

3. Блум Э. Я., Кронкалс Г. Е., Федин А. Г. Термомагнитная конвекция при поперечном обтекании цилиндра. — «Магнитн. гидродинамика», 1977, № 1, с. 28—34.
4. Бирх Р. В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости. — ПМТФ, 1966, № 3, с. 69—72.
5. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Мызников В. М. Об устойчивости плоскопараллельного конвективного течения жидкости в горизонтальном слое. — ПМТФ, 1974, № 1, с. 95—100.
6. Hart J. E. Stability of the flow in a differentially heated inclined box. — «J. Fluid Mech.», 1971, vol. 47, pt 3, p. 547—576.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.—Л., Гостехиздат, 1954.

УДК 620.171.3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦА НА ВЕЛИЧИНУ РАЗРУШАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКОЛЕ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ АМГ-6

*Ю. В. Батъков, С. А. Новиков, В. А. Синицын,
Ю. С. Соколов, А. В. Чернов*

(Москва)

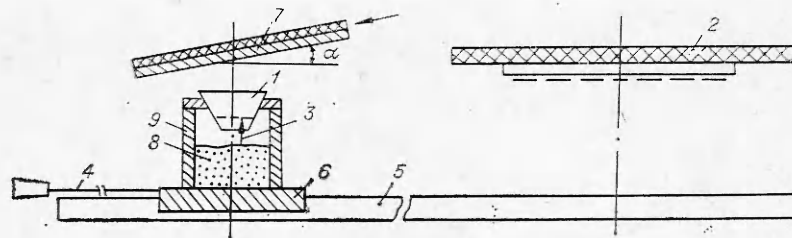
Исследование температурной зависимости прочностных характеристик конструкционных материалов при интенсивных ударных нагрузках, в том числе при взрывном нагружении, представляет в настоящее время большой практический интерес. Осуществление нагружения и проведение необходимых измерений в подобного рода экспериментах связано с определенными техническими трудностями. Поэтому число работ, посвященных этому вопросу, весьма ограничено. В [1, 2] представлены данные об упругопластических свойствах ряда металлов при нормальной и повышенных температурах, полученные при исследовании параметров упругих волн, возбуждаемых взрывом. В [3, 4] проведены исследования зависимости величины разрушающих напряжений при отколе в стали и меди от температуры образца. В данной работе исследовано влияние температуры образца на величину разрушающих напряжений при отколе в широко применяемом алюминиевом сплаве АМГ-6 в области температур от 0 до 550°C, т. е. практически до температуры начала плавления * сплава.

Исследуемые образцы вырезались из одной заготовки и представляли собой диски диаметром 70 мм, толщиной 10 мм с конической (под углом 45°) боковой поверхностью.

Испытание образцов проводилось на специальной установке, схема которой приведена на фиг. 1.

Нагрев образца 1 осуществлялся лучистым тепловым потоком от ленточного нихромового нагревателя 2 мощностью 3 кВт (50А, 60В), смонтированного на термостойком экране. Температура образца контролировалась с помощью термопары 3 вплоть до момента нагружения образца. Время нагревания образца до температуры 550°C составляло ~20 мин. Неоднородность температуры по толщине образца в момент нагружения не превышала ~5°C. Нагретый образец с помощью тросика 4 дистанционно передвигался по направляющим 5 на специальной платформе 6 под нагру-

* Плавление сплавов и твердых растворов характеризуется температурным интервалом плавления. Для сплава типа АМГ-6 температура начала плавления ~570°, температура конца плавления ~640°C [5].



