

*А.А. ЗОРИ*, д-т. техн. наук, проф. ДонНТУ,  
*Р.И. СОЛОМИЧЕВ*, студ. ДонНТУ,  
*В.П. ТАРАСЮК*, к-т. техн. наук, доц. ДонНТУ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ВОЗДУХЕ И СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛА ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ИЗ СТАЛИ 150ХНМ**

Предложен расчет коэффициентов затухания ультразвука в металле банджа валков из конкретного типа стали при изменении геометрических размеров зерен металла под действием температуры, а также определены коэффициенты затухания звуковой волны в воздухе при изменении расстояния от объекта контроля до преобразователя. Произведен подбор наиболее оптимальных параметров функционирования разрабатываемой электронной системы.

In the work was taken the calculation results of the ultrasonic attenuation coefficients in the metal bandage rolls of a steel when the geometrical the grains dimensions of the metal under the temperature influence, as well as the damping coefficients of the sound wave in the air when changing the distance from the object to control the converter. Made to select the most optimal functioning parameters developed an electronic system.

**Введение.** Остановка производства стального проката на металлургическом комбинате в связи с внезапным выходом из строя прокатных роликов влечет за собой значительные экономические последствия для предприятия. Поэтому, на данный момент перспективным направлением в металлургическом производстве является осуществление непрерывной оценки износа оборудования с помощью неразрушающего контроля (НК).

В приповерхностном слое металла банджа сталепрокатных валков в процессе многоразовой горячей прокатки возникают усталостные трещины под значительными нагрузками и перепадами температур, которые необходимо своевременно отследить на ранних стадиях их развития. Данная проблема решается бесконтактным электромагнитно-акустическим (ЭМА) методом неразрушающего контроля.

**Постановка задачи.** Для разработки электронной системы диагностического контроля состояния валков, необходимо исследовать затухание ультразвуковых колебаний (УЗК), как в структуре металла, при изменении размеров зерен под действием температуры, так и в воздушной прослойке между датчиком и поверхностью валков.

**Решение задачи и результаты исследований.** Коэффициент затухания УЗК  $\delta$  складывается из коэффициентов поглощения  $\delta_{\text{п}}$  и рассеяния  $\delta_{\text{р}}$ :  $\delta = \delta_{\text{п}} + \delta_{\text{р}}$ . При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны. Большое влияние на величину коэффициента

рассеяния  $\delta_p$  в металле оказывает соотношение среднего размера кристаллов (зерен) -  $\bar{D}$  с длиной волны ультразвука -  $\lambda$ . При  $\bar{D} \ll \lambda$  коэффициент  $\delta_p$  пропорционален  $f^4$ , где  $f$  – частота колебаний (рис.1). Общее затухание в этом случае определяется формулой [1]:

$$d = A \cdot f + B \cdot f^4 \cdot \bar{D}^3, \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные,  $A = 0,096 \cdot 10^{-6}$ ,  $B = 0,4977 \cdot 10^{-24}$ .

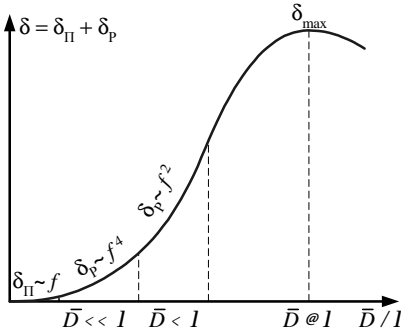


Рис.1. Схематическая зависимость коэффициента затухания от среднего диаметра зерна и длины волны

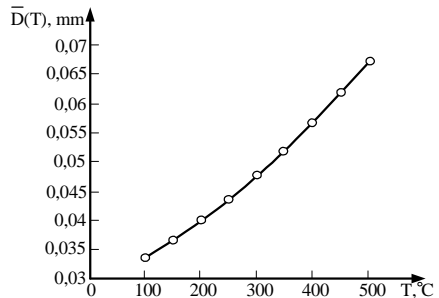


Рис.2. Изменение средней величины зерна в зависимости от температуры нагрева

Расчет коэффициентов затухания производится при частоте колебаний  $f = 2,0$  МГц. Зная скорость распространения волны в углеродистых сталях  $c_1 = 5900$  м/с, определим длину волны  $\lambda$  из соотношения:

$$l = \frac{c_1}{f} = \frac{5900 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^6 \text{ Гц}} = 2,95 \text{ мм}. \quad (2)$$

