

УДК 534.6

Научная статья

Осциллятор с соударениями как динамический способ исследования упругих свойств металлов и сплавов


В. В. Нарожнов

Институт прикладной математики и автоматизации филиал ФГБУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук», 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова 89-а, Российская Федерация

E-mail: narojnov.victor@gmail.com


В работе с помощью осциллятора с соударениями проводилось исследование упругих свойств металлов и сплавов. Для 5 различных металлических пластин получены экспериментальные осциллограммы акустических сигналов, возникающих при ударах осциллятора по поверхности образца. Построены зависимости амплитуды акустических сигналов от амплитуды возбуждающих сигналов. Методом линейной регрессии определен калибровочный коэффициент экспериментального стенда. Далее определены модуль Юнга и поперечная скорость звука для всех исследованных образцов. Полученные значения искомых величин хорошо согласуются со справочными данными.

Ключевые слова: осциллятор с соударениями, модуль Юнга, скорость звука в металлах, упругий удар.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-239-247

Поступила в редакцию: 11.11.2022

В окончательном варианте: 01.12.2022

Для цитирования. Нарожнов В. В. Осциллятор с соударениями как динамический способ исследования упругих свойств металлов и сплавов // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 40. № 3. С. 239-247.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-239-247

Контент публикуется на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International* (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Нарожнов В. В., 2022

Введение

Изучение упругих свойств материалов необходимо для эффективного развития различных инженерных и научных областей. Так, в гражданском строительстве проводят анализ напряжений и изгибных свойств таких конструкций, как стержни, балки, пластины и т.д. Отрасли машиностроения и авиакосмической техники используют эластичность в многочисленных задачах анализа термических напряжений, механики разрушения, усталости, а также проектирования элементов машин и

Финансирование. Исследование выполнялось без финансовой поддержки фондов.

летательных аппаратов. В материаловедении эластичность используется для определения полей напряжений кристаллических тел, дислокаций, микроструктур.

В данной работе предлагается рассмотреть осциллятор с соударениями в качестве динамического инструмента для исследования упругих свойств металлов и сплавов. Отметим, что в настоящее время широкое распространение получили статические методы исследования, которые реализуются путем вдавливания штампа в образец [1, 2, 3]. К недостаткам таких методов можно отнести необратимую деформацию и разрушение исследуемых материалов. К сожалению, динамические методы до сих пор не находят широкого применения для исследования упругих свойств.

Эксперимент

Для проведения экспериментов использовался стенд, разработанный в [4]. Рассмотрим его принцип работы. Генератор подает на катушку индуктивности переменный сигнал. Возникающее в катушке магнитное поле приводит в колебательное движение осциллятор, который выполнен в виде тонкой металлической балки с запаянным на свободном конце металлическим ударником сферической формы. В процессе колебаний осциллятор совершает удары по поверхности металлического образца. Амплитуда колебаний осциллятора и, соответственно, сила удара зависят от величины переменного напряжения на катушке. Вместе с этим осциллятор и образец включены в единую электрическую цепь по схеме делителя напряжения [5]. В отсутствие удара цепь разомкнута, и электрический сигнал отсутствует. В момент удара осциллятора цепь замыкается, и на выходе схемы появляется сигнал напряжения. Для регистрации акустических сигналов, возникающих при соударениях, использовался пьезоэлектрический датчик. Для формирования и измерения сигналов применялись двухканальный генератор Rigol DG1062Z и четырехканальный осциллограф Rigol MSO1074Z.

В качестве образцов использовались металлические пластины Al, Cu, Ta, Ti и Zr. В качестве ударника использовался шар из высокоуглеродистой подшипниковой стали ШХ15. Модуль Юнга данной стали составляет 211 ГПа, что намного превышает модуль Юнга исследуемых образцов. В связи с этим деформация ударника в экспериментах была практически исключена. Радиус шара 2.5 мм. Расстояние между ударником и пьезодатчиком составляло 5 мм. Частота возбуждающего сигнала 26 Гц. Питающее напряжение в цепи 0.6 В, сопротивление $R = 200$ Ом.

