

УДК 621.762:621.034:669.1

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ TiC–TiNi

В. В. Акимов, Н. А. Иванов

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 644080 Омск

Ультразвуковым резонансным методом определены упругие характеристики и скорости распространения ультразвуковых волн в композиционном материале TiC–TiNi. С использованием полученных значений модулей упругости твердого композита определены его пластические свойства. Исследовано влияние различных добавок на упругие и пластические свойства композита.

Из анализа закономерностей распространения волн напряжения в упругих телах следует, что скорость волнового движения постоянна для данной среды и определяет ее упругие свойства [1, 2]. Свойства твердых композиционных материалов, имеющих сложную неоднородную структуру, существенно зависят от характера внешнего воздействия и температуры. Поэтому характеристики волнового движения определяются не только упругими, но и пластическими свойствами, а также структурными неоднородностями твердых сплавов.

В настоящее время ультразвуковые колебания применяются для исследования упругих и неупругих характеристик твердых сплавов. В частности, ультразвуковой резонансный метод контроля прочности и однородности материала основан на принципе измерения скорости ультразвукового импульса, величина которого зависит от упругих свойств и плотности твердого сплава.

В данной работе использован резонансный метод непрерывных колебаний, предложенный в [3, 4]. Схема составного вибратора приведена на рис. 1. Образец с приклеенными кварцевыми датчиками закреплен в специальном держателе. Непрерывно изменяющийся в диапазоне частот $1 \div 10$ МГц ультразвуковой сигнал от генератора после прохождения образца поступает на усилитель. Частота сигнала измеряется частотомером в момент резонанса, т. е. когда на ламповом вольтметре отмечается максимальное напряжение. Диаметр спеченных образцов соответствует размеру ячейки, в которую помещен образец. Образцы спекались в вакуумной печи. Методика получения и структурные характеристики композита приведены в работе [5].

В экспериментах, проведенных при комнатной температуре в диапазоне частот $1 \div 10$ МГц, определялись скорости распространения продольных (v_l) и поперечных (v_t)

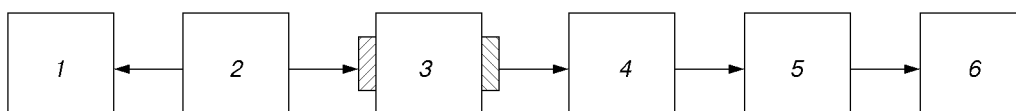


Рис. 1. Схема составного вибратора:

1 — частотомер, 2 — генератор высокой частоты, 3 — образец, 4 — широкополосный предусилитель, 5 — широкополосный усилитель, 6 — ламповый вольтметр

Таблица 1

Объемный состав сплава	v_l , м/с	v_t , м/с	P , %
30 % TiC — 70 % TiNi	7089,3	3619,5	2
40 % TiC — 60 % TiNi	7314,4	3849,5	3
50 % TiC — 50 % TiNi	7934,1	4686,5	1
50 % TiC — 40 % TiNi — 10 % Ti	7990,0	4645,0	1
60 % TiC — 40 % TiNi	7641,9	4358,4	8
70 % TiC — 30 % TiNi	7716,4	4258,2	10
50 % TiC — 49,5 % TiNi — 0,5 % B	7482,1	4207,8	2
50 % TiC — 49 % TiNi — 1 % B	7556,6	4221,9	2,8
50 % TiC — 48,5 % TiNi — 1,5 % B	7616,4	4306,1	2,2
50 % TiC — 48 % TiNi — 2 % B	7811,6	4511,0	1,5
50 % TiC — 49,5 % TiNi — 0,5 % Ni	7994,13	4686,52	3
60 % TiC — 39,5 % TiNi — 0,5 % Ni	7641,86	4358,41	4
50 % TiC — 10 % TiN — 40 % TiNi	7180,3	4192,7	4,5
40 % TiC — 20 % TiN — 40 % TiNi	7244,87	4034,61	5
30 % TiC — 10 % TiN — 60 % TiNi	7350,0	3830,0	7

