

НЕЛИНЕЙНЫЕ УПРУГИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ В95 И В95/nd

А.И. Коробов, Д.М. Крупин

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия
aikor42@mail.ru

Для описания нелинейных упругих свойств твердых тел используются упругие коэффициенты третьего порядка (УКТП). Они количественно описывают ангармонизм кристаллической решетки и используются для анализа взаимодействия акустических волн в твердых телах [1]. Для определения УКТП разработан ряд экспериментальных методов. Наиболее часто используется метод Терстона-Браггера [2], основанный на измерении зависимости скорости упругих волн в твердых телах от давления, и спектральный метод [1], основанный на измерении эффективности генерации второй акустической гармоники в поле акустической волны конечной амплитуды. Целью данной работы является исследование нелинейных упругих свойств сплава алюминия В95 и сплава В95/nd с добавлением частиц нанодиамаза спектральным методом. Ранее в [3] в этих материалах методом Терстона-Браггера были определены все УКТП.

Распространение акустических объемных волн (ОАВ) в твердых телах описывается уравнением движения [4]:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial a_j} \left[\frac{\partial U_i}{\partial a_m} T_{km} \right] = \frac{\partial^2 U_k}{\partial a_j \partial a_m} \left[\frac{\partial U_p}{\partial a_q} C_{ijkmpq}^* \right] \quad (1)$$

и уравнением состояния

$$T_{ij} = C_{ijkl} U_{kl} + \frac{1}{2} C_{ijk} \lg r U_{kl} U_{gr}, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность материала, $U_i = x_i - a_i$ – компонента единичного вектора смещения \vec{U} ; a_i – координата точки в исходном недеформированном состоянии, x_i – координата точки в данный момент, T_{ij} – тензор термодинамического напряжения, U_{kl} – тензор деформации, $C_{ijkmpq}^* = C_{ijkmpq} + (\delta_{kp} C_{ijmq} + \delta_{ik} C_{jmpq} + \delta_{ip} C_{jkmq})$, C_{ijkl} – коэффициенты упругости 2-го порядка, коэффициенты, C_{ijkmpq} – УКТП, которые описывают нелинейность, связанную с нелинейностью межмолекулярных сил, коэффициенты $(\delta_{kp} C_{ijmq} + \delta_{ik} C_{jmpq} + \delta_{ip} C_{jkmq})$ – описывают геометрическую нелинейность, которая определяется нелинейной связью между компонентами тензора деформаций и производными от компонент вектора смещений по координатам.

Распространение продольной ОАВ конечной амплитуды частоты f в твердом теле сопровождается генерацией 2 акустической гармоники на частоте $2f$. В случае изотропного твердого тела зависимость амплитуды 2 гармоники A_2 от амплитуды основной волны A_1 определяется выражением:

$$A_2 = [(Nk^2L)A_1^2]/8, \quad (3)$$

где $N = C_{111}^*/C_{11} = (C_{111} + 3C_{11})/C_{11}$ – нелинейный акустический параметр, $k=2\pi f/V_L$.

Нелинейные упругие свойства В95 and В95/nd были исследованы спектральным методом по эффективности генерации второй акустической гармоники на частоте $2f=10$ МГц при распространении в них продольной ОАВ конечной амплитуды на частоте $f=5$ МГц. Результаты экспериментов приведены на рис 1.

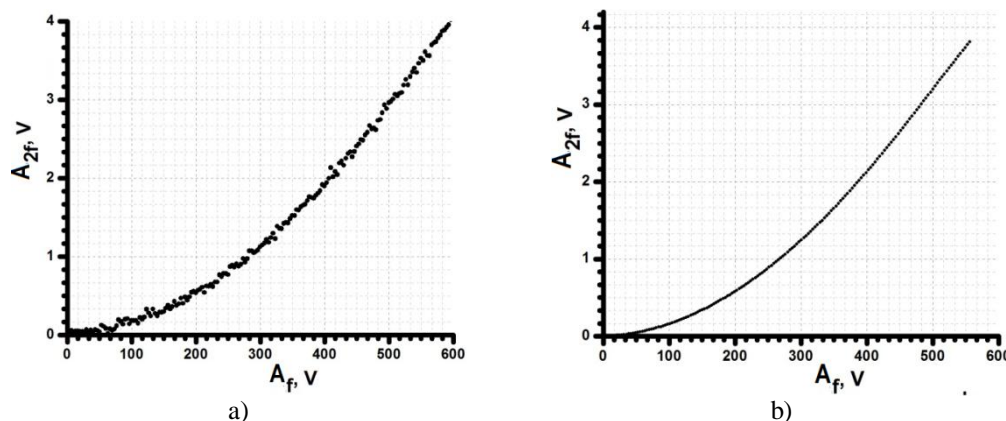


Рис 1. Зависимость амплитуды второй гармоники A_1 амплитуды второй гармоники A_2 в образце: а) В95; б) В95nd

Для анализа результатов экспериментов заменим в уравнении (3) амплитуды A_f и A_{2f} через деформации в этих волнах $A_f = \varepsilon_f/k_f$, $A_{2f} = \varepsilon_{2f}/k_{2f}$. Также учтем, что в твердых телах с дефектами наряду физической и геометрической нелинейностями может проявляться структурная нелинейность. Это приводит к тому, что зависимость амплитуды второй гармоники A_2 от амплитуды основной волны A_1 в (9) может отличаться от квадратичной:

$$\varepsilon_{2f} = \left\{ \frac{Nk_f L}{4} \right\} \cdot \varepsilon_f^M, \quad \text{где } M \neq 2. \quad (4)$$

