

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 8
 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

В.Н. Данилов, В.М. Ушаков, А.И. Рымкевич. Исследование возможностей оценки состояния структуры металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации, ультразвуковым методом.....	3
В.Ю. Шпильной, В.П. Вавилов, Д.А. Дерусова, Н.В. Дружинин, А.Ю. Ямановская. Особенности проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с использованием бесконтактной ультразвуковой стимуляции и лазерного вибросканирования	14
А.В. Мартыненко, В.П. Ермаченко. К вопросу об интерпретации эхограмм ультразвукового импульсного дефектоскопа	24

Электромагнитные методы

В.Е. Никулин, С.Г. Паршин, А.М. Левченко. Исследование остаточных сварочных напряжений при подводной мокрой сварке низколегированной стали с применением магнитоанизотропного и рентгенодифрактометрического метода	37
В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич. Дифференциальный фон электрического сигнала, снимаемого с индукционной магнитной головки.....	51
Р.К. Вагапов. Сравнение и интерпретация результатов обработки данных внутритрубной диагностики для условий транспортировки коррозионно-агрессивного газа.....	62
Информация.....	72

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ, НАХОДИВШИХСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ, УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

© 2021 г. В.Н. Данилов^{1,*}, В.М. Ушаков^{1,**}, А.И. Рымкевич¹

¹АО «НПО «НИИТМАШ», Россия 115088 Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4
E-mail: *vadnicdan@yandex.ru; **ushvalmich@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.2021; после доработки 02.06.2021
Принята к публикации 15.06.2021

Представлены результаты первого этапа ультразвуковых исследований структуры металла трубопроводов тепловых электростанций, находившихся в эксплуатации. Испытаниям подвергался металл марок стали: 15X1M1Ф и Ст20 с различной наработкой (временем эксплуатации). Образцы металла подвергались металлографическому анализу, на основании данных которого (среднего размера зерна — \bar{D} , дисперсии распределения $\ln D$ — σ_D) проведен теоретический расчет параметров УЗ импульсов донного сигнала в металле. Получены количественные данные по влиянию толщины слоя контактной жидкости (зазора) между преобразователем и объектом контроля на рабочих частотах 5,0, 7,5 и 10 МГц для различных значений среднего размера зерна металла. Приведены примеры расчетных и экспериментальных импульсов и спектров сигналов для частоты 5 МГц.

Ключевые слова: трубопровод, ультразвук, структура металла, продольная волна, неразрушающий контроль, донный сигнал, импульс, спектр.

DOI: 10.31857/S0130308221080017

1. ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации тепломеханического оборудования атомных электростанций (АЭС) и тепловых (ТЭС) происходит деградация металла, которая сопровождается структурными изменениями, ухудшением механических свойств, накапливаются микрповреждения. Из микротрещин образуются недопустимые макротрещины. Традиционный неразрушающий контроль обеспечивает выявление сформировавшихся при эксплуатации дефектов: трещин различного происхождения, свищей и утонения за счет коррозии объектов контроля. Современные требования безопасности АЭС согласно нормам МАГАТЭ [1, 2] рекомендуется прогнозирование состояния металла, включая оценку структурных изменений, микрповреждений, ухудшения мехсвойств. Такой подход включает оценку несплошностей, а также определение прочностных характеристик металла и оценку изменений его структуры на основании, в том числе, результатов неразрушающего контроля [3—7, 17]. В настоящей статье рассмотрена теоретическая предпосылка возможностей использования ультразвукового метода для оценки состояния структуры металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации.

Исследованию подвергались образцы металла из стали 20, вырезанных из питательного трубопровода (рабочее давление 180 кГ/см² и температура 215°С) и стали 15X1M1Ф паропровода (рабочее давление 38 кГ/см² и температура 545°С). Время эксплуатации трубопроводов (наработка) составляла: для стали 20 — 155 000 и 190 000 ч, а для стали 15X1M1Ф — 208030 и 269386 ч соответственно. В испытаниях использовались также два образца из металла без наработки: один из стали 20 и один из стали 15X1M1Ф.

2. ЦЕЛЬ

Общая цель работы: оценка с помощью ультразвукового метода состояния структуры образцов металла трубопроводов, находившихся в эксплуатации, на основе теоретико-экспериментальных исследований. Рассмотрен первый этап: теоретическое исследование возможностей ультразвукового метода структуроскопии.

В данной статье рассмотрены следующие задачи.

Выполнить металлографию образцов, оценить микроструктуру металла образцов, оценить средний размер зерна \bar{D} .

Провести теоретический расчет по определению влияния микроструктуры и качества шероховатости контактной поверхности на изменение параметров сигнала на частотах: 5,0; 7,5 и 10,0 МГц.

Оценить влияние толщины слоя контактной жидкости на характеристики эхосигнала на указанных частотах.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Металлографический анализ

Работу проводили следующим образом. Из трубопроводов вырезали заготовки, из которых выполнялись образцы в виде кубиков с шероховатостью контактной поверхности образцов — не хуже R_z 5 мкм, остальных поверхностей кубика — R_z 20. Исследования проводились в два этапа. На первом была выполнена металлография образцов с оценкой размера зерна по ГОСТ 5639—82 и микроструктуры по ГОСТ 5640—68 с использованием микроскопа Axiovert 40 MAT (Carl Zeiss, Германия). В табл. 1 представлены результаты металлографического анализа.

Таблица 1

Результаты металлографического анализа испытуемых образцов

Номер образца	Марка и наработка, тыс. ч	Микроструктура	Номер зерна	Оценочный размер зерна, мкм
1А	Ст20; 0 ч	Микрозернистый бейнит с карбидами по границе зерен	9, 10	12—8
1Б	Ст15Х1М1Ф 0 ч	Бейнит отпуска + феррит + карбиды	8, 7	17—20
2 и 3	15Х1М1Ф, 208033 и 269386	Бейнит отпуска + феррит + карбиды со сфероидизацией цементита на границах зерен	5, 6	50—40
4 и 5	Ст20 15500 и 190000	Феррит и пластинчатый перлит	7, 6	25—40

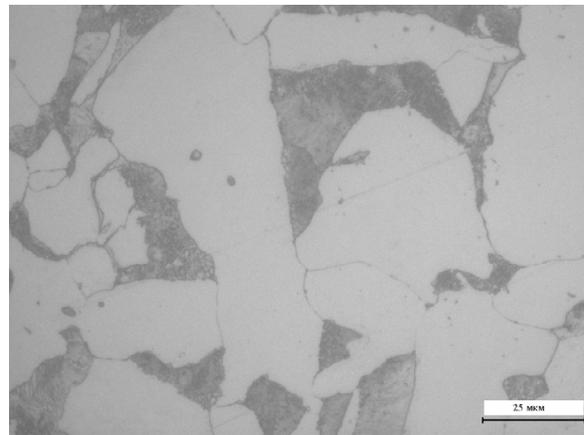
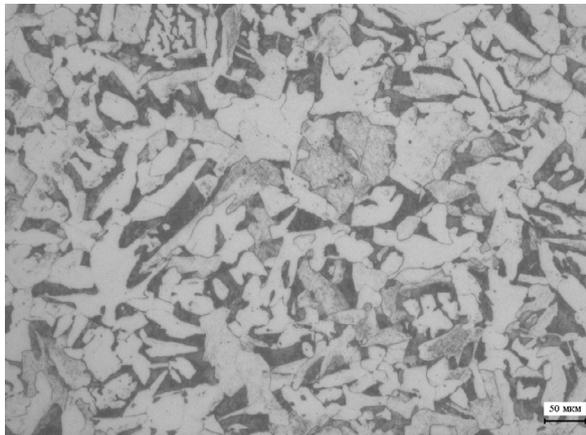


Рис. 1. Микроструктура образца № 5, Ст20 с наработкой 190 тыс. ч. Масштаб 50 мкм (слева), 25 мкм (справа). Увеличение 100×(слева) и 500× (справа).

В качестве примера на рис. 1 показана микроструктура образца № 5 с наработкой 190 тыс. ч.

3.2. Теоретический расчет параметров ультразвуковых эхосигналов

Дальнейшие исследования были ориентированы на проведение теоретического расчета формы и спектра УЗ эхоимпульсов продольных волн в среде с использованием коэффициента затухания, полученного в работе [10].

Следует отметить, что решение задачи структуроскопии ультразвуковым методом рассматривалось многими авторами (см., например, [8—12, 14, 17]). Исследования в данном направлении продолжаются, однако в силу сложности — проблема до конца не решена.

Металлографические исследования образцов металлов с разным временем наработки показали изменение размера зерен (кристаллитов): \bar{D} — среднего размера и среднеквадратичного отклонения σ_D нормального распределения величин $\ln D$ [8—10].

Согласно работам [11, 12], размер зерна оказывает очень большое влияние на коэффициент рассеяния ультразвуковых волн, поэтому структуру металлов целесообразно оценивать по затуханию упругих волн [11], причем одним из перспективных способов этого является исследование спектрального состава донного сигнала или сравнение амплитуд донного сигнала на различных частотах. Качество акустического контакта приводит к разбросу оценки коэффициента затухания, поэтому в теоретических расчетах приведена оценка влияния контакта на параметры эхосигнала.

Коэффициент затухания продольной волны δ_l определяется свойствами металла и складывается из коэффициентов поглощения δ_n и рассеяния δ_p [11, 12]:

$$\delta_l = \delta_n + \delta_p, \quad (1)$$

причем коэффициент затухания δ_n пропорционален частоте колебаний f_p , распространяющейся в среде ультразвуковой волны [11]:

$$\delta_n = A_n f_p. \quad (2)$$

Для малоуглеродистой стали в формуле (2) величина $A_n = 0,12 \times 10^{-3}$ Нп/(МГц мм) (значение коэффициента δ_n определяется в Нп/мм) [11].

Выражение коэффициента затухания продольных волн в поликристаллическом металле, учитывающее статистическое распределение зерен (кристаллитов) по размерам, имеет следующий вид [10]:

$$\delta_p = \frac{21}{40\pi^2} F_a \left(1 + \frac{3}{2} \frac{c_l^5}{c_t^5}\right) k_l \left\{ (k_l \bar{D})^3 \exp(3\sigma_D^2) \times \right. \\ \left. \times \Phi \left[\frac{\ln(D_R/\bar{D}) - 2,5\sigma_D^2}{\sigma_D} \right] + k_l \bar{D} \left(1 - \Phi \left[\frac{\ln(D_R/\bar{D}) - 0,5\sigma_D^2}{\sigma_D} \right] \right) \right\}, \quad (3)$$

где c_p, c_t — скорости продольной и поперечной волн в стали, определяемые по усредненным значениям постоянных Ламэ поликристалла [13, 14], $D_R = \frac{\lambda_l}{2\pi} = \frac{1}{k_l}$ (λ_l — длина продольной волны с волновым

числом k_l); F_a — коэффициент упругой анизотропии металла [10, 14]; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-0,5t^2) dt$ — нормальная функция распределения или $\Phi(x) = 0,5[1 + \operatorname{erf}(x/\sqrt{2})]$ ($\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок).

Первое слагаемое в фигурных скобках в (3) относится к коэффициенту затухания вследствие рэлеевского рассеяния, а второе — фазового [10, 13]; когда разброс размера зерен не учитывается

($\sigma_D \rightarrow 0$), $|x| \rightarrow \infty$ в (3) $\Phi(x) \rightarrow \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$. Согласно работе [14], для стали с относительным объ-

емным содержанием перлита P_n коэффициент анизотропии F_a может быть определен по формуле $F_a = P_n F_{a_n} + (1 - P_n) F_{a_\phi}$, где $F_{a_\phi} = 6,64 \times 10^{-3}$, $F_{a_n} = 1,66 \times 10^{-3}$ со средним значением при $P_n = 0,5 - F_a \cong 0,004$.

Формула (3) использовалась в работе [14] при количественной оценке структуры металла осей колесных пар.

Ниже приведены результаты расчетов донных сигналов моделей прямых преобразователей с номинальными частотами f_0 , равными 5, 7,5, 10 МГц для стали с различными параметрами \bar{D} и σ_D структуры, которые проводились с использованием компьютерной программы, являющейся модификацией программы, описанной в работе [15]; величина F_a имела значение 0,004 [14].

В моделях прямых преобразователей предполагалось, что пьезопластина диаметром 6 мм выполнена из пьезокерамики ЦТС-19, протектор — из минералокерамики с акустическим импедансом 25×10^6 кг/(м²с) [16] имеет толщину, равную 0,5 толщины пьезопластины, которая выбиралась размерами 0,36, 0,27 и 0,18 мм соответственно для частот 5, 7,5 и 10 МГц. В расчетах использовалось значение акустического импеданса демпфера, равное 11×10^6 кг/(м²с), соответствующее применявшемуся при расчетах в работе [16]; влияние электрической схемы включения преобразователя на форму импульса не учитывалось.

В ходе моделирования влияния затухания упругих продольных волн на характеристики донных сигналов комплексный частотный спектр импульса выбранной модели умножался на частотно зависимый множитель $\exp(-\delta_l 2h)$, характеризующий затухание различных составляющих спектра

сигнала, определяемого коэффициентом затухания $\delta_l(1)$ в зависимости от пройденного продольной волной расстояния h до отражающей поверхности. При этом, как показано в работе [15], на спектр и импульс сигнала заметное влияние оказывает толщина слоя контактной жидкости z_c между проектором преобразователя и контролируемой средой.

Расчеты проводились для стали со скоростью $c_l = 5,9$ мм/мкс продольной и $c_t = 3,23$ мм/мкс поперечной волн, расстояние h полагалось равным 30 мм. На рис. 2 приведены нормированные на максимальное значение частотные спектры $S^N(f)$ донного сигнала модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 5$ МГц, параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для нескольких значений толщины z_c (рис. 2а) и значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин размера \bar{D} (рис. 2б). Минимальная частота расчета составляла 0,1 МГц.

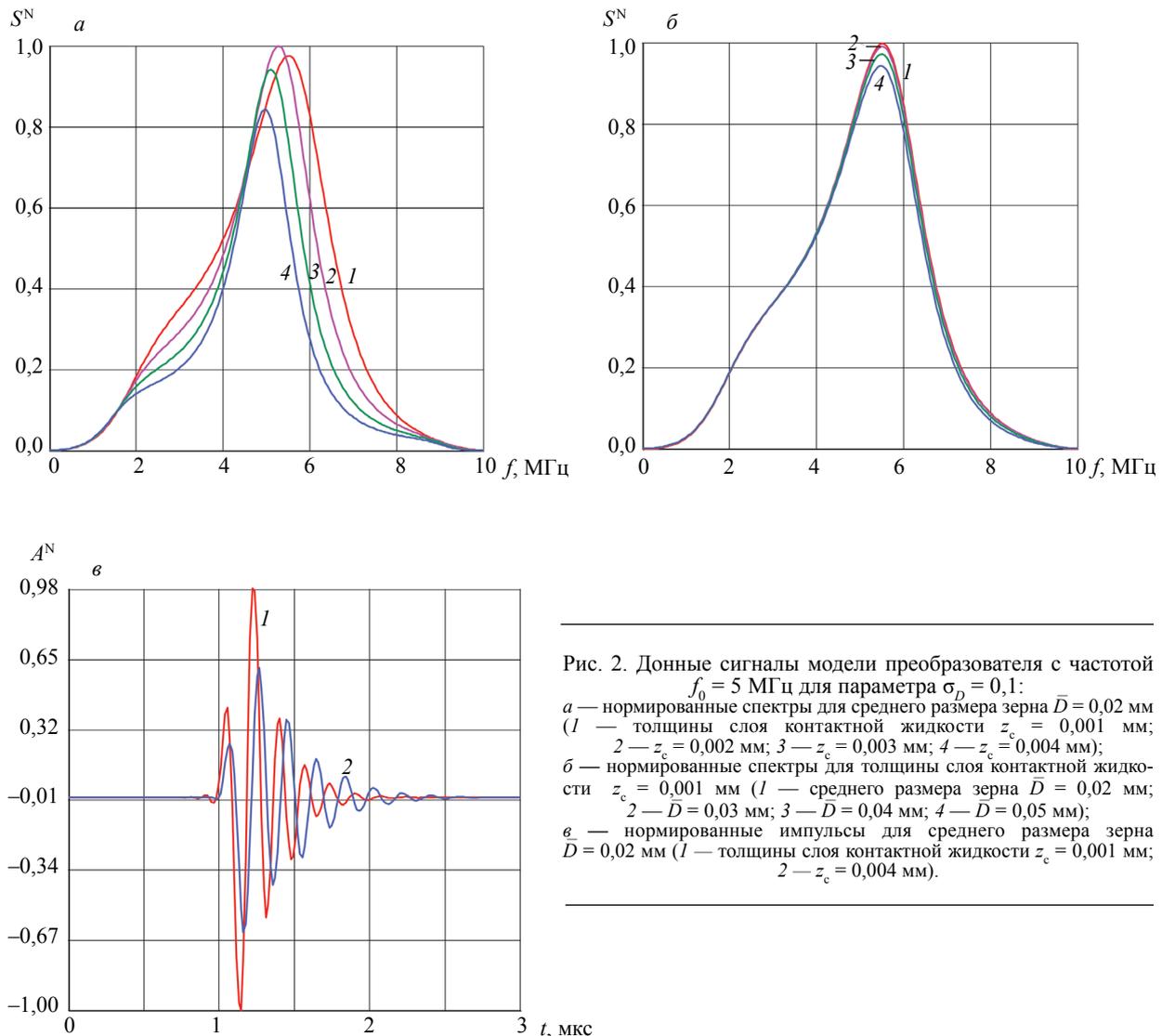


Рис. 2. Донные сигналы модели преобразователя с частотой $f_0 = 5$ МГц для параметра $\sigma_D = 0,1$:
 а — нормированные спектры для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,002$ мм; 3 — $z_c = 0,003$ мм; 4 — $z_c = 0,004$ мм);
 б — нормированные спектры для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм; 2 — $\bar{D} = 0,03$ мм; 3 — $\bar{D} = 0,04$ мм; 4 — $\bar{D} = 0,05$ мм);
 в — нормированные импульсы для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,004$ мм).

Из рис. 2а видно, что увеличение толщины z_c приводит к ограничению спектров сигналов со стороны высоких частот, при этом возрастание z_c от 0,001 до 0,004 мм приводит к уменьшению частоты максимума спектра примерно на 0,5 МГц и уменьшению его ширины. Для частоты модели преобразователя $f_0 = 5$ МГц и расстояния $h = 30$ мм влияние изменения размера зерна \bar{D} от 0,02 до 0,05 мм (см. табл. 1) достаточно мало и приводит к небольшому относительному уменьшению значения максимума спектра при незначительном понижении частоты максимума (рис. 2б). При этом изменение параметра σ_D от 0,1 до 0,7 на спектральные характеристики практически не сказывается.

