

## КИНЕТИКА РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ6М В УСЛОВИЯХ ОТКОЛА

Г. И. Канель, С. В. Разоренов, В. Е. Фортков  
(Черноголовка)

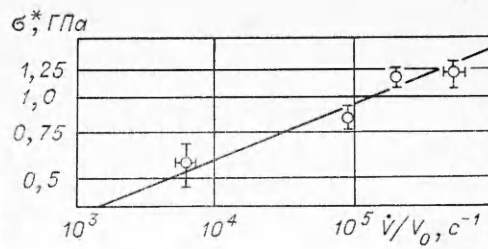
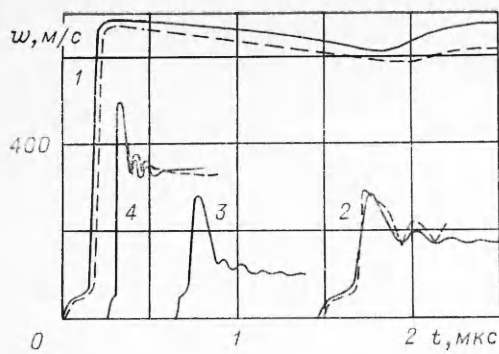
Известно, что величина разрушающих напряжений зависит от длительности действия нагрузки, однако количественное выражение этой зависимости остается неясным. В условиях откола при весьма кратковременных воздействиях получены, как сообщается, например, в [1], величины растягивающих напряжений в металлах, приближающиеся к значениям теоретической прочности на разрыв. Однако использованный в [1] метод изучения откольных явлений, основанный на анализе сохранных после испытаний образцов, может давать значительное завышение получаемых значений разрушающих напряжений [2]. В этом отношении наиболее достоверным и информативным является метод определения откольной прочности по результатам непрерывной регистрации профилей скорости свободной тыльной поверхности образцов  $w(t)$ . В данной работе проведены измерения профилей  $w(t)$  и определены величины откольной прочности алюминиевого сплава АМГ6М в широком диапазоне характерных длительностей падающих импульсов нагрузки. С учетом полученных данных модифицирована предложенная ранее [3] континуальная модель разрушения и проведено сопоставление с экспериментальными данными результатов расчетов с использованной предложенной кинетики разрушения.

Исследуемые образцы изготавливались из листового материала толщиной 1,8—10 мм. Поперечные размеры образцов составляли 80—120 мм. Одномерные импульсы сжатия в образцах генерировались ударом алюминиевой фольги толщиной 0,19—0,40 мм со скоростью  $675 \pm 15$  м/с или детонацией заряда взрывчатого вещества (взрывной линзы) в контакте с образцом. Метание фольг осуществлялось с помощью взрывных устройств, подобных описанному в [2]. Непрерывная регистрация профилей скорости свободных тыльных поверхностей образцов проводилась с использованием емкостных датчиков [4]. В зависимости от требуемых разрешающей способности и времени регистрации диаметр измерительного электрода 5—20 мм, а расстояние между электродом и поверхностью образца 1—6 мм соответственно.

Результаты регистрации изменения скорости поверхности образца  $w$  со временем  $t$  приведены сплошными линиями на фиг. 1, где каждая кривая получена усреднением данных 2—5 опытов. Условия нагружения указаны в таблице. Применение емкостных датчиков диаметром 5 мм обеспечивает разрешение времени нарастания скорости поверхности во фронте ударной волны на уровне 10—15 нс. Для ударных волн с амплитудой ниже 3 ГПа регистрируемое время нарастания существенно больше этого предела, что согласуется с результатами измерений с применением лазерной интерферометрии [5].

