

## Определение физико-механических свойств резиноподобных титановых сплавов по акустическим измерениям

К. Ю. Безымянная, А. Н. Колесников, К. А. Комаров

*На примере сплава на основе Ti с разным содержанием  $\beta$ -стабилизирующих добавок показаны возможности определения физико-механических свойств материала по результатам измерения его акустических характеристик. Для измерения применены традиционные методики, основанные на импульсном и резонансном возбуждениях образцов материала. Полученные данные использованы для расчёта полного комплекса модулей упругости, определяющего механическое поведение материала. Выявлена корреляция акустических характеристик с микротвёрдостью материала.*

**Ключевые слова:** титановые сплавы, физико-механические характеристики, модули упругости, акустические измерения, скорость ультразвука, импульсный и резонансный методы.

### Введение

Акустические свойства материалов в силу своей природы тесно связаны с их другими физико-механическими свойствами [1]. Это позволяет изучать свойства твёрдых тел, определяя их акустические характеристики [2]. Работы в этом направлении активно ведутся со второй половины прошлого столетия [3—8]. Особое значение приобретает возможность изучения неразрушающими ультразвуковыми методами полученных свойств образцов многофазного материала в процессе его создания [9, 10]. К сожалению, в материаловедческой практике для решения указанной задачи используют далеко не все возможности акустических измерений. Теория применения акустических методов для оценки свойств образцов многофазных материалов развита в работе [11].

В настоящей работе показаны возможности использования акустических измерений на примере определения физико-механических свойств образцов титановых сплавов, которые разрабатывались как резиноподобные материалы с наперёд заданными характеристиками упругости.

### Объект исследований. Методы и результаты акустических измерений

В работе исследовали физико-механические характеристики материала на основе Ti с разным содержанием  $\beta$ -стабилизирующих добавок, полученного вакуумным литьём. Образцы предоставлены Голтвяницей В. С. (Запорожский технический университет). Они представляли собой стержни с прямоугольным поперечным сечением. Размеры образцов (длина  $l$ , ширина  $a$  и высота  $h$ ) приведены в табл. 1.

Для повышения информативности и достоверности результатов исследований использовали два из наиболее распространённых методов измерения акустических характеристик материала: один основан на импульсном, а второй — на резонансном возбуждении образцов.

**Т а б л и ц а 1. Измеренные параметры образцов и акустические характеристики материала**

Номер плавки	Размер, мм			Время, мкс			$f_i$ , кГц	Скорость, км/с			
	$l$	$a$	$h$	$t_l$	$t_a$	$t_h$		$V_l$	$V_a$	$V_h$	$V_{ср}$
821	44,7	3,07	5,82	9,72	1,63	2,17	38,59	5,16	5,35	5,26	3,450
822	42,3	3,13	5,95	9,19	1,64	2,18	40,91	5,20	5,44	5,33	3,46
823	44,6	2,87	5,97	9,74	1,58	2,19	38,33	5,14	5,36	5,32	3,42
824	45	2,84	5,15	9,68	1,60	2,02	38,86	5,22	5,31	5,34	3,50
1166	43,8	2,96	5,84	9,47	1,61	2,13	39,87	5,21	5,39	5,44	3,49

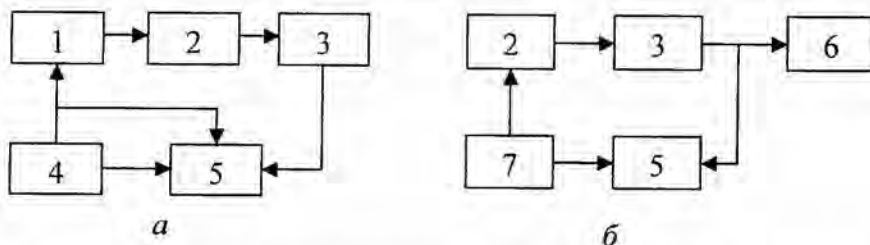
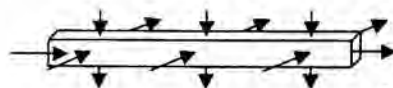


Рис. 1. Структурные схемы импульсного (а) и резонансного (б) методов измерений: 1 — генератор прямоугольных импульсов; 2 — измерительная акустическая камера; 3 — усилитель; 4 — измеритель временных интервалов; 5 — двухканальный осциллограф; 6 — вольтметр; 7 — генератор стандартных сигналов.