Нормированные на общий максимум импульсы донного сигнала $A^N(t)$ модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 5$ МГц, размера зерна \bar{D} от 0,02 мм ($\sigma_D = 0,1$) и значений толщины слоя контактной жидкости z_c от 0,001 и 0,004 мм приведены на рис. 2в. Из этого рисунка видно, что увеличение z_c приводит к уменьшению амплитуды и возрастанию длительности импульса.

На рис. 3а приведен вид нормированного теоретического импульса ($f_0 = 5$ МГц) донного сигнала для параметров $\bar{D} = 0,02$ мм, $z_c = 0,003$ мм, на рис. 3б — экспериментального импульса для реального преобразователя П111-5,0-К6-002, отраженного от боковой поверхности стандартного образца СО-2 ($h = 30$ мм), полученного на компьютерной установке «Авгур» [11], а на рис. 3в — экспериментального спектра этого импульса (соответствующий теоретический спектр приведен на рис. 2а — см. зависимость 3). Ширина теоретического спектра на уровне 0,5 (–6 дБ) от максимума составляет примерно 1,7 МГц, а экспериментального — около 1,5 МГц; частота максимума экспериментального спектра ($\approx 4,9$ МГц) несколько ниже частоты максимума теоретического (5,1 МГц).

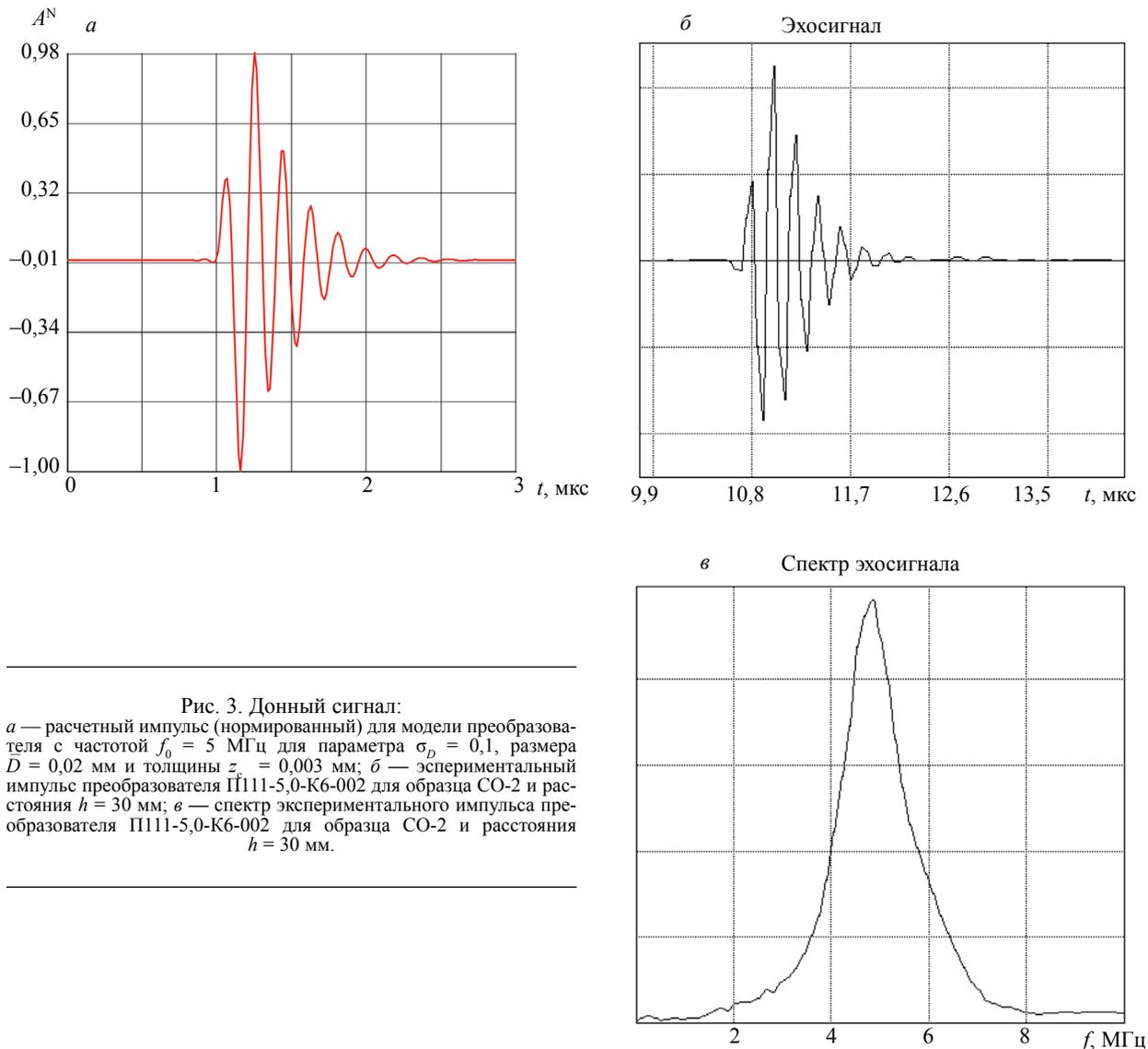


Рис. 3. Донный сигнал:

а — расчетный импульс (нормированный) для модели преобразователя с частотой $f_0 = 5$ МГц для параметра $\sigma_D = 0,1$, размера $\bar{D} = 0,02$ мм и толщины $z_c = 0,003$ мм; б — экспериментальный импульс преобразователя П111-5,0-К6-002 для образца СО-2 и расстояния $h = 30$ мм; в — спектр экспериментального импульса преобразователя П111-5,0-К6-002 для образца СО-2 и расстояния $h = 30$ мм.

Для значения толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,003$ мм формы теоретических и экспериментальных импульсов и спектров наиболее похожие, а их имеющиеся различия могут быть объяснены как ограничениями принятой расчетной модели, в том числе приближенным заданием параметров, определяющих затухание продольных волн в среде, так и возможными отличиями характеристик реального преобразователя и использованных в расчетах.

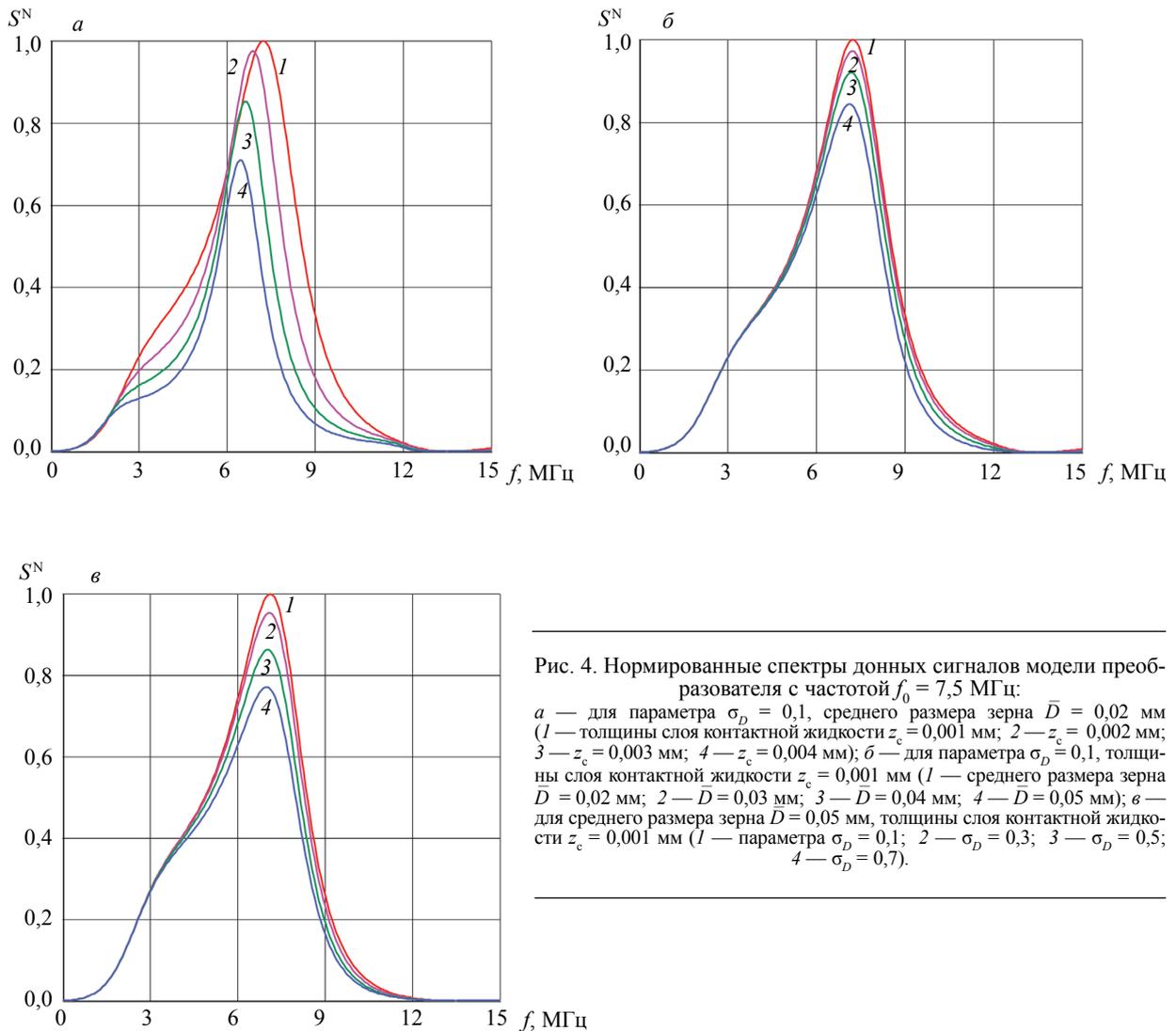


Рис. 4. Нормированные спектры донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц:

a — для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,002$ мм; 3 — $z_c = 0,003$ мм; 4 — $z_c = 0,004$ мм); *б* — для параметра $\sigma_D = 0,1$, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм; 2 — $\bar{D} = 0,03$ мм; 3 — $\bar{D} = 0,04$ мм; 4 — $\bar{D} = 0,05$ мм); *в* — для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,05$ мм, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — параметра $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\sigma_D = 0,3$; 3 — $\sigma_D = 0,5$; 4 — $\sigma_D = 0,7$).

На рис. 4 приведены нормированные на максимальное значение частотные спектры $S^N(f)$ донного сигнала модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 7,5$ МГц, параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для нескольких значений толщины z_c (рис. 4а); значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин размера \bar{D} (рис. 4б); размера $\bar{D} = 0,05$ мм, значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин параметра σ_D (рис. 4в).

Сравнение рис. 4а и б соответственно с рис. 2а и б показывает заметное возрастание влияния изменения параметров z_c и \bar{D} на форму спектра и его значение в максимуме. Изменение величины z_c от 0,001 до 0,004 мм приводит к уменьшению частоты максимума спектра примерно на 0,8 МГц (рис. 4а). Для частоты $f_0 = 7,5$ МГц на значении максимума спектра заметно сказывается и разброс размера зерен, характеризуемый параметром σ_D (см. рис. 4в).

Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (параметр $\sigma_D = 0,1$) и 0,05 мм (параметр $\sigma_D = 0,1, 0,7$) приведены на рис. 5. Форма импульсов 1 — 3 почти не меняется, однако различие их амплитуд весьма заметно. Так, максимум положительной огибающей импульса 3 ($\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$) на треть меньше, чем для импульса 1 ($\bar{D} = 0,02$ мм, $\sigma_D = 0,1$).

На рис. 6 приведены нормированные на максимальное значение частотные спектры $S^N(f)$ донного сигнала модели преобразователя с номинальной частотой $f_0 = 10$ МГц, параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для нескольких значений толщины z_c (рис. 6а); параметра $\sigma_D = 0,1$, величины $z_c = 0,001$ мм для нескольких значений размера \bar{D} (рис. 6б); размера $\bar{D} = 0,05$ мм, значения $z_c = 0,001$ мм для нескольких величин параметра σ_D (рис. 6в).

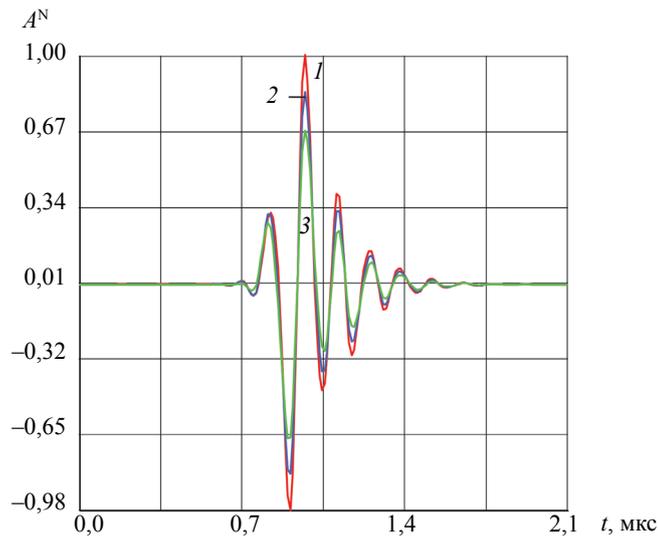


Рис. 5. Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм:

1 — средний размер зерна $\bar{D} = 0,02$ мм, параметр $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,1$; 3 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$.

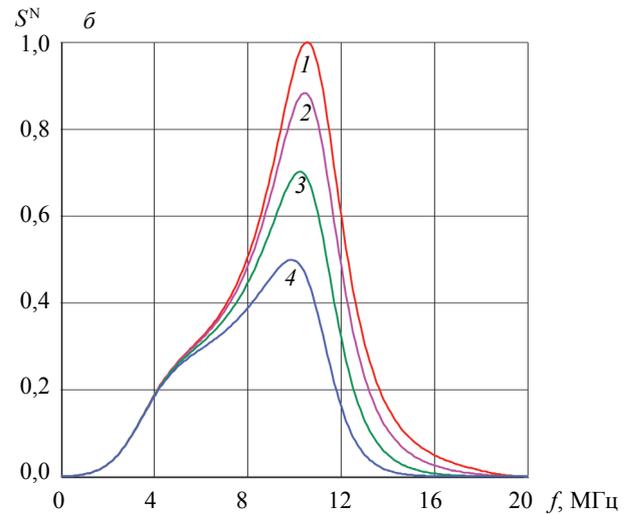
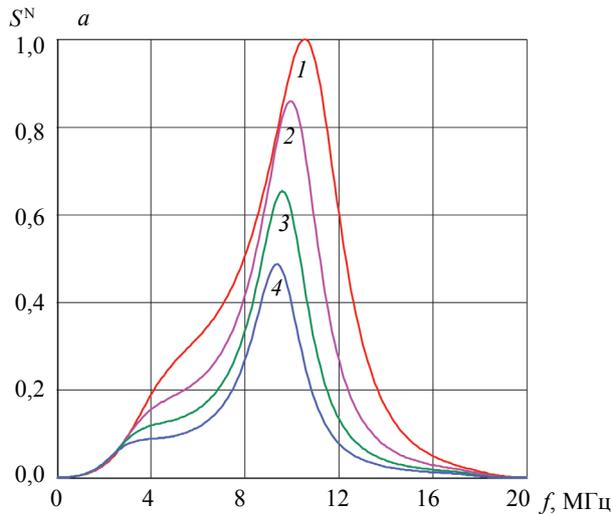
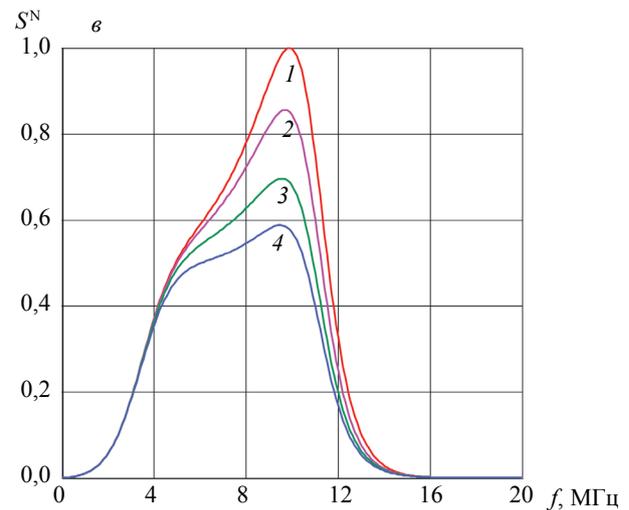


Рис. 6. Нормированные спектры донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц:

a — для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,002$ мм; 3 — $z_c = 0,003$ мм; 4 — $z_c = 0,004$ мм); *б* — для параметра $\sigma_D = 0,1$, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм; 2 — $\bar{D} = 0,03$ мм; 3 — $\bar{D} = 0,04$ мм; 4 — $\bar{D} = 0,05$ мм); *в* — для среднего размера зерна $\bar{D} = 0,05$ мм, толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — параметра $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\sigma_D = 0,3$; 3 — $\sigma_D = 0,5$; 4 — $\sigma_D = 0,7$).



Из сравнения рис. 4а и 6а видно существенное увеличения влияния изменения толщины контактной жидкости z_c как на форму спектра, так на положение частотного максимума и его величину. Увеличение значения z_c от 0,001 мм до 0,004 мм приводит к уменьшению частоты максимума спектра на 1,2 МГц примерно (рис. 6а, $f_0 = 10$ МГц), что на 0,4 МГц больше, чем для частоты $f_0 = 7,5$ МГц (см. рис. 4а); относительная величина максимума S^N для $f_0 = 10$ МГц для $z_c = 0,004$ мм составляет 0,5 примерно (см. зависимость 4 на рис. 6а), а для $f_0 = 7,5$ МГц — $\approx 0,7$ (см. зависимость 4 на рис. 4а).

Влияние изменения размера зерна \bar{D} на спектр S^N для модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц (см. рис. 6б) гораздо более выражено, чем для модели $f_0 = 7,5$ МГц. При увеличении значения \bar{D} от 0,02 до 0,05 мм уменьшение частоты максимума спектра составляет, примерно 0,15 МГц для модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц и 0,6 МГц для модели с $f_0 = 10$ МГц, а соответствующее относительное значение смещения максимума спектра составляет $\approx 0,85$ и 0,5. Влияние разброса размеров зерен (параметра σ_D) на форму и максимум спектра для модели с $f_0 = 10$ МГц гораздо более выражено, чем для модели с $f_0 = 7,5$ МГц (ср. зависимости с одинаковыми номерами на рис. 4в и 6в).

Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм для значений толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм и 0,003 мм приведены на рис. 7а, на котором видно значительное изменение формы импульса и уменьшение максимума огибающей импульса 2 ($z_c = 0,003$ мм) относительно такого максимума импульса 1 ($z_c = 0,001$ мм) в 3 раза.