На профилях  $w(t)$  четко выделяется выход на поверхность упругого предвестника с амплитудой 0,37 ГПа, что соответствует динамическому пределу текучести  $\sigma_T = 0,18$  ГПа. Вслед за упругим предвестником фиксируется выход на поверхность пластической ударной волны и головной

Номер кривой на фиг. 1	Условия нагружения	Толщина образца, мм	$w_0$ , м/с	$\Delta w$ , м/с	$\Delta h$ , мм	$\frac{dw}{dt}$ , $10^6$ м/с <sup>2</sup>	$\sigma^*$ , ГПа	$\frac{\Delta E}{10^5}$ Дж/м <sup>2</sup>
1	Взрывная линза	10,0	$685 \pm 15$	$75 \pm 15$	4,7	$66 \pm 5$	$0,57 \pm 0,1$	—
2	Ударник, $\delta = 0,40$ мм	9,6	$283 \pm 6$	$113 \pm 5$	0,61	$950 \pm 50$	$0,83 \pm 0,08$	0,18
3	Ударник, $\delta = 0,19$ мм	4,4	$285 \pm 5$	$160 \pm 5$	0,34	$2100 \pm 100$	$1,15 \pm 0,05$	0,15
4	»	1,8	$495 \pm 15$	$160 \pm 15$	0,18	$5500 \pm 1000$	$1,2 \pm 0,12$	0,19



Ф и г. 2

Ф и г. 1

части падающей волны разрежения. Отражение импульса сжатия от свободной поверхности сопровождается появлением растягивающих напряжений в образце, которые приводят к его разрушению. В результате падения растягивающих напряжений при разрушении появляется волна сжатия (откольный импульс). Затухающие колебания скорости поверхности связаны с многократными отражениями откольного импульса от поверхности образца и зоны разрушения. Из приведенных профилей видно, что на фоне колебаний скорости поверхности заметное торможение откалываемой пластины продолжается в течение примерно 0,2 мкс. По-видимому, это и есть характерное время, необходимое для завершения процесса разрыва образца в данных условиях.

Растягивающие напряжения в плоскости откола  $\sigma^*$  определялись из профилей  $w(t)$  по разности  $\Delta w$  скорости на первом максимуме и первом минимуме [6, 7]:

$$\sigma^* = (1/2)\rho_0 c_0 (\Delta w + \delta w),$$

где  $\rho_0 = 2,61 \text{ г/см}^3$  — плотность материала;  $c_0$  — объемная скорость звука, принятая равной средней для алюминиевых сплавов величине 5,3 км/с;  $\delta w$  — поправка, учитывающая нагон фронтом откольного импульса, распространяющимся по растянутому материалу со скоростью продольной упругой волны  $c_l = 6,4 \text{ км/с}$ , разгрузочной части исходного импульса сжатия, имеющей скорость  $c_0$ . С учетом градиентов скорости в падающем импульсе  $\dot{w}_1$  и во фронте откольного импульса  $\dot{w}_2$  величина  $\delta w$  оценивается, как нетрудно показать, выражением

$$\delta w = \left( \frac{h}{c_0} - \frac{h}{c_l} \right) \frac{|\dot{w}_1 \dot{w}_2|}{|\dot{w}_1| + \dot{w}_2},$$

где  $h$  — толщина откольной пластины, определяемая по периоду реверберации в ней откольного импульса:  $h = (1/2)c_l \Delta t$ . Найденные значения откольной прочности сплава приведены в таблице. Там же даны значения работы разрушения, оцененные по величине потери кинетической энергии  $\Delta E$  откалываемой пластины в процессе ее отделения от образца [8]. Погрешность определения работы разрушения составляет  $\sim 20\%$ , в этих пределах величина  $\Delta E$  практически одинакова для трех условий нагружения.

Появление минимума на профиле  $w(t)$  можно интерпретировать как свидетельство достижения скорости роста объема трещин или пор  $\dot{V}_T$ , равной скорости деформирования в разгрузочной части падающего импульса  $\dot{V} \approx -(1/2)\dot{w}_1/\rho_0 c_0$  — при таком соотношении скоростей происходит экранировка части падающего импульса [9]. Судя по соотношению времен первого и последующих колебаний скорости поверхности, заметной задержки разрушения нет, и полученные значения разрушающих напряжений практически соответствуют началу разрушения.

