном состоянии. Это минимальная энергия необходимая для того, чтобы разрушить элементарную связь — связь между двумя атомами. Величину G следует интерпретировать как элементарную порцию энергии, необходимую для разрушения структурной ячейки.

Выражения для температурной зависимости откольной прочности получим, предполагая, что в соотношениях для временной зависимости прочности (3) инкубационное время разрушения τ зависит от температуры T по закону (4). Полученный результат может быть применен для анализа экспериментальных данных из работы [1]. В экспериментах [1] воздействие представляло собой импульс треугольного профиля, причем для всех температур испытания длительность импульса t_i была одинакова, она составляла $0.12 \mu\text{s}$. Испытания были проведены в температурном интервале от 15 до 650°C , что лишь на 10°C меньше температуры плавления. Для каждого материала мы подбираем „элементарную энергию разрушения ячейки“ G так, чтобы получались соответствующие опытам [1] значения пороговых амплитуд при минимальной температуре испытаний (15°C). При этом для каждого материала по формуле (4) автоматически получаются соответствующие инкубационные времена разрушения. Экспериментальные значения пороговых амплитуд при 15°C , соответствующие им величины элементарной энергии разрушения G , полученные по формуле (4) инкубационные времена разрушения и использованная в расчетах статическая прочность для обоих материалов приведены в таблице.

Результаты расчета температурных зависимостей откольной прочности для монокристаллов и поликристаллов алюминия по формулам (3) с учетом (4)

приведены на рисунке; значками обозначены экспериментальные данные. Экспериментальные данные имеют значительный разброс, что, вообще говоря, характерно для подобных измерений с высоким пространственным разрешением (измерения в эксперименте проводились интерферометрическим способом). Более точное количественное соответствие расчетов может быть получено по мере накопления экспериментальных данных, а также по мере уточнения методик проведения экспериментов и измерений.

Заметим, что инкубационное время разрушения для поликристаллического алюминия при комнатной температуре ($0.75 \mu\text{s}$) совпало с тем, что было получено в работе [5], где оно было найдено для экспериментальных данных [6]. В [6] проводилось экспериментальное исследование хрупкого разрушения твердых тел в волне растягивающих напряжений с помощью техники плоского соударения пластины-ударника с пластиной-мишенью. Таким образом, эксперимент [1] для поликристаллического алюминия при комнатной температуре хорошо согласуется с классическими опытами ФТИ и эффективно прогнозируется при помощи теории инкубационного времени.



Температурная зависимость разрушающей пороговой амплитуды импульса длительностью $0.12 \mu\text{s}$ для монокристаллов алюминия (1 — экспериментальные данные [1], 3 — расчет по формуле (3)) и поликристаллического алюминия (2 — экспериментальные данные [1], 4 — расчет по формуле (3)). Растягивающие напряжения, соответствующие началу плавления: 5 — расчет по „классическому“ критерию (11), 6 — расчет по формуле (1) с $\tau_m = 0.7 \mu\text{s}$.

Эффект аномальных температур

При достижении в материале достаточно больших напряжений начинается процесс плавления. При этом значения температуры будут ниже температуры плавления материала при нулевом давлении. Для оценки растягивающих напряжений, при которых начинается плавление, авторы [1] рассматривали условие пересечения кривой плавления твердого тела в виде

$$\frac{dV}{dp} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \frac{dT_m}{dp} + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T, \quad (5)$$

где V — объем, p — давление, T — температура, и изэнтропы расширения твердого тела, линеаризованное уравнение состояния которой имеет следующий вид:

$$V = V(T_{m0}) + (T_0 - T_{m0}) \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p=0} + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_S, \quad (6)$$

где T_0 — начальная (при $p = 0$) температура испытания, T_{m0} — температура плавления при нулевом давлении, S — энтропия.

Произведя простейшие преобразования, а именно умножив обе части формулы (6) на p и перенося в формуле (7) из правой части в левую $V(T_{m0})$, воспользуемся приближенной формулой

$$V - V(T_{m0}) \approx p \frac{dV}{dp}.$$

Приравнявая правые части преобразованных уравнений, получаем искомую оценку зависимости между температурой и давлением, соответствующую фазовому переходу I рода,

$$p\alpha \frac{dT_m}{dp} - \frac{p}{K_T} = \alpha(T_0 - T_{m0}) - \frac{p}{K_S}, \quad (7)$$

где $\alpha = 1/V(\partial V/\partial T)_{p=0} = 1.12 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ — объемный коэффициент теплового расширения, $K_T = -V(\partial p/\partial V)_T = 56.7 \text{ GPa}$ и $K_S = -V(\partial p/\partial V)_S = 71.1 \text{ GPa}$ — изотермический и изэнтропический модули объемной упругости материала, $T_{m0} = 933.2 \text{ K}$.

Данная зависимость отвечает достаточно плавному (квазистатическому) воздействию и предполагает, что плавление материала рассматривается как мгновенный процесс.