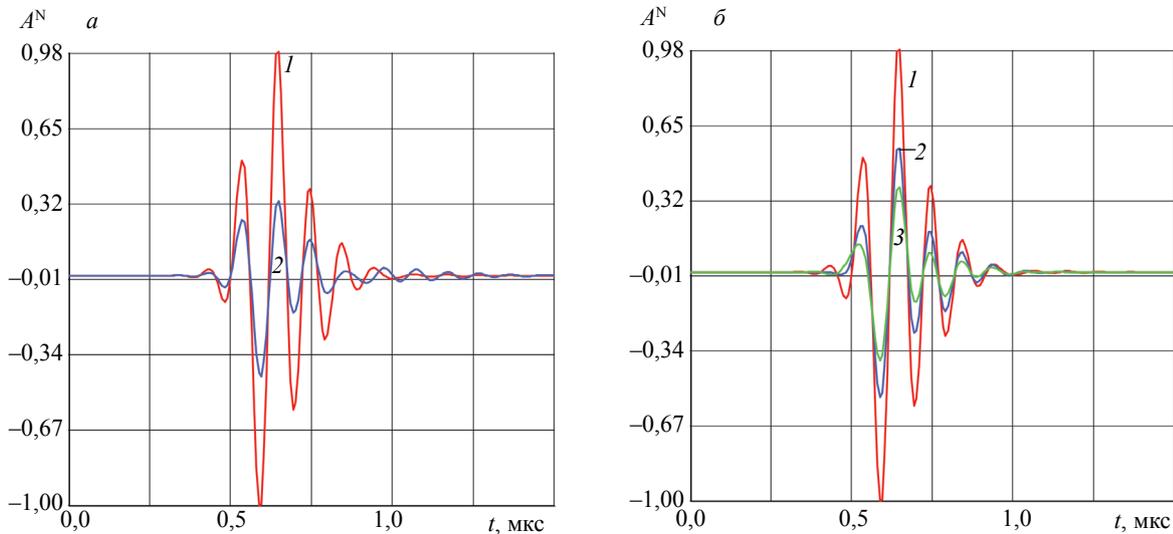


Рис. 7. Нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с частотой $f_0 = 10$ МГц: а — для параметра $\sigma_D = 0,1$, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (1 — толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм; 2 — $z_c = 0,003$ мм); б — для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм (1 — среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм, параметра $\sigma_D = 0,1$; 2 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,1$; 3 — $\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$).

На рис. 7б приведены нормированные импульсы донных сигналов модели преобразователя с $f_0 = 10$ МГц для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм, среднего размера зерна $\bar{D} = 0,02$ мм (параметр $\sigma_D = 0,1$) и 0,05 мм (параметр $\sigma_D = 0,1, 0,7$). Можно отметить некоторое изменение формы импульсов 1 — 3 и весьма существенное различие их амплитуд. Максимум положительной огибающей импульса 3 ($\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,7$) составляет 0,37 от такого максимума импульса 1 ($\bar{D} = 0,02$ мм, $\sigma_D = 0,1$), а аналогичный максимум импульса 2 ($\bar{D} = 0,05$ мм, $\sigma_D = 0,1$) — 0,55. Для модели преобразователя с частотой $f_0 = 7,5$ МГц (см. рис. 5) соответствующие значения относительных максимумов огибающих импульсов 3 и 2 составляют 0,84 и 0,67.

В табл. 2—4 приведены значения отношений максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$ (в дБ) для моделей прямых преобразователей с номинальными частотами $f_0 = 5, 7,5, 10$ МГц для различных значений среднего размера зерна \bar{D} и параметра σ_D соответственно для толщины $z_c = 0,001, 0,002$ и 0,003 мм (расстояние $h = 30$ мм). Значения $A_{0\max}$ (опорных донных сигналов) определялись для фиксированных параметров $\bar{D} = 0,02$ мм и $\sigma_D = 0,1$ для каж-

Таблица 2

Отношения максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$ (в дБ)
для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,001$ мм

σ_D	\bar{D} , мм	$f_0 = 5$ МГц	$f_0 = 7,5$ МГц	$f_0 = 10$ МГц
0,1	0,03	-0,09	-0,26	-0,96
	0,04	-0,25	-0,74	-2,66
	0,05	-0,52	-1,50	-5,06
0,3	0,03	-0,12	-0,36	-1,31
	0,04	-0,33	-0,96	-3,37
	0,05	-0,66	-1,89	-6,02
0,5	0,03	-0,21	-0,61	-2,10
	0,04	-0,54	-1,47	-4,52
	0,05	-0,97	-2,64	-7,25
0,7	0,03	-0,41	-1,05	-3,07
	0,04	-0,86	-2,14	-5,65
	0,05	-1,41	-3,46	-8,34

Таблица 3

Отношения максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$
(в дБ) для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,002$ мм

σ_D	\bar{D} , мм	$f_0 = 5$ МГц	$f_0 = 7,5$ МГц	$f_0 = 10$ МГц
0,1	0,03	-0,06	-0,21	-0,90
	0,04	-0,18	-0,59	-2,46
	0,05	-0,37	-1,12	-4,72
0,3	0,03	-0,08	-0,29	-1,22
	0,04	-0,24	-0,74	-3,11
	0,05	-0,48	-1,41	-5,72
0,5	0,03	-0,15	-0,50	-1,96
	0,04	-0,39	-1,12	-4,29
	0,05	-0,77	-2,02	-7,10
0,7	0,03	-0,30	-0,84	-2,92
	0,04	-0,67	-1,67	-5,48
	0,05	-1,19	-2,73	-8,33

дой модели преобразователя. Из табл. 2—4 видно монотонное убывание значения $A_{\max}/A_{0\max}$ при возрастании величины среднего размера зерна \bar{D} и частоты f_0 модели преобразователя. Увеличение параметра σ_D приводит к смещению диапазонов изменения значения отношений максимумов $A_{\max}/A_{0\max}$. Так, например, для значения $\sigma_D = 0,1$ и размера зерна $\bar{D} = 0,05$ мм отношение $A_{\max}/A_{0\max}$ при возрастании частоты f_0 от 5 до 10 МГц изменяется от -0,52 до -5,06 дБ (см. табл. 2), а для $\sigma_D = 0,7$ и того же размера \bar{D} аналогичное изменение составляет уже от -1,41 до -8,34 дБ. Возрастание толщины слоя контактной жидкости z_c приводит в ряде случаев к некоторому уменьшению величин отношений максимумов огибающих импульсов донных сигналов при сохранении общей тенденции их убывания с ростом значений \bar{D} и f_0 .

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Металлографический анализ показал, что средний размер зерна \bar{D} испытываемого металла, находившегося в эксплуатации (с наработкой), увеличился с 25 до 50 мкм по сравнению металлом без наработки (в этом случае наибольший размер \bar{D} равен примерно 20 мкм (0,02 мм), см. табл. 1). Указанные значения \bar{D} и дисперсии σ_D обуславливали выбор рабочих частот от 5,0 до 10,0 МГц.

Отношения максимумов огибающих импульсов донных сигналов $A_{\max}/A_{0\max}$ (в дБ) для толщины слоя контактной жидкости $z_c = 0,003$ мм

σ_D	\bar{D} , мм	$f_0 = 5$ МГц	$f_0 = 7,5$ МГц	$f_0 = 10$ МГц
0,1	0,03	-0,06	-0,14	-0,84
	0,04	-0,18	-0,42	-2,29
	0,05	-0,38	-0,89	-4,04
0,3	0,03	-0,09	-0,20	-1,14
	0,04	-0,24	-0,55	-2,90
	0,05	-0,49	-1,15	-5,39
0,5	0,03	0,15	-0,35	-1,83
	0,04	-0,39	-0,90	-4,06
	0,05	-0,77	-1,74	-6,90
0,7	0,03	-0,30	-0,66	-2,78
	0,04	-0,68	-1,44	-5,33
	0,05	-1,19	-2,46	-8,30

Теоретический расчет формы донного эхосигнала и его спектра показал следующее: влияние изменения толщины z_c контактного слоя от 0,001 до 0,004 мм сопоставимо с влиянием структуры со средним размером \bar{D} зерна от 20 до 50 мкм (от 0,02 до 0,05 мм) на спектр эхоимпульса, распространяющегося в испытуемом металле образцов. При этом указанное влияние увеличивается с увеличением рабочей частоты от 5,0 до 10 МГц. В частности, на частоте 5,0 МГц такое изменение величин z_c и \bar{D} лишь незначительно смещает частотное положение максимума спектра и несколько уменьшает его амплитуду. На частоте 10 МГц для максимальных значений z_c и \bar{D} наблюдается гораздо более существенное уменьшение амплитуды максимума и его смещения в сторону низких частот. Расширяется также полоса пропускания на уровне 6 дБ от максимума (см. рис. 6а и б). Например, уменьшение амплитуды максимума спектра составляет примерно 6 дБ (ср. кривые 4 на рис. 6а и б). Форма и длительность импульса эхосигнала менее подвержена изменениям, чем его спектр за счет влияния толщины слоя контактной жидкости и среднего размера зерна металла, т.е. спектр сигнала является более информативной характеристикой структуры металла.

Важный для практики ультразвуковой структуроскопии вывод состоит в необходимости учета строго заданной шероховатости поверхности объекта испытаний. Влияние указанной шероховатости можно исключить при нормировке по образцу с заданным размером зерна, т.е. получить исходный спектр сигнала, аналогичный, например, кривой 4 на рис. 6а.

В процессе оценки структуры необходимо обеспечить одинаковость шероховатости поверхности и силы прижатия преобразователя по аналогии с исходным состоянием (т.е. при нормировке). Таким образом, процедура измерения шероховатости поверхности объекта контроля становится обязательной. Допуск на шероховатость может быть определен на основании теоретического расчета.

Данные табл. 2—4 по существу показывают уменьшение чувствительности контроля при увеличении толщины слоя контактной жидкости z_c от 0,001 до 0,004 мм. Указанное уменьшение для использовавшегося в расчетах значения глубины донного сигнала h не превышает 9 дБ. Однако приведенные данные требуют экспериментального подтверждения в зависимости от величины шероховатости поверхности испытуемого металла.

На втором этапе работ по данной теме предполагается проведение экспериментов на образцах металла, представленных в табл. 1.

5. ВЫВОДЫ

На основе металлографического анализа металла трубопроводов марок стали Ст20 и 15Х1М1Ф, находившихся в эксплуатации, определены значения среднего размера зерна. Полученные значения 20—50 мкм (0,02—0,05 мм) использованы в теоретическом расчете параметров эхосигнала: эхоимпульсов донных сигналов и их спектра.

Установлено равнозначное влияние толщины z_c слоя контактной жидкости в пределах от 0,001 до 0,004 мм и среднего размера \bar{D} (0,02—0,05 мм) зерна металла на спектр импульсов в диапазоне рабочих частот 5,0—10,0 МГц. Получены количественные данные изменения спектра (смещения максимума спектра и ширины полосы) для различных значений z_c и \bar{D} .

Показано, что спектр сигнала является более информативной характеристикой структуры металла по сравнению с формой и длительностью эхоимпульсов.

Полученные теоретические результаты требуют экспериментального подтверждения в зависимости от величины z_c и среднего размера зерна \bar{D} для рабочих частот от 5,0 до 10,0 МГц.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Д.М. Давыдову за подготовку образцов металла к металлографическому исследованию и к.т.н. А.С. Гуденко за проведение работ по металлографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы МАГАТЭ по безопасности SSG — 48. Управление старением и разработка программы долгосрочной эксплуатации атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности №SSG-48. МАГАТЭ. Вена. 2018.
2. Нормы безопасности МАГАТЭ. Периодический анализ безопасности атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности №SSG-25. МАГАТЭ. Вена. 2013.
3. Щербинский В.Г. Ультразвуковая структуроскопия и тензометрия металлов: обзор // Тяжелое машиностроение. 2016. № 3—4. С. 2—8.
4. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Муравьев В.В., Фальмер С.В. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической спектроскопии // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 44—51.
5. Тютин М.Р., Ботвина Л.Р., Левин В.П., Ефимов А.Г., Кузелев Н.Р. Исследование механических свойств конструкционных сталей акустическими и магнитными методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 7. С. 44—48.
6. Муравьев В.В., Злобин Д.В., Ленков С.В., Зверев Н.Н. Прибор для измерений скорости акустических волн в металлах и сплавах // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 142—146.
7. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Gabbasova M.A., Buldakova I.V., Sokov M.Yu. Analysis of Reflected Signals in Testing Cylindrical Specimens by the Multiple Reflection Echo-Shadow Method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. V. 52. No. 4. P. 1—7.
8. Меркулова В.М. Влияние распределения размеров зерен на затухание ультразвуковых волн // Дефектоскопия. 1970. № 2. С. 111—113.
9. Кеслер Н.А., Шрайфельд Л.И. Исследование рассеяния ультразвука с учетом статистики распределения величины зерен поликристаллических металлов // Дефектоскопия. 1975. № 1. С. 95—100.
10. Данилов В.Н. К расчету коэффициента затухания упругих волн при рассеянии в поликристаллических средах // Дефектоскопия. 1989. № 8. С. 18—23.
11. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник в 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2008. 864 с.
12. Ермолов И.Н. Контроль ультразвуком (краткий справочник). М.: НПО ЦНИИТМАШ, 1992. 86 с.
13. Меркулов Л.Г., Меркулова В.М. Лекции по теории ультразвука. Таганрогский радиотехнический институт, 1976. 71 с.
14. Дымкин Г.Я., Кадикова М.Б. Ультразвуковой метод количественной оценки структуры металла осей колесных пар // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 27 — 36.
15. Данилов В.Н. Программа компьютерного моделирования работы электроакустических трактов дефектоскопов «Импульс +» // Дефектоскопия. 2006. № 3. С. 37—43.
16. Данилов В.Н., Воронкова Л.В. Исследование возможностей ультразвукового контроля чугуна с пластинчатым графитом с использованием стандартных прямых преобразователей // Контроль. Диагностика. 2020. № 1. С. 4—18.
17. Велев Б., Иванов И., Каменов В. Автоматизированная система комплексного неразрушающего контроля структуры и механических свойств материалов машиностроения // Дефектоскопия. 2021. № 3. С. 17—25.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ И ЛАЗЕРНОГО ВИБРОСКАНИРОВАНИЯ

© 2021 г. В.Ю. Шпильной^{1,*}, В.П. Вавилов^{1,**}, Д.А. Дерусова^{1,2,***},
Н.В. Дружинин^{3,****}, А.Ю. Ямановская^{1,*****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

²Севастопольский государственный университет, Россия 299053 Севастополь, ул. Университетская, 33

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия 634050 Томск, пр. Академический, 2/4

E-mail: *red@tpu.ru; **vavilov@tpu.ru; ***vshpilnoy@list.ru;

****mikola@sibmail.com; *****ayy4@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.04.2021; после доработки 18.06.2021

Принята к публикации 25.06.2021

Бесконтактная ультразвуковая стимуляция является сравнительно малоисследованным способом неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов. Сочетание бесконтактной ультразвуковой стимуляции совместно с лазерным сканированием может обеспечить оценку качества изделия без внешнего воздействия на исследуемый объект.

Настоящая работа посвящена исследованию ультразвуковой диагностической системы на основе совместного использования бесконтактного магнитострикционного излучателя и сканирующей лазерной доплеровской виброметрии для проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов. Применение преобразователя данного типа для бесконтактной стимуляции материалов позволило обеспечить мощность, достаточную для быстрого обнаружения дефектов, а оптимизация условий проведения эксперимента повысила эффективность результатов контроля. Измерение диаграммы направленности магнитострикционного излучателя позволило определить особенности излучения магнитостриктора в сборке с титановым волноводом ступенчатого типа.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвук, бесконтактная стимуляция, магнитостриктор, лазерная виброметрия, полимерные композиционные материалы.

DOI: 10.31857/S0130308221080029

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные полимерные композиционные материалы сочетают высокую прочность и малую массу, что способствует их широкому использованию практически во всех отраслях машиностроения. Наряду с развитием новых технологий возрастают требования к качеству продукции и обеспечению ее безопасной эксплуатации. Это определяет необходимость разработки новых и совершенствования существующих методов неразрушающего контроля.

Ультразвуковые (УЗ) методы неразрушающих испытаний (НИ) традиционно считаются надежными при контроле изделий из композитов ввиду высокого разрешения и достоверности регистрируемых данных. Взаимодействие упругих волн с дефектными областями материалов приводит к рассеянию энергии волны от дефекта и отражению ультразвука, что, в свою очередь, регистрируют с помощью измерительных систем различного типа. Однако следует отметить, что получение информативного сигнала от дефекта всегда требует специфических условий проведения тестирования: обеспечения хорошего контакта излучателя с объектом контроля, размещения объекта в иммерсионную жидкость либо увеличения подводимой акустической энергии [1—3]. В связи с этим, разработчики новых методов НИ стремятся оптимизировать процедуру проведения тестирования с целью сохранения энергоресурсов и минимизации повреждения объекта в точке ввода УЗ при поддержании информативного уровня измеряемого сигнала.

Магнитострикционные и пьезоэлектрические ультразвуковые излучатели, состоящие из одного или нескольких электромеханических преобразователей, усилителей упругих механических колебаний (концентраторов) и волноводов различных форм, нашли широкое применение для мощной УЗ стимуляции. Диагностические устройства на основе указанных УЗ излучателей способны обеспечить стабильный акустический сигнал фиксированной частоты с требуемыми параметрами УЗ воздействия (частота, интенсивность, зона УЗ воздействия и т.п.). В известных работах по УЗ вибротермографии композитных и металлических материалов [3, 4] показано, что интенсивное трение стенок дефектов в процессе мощной УЗ стимуляции приводит к существенному (до 15 К) локальному изменению температуры за сравнительно короткое время (около 10 с) в дефектной

зоне. В связи с этим, контроль дефектов в материалах путем регистрации температуры стимулируемого изделия — УЗ инфракрасная термография (вибротермография) — был признан экспрессным способом НИ, однако плотное прижатие массивного излучателя к контролируемому объекту способно повредить материал в точке ввода ультразвука.

Более поздние исследования в области развития вибротермографии [5—6] были направлены на повышение энергоэффективности метода за счет использования явления локального резонанса дефекта (Local Defect Resonance — LDR). В работах [7, 8] было продемонстрировано, что наличие дефектов в материалах приводит к локальному снижению жесткости изделия в этой зоне. Взаимодействие упругих волн со структурными неоднородностями приводит к интенсивным локальным вибрациям на характерной резонансной частоте дефекта, что может быть легко обнаружено методом сканирующей лазерной доплеровской виброметрии (SLDV). Успешная комбинация SLDV с акустической стимуляцией изделия обеспечивала выявление дефектов различного происхождения (ударных повреждений, трещин, расслоений, непроклеев и т.п.) в композиционных материалах [9, 10]. Результаты данных исследований позволили выявить дефекты при низком уровне вводимой акустической энергии (нескольких десятков Вт), но также требовали плотного контакта пьезоизлучателя с поверхностью контролируемого объекта, например, путем приклеивания с помощью эпоксидной смолы. Указанный недостаток метода был устранен применением бесконтактных излучателей [11], однако низкий уровень мощности воздушно-связанных резонансных пьезопреобразователей не позволил получать информативный сигнал от дефектов в случае, если частота резонанса излучателя отличалась от частоты резонанса дефекта. Таким образом, результаты вышеуказанных работ подтвердили возможность использования бесконтактной стимуляции материалов для проведения НИ композитов в случае, если заранее известны размеры дефекта и определена частота его резонанса.

