

Секція «Фізико-математичні науки»:

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУБИЧЕСКИХ ДОДЕКАБОРИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Алексенко В.Л., Букетов А.В.

Украина, Херсонская государственная морская академия

Корень Е.В.

Украина, Херсонский государственный аграрный университет

Одинцов В.В., Скирленко В.О.

Украина, Херсонский государственный университет

STRENGTH CHARACTERISTICS OF CUBIC DODECABORIDES RARE EARTH METALS

Abstract: In the work by calculation and methods of static and dynamic studies of mechanical properties for the first time identified a module of elasticity (Young's modulus), shear modulus G , the coefficient of transverse deformation (Poisson's ratio) hot-sintered dodecaborides phases YB_{12} , TbB_{12} , DyB_{12} , HoB_{12} , ErB_{12} , TmB_{12} , YbB_{12} , LuB_{12} , ZrB_{12} . The numerical values of the calculated and experimental mechanical parameters are the same.

Keywords: refractory compounds, the mechanical characteristics, the characteristic temperature, Young's modulus, shear modulus, Poisson's ratio.

Анотація: У роботі розрахунковим шляхом і методами статичних і динамічних досліджень механічних властивостей вперше визначено модуль нормальної пружності (модуль Юнга), модуль зсуву G , коефіцієнт поперечної деформації (коефіцієнт Пуассона) гарячеспечених додекаборидних фаз YB_{12} , TbB_{12} , DyB_{12} , HoB_{12} , ErB_{12} , TmB_{12} , YbB_{12} , LuB_{12} , ZrB_{12} . Чисельні значення розрахованих та експериментальних механічних параметрів збігаються.

Ключові слова: тугоплавкі сполуки, механічні характеристики, характеристична температура, модуль Юнга, модуль зсуву, коефіцієнт Пуассона.

Вступлення. В современных отраслях промышленности – химии, металлургии, машиностроении, радиоэлектронике, авиа- и автостроении, атомной и военной технике – научный прогресс, экономические и экологические показатели в значительной степени определяются конструкционными материалами, которые используются при создании, эксплуатации производств и выпуске различных видов товарной продукции. Традиционно выпускаемые металлы и их многочисленные сплавы уже не удовлетворяют требованиям по химической устойчивости, удельной плотности и физико-механическим свойствам, особенно в условиях больших механических нагрузок, в высокотемпературных режимах и в коррозионных средах. Новый класс конструкционных материалов на основе редких металлов, кремния, бора и других элементов в виде карбидов, боридов, нитридов, карбосилицидов и композиций из этих соединений обосновывает необходимость нового направления в их создании и использовании, а также глубокого научного исследования их физико-химических свойств. Можно смело сказать, что указанные конструкционные материалы являются основой в материаловедении ХХІ века. К таким материалам можно отнести бориды, и в частности, додекабориды редкоземельных металлов со структурой типа UB_{12} .

Постановка проблемы. Физико-химические свойства этих фаз изучены недостаточно [1,2,3], особенно, что касается механических, прочностных их характеристик. Лишь в работе [4] указывается, что предел прочности при изгибе для YB_{12} составляет 165 кг/мм^2 (пористость спекленных в вакууме образцов 22-26%), в работе [2] приведены расчетные значения модуля упругости додекаборидов.

Нами впервые выполнены систематические исследования таких механических характеристик как модуль нормальной упругости (модуль Юнга), модуль сдвига, коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) однофазных додекаборидных фаз YB_{12} , TbB_{12} , DyB_{12} , HoB_{12} , ErB_{12} , TmB_{12} , YbB_{12} , LuB_{12} , ZrB_{12} , полученных путем спекания порошков додекаборидов металлов в среде аргона в тиглях из диборида циркония в засыпке крупного порошка спекаемого борида при температуре 2100-2200 К.

Спеченные материалы имели пористость 15-20%. Образцы для исследований вырезались на электронском станке и имели вид параллелепипедов с размерами $(10 \times 2,5 \times 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Образцы таких размеров требовали и соответствующей методики изучения механических констант.

Перед тем как экспериментально исследовать механические характеристики нами произведены расчеты некоторых из них по известным формулам, а именно, используя коэффициент термического расширения (α), характеристическую температуру (Θ), температуру плавления ($T_{\text{пл}}$), скорость распространения звука ($v_{\text{зв}}$) и др.

Из формулы Френкеля $\alpha = \frac{nk}{nR^3 E}$:

$$E = \frac{nk}{\alpha nR^3} \quad (1)$$

из формулы Францевича $\Theta_D = \frac{1,6818 \cdot 10^3 \sqrt{E}}{M^{\frac{1}{3}} \cdot \gamma^{\frac{1}{6}}}$;

$$E = \frac{\Theta^2 M^{\frac{2}{3}} \gamma^{\frac{1}{3}}}{1,6818^2 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

а также коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) получали из формулы Кестера и формулы Францевича:

$$f(\mu) = \left(\left(\frac{1+\mu}{3(1-\mu)} \right)^{\frac{3}{2}} + 2 \left(\frac{2(1+\mu)}{3(1-2\mu)} \right)^{\frac{3}{2}} \right); \quad (3)$$

$$f(\mu) = \frac{3,34 \cdot 10^7 T_{пл}^{\frac{3}{2}}}{A \gamma^{\frac{1}{2}} C V^{\frac{2}{3}} \Theta^3} \quad (4)$$

где μ - коэффициент Пуассона; $T_{пл}$ - температура плавления; A - молекулярный вес; γ - плотность; $C = \frac{1}{\sqrt{2}}$; V - объем молекулы (Å^3); Θ - характеристическая температура, К.

