

1. При граничных условиях $\Theta_e = \Theta_n$ при $q_w < q_w^*$ реализуется квазистационарный режим пиролиза, а при $q_w \geq q_w^*$ происходит бурное разложение материала, обусловленное тем, что процесс пиролиза при $T > T_*$ имеет экзотермическую стадию. Этот режим пиролиза целесообразно назвать «воспламенением» по аналогии с соответствующим процессом в теории горения.

2. При фиксированном q_w при $\Theta_e < \Theta_e^*$ процесс пиролиза квазистационарен, а при $\Theta_e \geq \Theta_e^*$ имеет место режим пиролиза типа воспламенения, причем Θ_e может быть меньше температуры «перехода» (в данном случае $\Theta = 0$).

3. Режим пиролиза типа воспламенения характеризуется наличием точки перегиба в кривой $\Theta_{\max}(\tau)$. Кроме того, при воспламенении композиционного полупрозрачного материала в зоне воспламенения давление достигает максимума и газообразные продукты пиролиза растекаются в обе стороны от зоны интенсивного пиролиза.

4. Вплоть до момента воспламенения конвективным переносом энергии в толще материала можно пренебречь.

Поступила в редакцию 3/VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Миков, В. Л. Страхов. Матер. 5 науч. конф. ТГУ по математике и механике. Томск: ТГУ, 1975.
2. А. М. Гришин, А. С. Якимов, В. Л. Миков. ФГВ, 1981, 17, 2.
3. В. В. Коршак. Химическое строение и температурные характеристики полимеров. М.: Наука, 1970.
4. Н. С. Грязнов. Основы теории коксования. М.: Metallургия, 1976.
5. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970.
6. А. М. Гришин. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермических решений. Томск: ТГУ, 1973.
7. Б. В. Алексеев, А. М. Гришин. Введение в аэротермохимию. Саратов: изд. Саратовского университета, 1976.

О РАБОТЕ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Г. И. Канель

(Черноголовка)

Многочисленные исследования отколов при воздействии на плоские образцы ударных волн показали, что это явление не может быть достаточно полно охарактеризовано одним только критическим напряжением разрушения. В связи с этим в литературе обсуждаются различные эмпирические критерии, определяющие возможность разрушения из соотношения между величиной и временем действия растягивающих напряжений [1]. Между тем эксперименты по непрерывной регистрации скорости свободной тыльной поверхности образцов в одномерных условиях нагружения [2, 3] показывают, что зависимость максимальных растягивающих напряжений при отколе от характерной длительности исходной нагрузки невелика — при изменении скорости разгрузки в падающем импульсе в 5—10 раз изменение максимальной величины разрушающих напряжений не превышает 10—20%. При построении эмпирических критериев [1], основанных главным образом на экспериментах с прямым наблюдением разрушения после соударения пластин [4—6], считалось, что эта зависимость гораздо сильнее. Завышение величины разрушающих напряжений при ее определении путем поиска критической скорости соударения связано с пренебрежением релаксацией напряжений по мере развития разрушения. Интенсивно развиваемый в последнее время ки-

нетический подход [7] позволяет наиболее полно описывать процесс разрушения, но требует проведения большого объема экспериментальной и расчетной работы, а получаемые соотношения содержат, как правило, слишком много параметров и пригодны скорее для модельных расчетов, чем для сопоставления свойств различных материалов.

Таким образом, остается актуальным вопрос о выборе простых критериев откольного разрушения, имеющих ясный физический смысл и пригодных для оценок возможности разрушения различных материалов [8]. В этом отношении представляется наиболее перспективным энергетический критерий [9], основанный на сопоставлении работы разрушения и запаса энергии в образце. Под работой разрушения здесь понимается отнесенная к единице площади сечения образца энергия, затраченная на весь процесс его разделения при отколе. Вызывает, однако, возражения способ подсчета работы разрушения по запасу только упругой энергии растяжения откалываемой пластины [9]. Поскольку откол происходит в условиях неравномерного распределения массовой скорости по толщине образца, на разрушение может расходоваться кинетическая энергия откольной пластины, запас которой, как нетрудно показать, к моменту начала разрушения обычно значительно превышает запас упругой энергии растяжения. Кроме того, подсчет упругой энергии сопряжен с неопределенностью, связанной с обусловленной релаксационным характером процесса разрушения ограниченностью роста растягивающих напряжений при распространении нагрузки в глубь образца [10].