Результаты измерений откольной прочности представлены на фиг. 2 в виде зависимости разрушающих напряжений  $\sigma^*$  от скорости деформи-

рования  $\dot{V}/V_0$  в логарифмических координатах. В пределах погрешности измерений экспериментальные данные описываются соотношением

$$(1) \quad \sigma^* = 0,093(\dot{V}/V_0)^{0,2},$$

откуда зависимость начальной скорости разрушения от напряжения может быть представлена в виде

$$(2) \quad \dot{V}_T = 1,45 \cdot 10^5 \sigma^5 V_0,$$

где  $\sigma$ , ГПа;  $\dot{V}_T$ ,  $\text{см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $V_0$  — удельный объем сплошного материала при нулевом давлении.

Откольные явления в алюминии АМг6 ранее исследовались [10, 11] путем наблюдения сохраненных после испытаний образцов и определения пороговых скоростей соударения, при которых появляются первые признаки разрушения или полный откол. При этом в [10] зарождение разрушения наблюдалось при напряжениях 1,3—1,55 ГПа (пороговые скорости соударения пластин толщиной 1—3 и 2—5 мм — 180—230 м/с), а полный откол — при напряжениях 1,5—1,8 ГПа (пороговые скорости соударения — 210—265 м/с). В то же время в [11] при нормальных начальных условиях начало откола наблюдалось лишь при напряжении 3 ГПа, хотя длительность импульса нагрузки в этой работе была наибольшей. И те и другие данные значительно превышают значения откольной прочности, полученные из профилей скорости поверхности образцов. По-видимому, в основном это расхождение связано с отсутствием объективных критериев для установления порогов разрушения. Можно также отметить не анализируемое обычно влияние условий сохранения и краевых эффектов на результат определения пороговых скоростей соударения.

Надежность метода определения разрушающих напряжений по результатам регистрации движения поверхности образца убедительно подтверждается наблюдениями появления откольного импульса в экспериментах с увеличением амплитуды исходной нагрузки от малых значений до величины, превышающей откольную прочность образца [12, 13]. При сильной зависимости (2) скорости разрушения от напряжения едва ли можно говорить о возможности значительных перенапряжений, поэтому полученные в [10, 11] значения откольной прочности следует признать завышенными. Тем не менее расхождение результатов различных способов исследования откольных явлений указывает на необходимость дальнейшего изучения физического механизма зарождения и развития разрушений в данных условиях.

Соотношение (1) может быть использовано для оценки возможности инициирования разрушения и толщины откольной пластины при профилях импульсов нагрузки приблизительно треугольной формы. Для расчетов разрушений в случаях произвольно изменяющейся нагрузки наиболее перспективен континуально-кинетический подход [14], описывающий разрушение как непрерывный процесс накопления повреждений в материале. В [3] предложено простое кинетическое соотношение, описывающее скорость роста удельного объема трещин или пор  $\dot{V}_T$  как функцию действующего напряжения  $\sigma$  и достигнутой степени разрушения  $V_T$ :

$$(3) \quad \dot{V}_T = K_1 \left( |\sigma| - \sigma_0 \frac{a}{V_T + a} \right) (V_T + V_{T0}) \text{sign}(\sigma) \quad \text{при} \quad |\sigma| > \sigma_0 \frac{a}{V_T + a},$$

где  $\sigma_0$  — начальный порог разрушения;  $V_{T0}$  — удельный объем потенциальных очагов разрушения;  $K_1$  — константа, обратно пропорциональная вязкости материала;  $a$  — константа, определяющая падение порогового напряжения по мере разрушения и имеющая величину порядка 0,01  $V_0$ . При численном моделировании экспериментов соотношение (3) обеспечивает хорошее согласие с результатами измерений, когда характерная длительность исходного импульса нагрузки изменяется примерно на порядок. Представленные в данной работе эксперименты охватывают два порядка