При теоретическом расчете затухания УЗК в металле воспользуемся справочными данными [2] – характеристикой изменения средней величины зерна стали 150ХНМ от рабочей температуры валков (рис.2). При минимальной рабочей температуре  $T \approx 150$  °С средний диаметр зерна составляет  $\bar{D} = 0,0365$  мм. Тогда, согласно выражению (1) получим затухание:

$$d = 0,0195 \text{ мм}^{-1}.$$

Или выразим в отрицательных децибелах, используя формулу:

$$N = 20 \lg(e^{-d \cdot X}), \quad (3)$$

где  $X$  – удаление от источника УЗК, на котором вычисляется затухание.

В таблице 1 представлены значения приведенных коэффициентов затухания наклонных поперечных ультразвуковых волн, определенные по формуле (1) при  $X$ : 16, 24 и 30 мм, а также значения, рассчитанные по формуле (3), где  $\Delta N$  – разность показаний аттенюатора затухания

ультразвука в дБ в объекте контроля (ОК) при прохождении расстояния  $X=X_1+X_2$  и изменении температуры на  $\Delta T=50^\circ$  (рис.3).

Таблица 1.

Значения коэффициентов затухания УЗК в зависимости от размеров зерен металла

$\bar{D}, \text{мм}$	$d, \text{мм}^{-1}$	$X = 16 \text{ мм}$		$X = 24 \text{ мм}$		$X = 30 \text{ мм}$	
		$N, \text{дБ}$	$\Delta N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$	$\Delta N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$	$\Delta N, \text{дБ}$
0,033	0,0194	-2,7099	0	-4,0648	0	-5,081	0
0,037	0,0195	-2,7224	0,012	-4,0836	0,019	-5,1044	0,023
0,04	0,0197	-2,7386	0,029	-4,1079	0,043	-5,1349	0,054
0,044	0,0198	-2,7597	0,05	-4,1395	0,075	-5,1744	0,093
0,048	0,0200	-2,7871	0,077	-4,1807	0,116	-5,2259	0,145
0,052	0,0203	-2,8228	0,113	-4,2342	0,169	-5,2927	0,212
0,057	0,0206	-2,8692	0,159	-4,3038	0,239	-5,3797	0,299
0,062	0,0210	-2,9295	0,22	-4,3942	0,329	-5,4927	0,412
0,067	0,0216	-3,0079	0,298	-4,5118	0,447	-5,6397	0,559

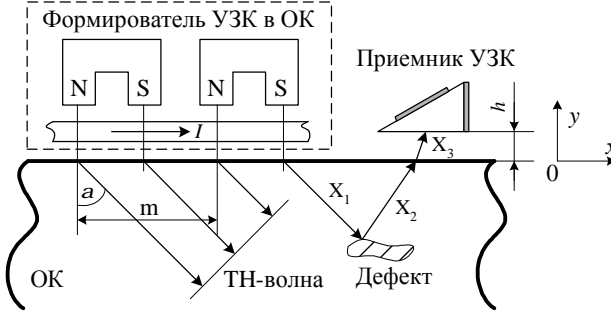


Рис.3. Схема проведения диагностического контроля

На рис. 4 приведена зависимость  $\Delta N$  от среднего диаметра зерна  $\bar{D}$  стали 150ХНМ на частоте 2,0 МГц при  $X=16$  мм (кривая 1),  $X=24$  мм (кривая 2) и  $X=30$  мм (кривая 3).

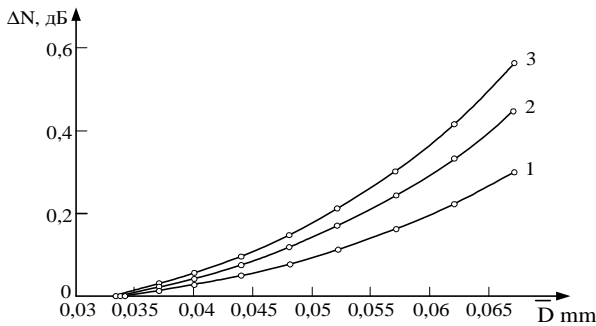


Рис. 4. Зависимость  $\Delta N$  от среднего диаметра зерна стали 150ХНМ

Из полученных результатов следует, что затухание волны в металлической структуре валков не превышает 1 дБ. В контексте проектируемой электронной системы диагностического контроля это показывает, что снижение амплитуды УЗК будет не существенным при изменении среднего диаметра зерен от 0,033 мм до 0,067 мм, вызванное изменением температуры валков от 150°С до 500°С.