Проведение УЗ неразрушающего контроля бесконтактным способом требует повышения мощности акустического сигнала ввиду существенного затухания звука в воздушной среде, а также разницы акустического импеданса на границе раздела воздух-твердое тело. Эффективность испытаний в этом случае определяется эффективностью работы излучателя, а именно, величиной передачи акустических колебаний через воздушную среду в объект исследования. Исходя из этого, разработчики устройств, работающих на основе магнестрикционных преобразователей, постоянно совершенствуют существующие технологии изготовления материалов, а также конструкцию излучателей и конфигурацию используемых волноводов [12, 13].

Настоящая работа посвящена исследованию направленности излучения мощного УЗ магнестрикционного излучателя с воздушной связью в сборке со ступенчатым титановым волноводом для задач бесконтактного УЗ НИ. Путем оценки взаимодействия упругих волн Лэмба с дефектными областями полимерного материала проведена оптимизация условий ввода ультразвука бесконтактным способом, а также оценено влияние угла направленности излучателя к контролируемой поверхности полимерного материала, на вибрационный сигнал от дефекта.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для бесконтактной УЗ стимуляции материалов использовали установку на основе магнестрикционного преобразователя (резонансная частота $22 \pm 1,65$ кГц, мощность $0,63 \pm 10$ % кВт), УЗ генератора USG-2-22-MS-1 (диапазон рабочих частот 14—48 кГц, мощность 2000 ± 10 % ВА) российского производства и сканирующего лазерного доплеровского вибрметра (SLDV) PSV-500-3D-HV (Polytec, Германия) (рис. 1). Система управления генератора обеспечивает автоматический поиск и стабильное поддержание работы устройства на частоте резонанса электромеханической системы установки. Уровень потребляемой электрической мощности излучателя задается оператором в диапазоне от 300Вт до 1кВт.

Поверхностные вибрации материалов, возникающие в процессе акустической стимуляции, анализировали методом сканирующей лазерной виброметрии. Благодаря высокой чувствительности измерительной аппаратуры, процесс взаимодействия распространяющихся упругих волн со структурными неоднородностями материала регистрировался в процессе лазерного сканирования. Результатом широкополосного сканирования (в диапазоне частот от 0 до 100 кГц) в режиме быстрого преобразования Фурье (FFT) является амплитудно-частотный спектр вибраций, а также изображения распределения механических колебаний на поверхности исследуемого материала в процессе УЗ стимуляции.

С целью определения направленности используемого магнестрикционного излучателя, лабораторная установка лазерной виброметрии была модифицирована путем введения отражаю-

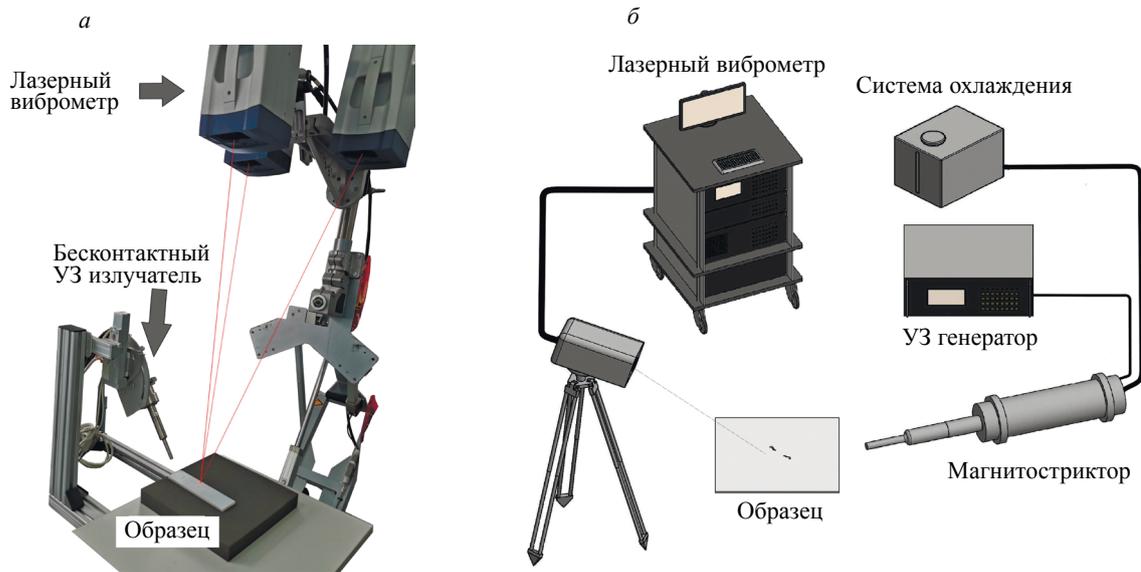


Рис. 1. Изображение (а) и схема (б) лабораторной установки бесконтактной УЗ стимуляции на основе магнитострикционного излучателя и сканирующей лазерной виброметрии.

щего элемента для измерения вибраций, распространяющихся в воздушной среде от излучателя (рис. 2). Более подробно описание системы для измерения диаграммы направленности приведено в разделе 3.



Рис. 2. Схема лабораторной установки для измерения ДН ультразвуковых излучателей с использованием лазерного виброметра.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Диаграмма направленности воздушно-связанного магнитострикционного излучателя

Для определения области назначения устройства важное значение имеет анализ спектральных характеристик излучателя, определение характера акустического поля вокруг излучателя и

диаграммы его направленности (ДН). Последняя характеристика, в свою очередь, отражает зависимость излучения устройства от его ориентации в пространстве.

В настоящей работе исследована ДН воздушно-связанного магнитоотрицательного излучателя путем регистрации зависимости коэффициента усиления излучателя от его направления в заданной плоскости. Установка для измерения ДН включала лазерный доплеровский виброметр (PSV-500-3D-HV, Polytec), мембрану для приема акустической волны от излучателя, а также систему вращения излучателя относительно приемника на основе угломера (см. рис. 2). Вращение устройства производили на полный оборот ($\Theta=360^\circ$) с погрешностью определения угла наклона $\pm 5^\circ$. В ходе измерения ДН магнитоотрицательного излучателя, приемник акустического сигнала (латунная круглая мембрана диаметром 18 мм и толщиной 0,2 мм) был размещен на фиксированном расстоянии 45 мм от поверхности излучателя. Амплитуду виброперемещения на приемнике определяли с использованием лазерного доплеровского виброметра в режиме быстрого преобразования Фурье. Лазерное вибросканирование проводили по центральной оси излучения путем измерения амплитудно-частотного спектра вибраций. Амплитуду скорости вибраций на поверхности приемника регистрировали в частотном диапазоне от 31,5 Гц до 100 кГц, выполняя не менее 5 измерений в каждой точке. Количество спектральных линий составило 3200, что соответствовало шагу сканирования менее 20 Гц.

При нормировании амплитуды виброперемещения по оси ординат было получено отношение амплитуды виброперемещения частиц среды (Δx , мкм) на выбранной частоте к ее максимальной величине (Δx_{\max} , мкм) во всем спектре измеряемых частот. Указанная величина характеризует уровень сигнала. Анализ результатов эксперимента позволил построить 3D-поверхность, отображающую ДН в измеренном диапазоне частот (рис. 3а), а также в избирательной области данных (рис. 3б).

Рассмотрим диаграмму направленности излучателя на частоте 21 кГц (рис. 5). Как видно из графика, основной лепесток излучателя имеет узконаправленный характер с разверткой в 10° (от -5 до 5° при уровне коэффициента направленного действия выше 0,3). Для повышения точности

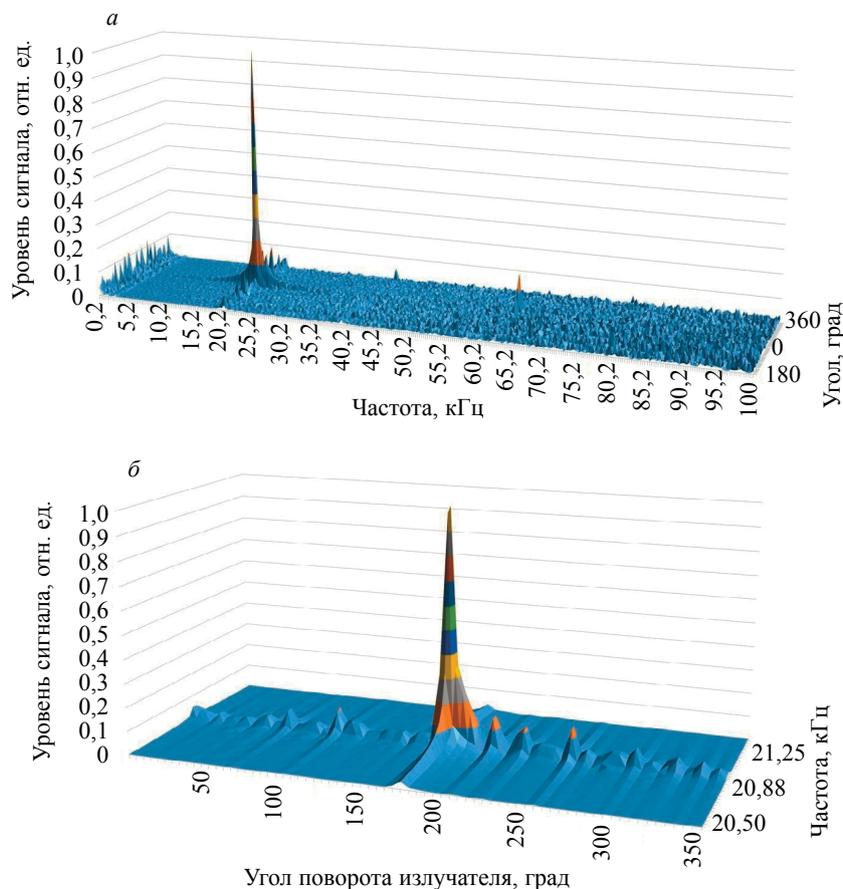


Рис. 3. Комплексная 3Д-ДН магнитоотрицательного излучателя в диапазоне от 50 Гц до 100 кГц (а) и в диапазоне от 20,5 Гц до 21,5 кГц (б).

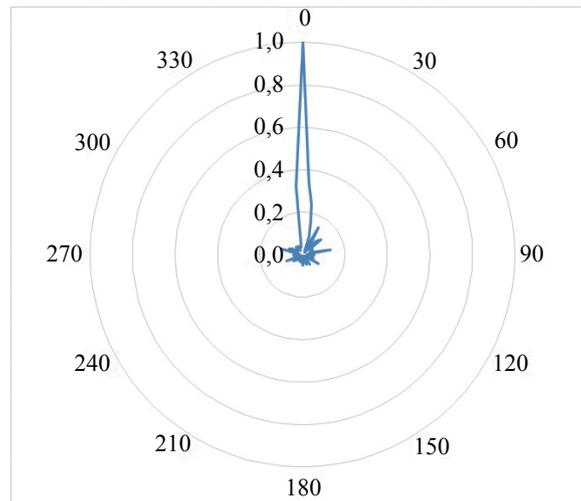


Рис. 4. Нормированная ДН магнитострикционного излучателя на основной частоте резонанса 21 кГц в полярных координатах.

определения направленности основного лепестка излучателя необходимо провести дополнительное исследование работы устройства в диапазоне углов от -5° до 5° с более высокой дискретностью измерений. Согласно условиям проведения настоящего эксперимента, основной лепесток диаграммы направленности должен совпадать с направлением в 0° , что подтверждено экспериментально. И, как следствие, основной лепесток диаграммы направленности соосен с главной акустической осью. Уровень сигнала боковых лепестков не превышает 15 % от максимальной величины.

Несмотря на низкую частоту дискретизации измерений, можно сделать вывод о том, что магнитострикционный излучатель в сборке со ступенчатым титановым волноводом имеет ярко выраженную узконаправленную область излучения в пределах 5° от основной оси излучения и полосу пропускания в диапазоне частот 20,5 — 21,5 кГц. Частота основного резонанса излучателя была зарегистрирована на 21,26 кГц, а высшие резонансные гармоники наблюдались на частотах 42 и 63 кГц. Следует отметить низкий уровень амплитуды высших резонансных гармоник излучателя, что свидетельствует об узкой полосе пропускания устройства в рассматриваемом диапазоне частот (31,5 Гц—100 кГц). Нормированная ДН излучателя в полярных координатах приведена на рис. 4.

С учетом полученных данных необходимо оптимизировать условия бесконтактного ввода ультразвука с целью повышения эффективности последующего проведения НИ материалов и изделий.

3.2. Неразрушающий контроль полимерных и композиционных материалов

Излучаемая акустическая мощность магнитострикционных преобразователей является одной из основных технических характеристик, определяющих эффективность их работы. В связи с ограничениями диапазона рабочих частот устройства традиционно полагают, что необходимым условием эффективной работы резонансных магнитострикционных устройств является высокий уровень мощности установки [14, 15]. Повышение энергопотребления установки до единиц кВт значительно увеличивает вводимую акустическую мощность, будучи ограниченными техническими характеристиками устройства. В связи с этим актуальна оценка уровня акустической мощности, достаточной для интенсификации процесса вибраций дефектов и их эффективного обнаружения.

Известно, что акустическая волна, распространяясь в среде, за единицу времени (t) переносит энергию через единичную площадку (S), перпендикулярную распространению волны, в зависимости от интенсивности ультразвука ($I = W_a / (S \times t)$). Таким образом, можно оценить акустическую мощность (W_a), вводимую в объект при проведении НИ материалов с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя, путем определения отношения интенсивности волны (I) к площади поперечного сечения изделия, расположенного перпендикулярно направлению ее распространения, с учетом свойств материала [16]:

$$W_a = I \times S = \frac{v^2 \rho c}{2} \times S, \quad (1)$$

где v^2 — амплитуда скорости вибраций частиц среды; ρ — плотность материала; c — скорость звука в материале.

В настоящем исследовании был проведен неразрушающий контроль пластины из полиметилметакрилата (оргстекла) размером $200 \times 50 \times 5,7$ мм с дефектом в виде несквозного отверстия прямоугольной формы, как показано на рис. 1. Акустическую стимуляцию пластины проводили на постоянной частоте ультразвука 21,26 кГц при уровне потребляемой электрической мощности излучателя 550 Вт. Бесконтактный ввод ультразвука осуществляли магнитострикционным излучателем при расстоянии до исследуемого материала, равном 45 мм, что определяется условием соблюдения фазовой синхронизации фронта распространяющейся волны с фронтом возбуждаемой упругой волны на поверхности материала [19].

Измеренная величина виброскорости на поверхности материала было использовано для оценки акустической энергии, вводимой в объект исследования (W_a) с учетом формулы (1) при известных величинах плотности оргстекла 1100 кг/м^3 и скорости распространения продольных волн в протяженном твердом образце (2630 м/с) [17]. Амплитуда колебательной скорости частиц среды была измерена в пучности стоячей волны в бездефектной области материала. В результате проведения виброизмерений был получен график зависимости вводимой акустической энергии от расстояния до излучателя при изменении угла наклона волновода к инспектируемой поверхности (рис. 5).

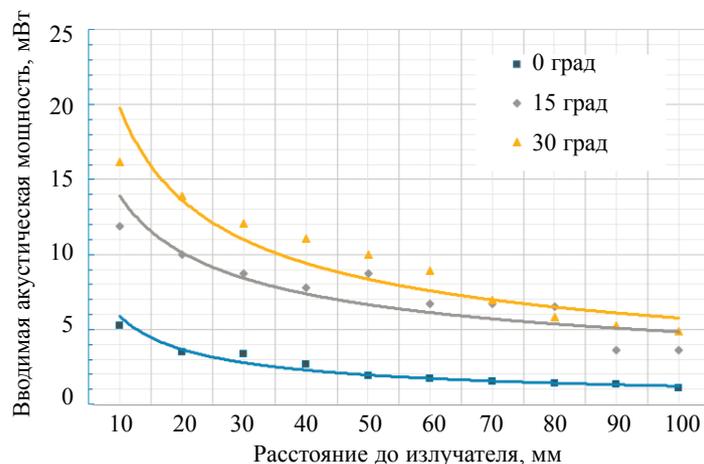


Рис. 5. Зависимость вводимой акустической мощности от расстояния до излучателя при изменении угла наклона волновода к инспектируемой поверхности.

В работе [19] показано, что ультразвуковые сканирующие системы с воздушной связью являются надежными устройствами для акустического неразрушающего контроля материалов, однако отличаются следующими особенностями: главный недостаток связан со слабым проникновением ультразвука в твердые тела из-за существенной разницы акустического импеданса на границе раздела воздух—твердое тело. В связи с этим, повышение акустической связи достигается за счет ввода ультразвука при определенном резонансном угле падения, а также соблюдении условия фазовой синхронизации. Указанная особенность излучателей с воздушной связью также наблюдалась в условиях настоящего эксперимента. В частности, на графике (см. рис. 5) показано, что при увеличении расстояния до источника звука происходит нелинейное снижение акустической мощности, вводимой в объект исследования, что связано с затуханием ультразвука в воздушной среде. Следует отметить, что увеличение угла наклона излучателя к инспектируемой поверхности приводит к увеличению уровня вводимой акустической мощности. В частности, рост наклона излучателя на 15 и 30° к исследуемой поверхности приводит к увеличению вводимой акустической мощности в 3 и 4 раза соответственно.

Наличие неоднородности в структуре материала приводит к локальному снижению жесткости изделия [18]. В данном случае при взаимодействии распространяющейся волны Лэмба с дефектом происходит локальное увеличение амплитуды скорости вибраций частиц среды в области неоднородности. Увеличение амплитуды скорости вибраций в области несквозного отверстия (v_{def}) по отношению к бездефектной зоне материала (v_{nd}) также меняется нелинейно, что связано с возник-

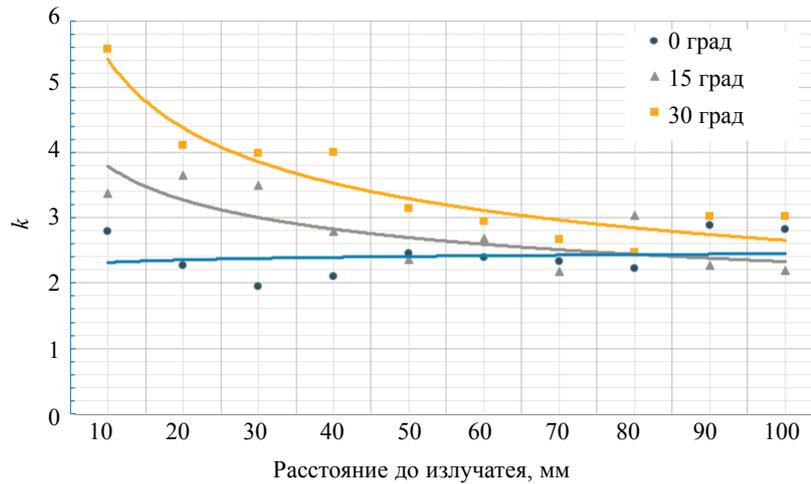


Рис. 6. Усиление амплитуды скорости колебаний дефекта при изменении расстояния до излучателя и угла ввода ультразвука.