по скорости деформирования, и точности соотношения (3) для описания полученных данных оказывается недостаточно. Этого следовало ожидать, так как ясно, что реально в материале существует спектр очагов разрушения, инициируемых при различных уровнях напряжения. В связи с этим константа  $V_{т0}$  в соотношении (3) заменена выражением

$$(4) \quad V_{т0} = K_2 \sigma^n.$$

Так как при подстановке (4) в (3) начальная скорость разрушения получается равной

$$\dot{V}_T = K_1 K_2 \sigma^{n+1},$$

то для определения константы  $n$  и произведения  $K_1 K_2$  можно воспользоваться соотношением (2). Выбор значений коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  остается довольно произвольным, но практика расчетов откольных разрушений с использованием (3) при  $V_{т0} = \text{const}$  показывает, что хорошее согласие с экспериментальными данными достигается при величине  $K_1 \sim 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с} / \text{кг}$ . Величина предела прочности  $\sigma_0$  является некоторой промежуточной между истинным напряжением разрыва в статических условиях и значениями откольной прочности; в данной работе она оценивалась линейной экстраполяцией экспериментальных результатов по откольной прочности к нулевой скорости деформирования.

На фиг. 1 штриховыми линиями показаны профили  $w(t)$ , полученные при численном моделировании проведенных экспериментов с использованием кинетики разрушения в виде (3), (4). Расчет проводился сквозным конечно-разностным методом по схеме «крест» с расщеплением по физическим процессам. Ввиду того что амплитуды моделируемых нагрузок относительно невелики, в качестве уравнения состояния использовалась ударная адиабата алюминия. Полный удельный объем вещества  $V$  представлялся суммой  $V = V_{\text{спл}}^{(p)} + V_T$ , давление в сплошной компоненте  $V_{\text{спл}}$  принималось равным среднему по сечению. В случае нагружения взрывной линзой в расчете задавался треугольный профиль скорости левой границы, в остальных вариантах рассчитывалось соударение пластин. Сопротивление деформированию описывалось моделью упруговязкопластического тела с нелинейной вязкостью  $\eta$ , определяемой выражением

$$\eta = \eta_0 \exp[-(|\tau| - \tau_T) / \tau_0 (1 + \alpha \varepsilon)],$$

где  $\tau$  — максимальное напряжение сдвига;  $\tau_T$  — напряжение сдвига на статическом пределе текучести;  $\varepsilon = \int_{V_0}^V \frac{dV}{V}$  — деформация;  $\alpha$  — константа упрочнения;  $\tau_0, \eta_0$  — константы материала. При напряжениях  $|\tau| < \tau_T$  материал ведет себя упруго. Зависимость модулей упругости от давления строилась в предположении постоянства коэффициента Пуассона [15]. Предполагалось, что по мере разрушения предел текучести, модуль сдвига и коэффициент вязкости уменьшаются пропорционально пределу прочности, т. е.

$$\tau_T^{\text{эф}} = \tau_T a / (a + V_T), \quad \eta^{\text{эф}} = \eta a / (a + V_T), \quad G^{\text{эф}} = G(p) a / (a + V_T).$$

Приведенные на фиг. 1 данные получены в расчетах со следующими константами материала:  $K_1 = 10^8 \text{ ГПа}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $K_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}^{-1} / \rho_0$ ,  $\sigma_0 = 0,5 \text{ ГПа}$ ,  $a = 10^{-2} / \rho_0$ ,  $\eta_0 = 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $\tau_T = 0,065 \text{ ГПа}$ ,  $\tau_0 = 5 \text{ МПа}$ ,  $\alpha = 10$ . Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает, что предложенная феноменологическая модель разрушения обеспечивает вполне удовлетворительное описание наблюдаемых откольных явлений в широком диапазоне скоростей деформирования.