В данном сообщении обсуждаются способы оценки работы разрушения по результатам двух типов экспериментов.

Рассмотрим баланс энергии в пластине толщиной L после введения в нее одномерной волны сжатия, в которой полное приращение энергии на единицу площади составляет E_0 , а количество движения — P_0 . В результате многократных проходов через пластину волна сжатия в ней затухнет, а ее энергия частично перейдет в кинетическую энергию пластины в целом и частично израсходуется на диссипативные процессы, в том числе и на разрушение. Если разделение пластины не произошло, то ее скорость в соответствии с законом сохранения количества движения установится равной $v_k = P_0/\rho L$, где ρ — плотность материала образца. При этом диссипировавшая в образце энергия определяется как

$$E_d = E_0 - \frac{1}{2} P_0^2 / \rho L, \quad (1)$$

а величина работы разрушения E_p может быть оценена сверху приравниванием ее E_d в (1).

В случае соударения пластин из одного материала кинетическая энергия и количество движения ударника практически полностью переходят в импульс сжатия в образце. Если экспериментально найдена, как это делалось в [4—6], минимальная скорость соударения, при которой происходит полный откол в образце (при этом скорости частей разрушенного образца равны, поскольку условия для разрушения предельны), то соотношение (1) может быть использовано для оценки сверху работы разрушения в виде

$$E_p \leq E_d = 1/2 \cdot \rho l v^2 (1 - l/L), \quad (2)$$

где l , v — толщина и скорость ударника.

В табл. 1 приведены результаты расчета по (2) с использованием литературных данных [4—6] поглощенной при откольном разрушении ряда материалов энергии E_d . Из таблицы видно, что в большинстве случаев рассчитанная величина E_d возрастает с увеличением толщины ударника. К сожалению, экспериментальной информации недостаточно для того, чтобы выделить долю энергии, поглощенной в зоне разрушения, но, вообще говоря, возрастание работы разрушения с увеличением толщины ударника не противоречит физическим представлениям. Зона

Таблица 1

Материал	l , мм	L , мм	v , м/с	E_d , 10^6 Дж/м ³	Литература
Медь холоднокатаная электролитическая	1,55—1,70	5,49	147,5—153	1,08—1,23	[4]
	2,9—3,5	6,50	122—128	1,07—1,18	
Ст. 08 КП	0,5	1	250	0,61	[6]
	1	2	205—230	0,82—1,04	
	2	4	160—180	1,00—1,27	
Алюминий АМг6 лист пруток »	1	2	265	0,47	[6]
	3	5	210—230	0,7—0,84	
	3	5	360—390	2,06—2,41	
	5	10	220—240	1,60—1,91	
Оргстекло	1	2	127—134	0,048—0,053	[5]
	2	4	102—108	0,061—0,069	
	2,8	7	98—102	0,095—0,103	

разрушения имеет конечную толщину, и возрастание полной работы разрушения вполне может быть объяснено увеличением объема разрушаемого материала при увеличении толщины ударника.

Во втором из обсуждаемых здесь методов исследования откола проводится регистрация скорости свободной тыльной поверхности образца $W(t)$.

Падение величины растягивающих напряжений при разрушении приводит к появлению волны сжатия, выходящей на поверхность в виде «откольного импульса». При этом разрушающие напряжения определяются по величине ΔW уменьшения скорости (от максимальной) к моменту выхода на поверхность откольного импульса, а завершение разрушения может быть установлено по достижении постоянной средней скорости поверхности и, следовательно, откольной пластины в целом. Как правило, подобные измерения проводятся с нагрузками, исходные амплитуды которых существенно выше необходимых для разрушения и, поскольку запас энергии после разрушения можно оценить только для откольной пластины, данных для оценки работы разрушения по (1) недостаточно. В этом случае работу разрушения можно оценить следующим образом.

