

УДК 539.533; 534.16

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТАЛИ

А. Бади́ди Буда, Х. Бельхельфа, В. Джери́р, Р. Халими

Центр научных исследований и технологий сварки и контроля, Черага, Алжир
E-mails: a.badidi@csc.dz, h.belkhalifa@csc.dz, w.djerir@csc.dz, r.halimi@csc.dz

Предлагается экспериментальный метод оценки объемной доли углерода в стали с помощью ультразвука. Исследуется воздействие звуковых волн на образец, погруженный в резервуар с водой. Скорость продольных волн измерялась погруженным в воду частотным датчиком (5 МГц). Скорость поперечных волн измерялась контактным частотным преобразователем (4 МГц). Коэффициенты затухания ультразвуковых продольных и поперечных волн определялись по параметрам трех последовательных отраженных при прохождении образца волн. Приведены результаты исследований влияния термообработки на параметры ультразвуковых волн. Показано, что с помощью параметров ультразвуковых волн можно не только определить объемную долю углерода в стали, но и получить информацию о ее структуре и эластичности.

Ключевые слова: углеродистая сталь, ультразвуковые волны.

Введение. Как известно, после прохождения через материал параметры ультразвуковых волн изменяются, что обусловлено механическими и физическими свойствами материала [1]. В частности, эти изменения зависят от структуры и свойств материала, количества содержащегося в нем углерода, а также от способа термообработки. Проведено исследование пяти низколегированных марок сталей с различной объемной долей углерода. Для рентгенофлуоресцентной спектрометрии каждой марки стали использовалось несколько образцов, химический состав которых приведен в табл. 1 (v — объемная доля химических веществ в образцах). Для изучения параметров ультразвуковых волн было выбрано по три цилиндрических образца (диаметр 50 мм, толщина 20 мм) из стали следующих пяти марок: 20MC5, 28M6, 35NCD16, XC38, 45NCM16.

Таблица 1

Химический состав образцов

Номер образца	v_C , %	v_{Mn} , %	v_{Si} , %	v_P , %	v_S , %	v_{Cu} , %	v_{Al} , %	v_{Ti} , %	v_{Ni} , %	v_{Cr} , %	v_{Mo} , %	v_V , %	v_{Sn} , %
1	0,192	1,170	0,298	0,020	0,026	0,128	0,0179	0,002	0,083	1,071	0,019	0,003	0,009
2	0,268	1,247	0,213	0,029	0,014	0,041	0,0291	0,002	0,054	0,027	0,010	—	0,005
3	0,344	0,418	0,230	0,020	0,012	0,203	0,0497	0,004	3,475	1,798	0,261	0,007	0,007
4	0,385	0,653	0,177	0,015	0,009	0,134	0,0034	0,002	0,066	0,030	0,011	—	0,015
5	0,439	0,421	0,247	0,016	0,012	0,038	0,0340	0,003	3,659	1,294	0,236	0,003	0,003

Таблица 2

Структура образцов

Номер образца	Марка стали	v_C , %	Структура образца
1	20MC5	0,192	Ферритно-перлитная
2	28M6	0,268	Ферритно-перлитная
3	35NCD16	0,344	Отпущенная
4	XC38	0,385	Ферритно-перлитная
5	45NCM16	0,439	Отпущенная

