



Modeling of the Effect of Attenuation of Ultrasonic Longitudinal Waves in Cast Iron with Flake Graphite on the Characteristics of Pulse Signals

Vadim N. DANILOV, Liubov V. VORONKOVA

CNIITMASH JSC, Moscow, RUSSIA
e-mail: vadnicdan@yandex.ru, voronkova-lv@yandex.ru

Abstract

An approach to describe the propagation and attenuation of ultrasonic waves in cast iron as a two-phase medium with inclusions of flake graphite of different contents, which allows to simulate the characteristics of ultrasonic testing of such media when changing the structure and conditions of control is proposed in the article. The influence of attenuation on the spectra and shape of pulses propagating in cast iron, as well as on the normalized pulse directivity characteristics of transmitting signals and their difference from similar diagrams for pearlitic steel is shown.

Keywords: Gray cast iron, two-phase medium, attenuation of ultrasonic wave, scattering on graphite inclusions, frequency spectrum, pulse signal length, directivity characteristics.

Моделирование влияния затухания ультразвуковых продольных волн в чугуна с пластинчатым графитом на характеристики импульсных сигналов

Вадим Н. ДАНИЛОВ, Любовь В. ВОРОНKOVA

1. Введение.

Чугун – это основной металл черной металлургии. Он представляет собой высокоуглеродистый сплав на основе железа. В сером чугуна (СЧ) углерод при охлаждении металла образуется в виде пластинчатых включений. Высокое содержание углерода в свободном состоянии определяет механические свойства серого чугуна. Такой чугун характеризуется высокими литейными качествами и малой усадкой при застывании. Расплавленный металл имеет высокую текучесть, поэтому из него можно выполнять отливки сложной формы. Ограничения по использованию изделий из серого чугуна обусловлены тем, что он имеет низкую прочность на изгиб и высокую хрупкость. Вместе с тем прочность серого чугуна на сжатие очень высока [1].

Характерный признак серого чугуна – пластинчатые или волокнистые отложения графита [2]. Улучшение механических свойств серого чугуна осуществляется модифицированием (введением в расплав вещества, влияющего на кристаллизацию, измельчающего структурные составляющие чугуна) и легированием (введением в расплав или шихту веществ, улучшающих различные свойства чугуна).

Впервые оценка коэффициента затухания упругих продольных волн вследствие их рассеяния на графитных включениях проводилась с использованием теории Мэсона, с учетом объемного содержания пластинчатого графита в чугуна, экспериментальных значений скорости продольной волны в чугуна, ступенчатой аппроксимации коэффициента затухания.

Исследовано влияние затухания упругих продольных волн в чугуна на характеристики импульсных сигналов различной длины. Для этих импульсов представлены частотные спектры, показано, как понижается частота максимума спектра с увеличением коэффициента затухания, уменьшается амплитуда и ширина спектра.

2. Акустические свойства серого чугуна.

Химический состав, физические свойства и марки серого чугуна приведены в ГОСТ1412-85 «Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки» [3]. Подобные сведения можно найти также в работах [4-6]. Среднее массовое содержание графита (углерода) в зависимости от марки чугуна с пластинчатым графитом составляет $\delta M_{\Gamma} \sim 3,0 - 3,4\%$ и очень существенно влияет на скорость упругих продольных волн в чугуна c_l . Эта скорость также связана со средним линейным размером графитовых включений \bar{D}_{Γ} [7-9], возрастающим с увеличением содержания графита δM_{Γ} .

Несмотря на наличие различной экспериментальной информации о затухании продольной упругой волны в зависимости от размера и содержания графитовых включений в чугуна, единый подход к описанию распространения и затухания ультразвуковой волны в чугуна как двухфазной среде с включениями пластинчатого графита отсутствует, что не позволяет моделировать характеристики ультразвукового контроля подобных сред при изменении структуры и условий контроля.