новением резонансных явлений в указанной зоне. На рис. 6 показана зависимость коэффициента усиления вибраций в области дефекта ($k = v_{def}/v_{nd}$) от изменения расстояния до излучателя и угла ввода ультразвука.

Согласно полученным результатам, максимальное усиление вибраций в области дефекта по отношению к бездефектной зоне наблюдается при расстоянии до излучателя 10 мм, которое было минимальным в условиях настоящего эксперимента (см. рис. 6), причем увеличение угла ввода ультразвука сопровождается увеличением полезного сигнала до трех раз. При увеличении расстояния между излучателем и исследуемым материалом свыше 70 мм, усиление амплитуды скорости колебаний снижается до 2—3 и не проявляет существенной зависимости от угла ввода ультразвука. Следует также отметить, что уменьшение уровня вводимой акустической энергии приводит к снижению достоверности определения геометрических размеров неоднородности при проведении НИ (рис. 7). Тем не менее область дефекта визуально проявляется даже при минимальной величине вводимой акустической энергии, которое составляло 5 мВт в настоящем эксперименте.

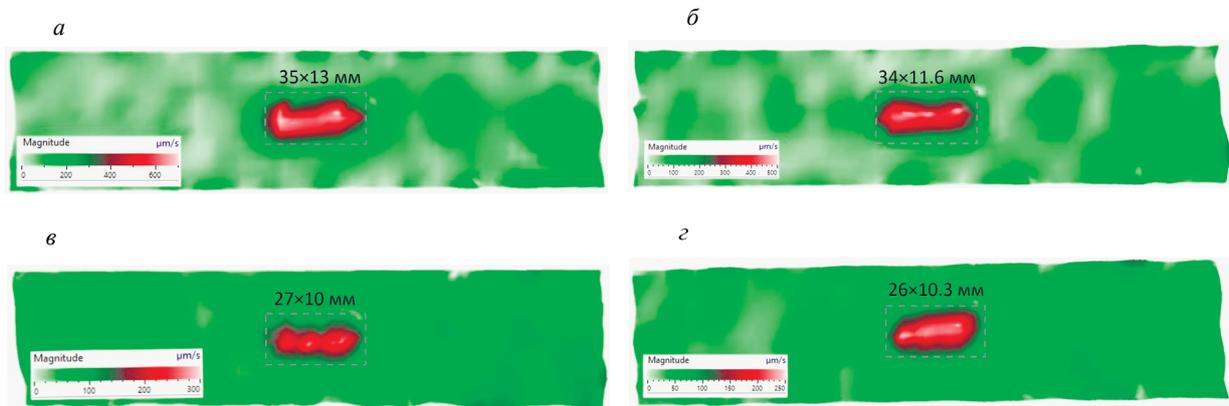


Рис. 7. Изображение вибраций на поверхности оргстекла с несквозным отверстием при вводимой акустической мощности 16 мВт (а), 12 мВт (б), 9 мВт (в), 5 мВт (г) и постоянном угле ввода ультразвука 30°.

Ниже приведены результаты практического использования бесконтактной УЗ стимуляции для обнаружения ударного повреждения энергией 16 Дж в углепластиковом композите. В процессе неразрушающего контроля экспериментальный образец подвергали УЗ стимуляции (электрическая мощность установки 600 Вт) в течение 60 с. Угол ввода УЗ колебаний составил 0°. Возбуждение упругих волн осуществляли с торцевой части углепластика на расстоянии 15 мм от излучателя до объекта контроля.

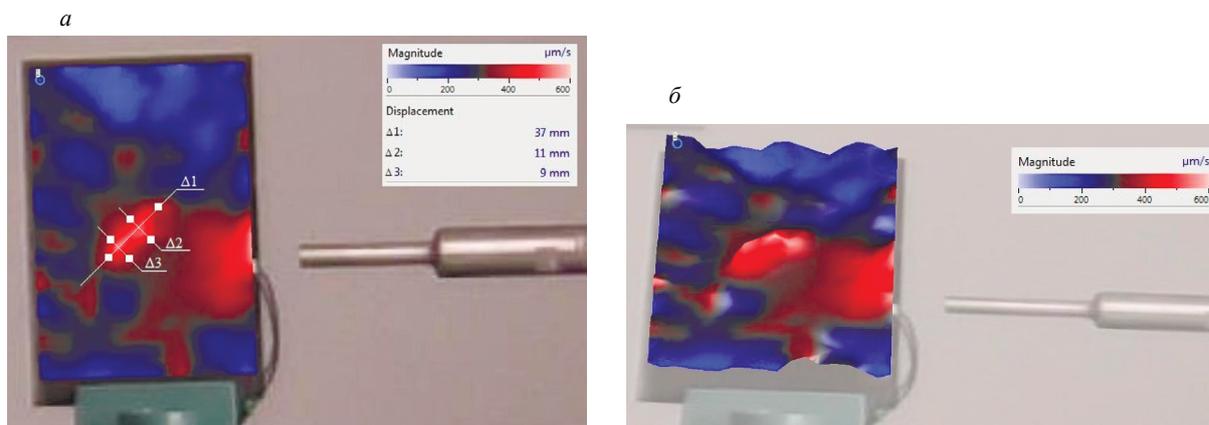


Рис. 8. Определение размеров ударного повреждения энергией 16 Дж в углепластиковом композите в результате анализа 2D- (а) и 3D- (б) изображений вибраций.

В результате тестирования были измерены вибрации на поверхности материала, возникающие в процессе его акустической стимуляции. В связи с тем, что удар приводит к образованию множественных расслоений в композите, область дефекта проявляется повышением амплитуды скорости вибраций (рис. 8) при лазерном вибросканировании. Экспериментально получено, что при общем уровне среднеквадратичной амплитуды скорости колебаний в бездефектной зоне порядка 250 мкм/с наличие расслоение приводит к увеличению указанного значения до 517 мкм/с. Зарегистрированные 2D (рис. 8а) и 3D (рис. 8б) изображения вибраций демонстрируют ударное повреждение в центре пластины с максимальными размерами 37×11 мм. На рис. 9а приведено изображение комбинирование данных лазерной виброметрии и фотографии углепластикового композита. Измеренная площадь ударного повреждения составила 930 мм². Зонирование фрагмента расслоения с 10-кратным увеличением показано на рис. 9б. Зона ударного повреждения на оборотной стороне композита визуально не обнаруживается, однако в локальной области наблюдается трещина вдоль направления укладки углеродных волокон (белая стрелка на рис. 9б). Полученные результаты подтверждают эффективность применения УЗ излучателей бесконтактного типа для обнаружения ударных повреждений в композитах.

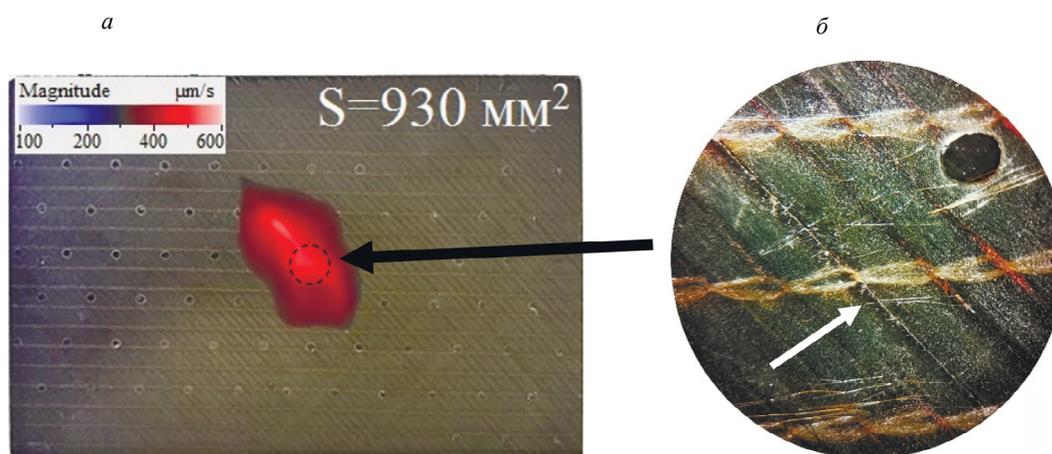


Рис. 9. Локализация ударного повреждения на фотографии обратной стороны углепластикового композита на основе данных лазерной виброметрии (а) и зонирование фрагмента расслоения с 10-кратным увеличением (б).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовали особенности бесконтактной УЗ стимуляции полимерных и композиционных материалов при лазерном вибросканировании. Получено, что величина вводимой акустической мощности через единичную площадку пластины оргстекла может достигать

6 мВт при расстоянии от излучателя до объекта около 10 мм. Увеличение угла наклона излучателя на 15 и 30° к исследуемой поверхности приводит к увеличению вводимой акустической мощности соответственно в 3 и 4 раза.

При взаимодействии распространяющейся волны Лэмба с дефектом происходит локальное увеличение амплитуды скорости вибраций частиц среды в области неоднородности. При анализе вибраций в области несквозного отверстия прямоугольной формы, возникающих в пластине оргстекла при бесконтактной УЗ стимуляции, было получено, что максимальное усиление вибраций в дефекте по отношению к бездефектной величине наблюдалось при минимальном расстоянии до излучателя, а увеличение угла наклона излучателя на 30° приводит к увеличению амплитуды скорости вибраций частиц среды в области неоднородности до трех раз. Следует отметить, что уменьшение уровня вводимой акустической энергии приводит к снижению достоверности результатов определения геометрических размеров неоднородности. Область дефекта проявляется в виде соответствующей отметки даже при минимальной величине вводимой акустической энергии, которая составляла 5 мВт в рамках настоящего эксперимента. Результаты практического использования бесконтактной УЗ стимуляции для обнаружения ударного повреждения энергией 16 Дж в углепластиковом композите позволили оценить геометрические размеры неоднородности и подтвердили возможность использования воздушно-связанных магнитострикционных излучателей для обнаружения дефектов указанного типа.

Измерение ДН бесконтактного магнитострикционного излучателя с использованием техники лазерной виброметрии позволило определить направленность излучения и оптимизировать условия проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с использованием бесконтактной УЗ стимуляции и лазерного вибросканирования.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-1221.2021.4 (экспериментальные результаты), гранта РФФИ № 19-29-13004 (лабораторная установка лазерной виброметрии), исследовательский грант СевГУ № 42-01-09/169/2021-4 (методика контроля качества).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Post W., Kersemans M., Solodov I., Van Den Abeele K., García S., van der Zwaag S. Non-destructive monitoring of delamination healing of a CFRP composite with a thermoplastic ionomer interlayer // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. V. 101. P. 243—253
2. Swiderski W., Vavilov V. Ultrasonic IR thermographic inspection of graphite epoxy composite: A comparative study of piezoelectric and magnetostrictive stimulation // *Opto-electronics Review*. 2015. V. 23. Iss.1. P. 33 — 36.
3. Guo X., Mao Y. Defect identification based on parameter estimation of histogram in ultrasonic IR thermography // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. V. 58. P. 218—227.
4. Guo X., Vavilov V. Pulsed thermographic evaluation of disbonds in the insulation of solid rocket motors made of elastomers // *Polymer Testing*. 2015. V. 45. P. 31—40.
5. Solodov I. Resonant Ultrasonic Activation of Damage: Application for Diagnostic Imaging // *Research in Nondestructive Evaluation*. 2017. V. 28. No.1. P. 28—44.
6. Solodov I. Resonant acoustic nonlinearity of defects for highly-efficient nonlinear NDE // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2014. V. 33. P. 252—262.
7. Rheinfurth M., Schmidt F., Döring D., Solodov I., Busse G., Horst P. Air-coupled guided waves combined with thermography for monitoring fatigue in biaxially loaded composite tubes // *Composites Science and Technology*. 2011. V. 71. No. 5. P. 600—608.
8. Solodov I., Döring D., Busse G. Air-coupled laser vibrometry: Analysis and applications // *Applied Optics*. 2009. V. 48. No. 7. P. C33—C3.
9. Hettler J., Tabatabaeipour M., Delrue S., Van Den Abeele K. Detection and Characterization of Local Defect Resonances Arising from Delaminations and Flat Bottom Holes // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2017. V. 3. Article number 2.
10. Pieczonka Ł., Ambroziński Ł., Staszewski W.J., Barnoncel D., Pérès P. Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer // *Optics and Lasers in Engineering*. 2017. V. 99. P. 80—87.
11. Solodov I., Rahammer M., Derusova D., Busse G. Highly-efficient and noncontact vibro-thermography via local defect resonance // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2015. V. 12. No. 1. P. 98—111.
12. Nad M. Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies // *Applied and Computational Mechanics*. 2010. V. 4. P. 79—88.
13. Jagadish Amitava Ray. Design and performance analysis of ultrasonic horn with a longitudinally changing rectangular cross section for USM using finite element analysis // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018. V. 40. No. 7. Article number 359.

14. *Xingwang G.* Ultrasonic Infrared Thermography of Aluminium Thin Plates for Crack Inspection in Friction Stir Welded Joints // *IEEE Sensors Journal*. 2020. V. 20. No. 12. P. 6524—6531.
 15. *Xingwang G.* Vibro-thermography of calibrated defects in hybrid plates focusing on viscoelastic heat generation // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2020. (in press)
 16. *Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н.* Основы физики и техники ультразвука. М.: Высшая школа, 1987. 224 с.
 17. *Ko Y.H., Kim K.J., Ko J.-H.* High-pressure sound velocity of PMMA studied by using brillouin spectroscopy // *Journal of the Korean Physical Society*. 2013. V. 63. No. 12. P. 2358—2361.
 18. *Solodov I., Rahammer M., Kreuzbruck M.* Analytical evaluation of resonance frequencies for planar defects: Effect of a defect shape // *NDT and E International*. 2019. V. 102. P. 274—280.
 19. *Solodov I., Döring D., Busse G.* Air-coupled Lamb and Rayleigh waves for remote NDE of defects and material elastic properties // *Journal of mechanical engineering*. 2010. V. 56. No. 9. P. 557—564.
-

К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭХОГРАММ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ДЕФЕКТОСКОПА

© 2021 г. А.В. Мартыненко^{1,*}, В.П. Ермаченко

¹ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», Россия 142103 Подольск, ул. Железнодорожная, 24
E-mail: atilla123@ya.ru

Поступила в редакцию 01.07.2021; после доработки 01.07.2021;
Принята к публикации 13.07.2021

Эхограмма ультразвукового импульсного дефектоскопа рассмотрена как автосвертка акустического сигнала, излученного в нагрузку и принятого демпфированной пьезопластиной. Реконструкция акустического сигнала позволяет определить дрейф коэффициентов отражения ультразвуковых колебаний на границах пьезопластина—нагрузка и пьезопластина—демпфер, например, при поверке пьезопреобразователей при изготовлении, в эксплуатационных условиях. Предлагается методика оценки чувствительности преобразователя.

Ключевые слова: УЗ преобразователь, автосвертка, реконструкция, чувствительность, разрешение, протектор.

DOI: 10.31857/S0130308221080030

В [1] приведена методика расчета импульсной характеристики или излученного ультразвукового импульса иммерсионного ультразвукового преобразователя (далее по тексту — преобразователь) как реакции на короткий (полуволновый или более короткий) электрический возбуждающий импульс в зависимости от акустических сопротивлений (далее по тексту — АС): среды Z_{cp} , пьезоэлемента $Z_{пэ}$, демпфера $Z_{д}$, протектора $Z_{пр}$. Отмечено совпадение излученных импульсов: расчетного и экспериментального, принятого широкополосным преобразователем (далее по тексту — ШП). В данной статье (далее по тексту, для лучшего восприятия) единица измерения акустического сопротивления (МПа·с/м) приводиться не будет.

Положительной стороной методики можно считать возможность определения АС сред с учетом реальной конструкции преобразователя и при использовании серийных дефектоскопов. Отрицательной стороной методики является влияние на результат импульсной характеристики ШП.

Устранить указанный недостаток возможно за счет реализации схемы на отражение. Однако для решения поставленной задачи необходима математическая модель эхоимпульса, то есть: как из излученного импульса в преобразователе формируется эхоимпульс (прямая задача) и, соответственно, основываясь на этой модели, как из эхоимпульса восстановить (реконструировать) излученный импульс (обратная задача). Стоит отметить, что прямая задача исследователями не изучена, хотя в дефектоскопии обратные задачи в настоящее время представляют большой интерес, что обусловлено перспективой получения более подробной информации о дефектах, улучшением разрешающей способности аппаратуры, возможностью более точной локализации несплошностей [2, 3].

При описании режима приема [4] обычно ограничиваются пояснением, что «в режиме приема упругих волн все процессы режима излучения сохраняются. Различие заключается в том, что в режиме приема вынуждающей силой является поступающая из акустической нагрузки упругая волна». Другими словами говорится о том, что при воздействии на преобразователь упругой волны с длительностью менее половины периода собственных колебаний исследуемого преобразователя на его выводах формируется импульсная характеристика (как, например, на рис. 1а для преобразователя без демпфера) [5]. Однако на вход преобразователя воздействует не единичный акустический импульс, а серия акустических импульсов с разной полярностью, амплитудой и задержкой в виде импульсной характеристики преобразователя на излучение, приведенной на рис. 1б [1]. Это и является причиной того, что форма, амплитуда, длительность эхоимпульса будет другой и не соответствовать эхоимпульсу представленному на рис. 1а. На рис. 1 приведены экспериментальные импульсные характеристики преобразователя на прием (см. рис. 1а) и на излучение (см. рис. 1б) как реакции преобразователя на короткий акустический и электрический импульсы соответственно. Отметим, что визуально характеристики на излучение и прием идентичны.