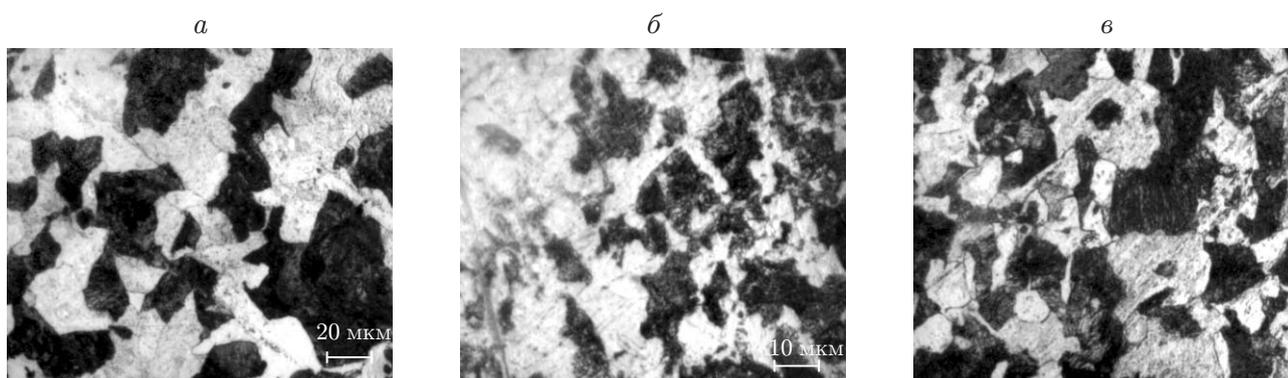


Рис. 1. Ферритно-перлитная микроструктура различных марок стали:
a — 20MC5 ($v_C = 0,192$ %); *б* — 28M6 ($v_C = 0,268$ %); *в* — XC38 ($v_C = 0,385$ %)

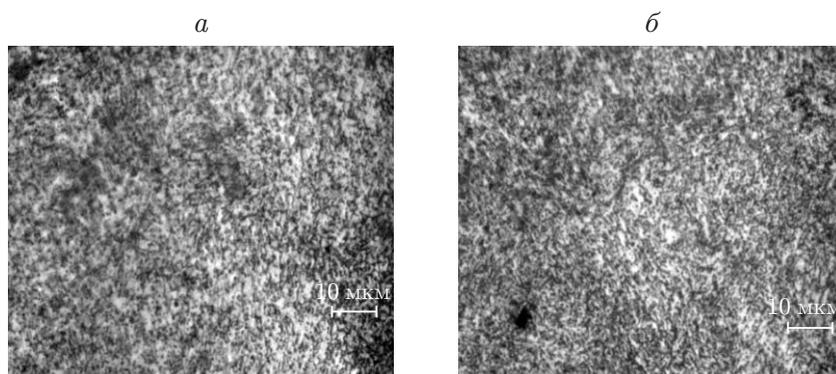


Рис. 2. Микроструктура отпущенной стали различных марок:
a — 35NCD16 ($v_C = 0,344$ %); *б* — 45NCM16 ($v_C = 0,439$ %)

1. Рентгенофлуоресцентная спектрометрия. В результате металлографического исследования образцов в необработанном состоянии обнаружена структура гипозвтектоидных сталей в двух микроструктурных состояниях (табл. 2):

- ферритно-перлитная микроструктура стали марок 20MC5, 28M6 и XC38 (рис. 1);
- микроструктура отпущенной стали марок 35NCD16 и 45NCM16 (рис. 2).

2. Твердость по Виккерсу. Для каждой марки стали была определена твердость по Виккерсу Hv [2]. Результаты представлены в табл. 3. Твердость стали по Виккерсу незначительно увеличивается с увеличением в ней объемной доли углерода (рис. 3). Однако для сталей марок 45NCM16 и 35NCD16 это увеличение является существенным, что объясняется упрочнением микроструктуры в результате отпуска.

Таблица 3
Твердость по Виккерсу сталей с различной объемной долей углерода

Номер образца	v_C , %	Hv
1	0,192	173,6
2	0,268	174,1
3	0,344	250,7
4	0,385	181,7
5	0,439	284,0

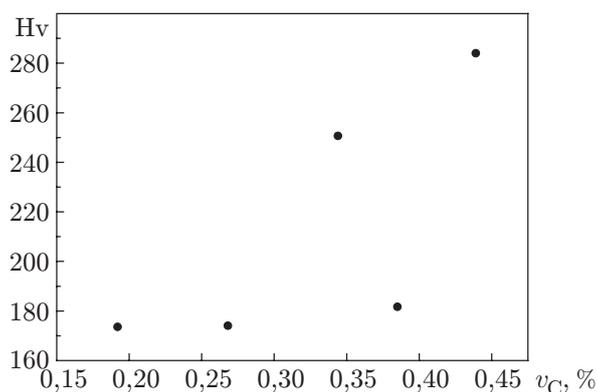


Рис. 3. Зависимость твердости стали по Виккерсу Hv от объемной доли содержащегося в ней углерода

При комнатной температуре стали представляют собой в основном смесь феррита и цементита, объемная доля которых зависит от объемной доли углерода.