Импульсный метод измерений реализован на установке для прецизионных измерений параметров упругой волны, разработанной в ИПМ НАН Украины [10], по схеме сквозного прозвучивания образца в разных направлениях при ударном возбуждении продольных упругих колебаний [12] в преобразователе с резонансной частотой 5 МГц. Установка позволяет измерять временные интервалы с абсолютной погрешностью  $\pm 5$  нс. Структурная схема метода представлена на рис. 1, а. Измерение времени распространения упругой волны  $t_{Si}$  проводили в трёх направлениях ( $S = l, a, h$ ) в различных зонах образца ( $i = 1, 2, 3$  — номер зоны для направлений  $a$  или  $h$ ;  $i = 1$  для направления  $l$ ). Схема прозвучивания образца показана на рис. 2. В соответствующем направлении  $S$  и  $i$ -й его зоне измеряли линейный размер образца  $S$ . Скорость распространения упругой волны  $V_{Si}$  для каждого направления и его зоны определяли по формуле  $V_{Si} = S/(t_{Si} - t_0)$ , где  $t_0$  — методическая поправка. Относительная погрешность измерения скорости распространения упругой волны для выбранной методики не превышала 0,002; 0,01 и 0,015 для направлений  $l, h$  и  $a$  соответственно. Для одного и того же направления  $S$  проводили усреднение скоростей распространения упругой волны  $V_{Si}$  по параметру  $i$ . Результаты вычислений скоростей распространения упругой волны по направлениям  $l, a$  и  $h$ , приведены в табл. 1 и на рис. 3, а. Из полученных результатов следует, что анизотропия свойств

Рис. 2. Схема прозвучивания образца.



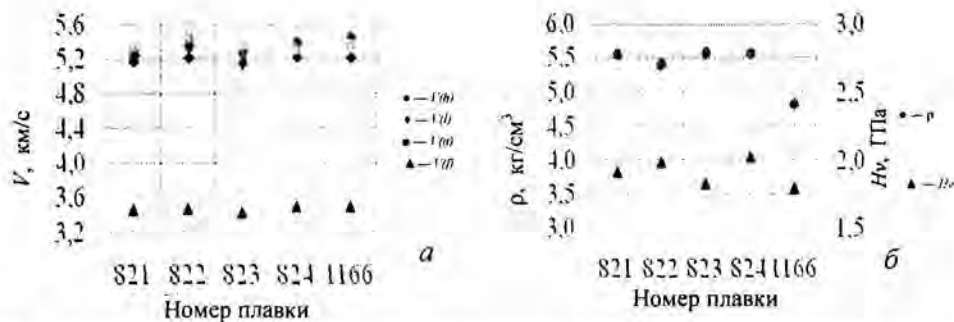


Рис. 3. Измеренные скорости распространения упругих волн (а), плотность и микротвёрдость (б).

материала незначительна, а изменения скоростей распространения упругой волны от плавки к плавке хорошо согласуются по различным направлениям.

Резонансный метод измерений реализован на модульной установке, разработанной в ИПМ НАН Украины, по схеме вынужденных колебаний образца на первой моде [3]. Установка позволяет измерять резонансную частоту  $f$  с абсолютной погрешностью  $\pm 5$  Гц. Структурная схема метода представлена на рис. 1, б. Схема прозвучивания соответствует наибольшему направлению  $l$  на рис. 2. Скорость распространения упругой волны  $V_{\text{ст}}$  определяли по формуле  $V_{\text{ст}} = 2lf$ . Относительная погрешность измерения скорости распространения упругой волны для выбранной методики не превышала 0,001. Результаты вычислений скоростей  $V_{\text{ст}}$  приведены в табл. 1 и на рис. 3, а. Сопоставление скоростей продольной упругой волны и волны в стержне показывает, что их абсолютные значения, как и для традиционных материалов, существенно отличаются, а изменения скоростей распространения всех видов упругой волны от плавки к плавке хорошо согласуются.

Дополнительно измерены плотность  $\rho$  и микротвёрдость  $H_v$  образцов материала. Измерение плотности проводили в соответствии с ГОСТ 18898-89 методом гидростатического взвешивания. Микротвёрдость по Виккерсу определяли в соответствии с ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 3, б. Наблюдается корреляция скоростей распространения упругой волны и микротвёрдости (наибольшая степень — в направлении  $l$ ).

### Расчёт физико-механических характеристик материала

По измеренным акустическим характеристикам материала (скоростям распространения упругой волны в различных направлениях и плотности) рассчитывали характеристики упругости материала. Расчёт проводили в рамках модели изотропного упругого тела. Модуль упругости (Юнга)  $E_l$  определяли классическим методом [3] по результатам резонансных измерений:

$$E_l = V_{\text{ст}}^2 \rho. \quad (1)$$

Коэффициент Пуассона  $\mu$  рассчитывали по формуле

$$E_l = \frac{V_l^2 \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}. \quad (2)$$

**Т а б л и ц а 2. Физико-механические характеристики материала**

Номер плавки	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модули упругости, ГПа						$\mu$	$H_v$ , ГПа
		$E_l$	$E_a$	$E_h$	$G_l$	$G_a$	$G_h$		
821	5,54	65,94	70,58	67,77	23,46	25,70	24,20	0,406	1,92
822	5,41	66,81	72,53	69,64	23,04	25,74	24,78	0,407	1,99
823	5,58	65,19	71,69	68,10	23,17	25,30	24,20	0,407	1,83
824	5,57	68,11	70,19	71,81	24,23	24,99	25,35	0,405	2,03
1166	4,82	58,77	63,51	64,29	20,92	22,45	22,77	0,405	1,80

Для расчётов модулей упругости по другим направлениям  $S$  использовали формулу (2), в которую вместо  $V_l$  подставляли значение скорости по соответствующему направлению  $V_S$ . Результаты расчётов приведены в табл. 2 и на рис. 4.