На рис. 1 показан пример осциллограмм, полученных с помощью стенда для медного образца: 1 – сигналы, подаваемые на катушку; 2 – акустические сигналы; 3 – электрический сигнал. В нижней фазе своего движения осциллятор наносит удары по поверхности образца, что соответствует минимумам задающего сигнала 1. В промежутках между ударами осциллятор совершает затухающие колебания (сигнал 2). Эксперименты показали, что степень затухания этих колебаний зависит от вязкоупругих свойств образца. Чем больше модуль Юнга образца, тем медленнее затухает сигнал 2. При ударах осциллятора измеряется электрический

сигнал 3. Всплески амплитуды этого сигнала соответствуют ударам осциллятора по поверхности образца. Сравнивая сигналы 2 и 3, приходим к выводу, что затухающие сигналы 2 содержат в основном информацию об упругих затухающих волнах, возникающих в образце.

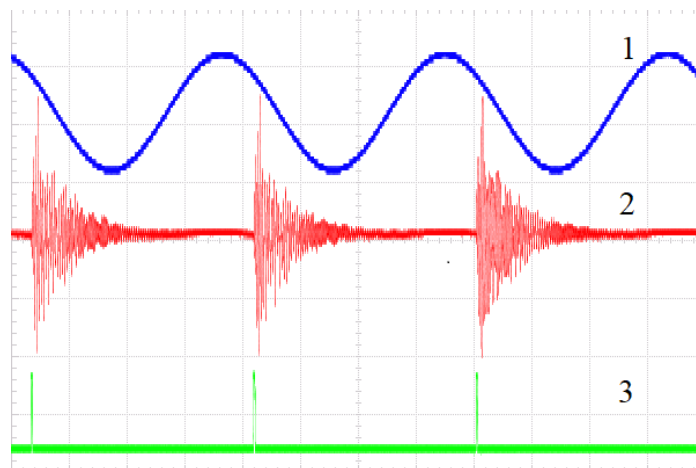


Рис. 1. Осциллограммы сигналов: 1 – сигнал с генератора (1 В/клетка); 2 – акустический сигнал (0.5 В/клетка); 3 – электрический сигнал (0.5 В/клетка). Временная развертка 10 мс/клетка.

[Figure 1. Oscillograms of signals: 1 – signal from the generator (1 V/cell); 2 – acoustic signal (0.5 V/cell); 3 – electrical signal (0.5 V/cell). Timebase 10 ms/cell.]

Эксперименты показали, что максимальная амплитуда акустических сигналов при малых колебаниях осциллятора прямо пропорциональна силе удара зонда о поверхность образца. На рисунке 2 представлены зависимости максимальной амплитуды акустических сигналов от амплитуды возбуждающего сигнала для всех исследованных металлов [6]. Для каждого образца проводилась серия из пяти измерений. Средняя абсолютная погрешность составляет 5 % при доверительной вероятности 0.9. Прямые были построены методом линейной регрессии. Коэффициент корреляции для всех зависимостей близок единице.

Метод линейной регрессии

Воспользуемся линейной моделью, изложенной в [6]. Максимальная амплитуда выходного напряжения будет определяться следующей формулой:

$$U_s = \frac{A}{\sqrt{E}} U_g, \quad (1)$$

где A – калибровочный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей измерительного стенда, E – модуль Юнга материала образца, U_g – амплитуда напряжения возбуждающего сигнала. Все образцы исследовались в одинаковых

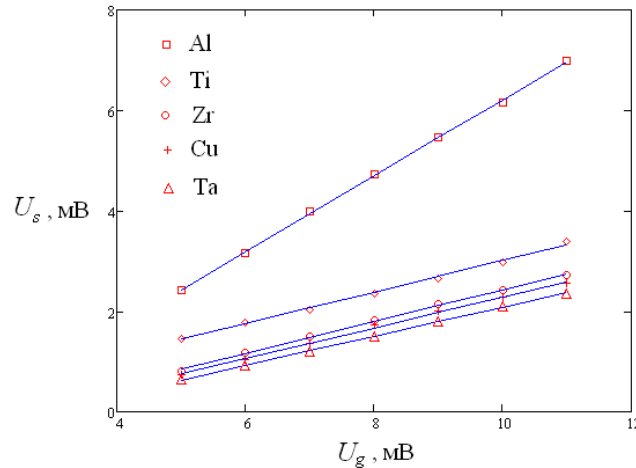


Рис. 2. Зависимость амплитуды акустических сигналов от амплитуды колебаний осциллятора.