Поскольку значения параметров c_l , δM_{Γ} и \bar{D}_{Γ} весьма тесно связаны между собой, то при моделировании затухания продольных волн в чугуна целесообразен выбор одновременно всех трех этих параметров. В данной работе для оценки влияния затухания продольных волн в чугуна с пластинчатым графитом (СЧ) на характеристики ультразвуковых сигналов были выбраны три модели, характеризующие низкое (модель №1), среднее (№2) и высокое (№3) затухание (см. таблицу 1).

Табл.1. Модели чугуна с пластинчатым графитом для оценки затухания продольных волн

№	1	2	3
δM_{Γ} , %	2,8	3,0	3,2
c_l , мм/мкс	4,5	4,2	4,0
\bar{D}_{Γ} , мм	0,07	0,11	0,15

3. Определение коэффициента затухания ультразвука для различных моделей чугуна.

Формула оценки коэффициента затухания упругих продольных волн в чугуна с пластинчатым графитом вследствие их рассеяния на структурных элементах с использованием теории Мэсона [10-12] имеет следующий вид:

$$\delta_{pl} = \frac{1}{8\pi} F_a k_l [(k_l \bar{D}_{\Gamma})^3 \Theta(1 - k_l \bar{D}_{\Gamma}) + k_l \bar{D}_{\Gamma} \Theta(k_l \bar{D}_{\Gamma} - 1)], \quad (1)$$

$$\Theta(x) = 1 \text{ при } x > 0 \text{ и } \Theta(x) = 0 \text{ при } x < 0$$

где k_l – волновое число продольной волны в чугуна, F_a – коэффициент анизотропии, характеризующий отклонение модуля объемной упругости фаз чугуна – металлической основы и углеродной – от среднего значения с учетом их объемного содержания; \bar{D}_{Γ} – средний линейный размер включения в чугуна (см. табл.1).

Коэффициент F_a в случае двухфазной среды записывается в виде [13]:

$$F_a = \delta V_\Gamma \left(1 - \frac{K_\Gamma}{K_{M+\Gamma}}\right)^2 + (1 - \delta V_\Gamma) \left(1 - \frac{K_M}{K_{M+\Gamma}}\right)^2, \quad (2)$$

где δV_Γ – объемное содержание графитовых (углеродных) включений; K_Γ – модуль объемной упругости графита, K_M – модуль объемной упругости металлической основы чугуна, а $K_{M+\Gamma}$ – аналогичный модуль самого чугуна (усредненное значение модулей составляющих чугуна фаз).

В формуле (2)

$$K_\Gamma = \rho_\Gamma c_{l\Gamma}^2, \quad K_M = \rho_M c_{lM}^2, \quad K_{M+\Gamma} = \rho c_l^2, \quad (3)$$

где ρ_Γ – плотность графита, ρ_M – плотность металлической основы чугуна, ρ – плотность чугуна; $c_{l\Gamma} \cong 1,47$ мм/мкс, $c_{lM} \cong 5,9$ мм/мкс и c_l – соответственно скорости продольных волн в графитовых (углеродных) включениях, металлической основе и самом чугуне. Значение плотности ρ может быть определено по формуле [14]:

$$\rho = \rho_\Gamma \delta V_\Gamma + \rho_M (1 - \delta V_\Gamma) \quad (4)$$

В справочной литературе обычно приводится массовое δM_Γ [3], а не объемное δV_Γ содержание углерода (графита) в чугуне, используемое в формулах (2) и (4). Соответствующий пересчет можно сделать с применением соотношения

$$\delta V_\Gamma = \delta M_\Gamma / [\delta M_\Gamma + (1 - \delta M_\Gamma) \rho_\Gamma / \rho_M] \quad (5)$$

Оценочное значение δM_Γ в чугуне с пластинчатым графитом составляет $\sim 3\%$ (см. табл.1), что при $\rho_M = 7800$ кг/м³ и $\rho_\Gamma = 2200$ кг/м³ [15] по формуле (5) дает оценку величины $\delta V_\Gamma \sim 10\%$, что примерно соответствует отношению [13] $(\frac{\bar{D}_\Gamma}{d_\Gamma})^3 = 3F_a$, где \bar{d}_Γ – среднее расстояние между графитовыми включениями (рассеивающими элементами), при этом величина $\frac{1}{\bar{d}_\Gamma^3}$ характеризует плотность элементов. Как показано в [8, 9], форма