В заключение авторы благодарят Л. Г. Ермолова за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борин И. П., Новиков С. А. и др. О кинетике разрушения металлов в субмикросекундном диапазоне долговечности.— ДАН СССР, 1982, т. 266, № 6.
2. Канель Г. И. Сопротивление металлов откольному разрушению.— ФГВ, 1982, № 3.
3. Сугак С. Г., Канель Г. И. и др. Численное моделирование действия взрыва на железную плиту.— ФГВ, 1983, № 2.
4. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности.— Приборы и техника эксперимента, 1963, № 1.
5. Johnson T. N., Barker L. M. Dislocation dynamics and steady plastic wave profiles in 6061-T6 aluminium.— J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, N 11.
6. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении.— Физика металлов и металловедение, 1966, т. 21, № 4.
7. Степанов Г. В. Откольное разрушение металлов в плоских упругопластических волнах нагрузки.— Проблемы прочности, 1976, № 8.
8. Канель Г. И. О работе откольного разрушения.— ФГВ, 1982, № 4.
9. Канель Г. И., Черных Л. Г. О процессе откольного разрушения.— ПМТФ, 1980, № 6.
10. Тарасов Б. А. Сопротивление разрушению пластин при ударном нагружении.— Проблемы прочности, 1974, № 3.
11. Батюков Ю. В., Новиков С. А. и др. Влияние температуры образца на величину разрушающих напряжений при отколе в алюминиевом сплаве АМГ-6.— ПМТФ, 1979, № 3.
12. Cochran S., Banner D. Spall studies in uranium.— J. Appl. Phys., 1977, vol. 48, N 7.
13. Канель Г. И., Петрова Э. И. Прочность титана ВТ6 в условиях ударно-волнового нагружения.— В кн.: Детонация. Черногловка, 1981.
14. Davison L., Stevens A. L. Continuum measures of spall damage.— J. Appl. Phys., 1972, vol. 43, N 3.
15. Воробьев А. А., Дремин А. И., Канель Г. И. Зависимость коэффициентов упругости алюминия от степени сжатия в ударной волне.— ПМТФ, 1974, № 5.

Поступила 24/VII 1983 г.

УДК 532.527 : 535.211

## ВИХРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛИМЕРЫ

А. Э. Аверсон, М. В. Алексеев, В. П. Борисов

(Чебоксары)

Воздействие лазерного излучения на различные вещества широко исследуется с точки зрения газодинамики выброса продуктов испарения или разложения при коротких импульсах большой плотности энергии [1—4]. В меньшей степени изучены эти вопросы при плотностях излучения, используемых в настоящее время для исследования механизма воспламенения твердых горючих веществ [5—6].

В данной работе исследована гидродинамика оттока продуктов деструкции полимеров под действием лазерного излучения с плотностью потока  $q < 10$  кВт/см<sup>2</sup>. В качестве мишеней использовались образцы из полиметилметакрилата (ПММА) и эбонита размером, намного превышающим характерный размер пятна облучения.

Опыты проводились в среде воздуха при  $T = 293$  К,  $p = 10^5$  Па в закрытой камере объемом  $0,1 \times 0,1 \times 0,3$  м<sup>3</sup>, снабженной окнами для наблюдения и ввода лазерного излучения. Луч непрерывного лазера с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм (или  $\lambda = 1,06$  мкм) фокусировался сверху на поверхность исследуемого вещества сферическим зеркалом, при перемещении которого диаметр пятна облучения изменялся в пределах 1—4 мм. Длительность импульса облучения задавалась механическим затвором с разрешением 0,2 мс, а плотность падающего потока регулировалась в пределах  $20—10^4$  Вт/см<sup>2</sup> путем изменения либо выходной мощности лазера, либо диаметра пятна облучения.

Визуализация течения продуктов деструкции производилась методом лазерного ножа [7] в стробоскопическом режиме. Для этого луч гелий-неонового лазера системой цилиндрических линз преобразовывался в плоскопараллельный и прерывался obturatorом с заданной частотой. Для наблюдения за характером движения окружающей среды в камере создава-