ультразвуковых волн непрерывных колебаний. Значения v_l , v_t находились по формулам

$$v_l = 2l\Delta f_x[1 + \rho_d l_d / (\rho_o l_o)], \quad v_t = 2l\Delta f_y[1 + \rho_d l_d / (\rho_o l_o)],$$

где ρ_d , ρ_o — плотности кварцевого датчика и образца; l_d , l_o — длины кварцевого датчика и образца; Δf_x , Δf_y — средние разности частот между соседними гармониками. Модули упругости определялись по соотношениям [1, 2]

$$E = 2G(1 + \mu), \quad G = \rho v_t^2, \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}, \quad \mu = \frac{1 - 0,5(v_l/v_t)^2}{1 - (v_l/v_t)^2}. \quad (1)$$

Здесь E — модуль Юнга; G — модуль сдвига; K — коэффициент всестороннего сжатия; μ — коэффициент Пуассона; v_t — продольная скорость звука.

Резонансные частоты определяются толщиной образцов и скоростью звука в них (с небольшим поправочным коэффициентом на влияние датчиков). В спектре составного вибратора присутствует несколько спектральных линий, разделенных примерно равными частотными промежутками.

Для исследования на ультразвуковой установке использовались образцы композиционного твердого сплава TiC–NiTi с параллельными гранями (отклонение не превышало 10^{-3} рад). Чистота обработки поверхности образцов не менее 7-го класса шероховатости. Погрешность определения модулей упругости не превышала 2 %. Полученные экспериментальные значения модулей упругости пересчитывались на беспористое состояние по уравнению [6]

$$\frac{E}{E_0} = \frac{G}{G_0} = \frac{K}{K_0} = 1 - 15P \frac{1 - \mu}{7 - 5\mu},$$

где P — пористость; индекс 0 соответствует сплошному образцу. При этом предполагалось, что коэффициент Пуассона не зависит от пористости образца. Результаты измерения скоростей продольных и поперечных ультразвуковых волн приведены в табл. 1.

Из результатов эксперимента следует, что с увеличением объемной доли карбидной составляющей сплава скорости продольных и поперечных волн вначале увеличиваются, а затем несколько уменьшаются. Возможно, уменьшение значений v_l , v_t связано с большей пористостью образцов; в этих образцах наблюдается существенное затухание ультразвуковых сигналов. Из табл. 1 следует, что небольшие добавки бора (от 0,5 до 2 %) в сплав

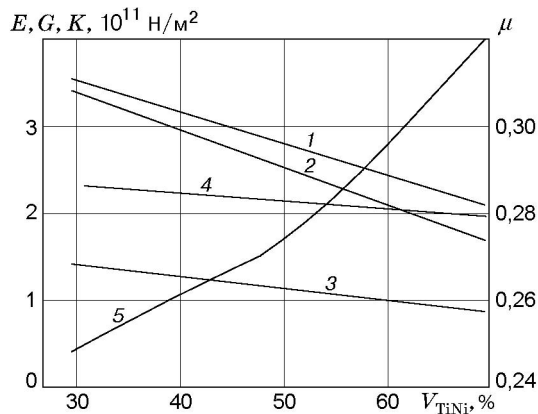


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости модулей упругости и коэффициента Пуассона от объемной доли связки в сплаве TiC–TiNi:

1 — E (эксперимент), 2 — E (расчет), 3 — G , 4 — K , 5 — μ

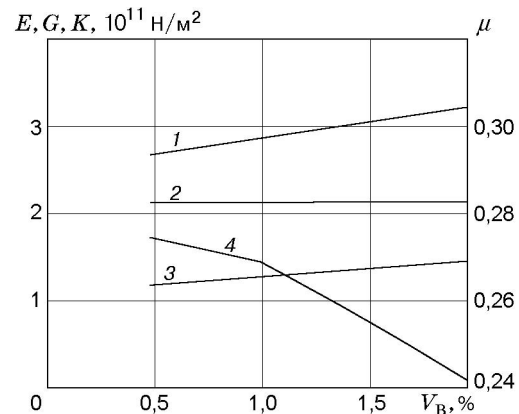


Рис. 3

Рис. 3. Зависимости модулей упругости и коэффициента Пуассона от объемной доли бора в сплаве TiC–TiNi:

1 — E , 2 — G , 3 — K , 4 — μ

50 % TiC — 50 % TiNi также ведут к увеличению скоростей продольных и поперечных ультразвуковых волн. Образцы составов 50 % TiC — 50 % TiNi, 50 % TiC — 48 % TiNi — 2 % В, 50 % TiC — 40 % TiNi — 10 % Ti малопористые, поэтому при нормальных условиях ($T = 293$ K) скорости распространения ультразвуковых волн в них большие.

Зависимости модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента Пуассона, коэффициента всестороннего сжатия от состава образцов определялись по формулам (1) при нормальных условиях.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 2, 3. Видно, что с увеличением объемной доли связующей фазы TiNi от 30 до 70 % значения E , G монотонно уменьшаются, а коэффициент Пуассона почти линейно увеличивается (см. рис. 2). Поскольку значения модулей упругости карбидов и диборидов металлов высокие, значения E , G возрастают с увеличением объемной доли карбидной фазы и добавок бора в сплаве (см. рис. 2, 3). Коэффициент всестороннего сжатия мало зависит от объемной доли связующей фазы. Зависимость экспериментальных значений модуля Юнга для твердых сплавов от объемного соотношения компонентов хорошо согласуется с расчетом по формуле

$$E = (E_{\text{TiC}}V_{\text{TiC}} + E_{\text{TiNi}}V_{\text{TiNi}})/V,$$

где E_{TiC} , E_{TiNi} — модули Юнга карбида титана и никелида титана.

Введение в состав сплава бора в количестве более 2 % приводит к образованию хрупкой фазы TiB₂, исчезновению пластической фазы TiNi и увеличению пористости, поэтому измерение упругих характеристик таких образцов не проводилось.

На основе модулей упругости композиционного материала можно оценить пластические свойства материала. В качестве характеристики пластичности использовалось отношение модуля всестороннего сжатия к модулю сдвига $q = K/G$ [7].

С увеличением объемной доли связующей фазы в твердых сплавах от 30 до 70 % пластичность материала линейно растет (рис. 4). Очевидно, это происходит из-за большой пластичности фазы TiNi, которая после спекания сохраняется в сплаве. Наиболее высокими прочностными и механическими характеристиками обладают твердые сплавы 50 % TiC — 50 % TiNi, 50 % TiC — 40 % TiNi — 10 % Ti, 50 % TiC — 49 % TiNi — 1 % В.

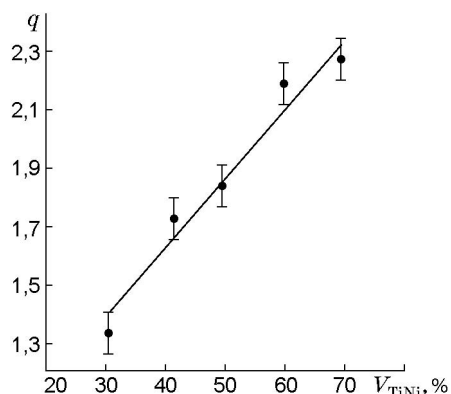


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость пластичности твердого сплава TiC–TiNi от объемной доли связки: точки — экспериментальные данные, линия — их аппроксимация

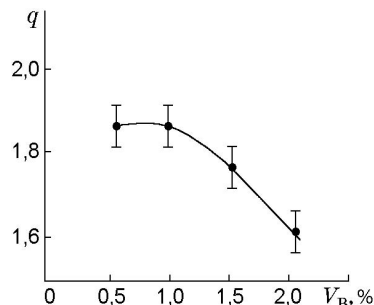


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость пластичности твердого сплава 50 % TiC — (50 – x) % TiNi — x % В от объемной доли бора: точки — экспериментальные данные, линия — их аппроксимация