элементов графита очень существенно влияет на скорость продольных волн в чугуне, соответственно на упругий модуль $K_{M+\Gamma}$, и приводит к большим погрешностям в определении значения коэффициента анизотропии (2) и величины коэффициента затухания (1). Поэтому при практических оценках затухания расчетным путем для определения модуля $K_{M+\Gamma}$ целесообразно использовать экспериментально измеряемое значение скорости продольной волны в чугуне c_l .

Формула (1) со ступенчатой аппроксимацией коэффициента затухания применима в области рэлеевского рассеяния при [12, 13] $\lambda_l \geq 2\pi\bar{D}_\Gamma$, где $\lambda_l = \frac{2\pi}{k_l}$ – длина продольной волны в чугуне, и в области фазового (стохастического) рассеяния при $\bar{D}_\Gamma \leq \lambda_l < 2\pi\bar{D}_\Gamma$.

Помимо затухания, обусловленного рассеянием продольных волн в чугуне на графитовых включениях, имеет место и затухание, связанное с диссипативным поглощением и рассеянием упругих волн на кристаллитах в металлической основе чугуна, занимающей около 90% объема. В этом случае оценка коэффициента затухания δ_{Ml} с учетом поглощения может проводиться с использованием формулы И.Н. Ермолова для малоуглеродистой стали [15, 16]:

$$\delta_{Ml} = 0,12 f + 20 \bar{D}_M^3 f^4, \quad (6)$$

где \bar{D}_M – средний размер зерна (кристаллита) металлической основы (в мм), f – частота колебаний (в МГц), δ_{Ml} – коэффициент затухания (в Нп/мм).

Общий оценочный коэффициент затухания продольных волн в чугуне δ_l представляется в виде

$$\delta_l = \delta_{pl} + \delta_{Ml} , \quad (7)$$

где коэффициент δ_{pl} определяется по формуле (1), а δ_{Ml} – по формуле (6).

По формуле (7) были проведены расчеты коэффициента затухания δ_l продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом. Частотные зависимости коэффициента $\delta_l (f)$ для моделей 1 – 3 чугуна с пластинчатым графитом (табл.1) и коэффициента затухания δ_{Ml} (И.Н. Ермолова) для малоуглеродистой стали ($\bar{D}_M = 0,05$ мм) приведены на рис.1.

Из этого рисунка видно, что коэффициент затухания продольных волн в чугуне δ_l на частоте $f = 5$ МГц много больше, чем коэффициент затухания δ_{Ml} для стали (0,0022, зависимость 4), причем даже для модели 1 (0,024 Нп/мм, зависимость 1).

4. Основные результаты исследований.

Для исследования влияния затухания упругих продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом на характеристики сигналов были выбраны модели излучаемых в чугунах упругих импульсов различной длины. Пьезопластина с задаваемой номинальной частотой f_0 предполагалась нагруженной с одной стороны на призму из оргстекла с акустическим импедансом $\cong 3 \times 10^6$ кг/(м² с), а с другой на демпфер, импеданс которого мог изменяться от 4×10^6 до 24×10^6 кг/(м² с).

В процессе моделирования влияния затухания упругих продольных волн в чугуне на характеристики сигналов комплексный частотный спектр импульса выбранной формы умножался на частотно зависимый множитель $\exp(-\delta_l d)$, характеризующий затухание различных составляющих спектра сигнала, определяемого коэффициентом затухания δ_l (рис.1) в зависимости от пройденного продольной волной расстояния d в чугуне.

