

УДК 539.3.620.1

ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛОВ В СУБМИКРОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ НАГРУЗКИ

© 2011 г.

Г.И. Канель

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

kanel@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Представлены результаты измерений динамических пределов упругости и откольной прочности металлов и сплавов. Получены температурно-скоростные зависимости напряжения течения и сопротивления разрушению в диапазоне скоростей деформирования $10^3 - 10^9 \text{ с}^{-1}$. Результаты измерений обсуждаются с точки зрения требований к определяющим соотношениям и моделям; приводятся примеры такого рода соотношений.

Ключевые слова: ударные волны, высокоскоростная деформация, разрушение, прочность, определяющие соотношения.

Исследования механических свойств материалов при скоростях деформирования 10^4 с^{-1} и более проводятся методом ударно-волнового нагружения испытуемых образцов. Измерения основываются на том факте, что структура волн и динамика волновых взаимодействий определяются, помимо термодинамического уравнения состояния вещества, процессами упругопластического деформирования и разрушения в материале. Для регистрации интенсивных волн сжатия и разрежения в твердых телах разработаны и используются методы непрерывных измерений волновых профилей с высоким пространственным и временным разрешением, суммируются новые и, в некоторых случаях, неожиданные результаты исследований прочностных свойств твердых тел при субмикросекундных длительностях ударно-волнового нагружения.

Информация о соотношении между скоростью пластического деформирования в ударной волне и величиной напряжения сдвига извлекается из экспериментальных данных двумя способами. Развитие пластической деформации непосредственно за фронтом упругого предвестника вызывает релаксацию напряжений и затухание последнего по мере его распространения. Скорость пластической деформации $\dot{\gamma}_p$ связана со скоростью затухания $d\sigma/dh$ соотношением [1]:

$$\left. \frac{d\sigma}{dh} \right|_{\text{HEL}} = -\frac{2}{3} \frac{G \dot{\gamma}_p}{c_l},$$

где G – модуль сдвига, c_l – скорость распространения упругого предвестника, равная продольной

скорости звука. Максимально возможные скорости деформирования реализуются непосредственно в пластических ударных волнах. Второй способ основан на измерениях скорости сжатия в пластических ударных волнах. Соответствующие значения девиаторных напряжений рассчитываются по отклонению линии Рэлея от ударной адиабаты вещества [2].

Эксперименты с ударными волнами в алюминии, в том числе в диапазоне микронных расстояний и пикосекундных длительностей [3, 4], показали, что затухание упругих предвестников волн ударного сжатия в этом материале описываются эмпирической зависимостью $\sigma_{\text{HEL}} = S(h/h_0)^{-\alpha}$ с показателем α , близким к 0.5. При этом реализуемые значения сдвиговых напряжений на расстояниях, пройденных волной, порядка 1 мкм достигают 3.4 ГПа, что близко к расчетному значению идеальной прочности алюминия на сдвиг [4]. Начальная скорость пластической деформации за фронтом упругого предвестника в алюминии, рассчитанная по скорости затухания предвестника, в диапазоне $10^3 - 10^9 \text{ с}^{-1}$ хорошо аппроксимируется зависимостью от сдвигового напряжения τ в виде $\dot{\gamma}_p = 2.9 \cdot 10^8 (\tau/\tau_0)^{2.75} \text{ с}^{-1}$, где $\tau_0 = 1 \text{ ГПа}$. Таким образом, зависимость скорости пластической деформации от напряжения гораздо сильнее линейной, ожидавшейся в предположении торможения дислокаций силами фононного трения. При равных сдвиговых напряжениях скорость деформирования в пластической ударной волне выше начальной скорости пластической деформации за фронтом упругого предвестника. Иными слова-

ми, вязкость материала падает по мере развития пластической деформации, что свидетельствует об интенсивном размножении элементарных носителей пластической деформации – дислокаций. В металлах и сплавах с повышенным пределом текучести затухание упругих предвестников происходит существенно медленнее, т.е. зависимость начальной скорости пластической деформации от напряжения гораздо слабее, чем в низкотвердых металлах.

Повышение температуры приводит к значительному возрастанию напряжения течения при ударном сжатии алюминия и некоторых других кристаллических материалов, что проявляется в возрастании амплитуды упругих предвестников, и увеличению времени нарастания параметров в пластической ударной волне. Этот эффект аномального термического упрочнения при высокоскоростной деформации связывается со сменой доминирующих механизмов торможения дислокаций [5]. Переход от одного механизма к другому в алюминии имеет место при скорости пластической деформации $(1-5) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, что хорошо согласуется с данными, полученными в экспериментах со стержнями Гопкинсона. Аномальное термическое упрочнение при высокоскоростной деформации, по-видимому, не является общим свойством всех кристаллических тел и проявляется в таких материалах, где напряжение течения сопоставимо с силами фононного трения. Новые и опубликованные ранее экспериментальные данные обсуждаются с точки зрения соотношения вкладов различных механизмов торможения дислокаций и на этой основе формулируются требования к определяющим соотношениям и моделям высокоскоростного деформирования. Пример эмпирического определяющего соотношения проверен численным моделированием ударных волн в алюминии и магниевом сплаве.

В настоящее время получена обширная экспериментальная информация о прочностных свойствах широкого круга материалов при отколе в микросекундном и наносекундном диапазоне длительностей воздействия. Получены [4] первые данные в пикосекундном диапазоне и скоростях деформирования $\sim 10^9 \text{ с}^{-1}$, найдено, что в этих условиях реализуется более 50% идеальной (предельно возможной) прочности алюминия. Зависимость скорости разрушения при отколе от величины растягивающего напряжения хорошо описывается степенной функцией, указывающей на достижение идеальной прочности при скорости растяжения $10^{10}-10^{11} \text{ с}^{-1}$. Увеличение температуры само по себе оказывает слабое влияние на сопротивление откольному разрушению металлов вплоть до температуры плавления. Значительно больший эффект в сплавах связан со структурными изменениями при отжиге. Вблизи температуры плавления зависимость резко усиливается в случае поликристаллических металлов и остается практически неизменной для монокристаллов. Результаты измерений обсуждаются с точки зрения требований к определяющим соотношениям и моделям высокоскоростного разрушения; приводится пример такого рода определяющего соотношения.

Список литературы

1. Duvall G.E. In: Stress Waves in Anelastic Solids / Eds. H. Kolsky, W. Prager. Berlin: Springer-Verlag, 1964.
2. Swegle J.W., Grady D.E. // J. Appl. Phys. 1985. V. 58(2) P. 692.
3. Гаркушин Г.В., Канель Г.И., Разоренов С.В. // ФТТ. 2010. Т. 52, №11. С. 2216.
4. Ашитков С.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92, №8. С. 568.
5. Kanel G.I., Razorenov S.V., Baumung K., Singer J. // J. Appl. Phys. 2001. No 90(1). P. 136.

RATE AND TEMPERATURE EFFECTS ON THE RESISTANCE TO DEFORMATION AND FRACTURE OF METALS IN A SUB-MICROSECOND LOAD DURATION RANGE

G.I. Kanel

Results of measurements of dynamic yield stress and spall strength of metals are presented. Rate and temperature dependences of the flow stress and the resistance to fracture are obtained for the strain rate range of 10^3 to 10^9 s^{-1} . The results are discussed in terms of requirements to constitutive relationships; examples of such relationships are presented.

Keywords: waves, high strain rates, fracture, strength, constitutive relationships.