Рис. 4. Характеристики упругости материала.

Модуль сдвига для каждого направления  $S$  определяли по формуле

$$G_S = \frac{E_S}{2(1 + \mu)}. \quad (3)$$

Результаты расчётов по формулам (1)—(3) приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Из полученных результатов следует, что материал обладает незначительной анизотропией свойств упругости и модули упругости изменяются от плавки к плавке. Наиболее существенное изменение модуля упругости обусловлено изменением плотности материала. Коэффициент Пуассона изменяется незначительно.

### Выводы

В рамках изотропной модели в результате вычислений по акустическим измерениям получен комплекс характеристик упругости материала, который полностью определяет его механическое поведение. Изменение модулей упругости от плавки к плавке позволяет использовать эту характеристику для отработки технологии получения материала.

Применённая изотропная модель могла привести к искажению оценки реальных характеристик упругости. Поэтому дальнейшее развитие аналогичных работ целесообразно проводить в направлении учёта анизотропии свойств исследуемых материалов.

Отмеченная корреляция между скоростью распространения упругой волны по длине образца и микротвёрдостью материала даёт оптимистический прогноз на выявление корреляционной связи между этими параметрами с последующей возможностью определения микротвёрдости по результатам акустических измерений.

1. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия* / Под ред. И. П. Голяминой. — М.: Сов. энциклопедия, 1979. — 400 с.
2. *Физика твёрдого тела*: Энциклопедический словарь. — К.: Наук. думка, 1996. — Т. 1. — 656 с.; — 1998. — Т. 12. — 648 с.

3. Кузьменко В. А. Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов. — К.: изд-во АН УССР, 1963. — 152 с.
4. Truell R., Elbaum Ch., Chick B. Ultrasonic methods in solid state physics. — New York and London: Academic press, 1966. — 436 p.
5. *Physical acoustics*. Applications to quantum and solid state physics / Ed. by W. Mason. — New York and London: Academic press, 1969. — V. 4. — 308 p.
6. Рохлин Л. Л. Акустические свойства легких сплавов. — М.: Наука, 1974. — 140 с.
7. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1981. — 80 с.
8. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: (Справ.). — К.: Наук. думка, 1982. — 288 с.
9. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. — Минск: Вышэйш. шк., 1989. — 182 с.
10. Безымянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств порошковых материалов // Порошковая металлургия. — 2001. — № 5/6. — С. 23—33.
11. Безымянный Ю. Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой // Акустичний вісник. — 2006. — 9, № 2. — С. 3—16.
12. *Неразрушающий контроль и диагностика: (Справ.)* / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.

### **Визначення фізико-механічних властивостей гумоподібних титанових сплавів за акустичними вимірюваннями**

К. Ю. Безимянна, А. М. Колесников, К. А. Комаров

*На прикладі сплаву на основі Ti з різним вмістом  $\beta$ -стабілізуючих добавок показано можливості визначення фізико-механічних властивостей матеріалу за результатами виміру його акустичних характеристик. Для виміру застосовано традиційні методики, засновані на імпульсному й резонансному збудженнях зразків матеріалу. Отримані дані використані для розрахунку повного комплексу модулів пружності, що визначає механічну поведінку матеріалу. Виявлено кореляцію акустичних характеристик з мікротвердістю матеріалу.*

**Ключові слова:** титанові сплави, фізико-механічні характеристики, модулі пружності, акустичні виміри, швидкість ультразвуку, імпульсний та резонансний методи.

### **Evaluation of physical and mechanical properties of rubber-like titanium alloys by their acoustic measurements**

K. Yu. Bezimyannaya, A. N. Kolesnykov, K. A. Komarov

*The present paper demonstrates the possibility of evaluating physical and mechanical properties of the material using the results on its acoustic characteristic measurements by the example of the Ti-based alloy with different  $\beta$ -stabilizing additives. Conventional methods based on pulse and resonant excitations of material samples have been applied to measure acoustic characteristics. The measured acoustic characteristics have been used to calculate the total complex of elastic moduli that determines mechanical behaviour of the material. Correlation between the acoustic characteristics and the material microhardness has been revealed.*

**Keywords:** titanium alloys, physical and mechanical characteristics, elastic moduli, acoustic measurements, ultrasound velocity, pulse method, resonant method.