При распространении импульса продольной волны в чугуне с пластинчатым графитом из-за гораздо большего, чем для перлитной стали, коэффициента затухания вследствие рассеяния на включениях графита будет меняться форма спектра. При этом понижается частота максимума спектра импульса, уменьшается значение самого максимума и ширина спектра с соответствующим уменьшением амплитуды импульса и изменением его формы.

На рис.2 приведены частотные спектры импульсов сигналов с формой 3 ($S_{сз}^N$, короткий импульс) для рабочей частоты $f_0 = 1,8$ МГц, нормированные на максимум спектра излучаемого сигнала ($S_{нз}^N$), прошедших в моделях чугуна с пластинчатым графитом 1 – 3 (см. табл.1) расстояние $d = 60$ мм.

Из рис.2 следует, что чем короче импульс (шире спектр), тем больше смещение максимума спектра в область частот, меньших номинальной. Например, для формы 3 и той же модели чугуна (зависимость 4) – $\cong 1,37$ МГц, что значительно ниже номинальной частоты f_0 . Смещение максимума спектра обуславливает изменение формы импульса.

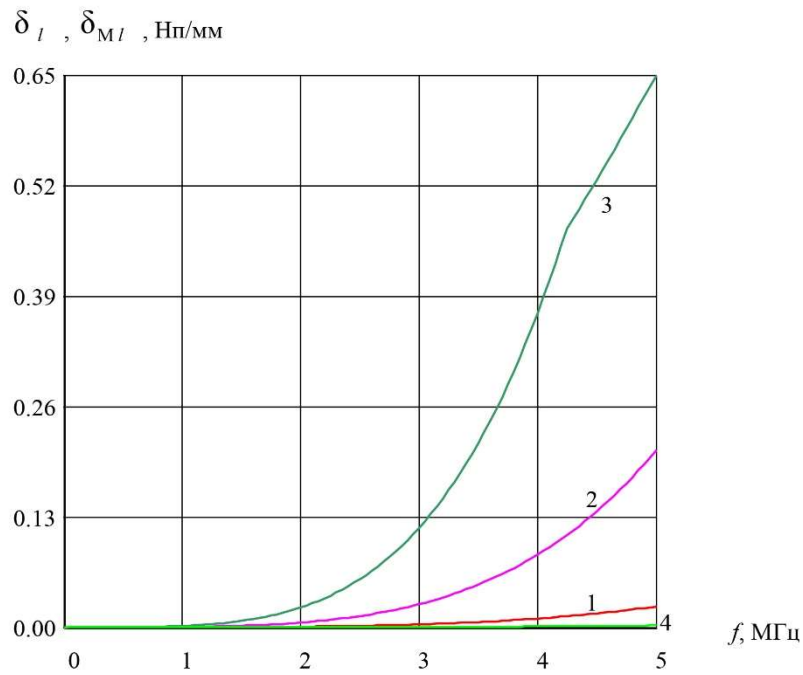


Рис.1. Частотные зависимости коэффициентов затухания δ_l и δ_{Ml} : 1. – δ_l , модель чугуна 1; 2. – δ_l , модель чугуна 2; 3. – δ_l , модель чугуна 3; δ_{Ml} – модель И.Н. Ермолова для малоуглеродистой стали.