Модуль сдвига: $G = \gamma \cdot v_m^2$, так как

$$v_m = \sqrt{\frac{G}{\gamma}}; \quad (5)$$

где v_m - скорость распространения звука.

$$v_m = \frac{\Theta_D}{\frac{h}{k} \sqrt[3]{\frac{3nN\gamma}{4\pi M}}}, \text{ так как } \Theta_D = \frac{h}{k} \cdot \left(\frac{3nN\gamma}{4\pi M} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

Результаты экспериментов. В виду малости размеров образцов для экспериментального исследования модуля Юнга нами использовался классический метод призматической балки прямоугольного сечения, заземленной с одного конца, дополненный зеркальным угломером (рис.1) [5].

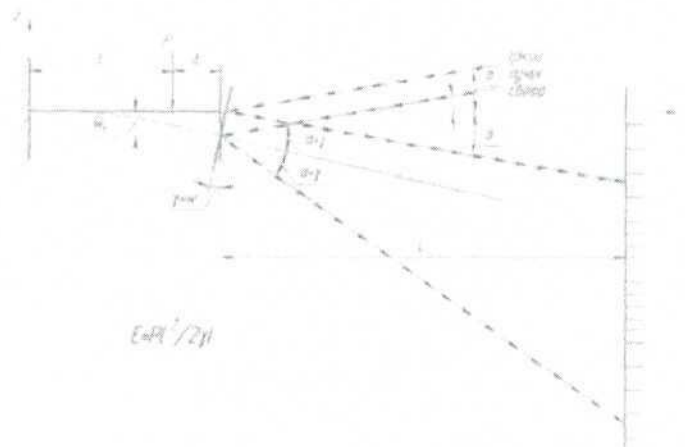


Рис. 1. Статические испытания консольной балки на изгиб. Определение углового перемещения конца образца с помощью зеркального угломера.

Модуль Юнга рассчитывался по формуле:

$$E = \frac{6P \left(\frac{l}{h}\right)^2}{\alpha b h} \quad (7)$$

где P – нагрузка на образец (Н); l – длина образца (м); h – толщина образца (м); b – ширина образца (м); $\alpha = \frac{\lambda}{L}$ (λ – дуга прогиба, L – расстояние) – угол, связанный с дугой прогиба.

Для подтверждения результатов, полученных из исследований по методике выше описанной (статический метод), нами проведены еще исследования динамическим методом (рис.2)[6].

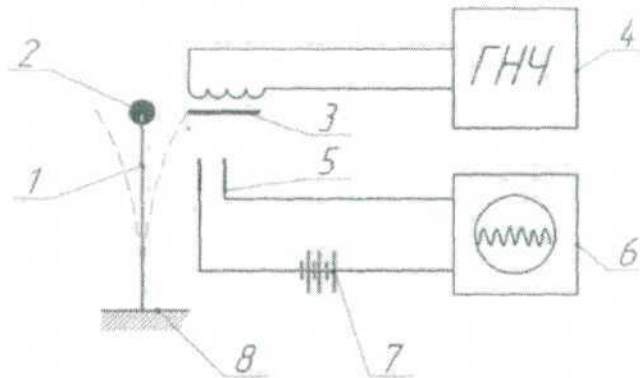


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения частот собственных колебаний образца.

1 – образец, 2 – якорь, 3 – электромагнит, 4 – генератор низкой частоты, 5 – конденсаторный микрофон, 6 – осциллограф, 7 – батарея, 8 – жесткое основание.

Массогабаритные параметры образца с якорем из магнитного материала определяются обмерами и взвешиванием до крепления на основе быстротвердеющим клеем. Относительно малый размер якоря в направлении продольной оси образца позволяет считать его массу сосредоточенной в центре тяжести. Колебания возбуждаются электромагнитом, питаемым генератором низкой частоты. Бесконтактная регистрация интенсивности колебаний осуществлялась конденсаторным микрофоном, подключенным на вход осциллографа. Резонансные частоты, соответствующие собственным частотам, надежно фиксировались по резкому возрастанию амплитуды колебаний. Далее размах колебаний свободного конца консоли регистрировался, как и при статических испытаниях, с помощью зеркального угломера.