Ф и г. 1

жающее устройство 7. Нагружение образца осуществлялось ударом алюминиевой пластины ($110 \times 150 \times 4$ мм), разогнанной до необходимой скорости скользящей детонационной волной помещенного на ней слоя взрывчатого вещества (ВВ), инициируемого одновременно по одной из граней пластины из ВВ. Для предотвращения откола в ударнике последний отделялся от ВВ слоем пористого материала. Скорость ударника варьировалась изменением толщины слоя ВВ, одновременность удара по поверхности образца достигалась путем установки ударника под определенным углом к образцу, зависящим от скорости ударника. Образующиеся в результате нагружения образца откольные пластины улавливались в практически неповрежденном виде с помощью малопрочного пористого демпфера 8, расположенного в стальном стакане 9.

Метод определения величины разрушающего напряжения заключался в следующем: производилось ударное нагружение образца и визуально после опыта определялся факт наличия или отсутствия откола. (При необходимости образец разрезался вдоль оси, изготавливался шлиф и производился металлографический анализ.) При последовательном ступенчатом изменении скорости пластины-ударника определялись условия нагружения, при которых начиналось образование откола. За величину разрушающего напряжения при отколе $\sigma_{отк}$ принималась величина растягивающих напряжений в плоскости образования трещины, получаемая расчетным путем (при известных уравнениях состояния материала образца и ударника) или с помощью измеренного в опыте давления в волне сжатия в образце. Точность полученного таким образом значения $\sigma_{отк}$ определяется величиной шага изменения давления при ударе, которое в проведенных опытах равнялось ~ 2 кбар, и точностью примененного уравнения состояния. Так как величина разрушающих напряжений в сплаве АМГ-6 невелика, то одним из возможных подходов к их расчетному определению является применение акустической теории откола. Известно, что при отражении импульса сжатия от свободной поверхности в материале будет распространяться импульс той же формы, что и исходный, но противоположного знака. Следовательно, в акустическом приближении величина $\sigma_{отк}$ будет равна максимальной величине давления в волне сжатия, распространяющейся по образцу в том опыте, в котором отмечено начало образования откола. В расчетах для области малых давлений (до 10 кбар) скорость ударной волны принималась равной скорости продольной упругой волны в неограниченной среде (6,3 км/с), а для области выше 10 кбар использовалось уравнение состояния материала ударника и образца в виде линейного соотношения между волновой D и массовой u скоростями [6]

$$D = 5,25 + 1,39u.$$

Влияние температуры (предварительного нагрева) на вид уравнения состояния не учитывалось. В ряде опытов производилось измерение давле-

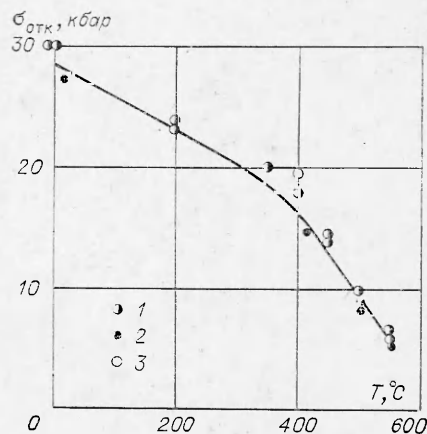
№ п/п	Скорость ударника, м/с	Температура образца, T°, C	Откольная прочность $\sigma_{отк}$, кбар	Примечание
1	400	0	30	Начало разрушения
2	400	-13	30	»
3	360	15	27	Нет откола
4	320	200	24	Начало разрушения
5	310	200	23	»
6	270	350	20	»
7	265	400	19.5	Откол
8	250	400	18	Начало разрушения
9	200	410	14.5	Нет откола
10	190	450	14	Начало разрушения
11	200	450	14.5	»
12	140	500	10	»
13	130	500	9	Нет откола
14	120	500	8	»
15	90	550	6.5	Начало разрушения
16	80	550	6	»
17	75	550	5.5	Нет откола

ния в образце с помощью манганинового датчика и аппаратуры, описанной в [7]. Толщина датчика вместе с изолирующими лавсановыми пленками составляла 0,12—0,16 мм, начальное сопротивление 35 Ом, площадь, занимаемая чувствительным элементом, $5 \times 6 \text{ мм}^2$. Измерения осуществлялись по мостовой схеме. Сила тока в датчике во время измерения 4,5А. Погрешность измерения амплитуды импульсных давлений не превышает $\pm 10\%$.