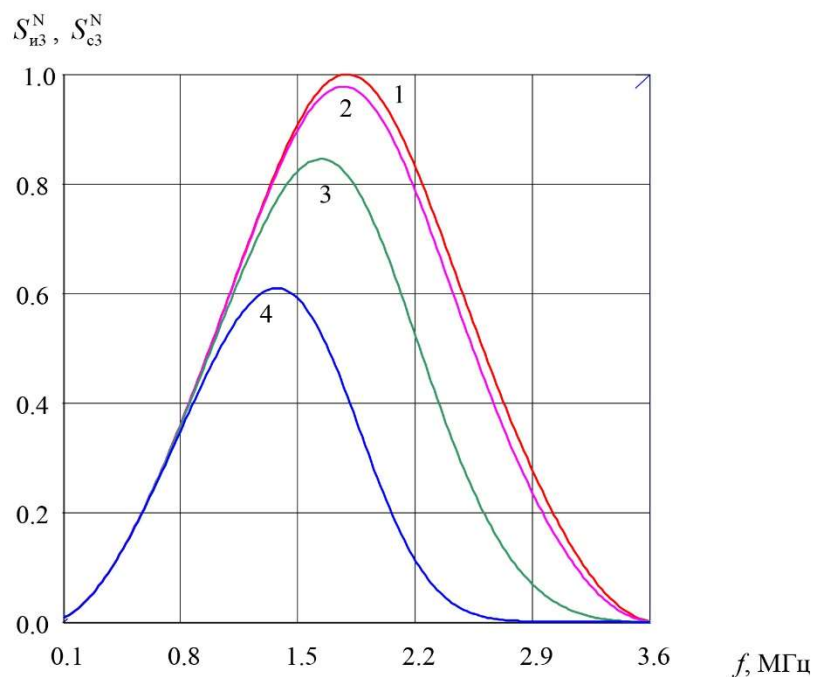


Рис.2. Спектры импульсов формы 3 ($f_0 = 1,8$ МГц): 1. – излучаемого S_{N3}^N ; 2 – 4 сигналов S_{N3}^N , прошедших расстояние $d = 60$ мм в чугуне - 2. – модели 1, 3. – модели 2, 4. – модели 3.

Увеличение расстояния d , проходимого ультразвуковым импульсом в чугуне, приводит к соответствующему возрастанию влияния затухания на форму его спектра, а также на вид самого сигнала.

Более детально влияние изменения расстояния d на спектры сигналов S_{c3}^N для модели чугуна 3 представлено рис.3.

Для сигнала с широким спектром $S_{и3}^N$ (рис.3) увеличение расстояния d приводит к гораздо меньшему падению значения максимума чем для сигнала с узким спектром, и весьма заметному уменьшению частоты максимума спектра.

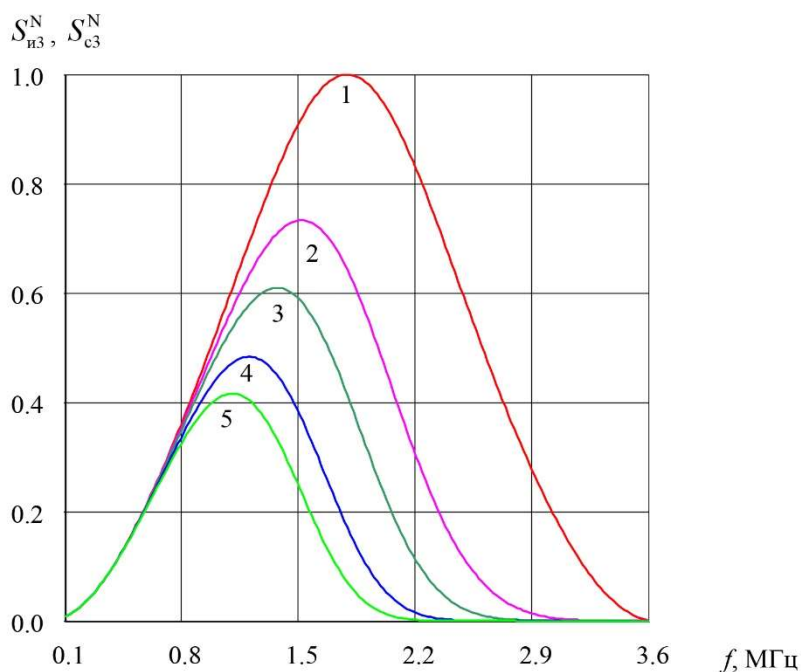


Рис.3. Спектры импульсов формы 3 ($f_0 = 1,8$ МГц): 1. – излучаемого $S_{и3}^N$; 2 – 5 сигналов S_{c3}^N , прошедших в чугуне модели 3 расстояние - 2. – $d = 30$ мм, 3. – $d = 60$ мм, 4. – $d = 120$ мм, 5. – $d = 180$ мм.

