

УДК 669.539.382.2

О ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Л. Б. Зуев, Б. С. Семухин, А. Г. Лунев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск

Исследована зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от действующего напряжения в пластически деформируемых поликристаллических металлах и сплавах. Установлено, что связь между действующим напряжением и скоростью ультразвука линейна, причем эта закономерность характерна для всех исследованных материалов. Предложен способ определения временного сопротивления отрыву материалов (предела прочности) при деформировании в области малых пластических деформаций без разрушения образцов.

В работах [1–4] показано, что скорость распространения ультразвука, измеряемая непосредственно при растяжении металлических образцов, сложным образом зависит от структуры материала, общей деформации и действующего напряжения. Ранее аналогичные данные в интервале меньших деформаций получены в [5, 6]. Представляет интерес исследование зависимости скорости распространения ультразвука V_s от действующего напряжения σ , типичный вид которой для латуни ЛС59-1 приведен на рис. 1. Три четко выраженных линейных участка этой зависимости описываются уравнением [3]

$$V_s = V_0 + \xi\sigma, \quad (1)$$

в котором эмпирические константы V_0 и ξ различны для разных стадий процесса. Из рис. 1 следует, что $\xi < 0$, однако возможны случаи (см., например, [1, 3]), когда $\xi > 0$, но в пределах одной стадии всегда $V_s \sim \sigma$ при коэффициенте корреляции $|\rho| \geq 0,9$.

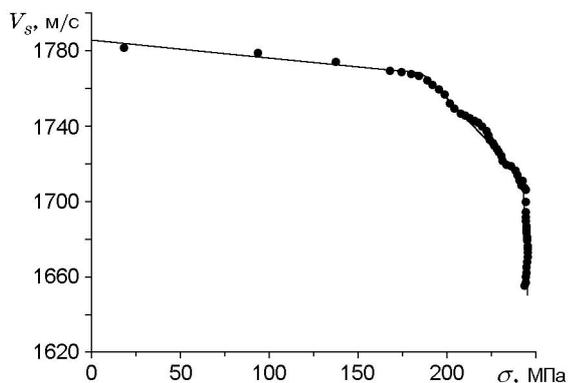


Рис. 1

Целью настоящей работы является определение области применимости соотношения (1) и оценка возможности его использования для определения механических характеристик неразрушающим способом. Получены зависимости $V_s(\sigma)$ для ряда материалов. Кроме латуни использовались сплавы различного технического назначения: стали 15ХСНД, 09Г2С, 12Х18Н10Т, трансформаторная сталь (Fe — 3 % Si), сплавы Э110 (Zr — 1 % Nb), 1420 (Al — 2,2 % Li — 5,6 % Mg) и 1450 (Al — 2 % Li — 3 % Cu), а также чистый кобальт (Co). У всех этих материалов отсутствует четко выраженный предел текучести,

а их кривые пластического течения σ – ϵ имеют вид параболы. Измерения скорости распространения ультразвука производились непосредственно во время растяжения плоских образцов методом автоциркуляции звуковых импульсов [5]. Методика проведения эксперимента детально описана в [7], поэтому здесь отметим только, что для измерений использовались импульсы поверхностных волн Рэлея с частотой заполнения 2 МГц.

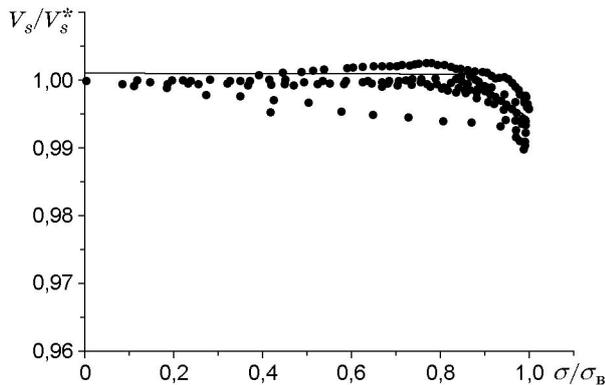


Рис. 2

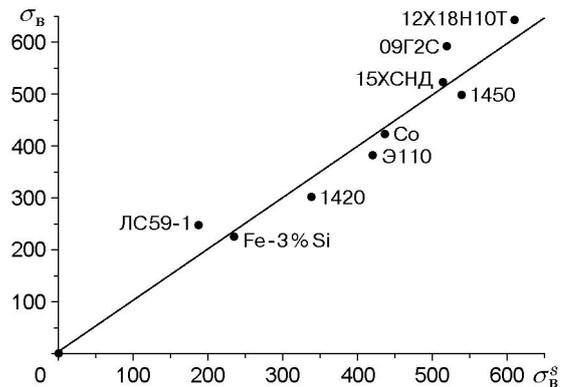


Рис. 3

В результате исследований установлено, что характер зависимостей $V_s(\sigma)$ для разных материалов в достаточной степени универсален. Поэтому, используя безразмерные координаты V_s/V_s^* и σ/σ_B (V_s^* — скорость звука в недеформированном материале, σ_B — временное сопротивление отрыву этого материала), можно получить общую для всех исследованных сплавов зависимость (рис. 2). При такой нормировке экспериментальные данные для различных сплавов близки, и первые два участка зависимости $V_s(\sigma)$ описываются соотношением, аналогичным (1):