точки — экспериментальные данные, линия — их аппроксимация

Добавки бора в сплав в небольших количествах (0,5 ÷ 1,0 %) немного увеличивают пластичность материала за счет очищения и раскисления поверхностей взаимодействующих компонентов, что улучшает их взаимодействие при спекании. При увеличении объемной доли бора в сплаве до 1 % и более образуется новая фаза — диборид титана (TiB₂). Эта фаза обладает высокой хрупкостью, поэтому пластичность материала уменьшается (рис. 5).

Результаты расчета модулей упругости и пластичности представлены в табл. 2. Видно, что введение в сплав нитрида титана (TiN) в количестве 10 ÷ 20 % немного увеличивает пластичность материала. Известно, что нитрид титана пластичнее карбида титана. Малые добавки никеля в сплав уменьшают пластичность материала. Это происходит потому, что никель, взаимодействуя с Ti, образует при спекании хрупкие фазы TiNi₃ и TiNi₂. Эти фазы уменьшают пластичность материала, он становится более хрупким.

Введение свободного титана в сплав TiC–TiNi препятствует образованию хрупких фаз TiNi₃ и TiNi₂ и сохраняет пластичную фазу TiNi. Значение q в таком сплаве возрастает до 1,91.

Таким образом, можно утверждать, что легкоплавкая вязкая составляющая никелида титана оказывает существенное влияние на упругие и пластические свойства композиционных материалов. Введение некоторых добавок в композиционный материал способствует улучшению взаимодействия фаз при спекании и улучшает физико-механические свойства материала.

Таблица 2

Объемный состав сплава	K , 10^{10} Н/м ²	G , 10^{10} Н/м ²	q
50 % TiC — 10 % TiN — 40 % TiNi	21,51	11,61	1,72
40 % TiC — 20 % TiN — 40 % TiNi	20,41	10,80	1,89
30 % TiC — 10 % TiN — 60 % TiNi	21,31	11,61	1,84
50 % TiC — 49,5 % TiN — 0,5 % TiNi	23,99	13,60	1,76
60 % TiC — 39,5 % TiNi — 0,5 % N	24,77	15,71	1,57
50 % TiC — 40 % TiNi — 10 % Ti	24,90	13,05	1,91

ЛИТЕРАТУРА

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
2. Баулин С. С., Нуцер М. Л., Фридман Г. Р. Неразрушающий контроль изделий из порошковых материалов с помощью ультразвуковых колебаний // Кузнеч.-штамп. пр-во. 1981. № 1. С. 157–163.
3. Volef D. I., Menes M. Nuclear magnetic resonance acoustic absorption in KI and KBr // Phys. Rev. 1959. V. 114, N 6. P. 1441–1451.
4. Volef D. I., Menes M. Measurement of elastic constants of RbBr, RbI, CsBr and CsI by an ultrasonic resonance technique // J. Appl. Phys. 1960. V. 31, N 6. P. 1010–1017.
5. Акимов В. В., Кульков С. Н., Панин В. Н., Горлач В. В. Влияние добавок бора на фазовый состав сплавов TiC–TiNi // Порошковая металлургия. 1985. № 8. С. 63–65.
6. Плятт Ш. Н., Рапопорт Ю. М., Чофнус Е. Г. К вопросу о зависимости модулей упругости некоторых гетерогенных систем от пористости // Инж.-физ. журн. 1958. Т. 1, № 6. С. 96–99.
7. Иванов Н. А. Упругие теплофизические свойства карбонитридов и оксикарбидов титана, циркония, ниобия: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1975.

*Поступила в редакцию 12/VII 2001 г.,
в окончательном варианте — 27/XI 2001 г.*