На рис.4 видно изменение формы импульса с широким частотным спектром ($S_{и3}^N$) вследствие ослабления его высокочастотных составляющих и смещения максимума спектра в низкочастотную область (см. рис.3, зависимость 4). Для импульса с узким спектром ($S_{и1}^N$) влияние затухания на его форму сказывается гораздо меньше.

Примеры форм излучаемого и регистрируемого коротких сигналов приведены на рис.4.

Повышение рабочей частоты приводит к возрастанию коэффициента затухания (см. рис.4) и возрастанию влияния затухания на форму спектра и вид распространяющегося в чугуне ультразвукового импульса. Значение $d = 60$ мм на частоте $f_0 = 2,5$ МГц соответствует дальности до отражателя при ультразвуковом контроле эхо – методом 30 мм, рекомендованной в работе [15] при контроле на этой частоте.

Также проводилось исследование влияния затухания упругих продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом на импульсную типовую диаграмму направленности круглой пьезопластины (по И.Н. Ермолову) [15, 16] $|\Phi_{и}| = \left| \frac{2J_1(q)}{q} \right|$, J_1 – цилиндрическая функция Бесселя первого порядка, q безразмерный параметр, аналогично тому, как это делалось в работе [17]. В качестве примера на рис.5 приведены результаты расчетов диаграмм для номинальной частоты сигнала $f_0 = 1,8$ МГц.

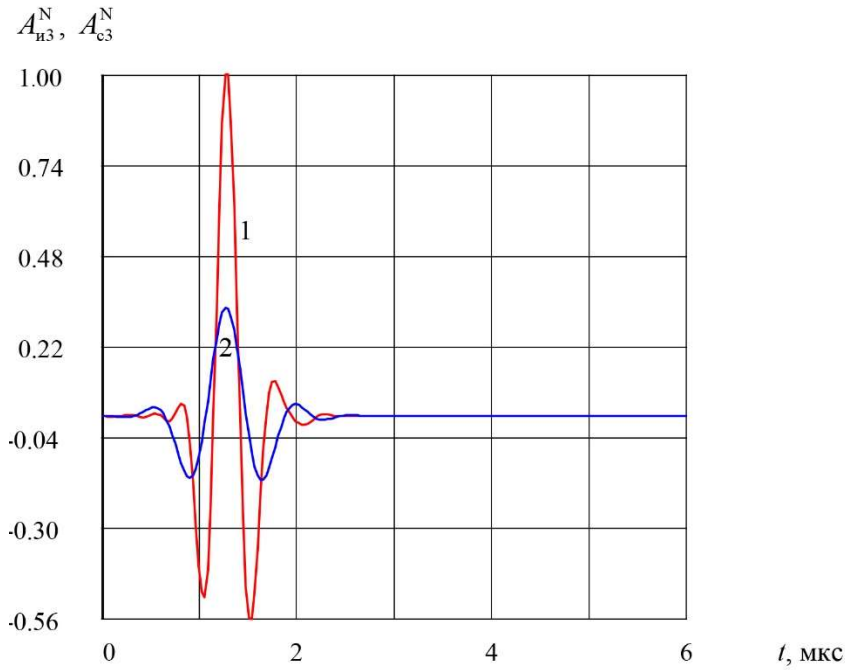


Рис.4. Формы излучаемого импульса $A_{из}^N$ и импульса сигнала $A_{с3}^N$, прошедшего расстояние $d = 120$ мм в чугуна с пластинчатым графитом модели 3 ($f_0 = 1,8$ МГц): 1. – $A_{из}^N$; 2. – $A_{с3}^N$.