Расчитаем коэффициент затухания акустической волны в воздушном слое, толщиной  $h$  (рис.3), который имеет место между ОК и приемником УЗК. Для этого составим волновое уравнение для вязкой теплопроводящей среды, используя уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial r'}{\partial t} + r_0 \cdot \text{div } v = 0 \quad (4)$$

и уравнение Навье-Стокса:

$$r_0 \frac{\partial v}{\partial t} + c_0^2 \nabla r' - \left( \frac{4}{3} h + x \right) \Delta v = 0, \quad (5)$$

где  $\eta=1,9 \cdot 10^{-5}$  (Па·с) и  $\xi=17,2 \cdot 10^{-6}$  (Па·с) – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости;  $c_0$  – скорость звука.

Из выражений (4) и (5), которые являются линеаризованными уравнениями гидродинамики для возмущений плотности  $\rho'$  и колебательной скорости  $v$ , находим уравнение для колебательной скорости, предполагая, что волна распространяется по оси  $y$ :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{b}{r_0} \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial y^2 \partial t} = 0, \quad (6)$$

где  $b=(4/3)\eta+\xi$ .

С учетом эффективного коэффициента вязкости получим:

$$b = \frac{4}{3} h + x + k \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right), \quad (7)$$

где  $k$ -коэффициент теплопроводности, его зависимость от температуры приведена на рис.5 [3];  $c_p=1,006 \cdot 10^3$  (Дж/кг·К) и  $c_v=0,717 \cdot 10^3$  (Дж/кг·К) – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме.

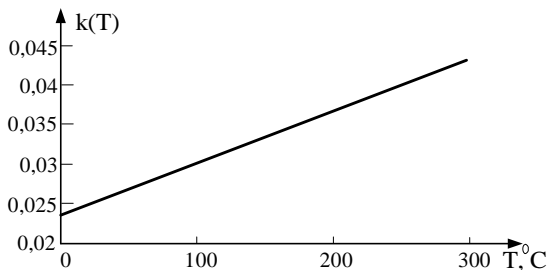


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры

Ищем решение волнового уравнения (6) в виде:

$$u = u_0 \exp(ikx - i\omega t). \quad (8)$$

После подстановки в волновое уравнение получаем закон дисперсии:

$$w^2 + c_0^2 k^2 - \frac{b}{r_0} i w k^2 = 0. \quad (9)$$

Отсюда находим, что если  $bw/(c_0^2 r_0) \ll 1$  (это соответствует малому затуханию звука на расстояниях порядка длины волны), то

$$k^2 = \frac{w^2}{c_0^2 - ibw/r_0} = \frac{w^2}{c_0^2} \left( 1 + i \frac{bw}{r_0 c_0^2} \right) \equiv (k_0 + ib)^2. \quad (10)$$

Используя выражение (8) при  $k_0 = w/c_0$ , имеем коэффициент затухания звука с учетом изменения температуры воздуха:

$$b(T) = \frac{w^2}{2r_0 (c(T))^3} \left[ \left( \frac{4}{3}h + x \right) + k(T) \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (11)$$

где  $c(T) = 331,3 + 1,21 \cdot T$  - зависимость скорости звука от температуры воздуха [4] (рис.6),  $\rho_0 = 1,293 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> - плотность воздуха,  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота в рад/с.