Выражая в (7) давление через температуру с использованием экспериментального значения $dT_m/dp = 64.1 \cdot 10^{-3} \text{ K/MPa}$ по данным из [7] и учитывая, что растягивающее напряжение соответствует отрицательному давлению, получим

$$P_m = \frac{T_{m0} - T}{0.032}. \quad (8)$$

В [1] оценка растягивающих напряжений, при которых начинается плавление материала, производится

с помощью данного соотношения. И если для поликристаллического алюминия экспериментальные данные сосредоточены ниже этой оценки, то эксперименты для монокристаллического алюминия показали, что пересечение расчетной границы области плавления не сопровождается резким падением прочности материала на разрыв, напротив, сохраняются высокие значения прочности.

Для объяснения этого эффекта введем новый критерий, соответствующий плавлению. Будем считать, что плавление есть не мгновенный процесс, но процесс, характеризующийся своим инкубационным периодом τ_m . Рассмотрим критерий плавления в следующем виде:

$$\int_{t-\tau_m}^t \sigma(S) dS \leq P_m \tau_m, \quad (9)$$

где P_m — среднее („равновесное“) напряжение, которое должно реализоваться в течение инкубационного периода τ_m для того, чтобы произошло плавление материала. Оно соответствует отрицательному давлению, определяемому из соотношения (7).

При выполнении равенства в (9) происходит плавление материала и соответствующая температура в этом случае определяется как температура плавления $T = T_m$. Как можно видеть, данный критерий по форме в точности совпадает с критерием инкубационного времени для хрупкого разрушения. Применив его для решения рассмотренной ранее задачи для треугольных волновых импульсов напряжения, получаем следующую зависимость динамических пороговых амплитуд P_{*melt} , вызывающих плавление, от длительности t_i инкубационного периода плавления τ_m и температуры T :

$$P_{*melt} = \begin{cases} \frac{2P_m(T)\tau_m}{t_i}, & t_i \leq \tau_m, \\ \frac{P_m(T)}{1 - \frac{\tau_m}{2t_i}}, & t_i \geq \tau_m. \end{cases} \quad (10)$$

В случае классического подхода (когда плавление рассматривается как „мгновенное“ событие), т.е. при $\tau_m = 0$, имеем

$$P_{*melt}(T) = P_m. \quad (11)$$

Для определения условий, при которых происходит начало плавления поликристаллического алюминия, может быть использован классический критерий плавления в виде (11), поскольку, как это можно видеть, экспериментальные данные для прочности поликристаллов в районе температуры плавления приблизительно соответствуют значениям отрицательных давлений, получаемым по данному критерию, а соответствующий „перегрев“ оказывается незначительным. Высокотемпературные же данные для прочности монокристаллов существенно превышают предельные напряжения, соответствующие классическому критерию плавления, и для

определения условий плавления в таких случаях следует применять критерий инкубационного времени (9) с $\tau_m = 0.7 \mu s$.

Инкубационное время плавления τ_m для монокристаллов алюминия оценивали, зная величину перегрева монокристаллов алюминия относительно оценки, полученной по классическому критерию, т.е. предполагая, что в эксперименте было выяснено значение температуры, при достижении которого значения откольной прочности для монокристаллов резко начинают падать в связи с началом плавления. Разница между этим значением температуры и ее значением, соответствующим началу плавления согласно классическому критерию (последнее определяем в точке пересечения кривых 3 и 5), и есть величина перегрева для монокристаллов алюминия. В [1] указана величина перегрева, равная $30^\circ C$, и выбранное нами инкубационное время плавления соответствует данному перегреву.

Таким образом, построенная модель объясняет эффект резкого падения прочности при температурах, близких к температурам плавления, тем, что происходит конкуренция двух процессов: разрушения и плавления, каждый из которых характеризуется соответствующим инкубационным временем. Можно оценить, при каких значениях давления и температуры происходит данный переход. Он определяется как точка пересечения графиков, соответствующих каждому из этих процессов. Предложенная модель инкубационного времени плавления позволяет объяснить эффект аномально высоких температур плавления, наблюдающихся в эксперименте [1] для монокристаллов алюминия.

Выводы

1. При помощи структурно-временного критерия и с учетом предложенного в данной работе вида температурной зависимости инкубационного времени разрушения получено аналитическое выражение для температурной зависимости откольной прочности.

2. Впервые создана модель, учитывающая структурно-временные характеристики фазового перехода в условиях ударного нагружения. Для определения момента фазового перехода при ударно-волновом нагружении был применен новый критерий инкубационного времени.

3. При помощи введенного в настоящей работе критерия для плавления дано объяснение наблюдаемому в эксперименте для монокристаллов алюминия явлению аномально высоких температур плавления.

Список литературы

- [1] Канель Г.И., Разоренов С.В. // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 5. С. 839–845.
- [2] Петров Ю.В. Препринт ИПМАШ РАН. СПб., 1996. 53 с.
- [3] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Проблемы механики разрушения твердых тел. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 112 с.

- [4] Петров Ю.В. // ДАН. 2004. Т. 395. № 5.
- [5] Глебовский П.А., Петров Ю.В. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 6. С. 1021–1024.
- [6] Беллендир Э.Н. Автореферат канд. дис. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1990. 21 с.
- [7] Gorecki T. High Temp. High Press. 1979. Vol. 11. P. 683.