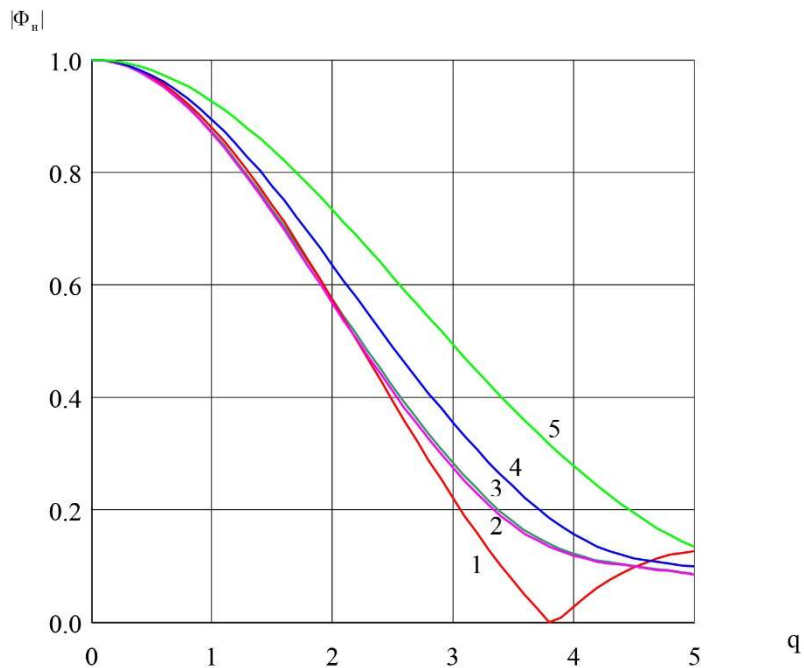


Рис.5. Диаграммы направленности: 1. – непрерывный режим излучения; 2. – импульсный режим (для импульса формы 3, $A_{из}^N$); 3. – для импульса сигнала $A_{с3}^N$, прошедшего расстояние $d = 60$ мм в чугуна с пластинчатым графитом модели 1; 4. – для – " – модели 2; 5. – для – " – модели 3.

Расширение спектра $|\Phi_n|$ на рис.5 обусловлено смещением максимума спектра сигнала в область низких частот (рис.2) вследствие затухания ультразвуковой волны в чугуна с пластинчатым графитом, возрастающего с увеличением номера модели (рис.1).

Толщина ультразвукового контроля стенок отливок из чугуна с пластинчатым графитом на частоте 2,5 МГц по экспериментальным данным работы [9] (длительность импульсов не известна) не превышает 20 мм, что соответствует полученной величине.

Диаграмма 2 на рис.5 соответствует отсутствию затухания или значению расстояния $d = 0$. Диаграмма 3 на рис.5 мало отличается от 2-ой, поскольку смещение максимума спектра для модели чугуна 1 и расстояния $d = 60$ мм незначительно. Для значений параметра $q < 2,3$ диаграммы 1 – 3 практически сливаются.

Сравнение импульсных диаграмм показывает их расширение с возрастанием расстояния d , более выраженное для импульса меньшей длительности, при этом для короткого импульса с широким спектром такое изменение диаграмм связано преимущественно с уменьшением частоты максимума спектра с ростом d , а для длинного – с возрастающей асимметрией формы спектра при незначительном смещении его максимума.

Из табл.1 видно, что скорость продольных волн в чугуне (c_l) для всех моделей ниже чем в перлитной стали или металлической основе (c_{lM}), поэтому диаграмма направленности одного и того же преобразователя в чугуне будет уже, чем в стали, поскольку в нем волновое число продольной волны $k_l \sim 1/c_l$ будет больше, чем для стали. Поэтому сопоставление диаграмм направленности $|\Phi_n|$ продольных волн для стали и чугуна целесообразно осуществлять, предполагая, что параметр q относится к излучению этих волн в сталь, а соответствующее значение аналогичного параметра для чугуна, определяемое как $q c_{lM}/c_l$, будет больше, чем для стали.

5. Выводы.

1. При моделировании затухания продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом для расчетной модели целесообразен выбор трех параметров – скорости продольных волн, массового содержания графитовых включений и их среднего линейного размера.