Следует отметить, что увеличение объемной доли карбидов приводит к увеличению механической прочности. Очевидно, что прочность зависит как от объемной доли углерода, так и от наличия и способа термообработки, которая при этом является определяющим фактором.

Такая же закономерность обнаружена при исследовании нелегированной углеродистой стали [3]. Увеличение объемной доли углерода приводит к увеличению прочности стали и уменьшению ее пластичности [4, 5]. Увеличение прочности с увеличением объемной доли углерода оказывает влияние на параметры ультразвуковых волн.

3. Экспериментальное исследование ультразвуковых волн. Используемая экспериментальная установка позволяет исследовать свойства материалов неразрушающим методом с помощью ультразвуковых волн. Образец, погруженный в резервуар с водой, облучается звуковыми волнами различной интенсивности. Автоматизированный стенд позволяет улавливать и обрабатывать ультразвуковые сигналы после их прохождения через образцы (рис. 4).

Скорость продольных волн V_L измерялась погруженным в воду частотным датчиком (5 МГц), скорость поперечных волн V_T — контактным способом с использованием преобразователя поперечных волн (4 МГц).

Коэффициенты затухания продольных α_L и поперечных α_T ультразвуковых волн определялись по трем последовательным основным отраженным сигналам, прошедшим через образец [6–9].

На рис. 5 показаны соответственно характерные сигналы продольных α_L и поперечных α_T волн, прошедших через образец из стали марки 28М6.

Результаты измерений скоростей продольных и поперечных волн приведены в табл. 4.

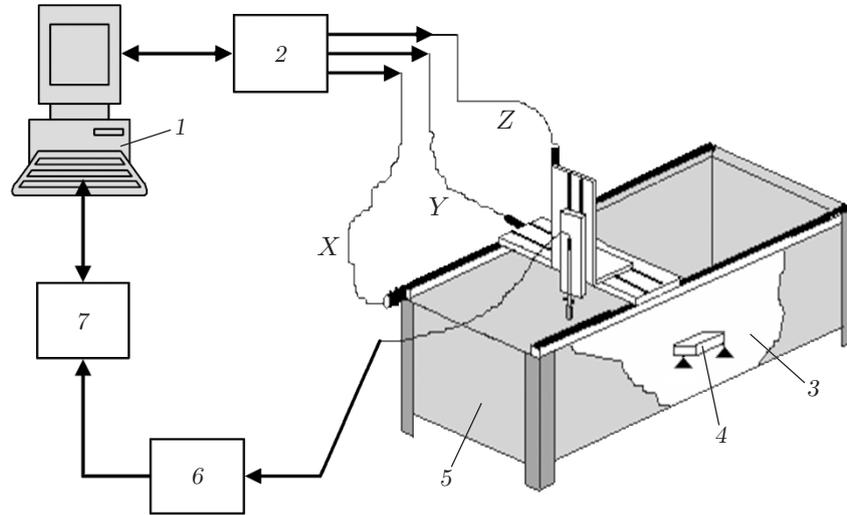


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 — персональный компьютер, 2 — контроллер, 3 — вода, 4 — образец, 5 — резервуар, 6 — передатчик-приемник, 7 — осциллограф