[Figure 2. Dependence of the acoustic signals amplitude on the amplitude of the impact oscillator.]

экспериментальных условиях, поэтому коэффициент A должен оставаться постоянным в пределах ошибки эксперимента. Чтобы определить этот коэффициент на основе экспериментальных данных, будем использовать метод линейной регрессии.

Рассмотрим подробно задачу. Пусть имеется система точек (x_i, y_i) , полученная в результате измерений максимальных амплитуд напряжений сигналов, возникающих при соударениях осциллятора с образцом. В одномерном случае уравнение линейной регрессии можно записать в виде:

$$y = \bar{y} + b_{Y/X}(x - \bar{x}), \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

где $b_{Y/X}$ – коэффициент регрессии, который в нашем случае определяет модуль Юнга. Для вычисления коэффициента $b_{Y/X}$ необходимо рассчитать средние квадраты отклонений

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad S_Y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (3)$$

а также ковариацию и коэффициент корреляции

$$m_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad r = \frac{m_{XY}}{S_X S_Y}. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) для коэффициента получаем [7]:

$$b_{Y/X} = r \frac{S_Y}{S_X} = \frac{m_{XY}}{S_X^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Определяя коэффициент $b_{Y/X}$ на основе экспериментальных данных, с учетом формулы (1) можно оценить модуль Юнга

$$E = \left(\frac{A}{b_{Y/X}} \right)^2, \quad (5)$$

где A уже считается заданной величиной, которая определена с использованием тестового образца.

Метод линейной регрессии реализован в программе Mathcad, которая использовалась для обработки экспериментальных данных. Линейная регрессия осуществлялась с применением оператора $\text{line}(x, y)$, который в наших обозначениях возвращает вектор коэффициентов $(\bar{y} - b_{Y/X}\bar{x}, b_{Y/X})$ линейной регрессии (2). Коэффициент корреляции r вычислялся с помощью функции $\text{corr}(x, y)$.

Модуль Юнга материала зависит как от состава, так и от условий механической обработки, поэтому на практике имеют место большие разбросы. В качестве эталона был выбран медный образец. По результатам измерений для меди с учетом известного значения модуля Юнга $E = 130$ ГПа было определено значение калибровочного коэффициента $A = 1.1 \cdot 10^5$ Па^{1/2}. Далее по формуле (5) были рассчитаны модули Юнга для всех исследованных образцов. По найденным значениям модулей Юнга рассчитывалась поперечная скорость звука согласно формуле:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}},$$

где ν – коэффициент Пуассона, ρ – массовая плотность. В таблице приведены результаты всех проведенных измерений и расчетов. Литературные данные были взяты из справочников [8, 9, 10]. Поскольку качество всех использованных образцов (оксиды на поверхности, примеси, дефекты и т.п.) в работе специально не контролировалось, то достигнутую в экспериментах точность можно признать удовлетворительной.