2. Предложена формула оценки коэффициента затухания упругих продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом вследствие их рэлеевского и фазового рассеяния на графитовых включениях с учетом отклонения модуля объемной упругости фаз чугуна – металлической основы и графитовой – от среднего значения с заданным объемным содержанием этих фаз.

3. Для исследования влияния затухания продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом на характеристики сигналов были выбраны формы излучаемых в чугун упругих импульсов различной длины с узким, средней ширины и широким спектрами.

4. Установлено различие в характере изменения спектров сигналов вследствие частотно зависимого затухания в чугуне в зависимости от длительности импульсов, их номинальных частот, моделей чугуна и пройденного ультразвуковой волной расстояния. Показано, что чем короче импульс (шире спектр), тем больше смещение максимума спектра в область частот, меньших номинальной.

5. Выявлено заметное изменение формы импульса с широким частотным спектром вследствие ослабления высокочастотных составляющих спектра и смещения его максимума в низкочастотную область. Для импульса с узким спектром подобное влияние затухания на его форму сказывается гораздо меньше.

6. Установлено влияние затухания продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом на импульсную диаграмму направленности круглой пьезопластины в зависимости от модели чугуна и длительности импульса. Показано расширение

импульсных диаграмм с возрастанием проходимого волной расстояния в чугунах, тем большее, чем шире спектр импульса.

7. Приведенные в статье результаты могут использоваться при выборе параметров прямых совмещенных преобразователей для контроля чугуна с пластинчатым графитом различной структуры и толщины.

Библиографический список.

1. Справочник по чугунному литью. Под ред. Гиршовича Н.Г. Л.: «Машиностроение», 1978. – 758 с.
2. Пивоварский Е. Высококачественный чугун / Перевод с немецкого Е.К. Захарова [и др.]; под ред. И.Н. Богачева и Б.Г. Лившица. М.: Metallurgia, 1965, Т.1. – 650с.
3. Межгосударственный стандарт ГОСТ1412-85 «Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки». М.: Изд. Стандартов, 2004. – 5 с.
4. Шерман А.Д. Чугун. М.: Metallurgia, 1991. – 576 с.
5. Вегман Е.Ф., Жеребин Н.Ф., Юсфин Ю.С., Курунов И.Ф., Пареньков А.Е., Черноусов П.И. Metallurgia чугуна. Учебник для вузов /Под редакцией Ю.С. Юсфин. – М: Академкнига, 2004. – 774 с.
6. Межгосударственный стандарт ГОСТ3443-87 «Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры». М.: Изд. Стандартов, 2005. – 42 с.
7. Zbinden H.U. Der ultrashall als Mittel der Wer Kstafforschung. – Technica, 1969, № 14, p. 3-18.
8. Heine H.J. Using NDT Effectively – Ultrasonics.- Foundry M and T, 1975, June, p. 76.
9. Воронкова Л.В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. – М.: Изд МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 24 с.
10. Физическая акустика. Под. ред. У. Мэсона. Т. IV, ч. Б. Применение физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела. М.: Изд. "Мир", 1970. – 440 с.
11. Меркулов Л.Г., Меркулова В.М. Лекции по физике ультразвука. – Таганрог, ТРТИ, 1976. – 69 с.
12. Данилов В.Н. К расчету коэффициента затухания упругих волн при рассеянии в поликристаллических средах. – Дефектоскопия, 1989, №8. – с. 17-23.
13. Данилов В.Н., Ермолин А.А. К оценке затухания продольных упругих волн вследствие рассеяния в горных породах. – Изв. ВУЗов. Горный журнал, 1989, №11. – с. 4-8.
14. Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород. М.: Гостоптехиздат, 1962. – 490 с.
15. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Т.3: Ультразвуковой контроль. Справочник. М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
16. Ермолов И.Н. Контроль ультразвуком (краткий справочник). М.: НПО ЦНИИТМАШ, 1992. – 86 с.
17. Данилов В.Н. К расчету акустического поля наклонного преобразователя в дальней зоне. – Дефектоскопия, 2009, №12, с. 36 – 51.