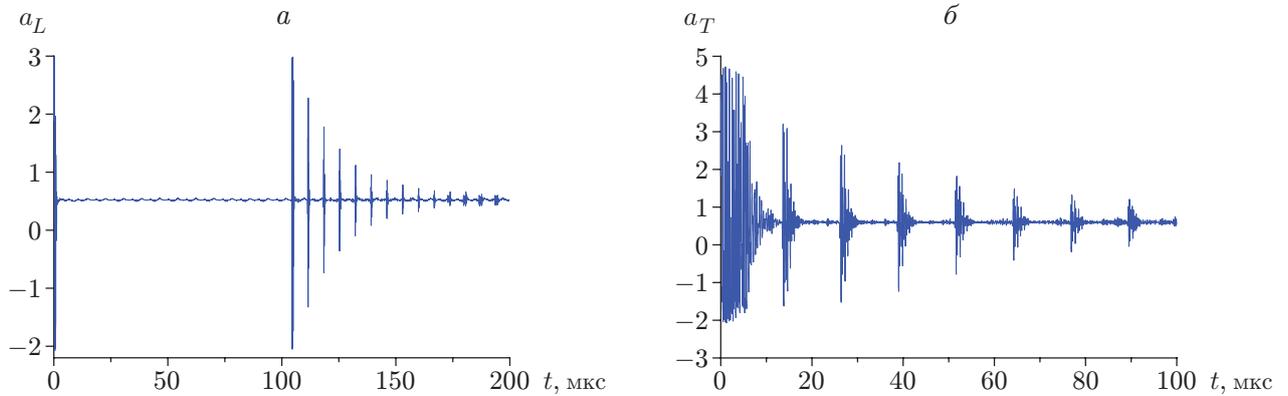


Рис. 5. Характерные сигналы продольной волны, измеренные методом погружения (а), и поперечной волны, измеренные контактным способом (б), для стали марки 28М6

Таблица 4

Зависимости скоростей V_L , V_T от объемной доли углерода

Номер образца	v_C , %	V_L , м/с	V_T , м/с
1	0,192	5925 ± 15	3206 ± 11
2	0,268	5929 ± 15	3212 ± 11
3	0,344	5952 ± 15	3231 ± 11
4	0,385	5930 ± 15	3219 ± 11
5	0,439	5959 ± 15	3232 ± 11

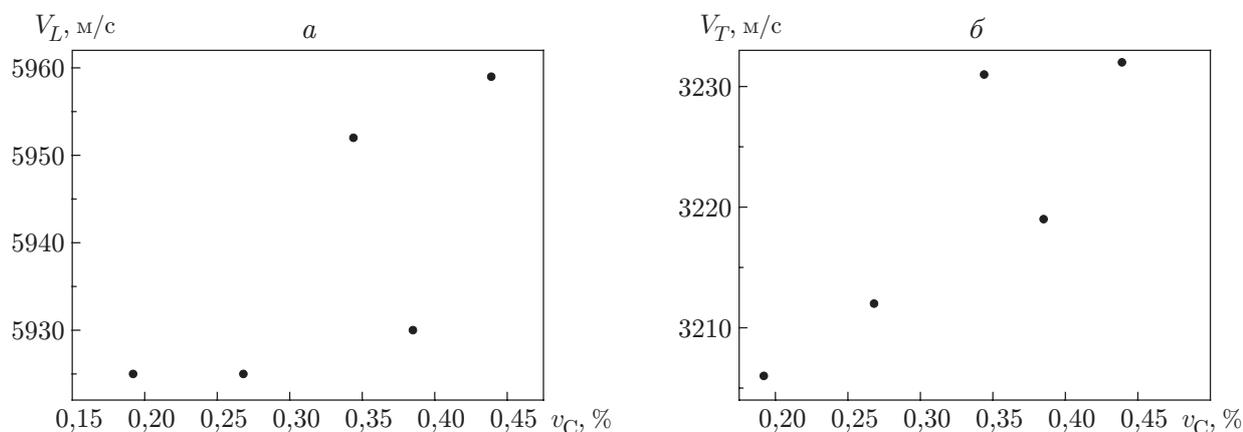
Рис. 6. Зависимости скоростей V_L (а) и V_T (б) от объемной доли углерода