Значительное расхождение со справочными значениями обнаруживается для алюминийсодержащего образца. Причина здесь, по-видимому, заключается в том, что исследованный образец не представлял собой чистый или даже технический алюминий. Для подтверждения этого заключения был проведен дополнительный эксперимент по определению модуля Юнга алюминийсодержащего образца путем вдавливания в него шарика из шарикоподшипниковой стали радиусом $R = 2.5$ мм. Шарик размещался в различных точках на поверхности исследуемого образца, и к нему в вертикальном направлении прикладывалась контролируемая сила $F = Mg$, где M – нагрузочная масса, g – ускорение свободного падения. Затем проводились измерения размеров отпечатков, оставляемых шариком. Модуль Юнга материала шарика намного больше, чем у материала образца. Тогда из формулы для полной силы, согласно контактной теории Герца [11, с. 70], можно оценить модуль Юнга образца:

$$E \approx \frac{3MgR}{4a^3}, \quad (6)$$

где a – радиус отпечатка, образованного при вдавливании. В эксперименте нагруженная масса M изменялась в диапазоне от 18 до 32 кг. При этом радиус отпечатков a на различных участках поверхности образца составлял от 0.3 до 0.45 мм. Оценки модуля Юнга по формуле (6) дают значения от 12 до 32 ГПа, что хорошо согласуется с данными, полученными в настоящей работе с помощью электромеханического осциллятора (см. таблицу).

Таблица

**Результаты измерений упругих свойств металлов [Results of
measurements of metals elastic properties]**

Sample	$c_t, 10^3, \text{m/s}$ present work	$c_t, 10^3, \text{m/s}$ reference book	E, GPa present work	E, GPa reference book
Al	1,7	3,08	22	69-72
Cu	2,3	2,26	-	130
Ta	1,8	2,09	144	175-190
Ti	3,2	3,11	123	100-116
Zr	2,6	2,39	120	84-250

Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты позволяют сделать важный вывод о том, что угол наклона прямых на рисунке 2 определяется модулем Юнга образцов. После того, как найдено численное значение коэффициента A , с помощью стенда можно определять модуль Юнга различных металлов и сплавов, что имеет большое практическое значение.

Заключение

Проведено исследование зависимости максимальной амплитуды акустических сигналов от амплитуды возбуждающего сигнала для некоторых металлов. Установлено, что угол наклона этих прямых определяется модулем Юнга образцов. Методом линейной регрессии найдено численное значение калибровочного коэффициента стенда, с помощью которого определены модуль Юнга и поперечная скорость звука для исследованных металлов. По затуханию акустических сигналов можно судить о вязкостных свойствах исследуемых материалов. Данная методика расширяет возможности применения осциллятора с соударениями, как динамического инструмента для диагностики упругих свойств твердых тел.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.


Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Список литературы

1. Foschini C. R., Souza E. A. C., Borges A. F. S., Pintao C. A. F. A new approach to measure the elasticity modulus for ceramics using the deformation energy method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016. Т. 30, № 8, С. 3585–3590 DOI: 10.1007/s12206-016-0719-z.

2. Lord J.D., Morrell R.M. Comparison of static and dynamic methods for measuring stiffness of high modulus steels and metal composites, *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 2014. Т. 53, № 3, С. 292–299 DOI: 10.1179/1879139514Y.0000000139.
3. Shibaev I. A., Belov O. D., Sas I. E. Determination of dynamic and static elasticity modules of granite samples, *Mining informational and analytical bulletin*, 2021. Т. 4, № 1, С. 5–15.
4. Рехвиашвили С. Ш., Нарожнов В. В. Стенд для исследования вязкоупругих свойств металлов и сплавов с помощью зондового акустического метода, *Бюл.* № 34, 2014.
5. Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*. М.: БИНОМ, 2014. 704 с.
6. Рехвиашвили С. Ш., Нарожнов В. В. Нелинейная динамика и акустические сигналы при упругих соударениях зонда с поверхностью твердого тела, *Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика»*, 2013. Т. 21, № 6, С. 49–57 DOI: 10.18500/0869-6632-2013-21-6-49-57.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов*. М.: Наука, 1986. 544 с.
8. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. *Физические величины: Справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
9. Marsh S.P. *LASL Shock Hugoniot Data*. California: University of California Press, 1980. 658 с.
10. Кикоин И. К. *Таблицы физических величин. Справочник*. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
11. Попов В.Л. *Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений*. М.: Физматлит, 2013. 352 с.



Нарожнов Виктор Валерьевич ✉ – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории автоматизации измерений Института прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН, г. Нальчик, Россия,  ORCID 0000-0002-8326-7100.