Прологарифмировав (4), получим

$$\ln \varepsilon_{2f} = \ln N + \ln[(k_f L)/4] + M \ln \varepsilon_f \quad (5)$$

Экспериментальные зависимости деформации во второй гармонике ε_{2f} от амплитуды деформации в основной частоте ε_{1f} в двойном логарифмическом масштабе представлены на рис. 2. Эти зависимости аппроксимируются прямыми $Y = A \cdot X + B$. Из сравнения этой функции с уравнением (5), видно, что $A=M$ – степень, определяющая зависимость деформации во второй гармонике ε_{2f} от амплитуды деформации на основной частоте ε_{1f} , величина $B = \ln N + \ln(k_f L)$ определяет координату пересечения аппроксимирующей прямой с осью Y .

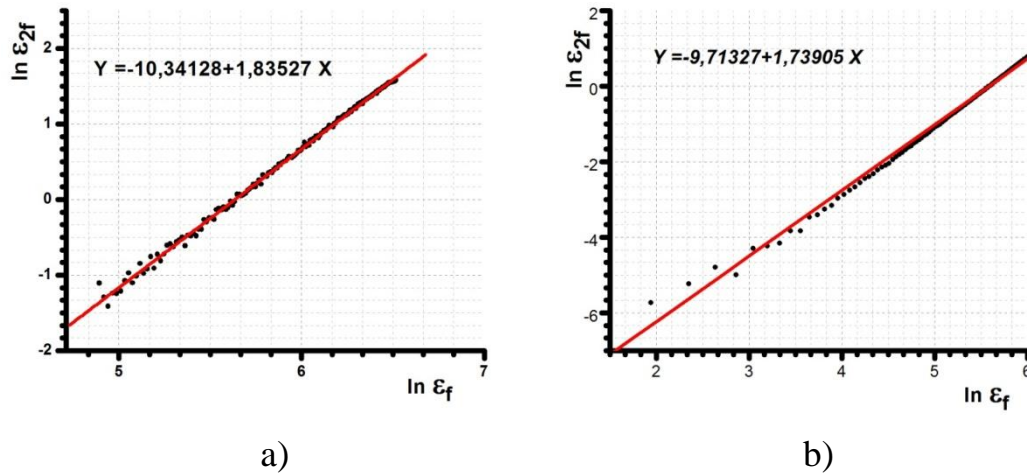


Рис. 2. Зависимость амплитуды деформации ε_2 во второй гармонике от амплитуды деформации ε_1 в основной волне в двойном логарифмическом масштабе в образце из: а) В95; б) В95nd

Результаты аппроксимации для В95 и В95nd приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры аппроксимирующих прямых $Y = Ax + B$.

МАТЕРИАЛ	$A=M$	B	$N=3+C_{111}/C_{11}$
В95	$1,83866 \pm 0,00619$	- $10,36078 \pm 0,03686$	2,12
В95/nd	$1,73905 \pm 0,00984$	$-9,71327 \pm 0,05527$	-3,86

Воспользовавшись (5), получим следующее уравнение

$$\ln(N_{nd}/N) = (B_{nd} - B) - \ln(k_{nd}/k) \quad (6)$$

где с индексом nd обозначены величины для сплава В95/nd, без индекса – величины для В95.

После подстановки в (3) численных значений коэффициентов упругости второго и третьего для В95 И В95/nd, определенных в [3], получим $[(N/nd)/N]_{din.} = 1,91 \pm 0,2$. Аналогичная величина, рассчитанная с использованием экспериментально измеренных в этой работе величин равна $|(Nnd)/N|_{qst} = 1,82 \pm 0,3$. Т.е величины $[(Nnd)/N]$, определенные из

квазистатических измерений в [3], и спектральным методом, в пределах ошибок измерений совпадают. Это указывает на корректность наших измерений. В последнем столбце таблицы приведены значения нелинейных параметров N в сплавах В95 и В95/nd, рассчитанные с использованием коэффициентов, измеренных в [3]. Анализ величин N показывает, что в сплаве В95 геометрическая нелинейность больше физической, а в В95/nd физическая нелинейность больше геометрической нелинейности. Также необходимо отметить, что как в В95, так и в В95nd степенная зависимость амплитуды второй акустической гармоники от амплитуды основной частоты отличается от квадратичной ($M \neq 2$): в сплаве В95 показатель степени $M=1,83866 \pm 0,00619$, а в В95nd $M=1,73905 \pm 0,00984$. Это указывает на наличие в этих сплавах структурной нелинейности, связанной дефектами, которые появились при изготовлении сплавов и образцов из них.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ НШ-2631.2012.2, гранта РФФИ № 12-02-00349-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zarembo L. K., Krasil'nikov V. A. Introduction to Nonlinear Acoustics (Nauka, Moscow, 1966) [in Russian].
2. Thurston R.N., Brugger K. Third-Order Elastic Constants and the Velocity of Small Amplitude Elastic Waves in Homogeneously Stressed Media. // Phys. Rev. 1964. 133, A1604-A1610.
3. Korobov A. I., Prokhorov V. M., Mekhedov D. M. Second Order and Third Order Elastic Constants of B95 Aluminum Alloy and B95/Nanodiamond Composite // Phys. Solid State. 2013. 55 (1), 8–11.
4. Thurston R. N. Shapiro M.J. Interpretation of Ultrasonic Experiments on Finite-Amplitude Waves. // J. Acoust. Soc. Am. 1967. 41, 1112-1125.