Пусть в эксперименте плоскость откола задана искусственно заранее, так что на отделение от образца откольной пластины энергия не затрачивается. Можно в принципе подсчитать запас энергии E_1 в искусственной откольной пластине

$$E_1 = \int_{L-h}^L (\rho u^2/2 + \rho \epsilon) dx, \quad (3)$$

где h — толщина откольной пластины; $u(x)$, $\epsilon(x)$ — распределение массовой скорости и удельной внутренней энергии по толщине пластины. При естественном отколе часть запаса энергии в откольной пластине тратится на разрушение, некоторая часть передается в глубь образца и после завершения разрушения и прекращения торможения откольной пластины в ней остается запас энергии E_2 . Работу разрушения можно затем оценить сверху как [11] $E_p \leq E_1 - E_2$.

Для определения E_1 не обязательно проводить опыты с искусственным отколом. При регистрации профилей $W(t)$ фиксируется выход на поверхность части падающего исходного импульса сжатия, затем «откольного импульса» и затухающие колебания скорости, связанные с ре-

Т а б л и ц а 2

Материал	W_{\max} , м/с	h , мм	σ^* , ГПа	v_1 , м/с	v_2 , м/с	$\frac{E_1 - E_2}{10^8}$ Дж/м ²
Медь М2	265	1,1	1,05—1,2	243	218	0,5
Железо «армно»	319	1,1	1,55—1,85	290	260	0,7
Алюминий АД1	430	1,95	0,76—0,92	396	362	0,7
Дюралюминий Д16	420	1,8	0,7—0,77	366	314	0,85
Никель НП2	245	1,45	1,49	228	197	0,85
Титан ВТ6	490	1,7	3,4—3,9	403	325	2,0
Нержавеющая сталь X18Н10Т	390	1,67	1,95—2,45	354	250	4,1

верберацией откольного импульса между свободной тыльной поверхностью и поверхностью разрушения образца. По периоду реверберации определяется толщина откольной пластины h . Подсчет E_1 может быть выполнен затем в акустическом приближении с использованием экспериментального профиля $W(t)$ для исходного импульса. При этом для подстановки в (3) $\varepsilon - \varepsilon_0 = p^2/2\rho^2c^2$, где c — скорость звука, p — давление, распределения по откольной пластине $u(x)$ и $p(x)$ в момент t_0 начала растяжения в будущем сечении откола определяются как

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{1}{2} \left[W\left(t_0 + \frac{L-x}{c}\right) + W\left(t_0 - \frac{L-x}{c}\right) \right], \\ p(x) &= \frac{1}{2} \rho c \left[W\left(t_0 + \frac{L-x}{c}\right) - W\left(t_0 - \frac{L-x}{c}\right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Обработка экспериментальных данных показывает, что для случаев, когда амплитуда падающего импульса в несколько раз превышает значение откольной прочности, дефект энергии $E_1 - E_2$ без существенной по сравнению с (3), (4) потери точности может быть определен как

$$E_1 - E_2 = \frac{1}{2} \rho h (v_1^2 - v_2^2),$$

где v_1 — определяемая по профилю $W(t)$ для исходного импульса средняя скорость предполагаемой искусственной откольной пластины; v_2 — конечная средняя скорость естественной откольной пластины. Для свободно летящей пластины величины v_1 и v_2 определяются делением смещения поверхности за период t_k колебаний ее скорости $S = \int_t^{t+t_k} W dt$ на величину t_k .