MSC 74M20

Research Article

Impact oscillator as a dynamic method for studying the elastic properties of metals and alloys


V. V. Narozhnov

Institute of Applied Mathematics and Automation KBSC RAS, 360000, Nalchik, Shortanova st., 89 a, Russia

E-mail: narojnov.victor@gmail.com


In this work, using an impact oscillator, the study of the metals and alloys elastic properties was carried out. For 5 different metal plates, experimental oscillograms of acoustic signals arising from impacts of the oscillator on the sample's surface were obtained. The dependences of the acoustic signals amplitude on the excitatory signals amplitude are constructed. The calibration coefficient of the experimental stand was determined by the method of linear regression. Further, the Young's modulus and the transverse speed of sound are determined for the all samples.

Key words: impact oscillator, Young's modulus, speed of sound in metals, elastic impact.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-239-247

Original article submitted: 11.11.2022

Revision submitted: 01.12.2022

For citation. Narozhnov V. V. Impact oscillator as a dynamic method for studying the elastic properties of metals and alloys. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, **40**: 3, 239-247. 
DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-239-247

Competing interests. The author declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. The author contributed to this article and solely responsible for submitting the final version of the article to print.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Narozhnov V. V., 2022


References

- [1] Foschini C. R., Souza E. A. C., Borges A. F. S., Pintão C. A. F. A new approach to measure the elasticity modulus for ceramics using the deformation energy method, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30:8, 3585–3590 DOI: 10.1007/s12206-016-0719-z
- [2] Lord J. D., Morrell R. M. Comparison of static and dynamic methods for measuring stiffness of high modulus steels and metal composites, *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 2014, 53:3., pp. 292–299. DOI: 10.1179/1879139514Y.0000000139

Funding. The study was carried out without support from foundations.

- [3] Shibaev I. A., Belov O. D., Sas I. E. Determination of dynamic and static elasticity modules of granite samples, Mining informational and analytical bulletin, 2021, 4:1, 5–15. (In Russian)
- [4] Pat. RF no 2552600. Rekhviashvili S. Sh., Narozhnov V. V. Stend dlya issledovaniya vyazkouprugikh svoystv metallov i splavov s pomoshch'yu zondovogo akusticheskogo metoda [Stand for the study of metals and alloys viscoelastic properties using the acoustic probe method]. 10.12.2014 Byul. 34 (In Russian)
- [5] Khorovits P., Khil U. Iskusstvo skhemotekhniki: Per. s angl [The Art of Circuitry: Translation from English], Moscow, BINOM, 2014. 704 (In Russian)
- [6] Rekhviashvili S. Sh., Narozhnov V. V. Nonlinear dynamics and acoustic signals in elastic collisions between a probe and a solid Surface, Izvestiya vuzov «Prikladnaya nelineynaya dinamika, 21:6, 2013, pp. 49–57. DOI: 10.18500/0869-6632-2013-21-6-49-57 (In Russian)
- [7] Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov. 13-e izd., ispravlennoe. [Handbook of mathematics for engineers and university students. 13th ed., revised], Moscow, Nauka, 1986. 544
- [8] Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical Quantities: Handbook], Moscow, Energoatomizdat, 1991. 1232.
- [9] Marsh S. P. LASL Shock Hugoniot Data. University of California Press, 1980. – 658 pp.
- [10] Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik / Pod red. akad. I. K. Kikoina [Tables of physical quantities. Handbook / Ed. acad. I. K. Kikoina], Moscow, Atomizdat, 1976. 1008.
- [11] Popov V. L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya. Ot nanotribologii do dinamiki zemletryaseniya [Contact interaction mechanics and friction physics. From nanotribology to earthquake dynamics], Moscow, Fizmatlit, 2013. 352.



Narozhnov Viktor Valer'evich ✉ – Ph.D. (Tech.), researcher in measurement automation laboratory in Institute of Applied Mathematics and Automation IAMA KBSC RAS, Nalchik, Russia,  ORCID 0000-0002-8326-7100.