Результаты исследования сведены в таблицу. Полученные расчетным путем и измеренные в эксперименте амплитуды волн сжатия хорошо согласуются между собой, отличие не превышает 10%. Характерное время действия растягивающих напряжений τ , определяемое измеряемой в опыте длительностью импульса давления, составляет $1,3 \cdot 10^{-6}$ с. Условия испытания соответствовали скорости деформации $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$.

На фиг. 2 приведена зависимость величины разрушающих напряжений при отколе от температуры образца, построенная по данным таблицы. Величина $\sigma_{отк}$ при температуре 550°C (вблизи температуры начала плавления) в 5 раз меньше, чем при нормальной температуре, но тем не менее составляет довольно заметную величину ~ 6 кбар. Полученная зависимость имеет явно выраженную выпуклость вверх. Следует отметить, что относительно слабое уменьшение $\sigma_{отк}$ с повышением температуры на начальном участке зависимости $\sigma_{отк} = f(T)$ отмечалось ранее также для стали [3] и для меди [4].

Полученные в опытах длительность действия напряжений τ и величины разрушающих напряжений позволяют провести сравнение экспериментальных результатов с данными, следующими из кинетической теории прочности твердых тел [8], согласно которой разрушающее напряжение σ , долговечность τ (время от момента приложения



Ф и г. 2

нагрузки до момента разрушения) и температура T связаны уравнением

$$(1) \quad \tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right),$$

где k — постоянная Больцмана; τ_0 — период колебания атомов; U_0 , γ — константы материалов. Подставляя в это уравнение константы для алюминия [9] $U_0 = 52$ ккал/моль, $\gamma \cong 2$ ккал·мм²/моль·кг и значения $\sigma_{отк}$, полученные в опытах с различными значениями температуры образца, получим, что характерное время разрушения должно быть на много порядков меньше времени действия растягивающих напряжений в опыте.

В работе [9] отмечено значительное расхождение данных эксперимента и результатов применения термофлуктуационного уравнения (1) С. Н. Журкова в области времени действия напряжений порядка 10^{-6} с и нормальной температуры образцов при значениях констант τ_0 , U_0 , γ , определенных для области больших значений τ ($10^{-3} - 10^7$ с).

В работе [10] неприменимость кинетической теории прочности для описания явления откола объясняется тем, что в этом случае длина импульса растяжения сравнима с размерами образцов и работа разрушения происходит за счет запаса упругой энергии. За критерий откола принято равенство запаса упругой энергии растяжения работе, совершаемой при разрушении материала λ

$$\lambda = \int_0^{\tau} \frac{c\sigma^2 dt}{AE},$$

где τ — длительность волны разрежения; σ — напряжение; c — скорость звука; E — модуль продольной упругости; $A = 2(1 - \mu) [(1 + \mu)(1 - 2\mu)]^{-1}$; μ — коэффициент Пуассона. Так как в акустическом приближении амплитуды и длительности волны разрежения и волны сжатия равны, то, используя измеренные в наших опытах величины τ и σ (запись импульса давления манганиновым датчиком), можно оценить энергию разрушения сплава АМГ-6 при нормальной и повышенной температурах. При нормальной температуре $\lambda_n \approx 4,3 \cdot 10^5$ Дж/м², при температуре 500°С $\lambda_T \approx 0,7 \cdot 10^5$ Дж/м², т. е. энергия разрушения при $T \approx 500^\circ\text{C}$ в 6 раз меньше, чем при нормальной температуре.

Продолжение исследований явления откола при повышенных температурах, когда наиболее отчетливо должна проявляться зависимость величины разрушающих напряжений от времени, представляет несомненный интерес для уточнения функциональной зависимости основных параметров разрушения материалов (σ , τ и T) в еще недостаточно изученной области «микросекундной» длительности импульсов нагружения.