В табл. 2 приведены рассчитанные по экспериментальным [2, 3] профилям $W(t)$ значения дефекта энергии откольной пластины $E_1 - E_2$ ряда металлов и сплавов. Эксперименты проведены в условиях нагружения образцов толщиной 10—15 мм ударом алюминиевой пластины толщиной 2 мм со скоростью 450—700 м/с. Погрешность определения $E_1 - E_2$ оценивается в 10—20%. В таблице приведены также максимальные W_{\max} и средние v_1 , v_2 значения скорости поверхности, толщины откольных пластин h и величины откольной прочности σ^* из [2, 3]. Видно, что ряд по работе разрушения отличается от ряда по прочности, следовательно, работа разрушения существенно дополняет описание прочностных характеристик материалов в условиях откола.

Приведенные в табл. 1, 2 результаты расчета дефекта энергии при разрушении по порядку величины близки к оценкам работы разрушения в [9], но получены более последовательным способом без привлечения косвенно определяемых и завышенных значений растягивающих напряжений.

По-видимому, критерий откола не может быть сведен только с сопоставлению запаса энергии в образце (или его части) и работы разру-

шения. Для инициирования разрушения необходимо создать в образце растягивающие напряжения, уровень которых определяется характеристиками потенциальных очагов разрушения и должен находиться независимо. Во всяком случае величина работы разрушения может быть использована для оценки возможности полного откола и скорости откольной пластины и является вполне ясной характеристикой материала.

Автор благодарит А. Н. Дремина и А. Л. Ни за полезные дискуссии.

Поступила в редакцию 5/VIII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. L. J. Cohen, И. М. Berkowitz. Int. J. Fract. Mech., 1971, 7, 2, 183.
2. Г. И. Канель, В. В. Щербань. ФГВ, 1980, 16, 4, 93.
3. Г. И. Канель. ФГВ, 1982, 18, 3.
4. J. H. Smith. ASTM Spec. Techn. Publ., 1962, 336, 264.
5. Б. А. Тарасов. Проблемы прочности, 1972, 12, 63.
6. Б. А. Тарасов. Проблемы прочности, 1974, 3, 121.
7. L. Seaman, D. R. Curran, D. A. Shockey. J. Appl. Phys., 1976, 47, 11, 4814.
8. Ю. И. Фадеев. — В сб.: Динамика сплошной среды (Динамические задачи механики сплошных сред). Вып. 32. Новосибирск, 1977.
9. А. Г. Иванов. ФГВ, 1975, 11, 3, 475.
10. Г. И. Канель, Л. Г. Черных. ПМТФ, 1980, 6.
11. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.

РЕАКЦИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КАМЕР ПРИ ПОДРЫВЕ В НИХ УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ

*А. Г. Иванов, В. А. Могилев, А. А. Сиротов,
В. Н. Софронов, Ю. А. Фатеев
(Москва)*

В связи с развитием научно-технических исследований, в которых используются заряды взрывчатого вещества, растет потребность во взрывных камерах, способных выдерживать подрывы достаточно больших масс ВВ. Традиционно несущая способность (под несущей способностью взрывной камеры понимается предельная масса заряда, подрыв которой не приводит к появлению пластических деформаций в стенке) повышается за счет увеличения массы металла как силового элемента, т. е. увеличения либо толщины стенки, либо габаритов конструкции. В настоящей работе приведены результаты экспериментального и расчетного изучения реакции трехслойной взрывной камеры, один из слоев которой выполнен из бетона.

Эксперимент

Экспериментальная информация о реакции камеры на взрывное нагружение получена в опытах на двух одинаковых образцах, схематический вид и геометрические размеры которых показаны на рис. 1, а характеристики сталей и бетона приведены в таблице. Внутренняя труба образцов имела сварной шов по образующей, а наружная — по винтовой линии. Методика испытаний состояла в том, что от опыта к опыту увеличивалась погонная масса цилиндрического заряда ВВ ($\mu_{ВВ}$) из состава ТГ 50/50, устанавливаемого соосно с трубами, пока не происходило полного разрушения взрывных камер. Аналогичным образом отдельно испытаны трубы, такие же как и те, что входили в состав железобетонных взрывных камер. От опыта к опыту измерялось приращение (u) радиуса внутренней и наружной камер в фиксированных сечениях вдоль