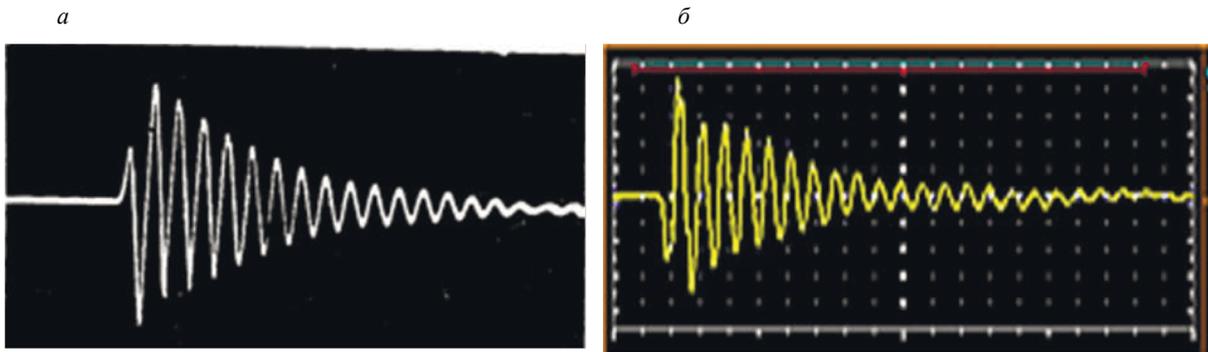


Рис. 1. Импульсные характеристики преобразователя:
a — на прием; *б* — на излучение.

Прием предельно демпфированным преобразователем

Рассмотрим важный для многих акустических задач пример приема предельно демпфированным преобразователем (см. рис. 2). На сегодняшний день в литературе практически отсутствуют объяснения механизма преобразования формы, амплитуды и длительности излученного импульса представленного на рис. 2*a* [1, 5] и состоящего из одного периода синусоиды в эхоимпульс (эхограмму), форма которого приведена на рис. 2*б* [6].

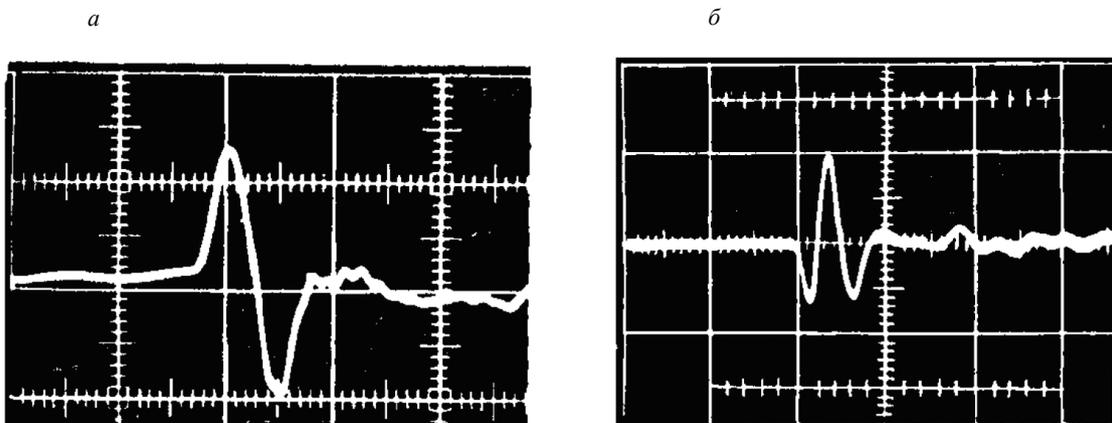


Рис. 2. Осциллограммы для предельно демпфированного полуволнового преобразователя при:
a — излученного акустического импульса; *б* — эхоимпульса (масштаб по горизонтали: *a* — 100 нс/см, *б* — 450 нс/см).

На рис. 3 предлагается графическая модель процесса формирования эхоимпульса. Коричневым цветом на рис. 3 выделена реакция преобразователя на первый полупериод излученного импульса из рис. 2*a*. Через половину периода появится реакция преобразователя на второй полупериод с противоположной полярностью из рис. 2*a* (на рис. 3 выделена синим цветом). По мере появления реакций преобразователя на полупериоды излученного импульса происходит суперпозиция двух импульсов H_i и H_z (кривая Y_p выделена красным цветом) или кривая Y_i — это текущее значение площади под кривой суммы реакций на все полупериоды с учетом их амплитуды, полярности и задержки. При измерении по нулевому уровню длительность эхограммы Y_i увеличивается в два раза относительно длительности излученного импульса H_i (см. рис. 2*a*), что объясняет ухудшение разрешающей способности при приеме и создает возможность ее улучшения при реконструкции. Вместе с тем при приеме происходит увеличение амплитуды в два раза. Это позволяет ввести новое понятие — коэффициент усиления по амплитуде K_y , как отношение мак-

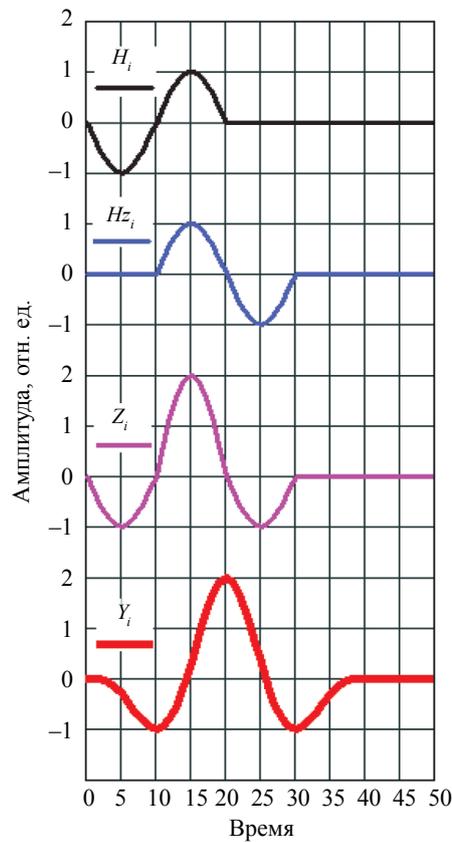


Рис. 3. Формирование эхоимпульса для предельно демпфированного преобразователя:

H_i — принятый электрический импульс при воздействии первого полупериода (выделен черным цветом); H_{z_i} — принятый электрический импульс при воздействии второго полупериода (выделен синим цветом); Z_i — сумма H_i и H_{z_i} (выделен розовым цветом); Y_i — эхоимпульс как суперпозиция H_i и H_{z_i} (выделен красным цветом).

симального значения эхоимпульса (кривой Y_i) к значению амплитуды первого полупериода излученного импульса (кривой H_i). Таким образом, $K_y = 2$ для предельно демпфированного преобразователя с $Z_d = Z_{пз}$.

Прием преобразователями без протектора

Таким же способом можно построить эхограммы для преобразователей с другим Z_d , например, для $Z_d = 0$ (недемпфированного, выделен синим цветом) с $Z_d = 2,3$ (выделен красным цветом) и $Z_d = 4,6$ (выделен черным цветом) (см. рис. 4). При этом значение АС пьезоэлемента $Z_{пз} = 27$, среды $Z_{ср} = 1,5$. Значения амплитуд полупериодов эхограммы нормированы относительно амплитуды первого полупериода, на амплитуду которого не влияют отраженные в преобразователе импульсы. При этом максимальное значение эхограммы или коэффициент усиления K_y для преобразователя с $Z_d = 0$ составило $K_y = 29,75$ для $Z_d = 2,3$ — 11,97. Таким образом, каждому преобразователю, как некоему «своеобразному электромеханическому трансформатору электрического напряжения» [5] соответствует свой Z_d и, соответственно, свой коэффициент усиления K_y . Хотя, как понятно из вышесказанного, преобразователь следует характеризовать не как «трансформатор» (преобразователь без увеличения мощности), а как синфазный накопитель энергии (конволотор).

На рис. 4 экспериментальные эхоимпульсы для преобразователя с $Z_d = 2,3$ приведены справа вверху и для преобразователя с $Z_d = 7$ справа внизу, которые по форме и амплитуде хорошо совпадают с расчетными импульсами, выделенными на рис. 4 красным и черным цветом соответственно.

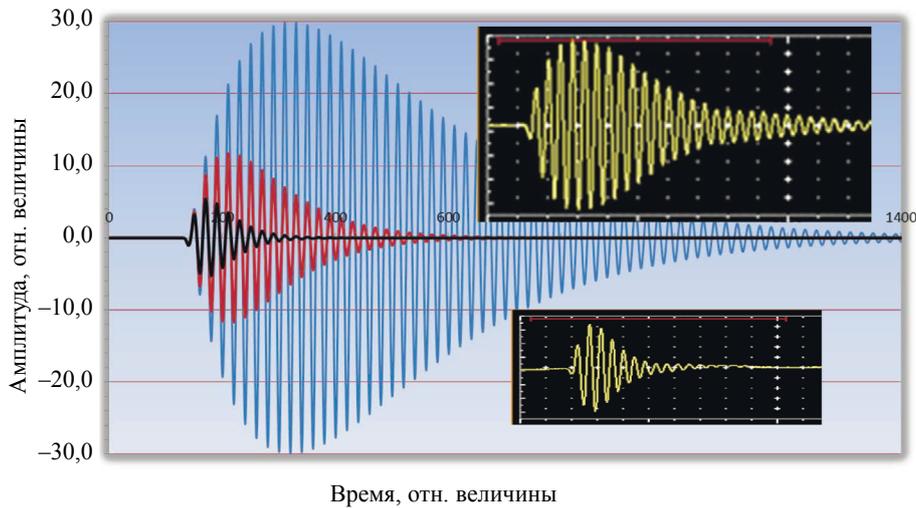


Рис. 4. Расчетные (слева) эхоимпульсы для пьезоэлемента с $Z_{пз} = 27$ и демпфером с $Z_{д}$, равным: 0 — выделен синим цветом; 2, 3 — красный цвет; 7 — черный цвет. Справа вверху и внизу на черном фоне приведены экспериментальные эхоимпульсы.

Методика расчета чувствительности преобразователя

При проектировании преобразователя необходимо оценить значение его чувствительности. Известные методики [4, 7] не учитывают наличие K_y при приеме. Предлагается ввести в расчет чувствительности значение K_y , тогда чувствительность можно записать как

$$K = K_{пн} + K_{пр} + K_y + K_o,$$

где $K_{пн}$ — коэффициент, учитывающий преобразование электрического импульса в акустический и обратно; $K_{пр}$ — коэффициент, учитывающий потери на прохождение акустического импульса в иммерсионную среду (воду) и обратно в пьезоэлемент; K_o — коэффициент отражения от металлического отражателя. Далее, основываясь на измерении чувствительности K по ГОСТ 23702—90 [8] преобразователя без протектора, изготовленного из одной пьезопластины от партии пластин, и зная K_y , определяем $K_{пн}$ для данной пьезокерамики партии пьезопластин проектируемого преобразователя, например, с протектором.

Пример практического использования методики

Рассмотрим иммерсионные преобразователи с протектором и без протектора с $Z_{пр} = Z_{д} = 4,6$, пьезоэлементом с $Z_{пз} = 27$, диаметром 15 мм. Чувствительности, определенные по ГОСТ 23702—90, составляют $-22,5$ и $-24,44$ дБ [9]. Коэффициенты усиления 14,62 и 18,03 дБ определены из рис. 7а работы [9] и из рис. 4 данной работы соответственно. $K_{пр}$ для преобразователя с протектором равен произведению коэффициентов прохождения из пьезоэлемента в протектор и из протектора в иммерсионную среду (вода), то есть: $K_{пр} = 4 \times Z_{пз} \times Z_{пр} / (Z_{пз} + Z_{пр})^2 \times 4 \times Z_{пр} \times Z_{ср} / (Z_{пр} + Z_{ср})^2 = -8,65$ дБ. Для преобразователя без протектора $K_{пр}$ равен произведению коэффициентов прохождения из пьезоэлемента в иммерсионную среду (вода), то есть: $K_{пр} = 4 \times Z_{пз} \times Z_{ср} / (Z_{пз} + Z_{ср})^2 = -14$ дБ. Коэффициент отражения от металлического отражателя равен $K_o = (Z_{ср} - Z_o) / (Z_{ср} + Z_o) = -0,57$ дБ. Полученные данные сведены в табл. 1. Значение $K_{пн} = -27,9$ дБ для пьезопластины указанных размеров и материала можно использовать для расчета K преобразователя с другой конструкцией, например, преобразователя без протектора. В результате оценка значения чувствительности для преобразователя без протектора составляет $K = -24,44$ дБ и совпадает с измеренным значением чувствительности. Стрелками в табл. 1 показан ход расчетов при оценке чувствительности преобразователя (ход расчетов может быть проведен и в обратную сторону, а также для определения недостающего коэффициента).

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют объяснить, почему преобразователь без протектора, который, как известно, считается самым чувствительным имеет более низкое значение K , чем у

Таблица 1

Коэффициент	Значение, дБ Для преобразователя с протектором	Значение, дБ Для преобразователя без протектора	Разница значений, дБ
K	-22,5	-24,44	1,94
K_{np}	-8,65	-14,0	5,35
K_o	-0,57	-0,57	
K_y	+14,62	+18,03	3,41
K_{np}	-27,9	-27,9	

преобразователя с протектором. Чувствительность преобразователя с протектором составляет -22,5 дБ, что выше преобразователя без протектора на 1,94 дБ (см. табл. 1). Эта величина образовалась за счет разности, полученной от улучшения условий прохождения акустического импульса из пьезоэлемента в иммерсионную среду и обратно на 5,35 дБ, с одной стороны, и снижения коэффициента усиления при приеме демпфированным преобразователем с протектором на 3,41 дБ, с другой стороны.

Прием преобразователем с протектором

На рис. 5 приведен графический процесс построения эхограммы для преобразователя с протектором. Используется излученный импульс (верхний импульс (1) на рис. 5), заимствованный из работ [1, 9]. Этот импульс представлен без изменения и является реакцией преобразователя на первый полупериод такого же, но излученного, акустического импульса с амплитудой, принятой за единицу. Через время, равное половине периода, представлен второй электрический импульс (2), как реакция преобразователя на второй полупериод акустического импульса с относительной амплитудой -2,0, поэтому фазы полупериодов импульса изменены, а амплитуды — увеличены в 2 раза. Еще через полпериода на выводах преобразователя возникает третий электрический импульс (3) как реакция преобразователя на третий полупериод с амплитудой 1,76 и так далее. Форма теоретического эхоимпульса — (7). Рядом, справа от максимумов полупериодов, приведены относительные значения амплитуд.

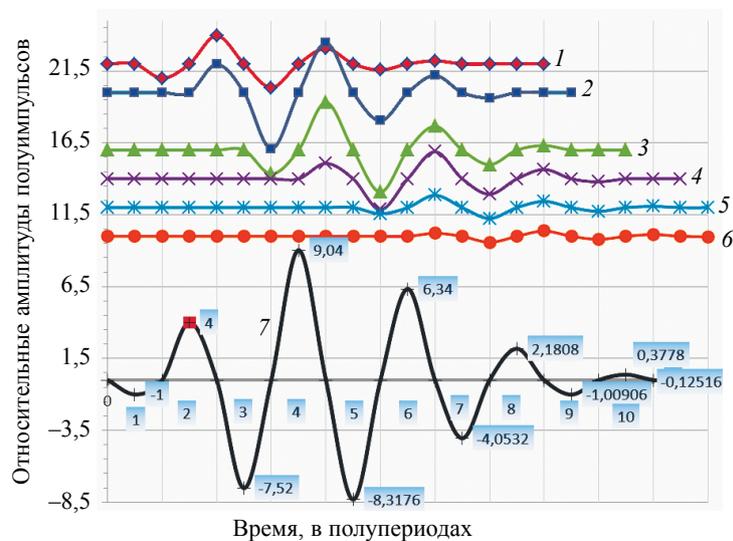


Рис. 5. Графическое представление процессов, происходящих в преобразователе при приеме. Верхние шесть импульсов (1—6) — реакции преобразователя на шесть полупериодов излученного импульса. Седьмой импульс (7) — результирующий импульс (эхограмма).

Экспериментальная проверка

В качестве экспериментального эхоимпульса использован эхоимпульс из рис. 7а работы [9], который представляет эхоимпульс с выхода преобразователя и который приведен в данной работе в правом верхнем углу на черном фоне рис. 6. Этот эхоимпульс также представлен в левой части рис. 6 в виде эхоимпульса, выделенного красным цветом (2), с амплитудами нормированными относительно первого полупериода. Значения относительных амплитуд приведены справа от максимумов полупериодов и экспериментальное $K_y = 14,62$ дБ. На экспериментальный эхоимпульс наложен из рис. 5 теоретический импульс и выделен синим цветом (1). Как видно из рис. 6, по форме и по длительностям теоретический и экспериментальный эхоимпульсы хорошо совпадают. Снижение амплитуд для экспериментального по сравнению с теоретическим эхоимпульсом объясняется затуханием в протекторе, непараллельностью плоскостей пьезопластины, протектора, имеются места пайки контактов.

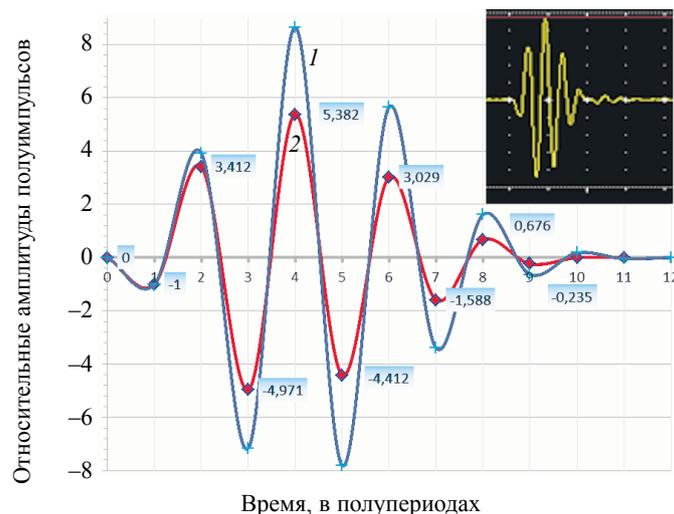


Рис. 6. Эхограммы: теоретическая (1); экспериментальная (2).

Прием преобразователем с протектором с АС $Z_{пр} = \sqrt{Z_{ср} \times Z_{пз}}$

На рис. 7а приведен расчетный излученный импульс из работы [9]. На рис. 7б для этого импульса приведен эхоимпульс, построенный графическим способом, как описано выше, и выделен синим цветом. Отметим его особенность — из-за компенсации части реакций преобразователя на излученный импульс при графическом построении эхоимпульса относительная амплитуда 7 полупериода становится равной 0,13, что фактически «разбивает» его на два импульса разной амплитуды и полярности, следующих друг за другом. Данный факт позволяет объяснить «двугорбость» амплитудно-частотной характеристики (спектра), так как наличие второго импульса с таким соотношением амплитуд приводит к образованию линейчатого спектра такого «двугорбого» вида. Данный вид спектра, конечно, позволяет расширить полосу пропускания, рассчитанную по уровню 0,7 от максимума спектра, однако это достигается за счет «дробления» импульса и фактически за счет увеличения его длительности, то есть

ухудшения разрешения. Известно, что для линейчатого спектра разность частот между его линиями обратно пропорциональна временному расстоянию между импульсами. Из рис. 7б временное расстояние между импульсами 1 и 2 составляет 8 полупериодов, обратная величина от которого при эффективной частоте эхоимпульса 4 МГц составляет 1 МГц, что совпадает с экспериментальными данными — с разностью частот между «горбами» (см. спектр в правой верхней части рис. 7б). Красной пунктирной линией на рис. 7б отмечен «недробленный» эхоимпульс от демпфированного пьезоэлемента, имеющий «одногорбый» спектр. С учетом сказанного выше, авторы не рекомендуют подобный способ для повышения разрешения преобразователя.