$$V_s/V_s^* = \varkappa_i + \alpha_i \sigma/\sigma_B, \quad (2)$$

где $i = 1; 2$ — номер стадии; константы \varkappa_i и α_i не зависят от материала и могут быть определены по экспериментальным данным, представленным на рис. 2. Для первого участка ($\sigma/\sigma_B < 0,6$) зависимости (2) $\varkappa_1 = 1 \pm 2,7 \cdot 10^{-4}$, $\alpha_1 = -6,5 \cdot 10^{-3} \pm 4,7 \cdot 10^{-4}$, для второго ($0,6 < \sigma/\sigma_B < 1$) $\varkappa_2 = 1,03 \pm 3 \cdot 10^{-3}$, $\alpha_2 = -3,65 \cdot 10^{-2} \pm 3,2 \cdot 10^{-3}$.

Из (2) следует

$$\sigma_B = \alpha_i \sigma (V_s/V_s^* - \varkappa_i)^{-1}. \quad (3)$$

Очевидно, соотношение (3) может быть использовано для оценки временного сопротивления еще на стадии малых пластических деформаций без разрушения образца. Для этого достаточно измерить скорость ультразвука V_s при напряжении σ , вызывающем малую пластическую деформацию и лежащем в интервале $\sigma_{0,2} < \sigma < 0,6\sigma_B$ ($\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести).

На рис. 3 представлена зависимость между временным сопротивлением отрыву σ_B , определяемым по диаграмме одноосного растяжения, и временным сопротивлением отрыву σ_B^s , вычисленным по формуле (3). Скорость звука в нагруженном образце V_s определялась при деформации $\varepsilon \approx 1\%$, что соответствует напряжению $\sigma \approx 0,1\sigma_B$. Оказалось, что величины σ_B и σ_B^s связаны линейно: $\sigma_B = 0,96\sigma_B^s$, а коэффициент их корреляции $\rho \approx 0,94$ (рис. 3). Таким образом, значения временного сопротивления отрыву, полученные обоими способами, практически совпадают. Попытка использовать для расчета данные для значений $\sigma/\sigma_B > 0,6$ оказалась неудачной из-за большего разброса данных. Приведенные результаты можно считать обоснованием ультразвукового метода определения временного сопротивления отрыву без разрушения образцов по результатам испытаний в области малых пластических деформаций. Такой метод представляется перспективным для развития некоторых видов неразрушающего контроля механических свойств.

Как известно, упрочнение материалов определяется тем, насколько большие по амплитуде поля внутренних напряжений должны преодолевать дислокации при скольжении [8].

В то же время скорость распространения ультразвука тем меньше, чем в более напряженном состоянии находится материал [9]. Таким образом, величины σ_B и σ_B^s зависят от степени напряженности материала, что, видимо, и объясняет их корреляцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Бушмелева К. И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al // Журн. техн. физики. 2000. Т. 70, № 1. С. 52–56.
2. Семухин Б. С., Зуев Л. Б., Бушмелева К. И. Скорость звука в низкоуглеродистой стали, деформируемой на нижнем пределе текучести // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 197–201.
3. Zuev L. B., Semukhin B. S., Bushmelyova K. I., Zarikovskaya N. V. On the acoustic properties and plastic flow stages of deforming Al polycrystals // Mater. Lett. 2000. V. 42, N 1/2. P. 97–101.
4. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Бушмелева К. И., Зариковская Н. В. Скорость распространения ультразвука в поликристаллах Al с разным размером зерна // Физика металлов и металловедение. 2000. Т. 89, № 4. С. 111, 112.
5. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
6. Лебедев А. Б., Кустов С. В., Кардашов Б. К. О внутреннем трении и дефекте модуля Юнга в процессе деформирования кристаллов // Физика твердого тела. 1992. Т. 34, № 9. С. 2915–2921.
7. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1996.
8. Судзуки Т., Ёсинага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир, 1989.
9. Tokuoka T., Iwashimizu Yu. Acoustical birefringence of ultrasonic waves in deformed isotropic elastic materials // Intern. J. Solids Structures. 1968. V. 4, N 3. P. 383–389.

Поступила в редакцию 26/VII 2001 г.