Таблица 5

Зависимости коэффициентов α_L и α_T от объемной доли углерода

Номер образца	v_C , %	α_L , дБ/мм	α_T , дБ/мм
1	0,192	$0,142 \pm 0,010$	$0,174 \pm 0,007$
2	0,268	$0,132 \pm 0,009$	$0,169 \pm 0,005$
3	0,344	$0,116 \pm 0,008$	$0,166 \pm 0,005$
4	0,385	$0,128 \pm 0,009$	$0,168 \pm 0,008$
5	0,439	$0,105 \pm 0,007$	$0,163 \pm 0,008$

Скорости продольных и поперечных волн, так же как и твердость, увеличиваются с увеличением объемной доли углерода (рис. 6). Закономерности изменения скоростей волн и прочности с изменением объемной доли углерода аналогичны. Наиболее значительное увеличение скорости волн наблюдается для образцов 3, 5.

Очевидно, что такая эволюция обусловлена влиянием двух факторов: объемной доли углерода и структуры стали.

Следует отметить, что по измеренным скоростям можно определить объемную долю углерода в стали и получить информацию о ее структуре. Преимуществами предлагаемой экспериментальной методики являются ее неразрушающий характер, простота и невысокая стоимость эксперимента.

Зная скорости продольных V_L и поперечных V_T волн и плотность ρ , можно определить модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν :

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}}.$$

Экспериментальные значения коэффициентов затухания продольных и поперечных волн, прошедших через образец, приведены в табл. 5. С увеличением объемной доли углерода коэффициенты затухания продольных и поперечных волн уменьшаются (рис. 7).

В поликристаллических материалах коэффициент затухания α является суммой коэффициента поглощения α_A и коэффициента рассеяния α_S [10, 11]:

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_S.$$

В области рэлеевских волн (рассматриваемый в данной работе случай), в которой $\lambda \gg D$ (λ — длина волны; D — диаметр зерна), коэффициент поглощения линейно зависит

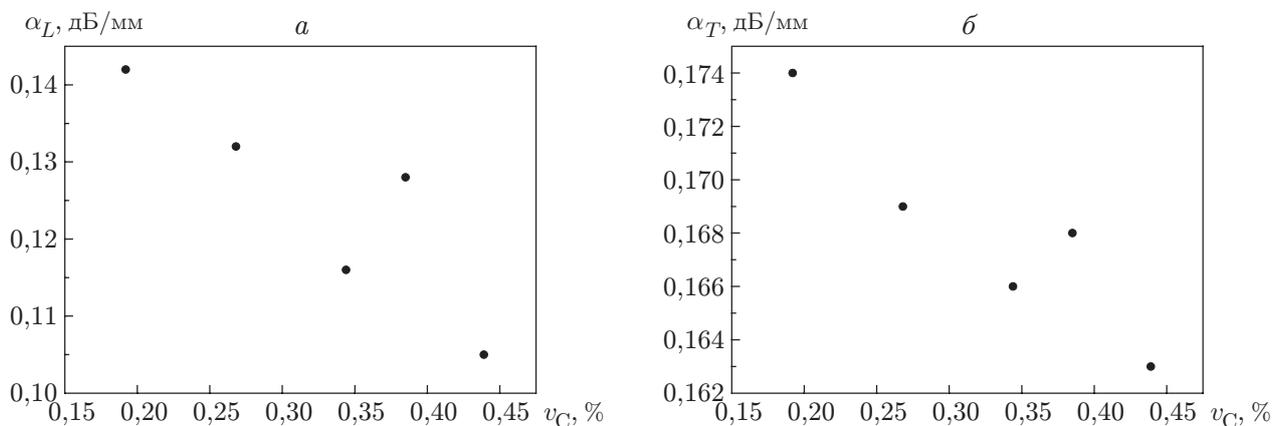


Рис. 7. Зависимости коэффициентов α_L (а) и α_T (б) от объемной доли углерода

от частоты f , а коэффициент рассеяния пропорционален величине f^4 :

$$\alpha(f) = a_1 f + a_2 D^3 f^4 \tag{1}$$

(a_1, a_2 — константы). Из формулы (1) следует, что основную роль в процессе затухания волн играет коэффициент рассеяния α_S . С увеличением твердости уменьшается размер зерна D , следовательно, в соответствии с уравнением (1) должен уменьшаться и коэффициент затухания. Приведенные в данной работе экспериментальные результаты подтверждают этот вывод.