Поступила 21 III 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С. А., Свиницын В. А., Иванов А. Г., Васильев Л. В. Упругопластические свойства ряда металлов при взрывном нагружении. — ФММ, 1966, т. 21, вып. 3.
2. Новиков С. А., Свиницын В. А. О влиянии температуры на упругопластические свойства стали при взрывном нагружении. — «Проблемы прочности», 1976, № 12.
3. Новиков С. А., Дивнов И. И., Иванов А. Г. Исследование разрушения стали, алюминия и меди при взрывном нагружении. — ФММ, 1966, т. 21, вып. 4.
4. Новиков С. А., Соболев Ю. С., Глушак Б. Л., Свиницын В. А., Чернов А. В. Исследования влияния температуры на величину разрушающего напряжения при отколе в меди. — «Проблемы прочности», 1977, № 3.

5. Таблицы физических величин. М., Атомиздат, 1976.
6. Альтшулер Л. В., Корнер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнение состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений.— ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 3.
7. Батюков Ю. В., Вишневецкий Е. Д. Аппаратура для измерения импульсных давлений пьезорезистивными датчиками в диапазоне 0,1—20 ГПа.— В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., изд. ВНИИФТРИ, 1976.
8. Бетехтин В. И., Журков С. Н. Временная и температурная зависимость прочности твердых тел.— «Проблемы прочности», 1971, № 2.
9. Златин Н. А., Иоффе Б. С. О временной зависимости сопротивления отрыву при отколе.— ЖТФ, 1972, XLII, № 8.
10. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении.— ФГВ, 1975, № 3.

УДК 539.3.534.231.1

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ С ТРЕЩИНОЙ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ВОГНУТОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

И. С. Гузь, В. Н. Катанчик

(Харьков)

Взаимодействие рэлеевской волны со стационарной трещиной, расположенной на прямолинейной поверхности, рассматривалось в работах [1, 2]. Показано, что поверхностная волна при определенных условиях может вызвать динамические напряжения, достаточные для развития трещины. Однако отсутствуют исследования, в которых изучались бы вопросы взаимодействия поверхностной волны с трещиной, расположенной на криволинейном полупространстве, хотя на практике такой случай встречается чаще.

Данная работа методом динамической фотоупругости рассматривает взаимодействие поверхностной волны с краевой трещиной, расположенной вдоль и по нормали к вогнутому полупространству. Исследования проводились на образцах из полиметилметакрилата с размерами $350 \times 400 \times 15$ мм. Поверхностная волна длительностью до 50 мкс возбуждалась точечным микровзрывом на линейном участке образца, сопряженным с криволинейным. Взаимодействие поверхностной волны с трещиной регистрировалось в циркулярно-поляризованном свете скоростной кинокамерой СФР-1 с частотой $1,5 \cdot 10^6$ кадр/с.

Вначале рассматривалось распространение поверхностной волны вдоль вогнутого полупространства без трещины, а затем ее взаимодействие с трещиной. Кинограммы, иллюстрирующие распространение поверхностной волны вдоль вогнутого полупространства постоянного радиуса кривизны ($R = 50$ мм), приведены на фиг. 1. Они показывают, что при распространении волны Рэлея вдоль прямолинейного полупространства распределение напряжений в волне имеет сложную форму: три розетки напряжений, две из которых расположены непосредственно у поверхности полупространства впереди и позади основного возмущения. При движении волны по криволинейному полупространству происходит непрерывное перераспределение упругой энергии в поверхностной волне. На участке $0 < \alpha < 90^\circ$ (α — центральный угол) вначале наблюдается разворот и усиление приповерхностной розетки, расположенной впереди основного возмущения, за счет частичного ослабления последнего и второй приповерхностной розетки, а затем преобразование основного возмущения в объемную волну, распространяющуюся со скоростью по-