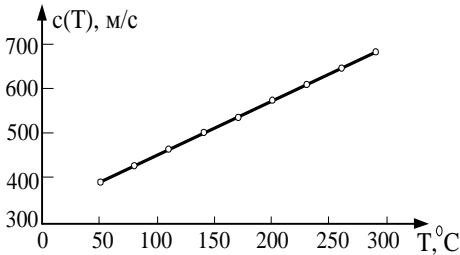


Рис. 6. Зависимость скорости звука в воздухе от температуры

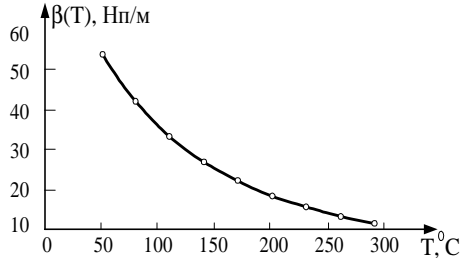


Рис. 7. Зависимость коэффициента затухания УЗК в воздухе от температуры

Согласно формуле (11), имеем зависимость коэффициента затухания УЗК в воздухе от изменения температуры воздуха от 50°C до 300°C (рис.7).

Используем выражение (3), для выражения затухание в отрицательных дБ при вариации расстояния  $h$  от ОК до приемника УЗК. Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Значения коэффициентов затухания УЗК в воздухе при изменении температуры

$T, ^\circ\text{C}$	$b, \text{мм}^{-1}$	$X_3 = 3 \text{ мм}$	$X_3 = 5 \text{ мм}$	$X_3 = 7 \text{ мм}$
		$N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$	$N, \text{дБ}$
1	2	3	4	5
50	54,22	-1,413	-2,355	-3,297
80	42,20	-1,100	-1,833	-2,566

1	2	3	5	7
110	33,52	-0,874	-1,456	-2,038
140	27,12	-0,707	-1,178	-1,649
170	22,28	-0,581	-0,968	-1,355
200	18,56	-0,484	-0,806	-1,128
230	15,64	-0,408	-0,679	-0,951
260	13,32	-0,347	-0,579	-0,810
290	11,45	-0,298	-0,497	-0,696

В таблице 2 представлены значения приведенных коэффициентов затухания наклонных поперечных ультразвуковых волн в воздушном слое, где  $N$  – затухания ультразвука в дБ между объектом контроля (ОК) и приемником при прохождении расстояния  $X_3$  (рис.3). На рис. 8 приведена зависимость  $N$  от температуры на частоте УЗК 2,0 МГц при  $X_3=3$  мм (кривая 1), при  $X_3=5$  мм (кривая 2) и при  $X_3=7$  мм (кривая 3).

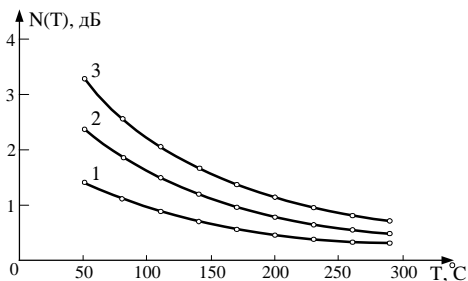


Рис. 8. Зависимость  $\Delta N$  от температуры воздуха и расстояния  $h$

**Заключение.** Из результатов исследования следует, что затухание волны в воздухе велико, существенно зависит от расстояния  $h$  и превышает затухание волны в металле больше чем в  $2 \cdot 10^3$  раза (по шкале в неперях,  $1 \text{ Нп} = 1 \text{ мм}^{-1}$ ). Общий коэффициент затухания определяется как алгебраическая сумма коэффициентов затухания волны в двух средах. Основное снижение амплитуды УЗК в основном происходит из-за наявности воздушного слоя, который является неизбежным и необходимым условием безконтактного способа контроля валков и, следовательно, затуханием в металле можно пренебречь. Повышение амплитуды УЗК у приемника, не увеличивая мощности излучения, возможно лишь при уменьшении воздушного зазора, который является оптимальным в пределах  $X_3=5$  мм.

**Список литературы:** 1. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. – М: Высшая школа, 1991. – 283 с. 2. Геращенко О.А, Гордов А.Н, Лах В.И. Справочник: температурные измерения.– К: Наукова думка, 1984. – 495 с. 3. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М: Высшая школа, 1978. – 445с. 4. Гурбатов С.Н, Руденко О.В. Акустика в задачах. – М: Наука, 1996. – 335 с. 5. Иванов А.И. Поведение металлов при повышенных нестационарных температурах и нагрузках. – М: Металлургия, 1982. – 351 с.