Из результатов экспериментов следует, что с увеличением в стали объемной доли углерода интенсивность затухания волн в ней уменьшается, причем наиболее существенно для образцов 3 и 5, которые были подвергнуты термообработке. Таким образом, затухание волн обусловлено влиянием двух факторов: объемной доли углерода в стали и ее структуры. По измеренным значениям коэффициентов затухания можно определить объемную долю углерода в стали и получить представление о ее структуре.

В соответствии с моделью Меркулова [12] примем следующие зависимости для коэффициентов затухания:

$$\alpha_L = \frac{8\pi^3 D f^4 \mu^2}{375 \rho^2 V_L^3} \left(\frac{2}{V_L^5} + \frac{3}{V_T^5} \right); \tag{2}$$

$$\alpha_T = \frac{2\pi^3 D f^4 \mu^2}{125 \rho^2 V_T^3} \left(\frac{2}{V_L^5} + \frac{3}{V_T^5} \right)$$

(μ — коэффициент анизотропии; ρ — плотность).

Из (2) следует, что с увеличением среднего размера зерна интенсивность затухания увеличивается, а с увеличением скорости распространения волн уменьшается. Эти закономерности подтверждаются полученными экспериментальными данными.

Заключение. Проведено исследование скоростей распространения и коэффициентов затухания ультразвуковых волн при их прохождении через образцы из стали. С использованием полученных данных можно определить объемную долю углерода в стали, ее упругие характеристики, а также микроструктуру, полученную в результате термообработки. Предложенный метод обладает двумя преимуществами: он является неразрушающим и позволяет легко определять скорость продольных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Badidi Bouda A., Benchaala A., Alem K.** Ultrasonic characterization of materials hardness // Ultrasonic. 2000. V. 38. P. 224–227.
2. **Rivenez J., Lambert A.** Mesure et appréciation non destructives des gradients de dureté // CETIM Inform. 1986. N 97.
3. **de Araujo Freitas V. L., de Albuquerque V. H. C., de Macedo S. E.** Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements // Mater. Sci. Engng. A. 2010. V. 527, iss. 16/17. P. 4431–4437.
4. **Steel castings handbook. Suppl. 8. High alloy data sheets. Corrosion Ser. S. 1.: Steel Founders' Soc. Amer., 2004.**
5. **Durand-Charre M.** La microstructure des aciers et des fontes: Genèse et interprétation. Paris: SIRPE, 2003.
6. **Badidi Bouda A., Lebaili S., Benchaala A.** Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation // NDTE Intern. 2003. V. 36, N 1. P. 1–5.
7. **Gracier C., Horsten B.** Simultaneous measurement of speed, attenuation, thickness and density with reflected ultrasonic waves in plates // IEEE. Ultrasonic Symp. 1994. P. 1219–1222.
8. **Peters F., Petit L.** A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media // Ultrasonics. 2003. V. 41. P. 357–363.
9. **Hireskorn S., Van Andel P. W., Netzelmann U.** Ultrasonic methods to detect and evaluate damage in steels // Nondestruct. Test. Evaluat. 2000. V. 15. P. 365–373.
10. **Research techniques in nondestructive testing / Ed. by R. S. Sharpe. S. 1.: Acad. Press, 1980. V. 4.**
11. **Saniie J., Wang T., Bilgutay N. M.** Analysis of homomorphic processing for ultrasonic grain signal characterization // IEEE Trans. UFFC. 1989. V. 36, N 3. P. 365–375.
12. **Merkulov L. G.** Investigation of ultrasonic scattering in metals // Soviet Phys. Tech. Phys. 1957. V. 1. P. 59–69.

Поступила в редакцию 10/IX 2012 г.