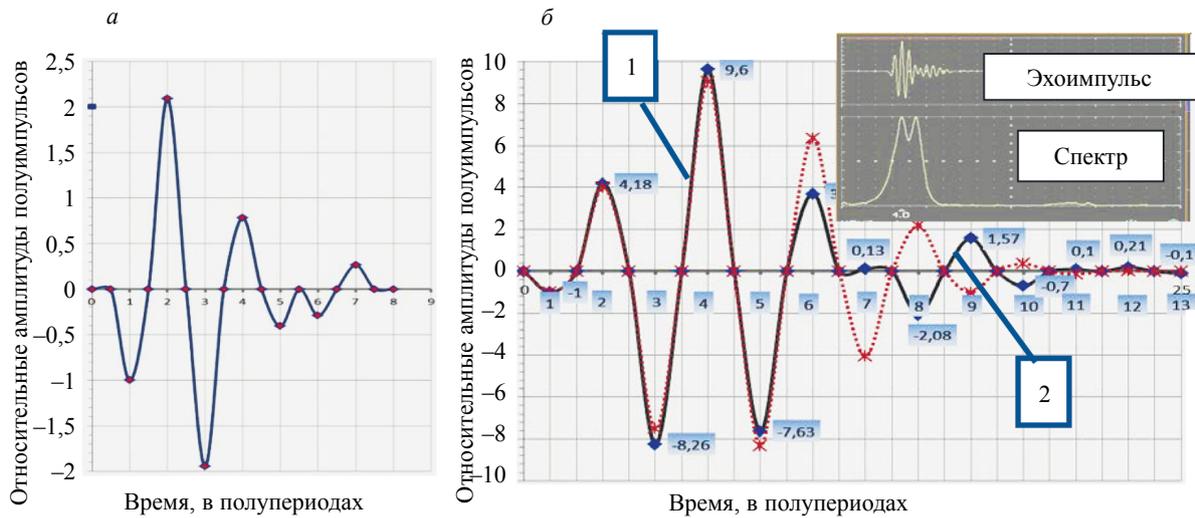


Рис. 7. Формы импульсов для преобразователя с протектором $Z_{пр} = \sqrt{Z_{ср} \times Z_{из}}$: *a* — излученного, расчетного; *б* — эхоимпульс расчетный с двугорбым спектром (выделен синим цветом, эхоимпульс с одногорбым спектром выделен красным пунктиром, в правом верхнем углу экспериментальный эхоимпульс и его спектр).

Эхоимпульс как автосвертка

Будем исходить из того, что операция получения результирующего сигнала по исходному называется сверткой (convolution) и любая линейная система, а в рассматриваемом случае преобразователь, осуществляет свертку входного сигнала со своей импульсной характеристикой [5, 10].

Обозначим значком \otimes операцию свертки, входной сигнал поступающий на вход приемного преобразователя как X , его импульсную характеристику как R , тогда выходной эхоимпульс Y или эхограмму можно представить в виде $Y = X \otimes R$. При этом излученный импульс X представляет собой свертку электрического дельта-импульса D , подаваемого на излучающий преобразователь с импульсной характеристикой преобразователя R или $X = D \otimes R$. Значение дельта импульса D равно 1, тогда $X = R$, что означает тождественность излученного импульса импульсной характеристике преобразователя на излучение. Далее излученный импульс $X = R$ поступает на вход преобразователя. При тождественности импульсных характеристик преобразователей эхограмма $Y = R \otimes R$. В схеме на отражение, в общем случае, происходит операция свертки X с импульсными характеристиками отражателей HO и $X = R \otimes HO$. При отражении от металлической стенки HO можно принять равной 1 и эхограмма $Y = R \otimes R$.

Таким образом, эхограмма является автосверткой импульсной характеристики преобразователя. Решая обратную задачу, получаем экспериментальную импульсную характеристику преобразователя R . При решении обратной задачи наибольшие трудности могут возникнуть при получении фазочастотной характеристики, которая обычно представляется характеристикой с фиктивными скачками размером 2π [11, 12], что затрудняет понимание и влияет на решение обратной задачи. Ниже решение этих задач рассмотрено более подробно.

Структура акустического сигнала, излученного пьезопреобразователем импульсного ультразвукового дефектоскопа достаточно проста и, как показал М. Редвуд [13], при возбуждении демпфированной пьезопластины коротким электрическим импульсом в нагрузку излучается серия акустических эквидистантных импульсов (в дальнейшем называемая редвудовской серией и обозначаемая как R -серия), относительные значения амплитуд которых составляют последовательность:

$$-1, (1 + w), -(1 + v)w, (1 + w)vw, -(1 + v)vw^2, (1 + w)v^2w^2, \dots, \quad (1)$$

где v, w — коэффициенты отражения по давлению на границах пьезопластина—нагрузка и пьезопластина—демпфер соответственно.

Заметим, что как положительные импульсы, так и отрицательные, начиная со второго, убывают с одинаковой скоростью, определяемой множителем $vw < 1$, следовательно, сумма амплитуд положи-

тельных импульсов как сумма членов убывающей геометрической прогрессии равна $(1+w)/(1-vw)$ и совпадает с суммой амплитуд отрицательных импульсов $-[1+(1+v)w/(1-vw)] = -(1+w)/(1-vw)$ и в целом сумма амплитуд R -серии равна нулю. Таким образом, начиная с первого положительного импульса, отношение амплитуд любых двух последовательных однополярных импульсов (последующего к предыдущему) равно произведению $Q = vw$, а отношение амплитуды любого отрицательного импульса к амплитуде предыдущего положительного импульса составляет величину $q = (1+v)w/(1+w)$. При экспериментальном определении указанных отношений Q и q получаем выражения для коэффициентов отражений:

$$w = (q - Q) / (1 - q), \quad (2)$$

$$v = Q(1 - q) / (q - Q).$$

Кроме того, легко показать, что огибающие серии определены выражениями:

$$y1_i = (1 + w) (vw)^{(i-h)/T}, \quad (3)$$

$$y2_i = (1 + v) w^{0,5} v^{-0,5} (vw)^{(i-h)/T},$$

где $y1$ — огибающая положительных импульсов; $y2$ — огибающая для отрицательных импульсов начиная со второго отрицательного; h — отсчет первого положительного импульса серии; T — расстояние в отсчетах i между импульсами одной полярности (соответствует времени двойного прохода УЗ импульса в пьезопластине); $h - T/2$ — отсчет начала серии (отрицательного импульса единичной амплитуды).

На рис. 8 приведена серия A_i ($h = 100$, $T = 100$, размер массива данных $2^{14} = 16384$), при расчете которой принято, что коэффициенты отражения ультразвуковых колебаний на границах пьезопластины определяются АС: среды $Z_{cp} = 1,5$ (вода), пьезоэлемента $Z_{пз} = 27$ (пьезокерамика ЦТС19), демфера $Z_d = 4,7$ (компаунд на полимерной связке с порошковым металлическим наполнителем). При электрическом импульсе возбуждения серия приобретает привычный вид (рис. 9).

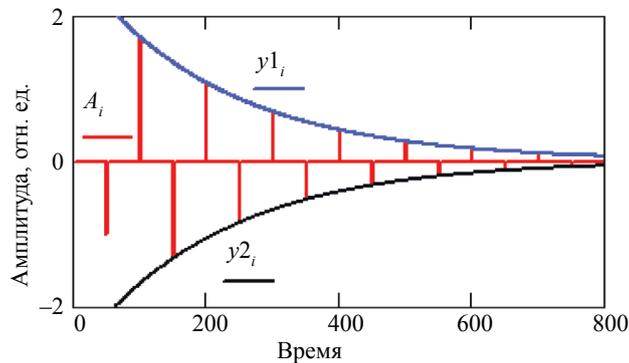


Рис. 8. Расчетная серия акустических эквидистантных импульсов, излучаемая преобразователем с $Z_{пз}=27$, $Z_d=4,7$ в воду.

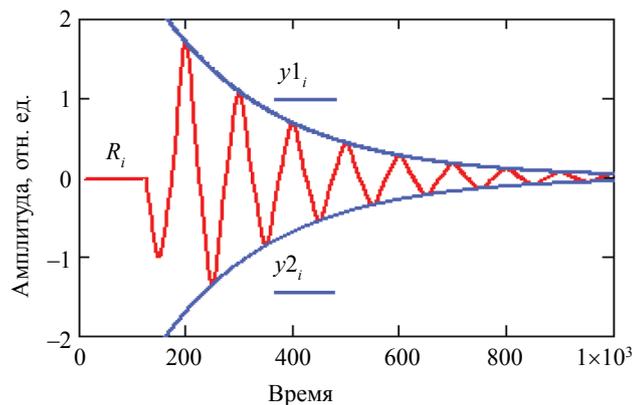


Рис. 9. R -серия при возбуждении электрическим импульсом гауссовской формы.

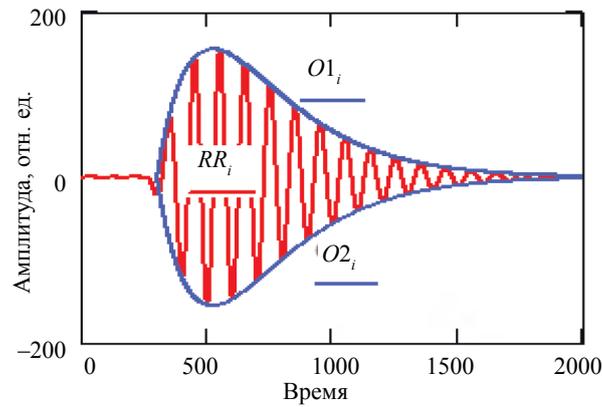


Рис. 10. Эхограмма RR как автосвертка R -серии. Огибающие автосвертки $O1$, $O2$ являются автосвертками огибающих $y1, y2$.

В представлении рис. 8 R -серия является импульсной характеристикой и, следовательно, в режиме ее приема тем же преобразователем эхограмму дефектоскопа можно рассматривать как автосвертку R -серии [10].

На рис. 10 приведены автосвертка R -серии (красный цвет) и автосвертки огибающих (синий цвет) рис. 9, рассчитанные стандартным образом как обратные фурье-преобразования квадратов соответствующих фурье-преобразований:

$$\begin{aligned} RR &= F^{-1} \{ [F(R)]^2 \}; \\ O1 &= F^{-1} \{ [F(y1)]^2 \}; \\ O2 &= F^{-1} \{ [F(y2)]^2 \}, \end{aligned} \quad (4)$$

где F, F^{-1} — операторы прямого и обратного фурье-преобразования соответственно.

Относительно вида огибающих заметим, что автосвертка функции $y(x) = \exp(-kx)$, $x \geq 0$ есть весьма узнаваемая функция вида $y(x) = x \exp(-kx)$, $x \geq 0$ (линейный начальный рост, максимум на участке выпуклости и убывание после точки перегиба). Она угадывается практически во всех эхограммах, полученных в условиях, сходных с условиями рассматриваемой ситуации [5, 7].

Для определения коэффициентов отражения границ требуется восстановление конфигурации редудовской серии по ее автосвертке.

Поскольку по основной теореме свертки:

$$\begin{aligned} F[R \otimes R] &= \{ F[R] \}^2, \text{ то} \\ R &= F^{-1} \left\{ \sqrt{F[R \otimes R]} \right\}. \end{aligned}$$

Представляя спектр автосвертки в виде произведения амплитудного и фазового спектров, имеем:

$$F[R \otimes R] = |F| \exp \left[\sqrt{-1} \arg(F) \right].$$

Восстановленная R -серия записывается в виде:

$$R = F^{-1} \left\{ \sqrt{|F|} \exp \left[\sqrt{-1} \frac{\arg(F)}{2} \right] \right\}. \quad (5)$$

Существенным моментом здесь является переход от функции $\arg(F)$, рассчитываемой как главное значение обратной тригонометрической функции и, следовательно, имеющая фиктивные скачки, к непрерывной функции $\arg(F)$. Этот переход осуществляется, например, с помощью введения вспомогательной мнимой экспоненты, как это предложено в [14].

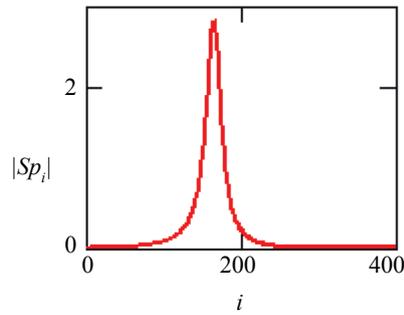


Рис. 11. Амплитудный спектр эхограммы рис. 3.

При численном счете рассматриваемая задача имеет корректное решение лишь для финитных функций с ограниченным спектром. В рассматриваемом примере эти условия выполняются: серия финитна, поскольку при длительности серии 10^3 отсчетов i (6 % от размера массива данных) амплитуда отдельных импульсов уменьшается на два порядка, а амплитудный спектр $|Sp_i|$ (рис. 11) сосредоточен в диапазоне отсчетов 50—250.

На рис. 12а изображен фрагмент фазового спектра φ_i , вычисленный как главное значение обратной тригонометрической функции и, следовательно, имеющий фиктивные скачки размером 2π . Введение мнимой экспоненты позволяет вычислить разность фаз в соседних отсчетах и построить фазовый спектр без скачков Φ_i как интеграл с переменным верхним пределом (рис. 12б).

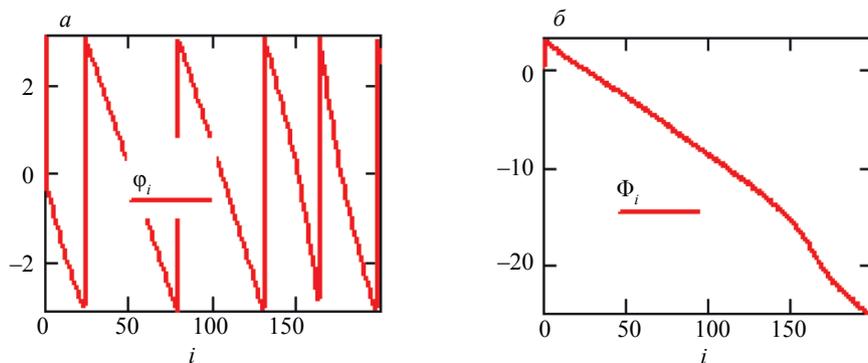
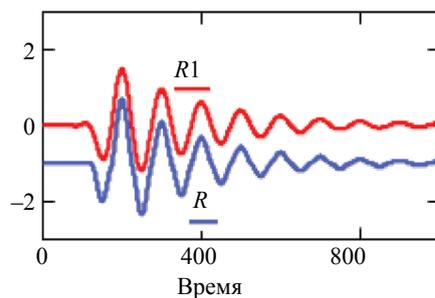


Рис. 12. Фрагменты фазового спектра, вычисленные:
 а — как главное значение обратной тригонометрической функции; б — как интеграл с переменным верхним пределом.

На рис. 13 приведен результат реконструкции по соотношению (5) R -серии рис. 9 (кривая красного цвета $R1$). Синим цветом отмечена исходная редвудовская серия R (кривая R смещена для удобства визуального сопоставления). Коэффициент корреляции кривых $R1$ и R составляет 0,995.

Рис. 13. Результат реконструкции $R1$ исходной серии R .

Таким образом, зная эхограмму, можно реконструировать излученный импульс и определить действительные значения АС преобразователя. Предложим несколько способов. Первый способ — используя выражения (3). Второй способ — используя выражение (5). Третий способ основывается на определении огибающих $y(x) = O(x)/x$ в выражении (4). Данный способ весьма прост, однако применим для значений Z_d менее 5.

Реконструкция экспериментальных эхограмм

На рис. 14 приведены реконструкции эхограмм от преобразователей без протектора со следующими демпферами с теоретическими значениями Z_d : 1 — воздух с $Z_d = 0$ (рис. 14а); 2 — вода с $Z_d = 1,5$ (рис. 14б); 3 — глицерин с $Z_d = 2,4$ (рис. 14в); 4 и 5 — компаунд на полимерной связке с разной величиной наполнителя и с разными Z_d (рис. 14г, рис. 14д). На рис. 14д в правой части приведена экспериментальная эхограмма данного преобразователя, сравнивая которую с реконструкцией $R1$ (излученным импульсом) нетрудно заметить выигрыш в разрешающей способности.