Опуская ряд особенностей расчетного определения собственных частот призматической балки, связанных с компьютерным решением (программы *consolL* и *consolE*) трансцендентного уравнения

$$\begin{cases} \left(EI(x)w_1''''(x) \right) = q(x) \\ w_2'(x) = \alpha_2(x) - Q(x)/Gw(x) \end{cases} \quad (8)$$

выбирая для решения значения частот лишь первых гармоник (желательно первого тона) [7], получаем значения резонансных частот и рассчитываем модули Юнга для соответствующих додекаборидных фаз (таблица 1). Тестирование метода осуществлялось на стальной заготовке с параметрами $l=0,1\text{м}$; $b=0,01\text{м}$; $h=0,002\text{м}$; $\gamma=7,8 \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$; $m=0,156 \cdot 10^4 \text{кг/м}^3$; $E_{\text{сталь}}=200\text{ГПа}$; $E_{\text{мод}}=(200 \div 210)\text{ГПа}$.

Все значения модулей упругости исследуемых додекаборидов пересчитаны на нулевую пористость по формуле:

$$E_0 = \frac{E_{\Pi}}{1 - 1,9\Pi - 0,9\Pi^2} \quad (9)$$

где Π – пористость.

Все полученные расчетные и экспериментальные результаты приведены в таблице 1.

Основные механические характеристики додекаборидов редкоземельных металлов и величины, связанные с ними

Фаза	YB ₁₂	TbB ₁₂	DyB ₁₂	HoB ₁₂	ErB ₁₂	TmB ₁₂	YbB ₁₂	LuB ₁₂	ZrB ₁₂	B	
Мол. вес M·10 ⁻³ кг/моль	218,732	288,656	292,232	294,732	296,982	298,732	302,732	304,732	220,952	10,811	
Плотность, γ·10 ³ кг/м ³	3,444	4,540	4,611	4,655	4,706	4,756	4,820	4,868	3,611	2,340	
Температура плавления, °К	2950	2400	2550	2750	2600	2750	-	2650	2750	2075	
Характер температура, °К	1052	900	850	872	872	868	845	848	976	1200	
Коэффициент термического расширения 10 ⁻⁶ К ⁻¹	3,2	3,6	4,6	3,6	3,7	3,8	3,7	3,4	3,5	8,3	
Коэффициент Пуассона	0,31	0,36	0,37	0,34	0,30	0,33	0,35	0,36	0,39	0,39	
Модуль сдвига, ГПа	Из U _{тн}	195	160	150	160	160	160	156	170	154	320[8]
	Из E _{расч}	180	141	151	166	143	157	154	141	156	-
Модуль Юнга расч. ГПа	Расчит. нами	270	200	200	210	220	210	200	220	190	-
	[2]	180	220	210	200	200	200	200	190	-	-
	(2)	230	180	190	220	200	210	200	180	190	330
Модуль Юнга эксп ГПа	E _{тн}	250	-	190	190	195	197	198	210	200	-
	E _{тн}	240	-	198	178	165	210	230	230	182	390[8]
Резонансная частота f, Гц	1544	-	1300	1960	1500	1300	1500	1324	3000	3540	

Выводы. Из таблицы 1 следует, что экспериментальные и расчетные значения механических характеристик додекаборидов численно практически совпадают. Численные значения модуля Юнга для додекаборидов значительно меньше по величине, нежели соответствующие значения для чистого бора. При этом в додекаборидных фазах все же сказываются сильные ковалентные связи В-В, однако в механических свойствах, по-видимому, существенно влияние металлических атомов, которые выступают в роли пластификаторов и этим снижают, и существенно, механические свойства додекаборидов (коэффициент сжимаемости 0,31-0,39), делая их более гибкими, пластичными, что немаловажно в практическом использовании этих прочных тугоплавких соединений (твердость H₁₀₀=(2500+2750)кг/мм²).

Литература

1. Одінцов В.В. Додекабориди рідкісноземельних металів. – Київ: Херсонська міська друкарня, 1992. – 57с.
2. Мойсєєнко Л.Л. Электрофизические свойства додекаборидных фаз редкоземельных металлов. Автореферат канд. дис. – Киев, 1981.
3. Шичєвалова Н.Ю. Магнитные, термические и транспортные свойства додекаборидов редкоземельных элементов. Канд. дис. – Вроцлав, 2001. – 163 с.
4. Своєобразіє вакуумно-термічного методу отримання і деякі властивості боридів Y і Gd. [Манєшє Р.М., Меєрсон Г.А., Журєвєєв Н.Н., Тєлюкова Т.М., Стєпанова А.А., Грамм Н.В.] // Порошк. метал. 6 (II), 1966. – С. 77-84.
5. ГОСТ 1497-81. Металлы. Методы испытания на растяжение.
6. Способ определения модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона литых деталей. Патент РФ №2431819 МПК G01N3/32, 2010.
7. Ланцов К. Практические методы прикладного анализа. Справочное руководство. Пер. с англ. М.Э. Кайнера, под ред. А.М. Лопицка. Гос. изд. физико-математической литературы, М, 1961. 524 с.
8. Цагарєєвичи Г.В. Некоторые механические свойства кристаллов β-ромбоэдрического бора. Сб. Бор. Получение, структура и свойства – М.: Наука, 1974. – С.121-125.