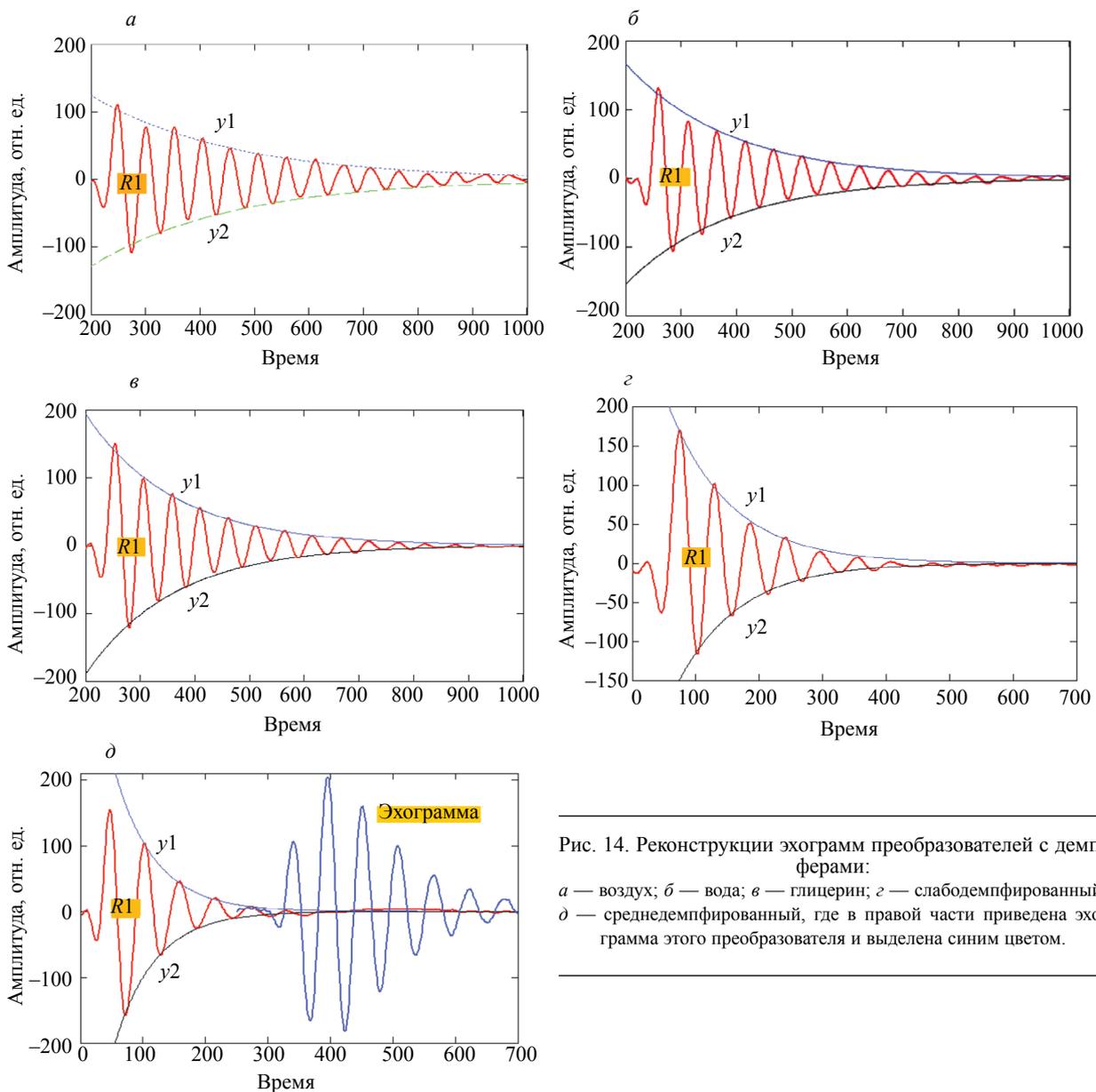


Рис. 14. Реконструкции эхограмм преобразователей с демпферами:
 а — воздух; б — вода; в — глицерин; г — слабодемпфированный;
 д — среднедемпфированный, где в правой части приведена эхограмма этого преобразователя и выделена синим цветом.

Для изготовления преобразователей использовалась пьезопластина из ЦТС-19 с $Z_{пз} = 22,5$, толщиной 0,5 мм, закрепленная по торцевой поверхности в корпусе. К электродам пьезопластины припаивались выводы. Внутри корпуса, в качестве демпфера помещались указанные выше среды. Электрическое согласование (добавление внешних электрических элементов) во всех экспериментах не использовалось. Эхограмма с выводов преобразователя поступала на вход дефектоскопа USD-60 производства фирмы «Кропус», в котором она преобразовывалась в цифровой код, который затем поступал в среду программы «Mathcad», где и осуществлялись приведенные выше преобразования.

Для всех преобразователей иммерсионной средой или нагрузкой была вода, поэтому наиболее интересен эксперимент (см. рис. 14б), когда условия с обеих сторон пьезопластины преобразователя одинаковы, то есть $Z_{ср} = Z_{д}$. При $Z_{пз} = 22,5$ и $Z_{ср} = Z_{д} = 1,6$, которое было принято за действительное АС и использовалось для определения действительных значений АС сред демпферов преобразователей.

Определение действительного АС

На первом этапе — по реконструкциям кривых эхограмм определяется среднее значение $Q = V*W$ путем подбора количества анализируемых пар полуволн с учетом среднеквадратичного отклонения этого произведения, позволяющего отсекаать выпадающие значения.

На втором этапе, рассчитав значение V при $Z_{ср} = 1,6$, $Z_{пз} = 22,5$, определяется значения W и далее $Z_{д}$. Получены следующие действительные значения АС демпферов: воздуха — 0,70; глицерина — 2,25; компаунда на полимерной связке с небольшим весовым процентом порошкового металлического наполнителя (слабодемпфированный преобразователь) — 4,66; компаунд на полимерной связке со средним весовым процентом порошкового металлического наполнителя (среднедемпфированный преобразователь) — 7,38.

Для каждой реконструкции на рис. 14, используя выражения (3), построены огибающие y_1 и y_2 для полученных АС и выделены синим цветом. Можно заметить расхождение реконструкции и их огибающих только для среднедемпфированного преобразователя (см. рис. 14д) с $Z_{д} = 7,38$, что согласуется с условием применения метода огибающих, при котором $Z_{д} \leq 5$.

При сравнении теоретических и действительных АС наиболее заметно отличие для «воздушного» демпфера, которое объяснимо влиянием конструкции преобразователя (узел крепления пьезопластины, контакты) на степень демпфирования, что необходимо учитывать при проектировании преобразователей.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Выше приведено решение прямой задачи или показано как, зная конструкцию и значения АС сред, можно определить (предсказать) эхограмму. Также приведено решение обратной задачи, а именно: как, зная эхограмму, реконструировать излученный импульс и определить значения АС сред преобразователя. Для ультразвуковых исследований (дефектоскопии, гидролокации, медицины) это наиболее интересная и востребованная задача, один из важных результатов которой — повышение разрешения при сохранении чувствительности [15].

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель работы преобразователя в режиме приема. Получено математическое выражение для эхоимпульса.
2. Показана теоретическая и практическая возможность реконструкции излученного импульса.
3. Приведены практические примеры оценки чувствительности преобразователя, акустических сопротивлений его материалов, повышения разрешения при сохранении чувствительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартыненко А.В. К вопросу о возможности повышения чувствительности и разрешения иммерсионного пьезоэлектрического преобразователя // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 3—12.
2. Бархатов В.А. Восстановление распределения отражателей по дальности. Обращение свертки эхосигналов // Дефектоскопия. 2003. №6. С.10—28.
3. Бархатов В.А. Экспериментальное исследование решений одномерной обратной акустической задачи // Дефектоскопия. 2012. № 12. С. 55—64.

4. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. Ермолова И.Н. М.: Изд-во Машиностроение, 1986. 280 с.
5. *Домаркас В.Й., Кажис Р.-Й.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Изд-во Минтис, 1975. 255 с.
6. *Королев М.В., Карпельсон А.Е.* Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Изд-во Машиностроение, 1982. 157 с.
7. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Изд-во Машиностроение, 1981. 240 с.
8. ГОСТ 23702—90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. М.: Изд-во Госстандарт СССР, 1991. 57 с.
9. *Мартыненко А.В.* Иммерсионный пьезоэлектрический преобразователь с улучшенными характеристиками // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 3—13.
10. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х томах. Пер. с франц. М.: Изд-во Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
11. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Изд-во Политехника, 2014. 294 с.
12. *Григорьев М.А., Толстиков А.В., Навроцкая Ю.Н.* Коэффициент передачи многослойного пьезопреобразователя при прямом и обратном преобразовании // Акустический журнал. 2002. Т. 48. № 2. С. 187—194.
13. *Redwood M.* A study of waveform in the generation and detection of short ultrasonic pulses // Journ. Appl. Mater. Research. 1963. V. 2. P. 76—84.
14. *Зверев В.А., Стромков А.А.* Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: Изд-во ИПФ РАН, 2001. 188 с.
15. *Мартыненко А.В., Ермаченко В.П.* Способ ультразвукового контроля материалов и изделий. Заявка на выдачу евразийского патента на изобретение № 2021114521 от 21.05.2021, МПК⁸G01N 29/00.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОГО И РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

© 2021 г. В.Е. Никулин^{1,*}, С.Г. Паршин^{1,**}, А.М. Левченко^{2,***}

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Россия 195251
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

²ООО «УНТЦ Сварка» Национального Агентства Контроля Сварки, Россия 194292, Санкт-Петербург,
3-й Верхний переулок, 1, корп. 3, лит. С

E-mail: * v.e.nikulin@ya.ru; ** parshin@spbstu.ru; *** info@rszmas.ru

Поступила в редакцию 06.05.2021; после доработки 01.06.2021

Принята к публикации 18.06.2021

Рассмотрена возможность оценки остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанізотропного и рентгенодифрактометрического методов. С помощью метода магнитной анизотропии обнаружена степень неоднородности остаточных напряжений в образцах с наплавкой, выполненных порошковой проволокой и покрытым электродом на воздухе и под водой. Применение двух методов неразрушающего контроля позволили определить и сравнить величины остаточных сварочных напряжений.

Ключевые слова: мокрая подводная сварка, сварочные напряжения, напряженно-деформированное состояние, магнитоанізотропный метод, метод рентгеновской дифракции.

DOI: 10.31857/S0130308221080042

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий подводной мокрой сварки морских конструкций из низколегированных сталей связано с решением проблемы мониторинга остаточных сварочных напряжений для достижения оптимального напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных соединений. Особенно важным является контроль НДС после подводной мокрой сварки высокопрочных сталей из-за риска появления холодных трещин, развития дефектов, коррозионных процессов и деформаций. Уровень механических напряжений определяется технологией подводной сварки и зависит от погонной энергии, состояния микроструктуры, рабочих нагрузок и коррозионных процессов [1—4]. Градиент температур, быстрые скорости охлаждения и развитие микроструктурной неоднородности оказывают влияние на рост остаточных сварочных напряжений [5—8].

Из-за высоких скоростей охлаждения при подводной мокрой сварке вдоль сварного соединения образуются высокие растягивающие напряжения, близкие к пределу текучести материала. Появление дефектов при подводной сварке дополнительно снижает надежность и ресурс эксплуатации сварных металлоконструкций [9]. Уменьшение остаточных сварочных напряжений и контроль НДС сварных конструкций позволяют предупредить разрушение морских конструкций, увеличить их надежность и ресурс эксплуатации.

Подводная сварка широко применяется в мире [10—14] при монтаже и ремонте трубопроводов, нефтегазодобывающих платформ, надводных и подводных кораблей, грузовых портов, причалов и прибрежных защитных сооружений. Развитие подводных технологий, освоение арктического и каспийского шельфа связано с широким применением морских конструкций из высокопрочных сталей, что обуславливает актуальность исследований в области подводной сварки, разработке сварочного оборудования и материалов [9, 15].

Для снижения остаточных напряжений применяются оптимизация термического цикла сварки путем изменения химического состава присадочного материала и использования термообработки. Таким образом можно управлять процессом распада аустенита и образованием мартенсита для релаксации растягивающих напряжений [16]. Применение термообработки приводит к снижению содержания водорода в сварном шве на 35 % от исходного значения, к снижению твердости шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Положительный эффект могут оказать также электромагнитное перемешивание сварочной ванны [17], низкочастотная виброобработка [18—20], проковка валиков [21].

Для контроля НДС применяются разрушающие и неразрушающие методы [22, 23]. Разрушающие методы основаны на разрезании, травлении, высверливании, электроэрозионной обработке.

Основной принцип заключается в «высвобождении» остаточных напряжений и измерении величины деформации с помощью тензометрических датчиков и оптических систем. В мировой практике широко применяется метод сверления глухих отверстий с использованием тензорезистивных датчиков, согласно ASTM E837-13a и ГОСТ 21616—91.

Среди неразрушающих способов контроля НДС широкое применение находит метод рентгеновской дифракции (XRD — X-Ray diffraction) (BS EN 15305:2008, ASTM E2860-12). Метод не требует калибровки под конкретный материал, однако требуется наличие эталона нулевого напряжения, согласно стандартам E915—16 и DIN EN 15305-2009. Метод XRD предъявляет строгие требования к подготовке поверхности контроля, а глубина проникновения рентгеновских лучей составляет менее 0,03 мм [23]. Применение XRD позволяет оценить степень деформации кристаллической решетки по смещению дифракционных пиков и их ширине дифракционных пиков, что имеет прямую связь с остаточными напряжениями первого и второго рода.

К магнитным методам контроля НДС относят измерение коэрцитивной силы путем намагничивания материала, определение магнитной анизотропии — магнитоанизотропный метод [24] и метод измерения шумов Баркгаузена [25]. В условиях упругого нагружения металлоконструкции точность корреляции НДС с измеряемой величиной коэрцитивной силы зависит от наличия остаточных пластических деформаций [26, 27].

Магнитоанизотропный метод (МAM) основан на принципе измерения ЭДС, наводимой в измерительных катушках датчика слабым переменным магнитным полем [24]. Разработки оборудования, использующие подобный тип преобразователей для определения напряженного состояния, ведутся также и за рубежом [28—31]. МAM требует наличия калибровки под конкретную марку стали. На характер калибровочной зависимости могут оказывать влияние наличие пластической деформации, остаточная намагниченность, фазовый состав и структура материала. К преимуществам данного метода можно отнести глубину проникновения сигнала до нескольких миллиметров, а также высокую точность корреляции с заданным уровнем механических напряжений при упругой деформации [32].

В ГОСТ Р 52891 представлен интерферометрический метод контроля, основанный на оптической регистрации нормальных перемещений кромок засверленного глухого отверстия [33]. Основными преимуществами данной измерительной системы является отсутствие калибровки и низкая стоимость в сравнении с применением тензорезистивных датчиков.

Использование различных аппаратных средств измерения механических напряжений затрудняется из-за отсутствия метрологического обеспечения [34]. Оценка остаточных сварочных напряжений при подводной сварке сталей осуществляется на основе моделирования тепловых полей, что требует валидации и экспериментального подтверждения моделей [35]. Это обуславливает актуальность настоящего исследования.

Целью исследования являлось экспериментальное определение остаточных сварочных напряжений при подводной мокрой наплавке покрытыми электродами и порошковой проволокой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения остаточных сварочных напряжений при подводной сварке использовали образцы 300×200×12 мм из судостроительной стали повышенной прочности D32 по ГОСТ Р 52927—2015, с модулем упругости $E = 200\ 000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,29$ (табл. 1, 2).

Таблица 1

Химический состав стали PC D32, %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0,09	0,22	0,95	0,005	0,013	0,05	0,03
As	N	Al	Mo	Nb	V	Cu
0,003	0,005	0,037	0,005	0,025	0,029	0,06

Для наплавки на воздухе и под водой использовали покрытые электроды для ручной подводной мокрой сварки Э38-ЛКИ-1П-3,0-УД (ЗАО «Электродный завод», г. Санкт-Петербург) и самозащитную порошковую проволоку ППС-АПЛ2 (ООО «УНТЦ Сварка», г. Санкт-Петербург) для автома-

Таблица 2

Физико-механические свойства стали D32

Предел прочности σ_b , не менее, МПа	Предел текучести σ_r , не менее, МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость при $t = 20$ °С, Дж/см ²
490	400	30	169

Таблица 3

Режимы сварки при наплавке на воздухе и под водой

Способ наплавки	Сила тока I , А	Напряжение U , В	Мощность дуги P , Вт	Скорость сварки v , м/мин	Погонная энергия дуги Q , кДж/мм
Порошковая проволока на воздухе	188	32	6016	0,235	1,23
Порошковая проволока под водой	198	32	6336	0,229	1,32
Покрытый электрод на воздухе	147	27	3969	0,186	1,07
Покрытый электрод под водой	141	28	3948	0,186	0,99

тической сварки. Источником тока являлся сварочный аппарат «Сварог MIG 3500» (ООО «ИНСВАРКОМ», г. Санкт-Петербург) с режимами наплавки (табл. 3).

Для контроля остаточных напряжений применялись магнитоанизотропный и рентгенодифрактометрический методы. Для МAM использовали прибор «Stressvision LAB» (ООО «Феррологика», г. Санкт-Петербург). Для XRD был применен прибор «HePKA» (ООО «РаДиаТех», г. Гатчина). Характеристики приборов указаны в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика приборов «Stressvision LAB» и «HePKA»

Характеристика	Stressvision LAB	HePKA
Минимальная площадь контроля	≈ Ø20 мм	2×2 мм
Глубина контроля	до 3 мм	до 10 мкм
Вывод результатов измерений	Графический	Численный
Точность измерений	±10 у.е. (по результатам стендовых испытаний для стали PC D32)	±25 МПа
Скорость измерения	1 с	Не менее 30 с
Особенность измерительной системы	4-полюсной магнитоанизотропный преобразователь с крестообразным магнитопроводом	Двухлучевой способ определения смещения углов дифракции в плоскости α -Fe (211)
	Обмотка на одном плече отвечает за намагничивание, на другом с поворотом на 90° — измерительная обмотка	Максимальный диапазон определения брэгговских углов $2\theta = 148\text{—}158,5^\circ$ 2 хромовых анода под углами 90 и 52° к поверхности образца

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вид образцов после наплавки на воздухе и под водой показан на рис. 1.

При расчете погонной энергии сварочной дуги под водой КПД принималось равным 0,8 [36]. Расчет погонной энергии сварочной дуги в процессе сварки проводился по формуле:

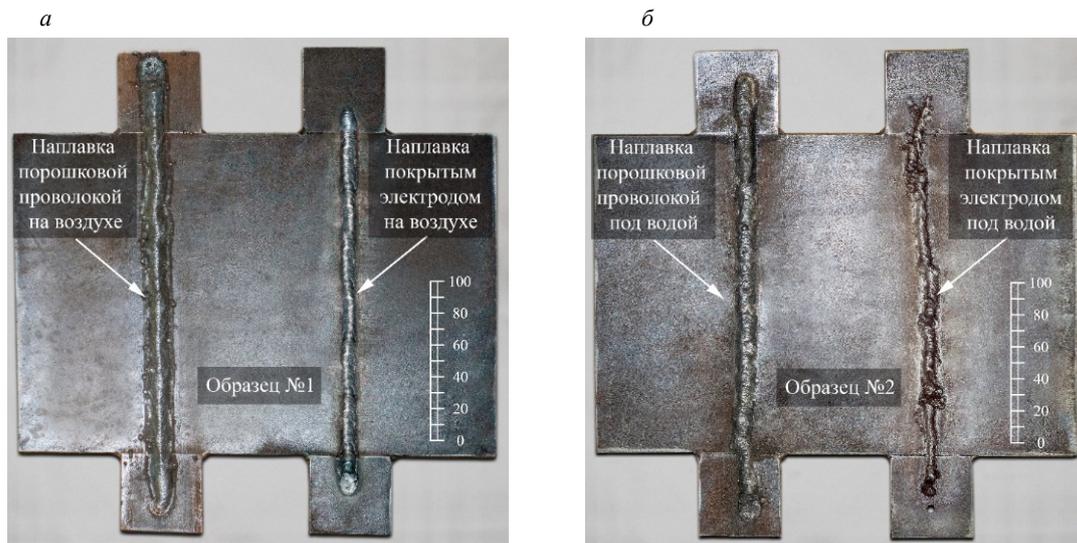


Рис. 1. Образцы № 1 и № 2 с наплавкой на воздухе (а) и под водой (б).

$$Q = \eta IU / v = \eta P / v, \quad (1)$$

где I — сила тока, А; U — напряжение, В; P — мощность дуги, Вт; v — скорость сварки мм/мин. На рис. 2 представлен график распределения погонной энергии при дуговой наплавке по длине шва $L = 200$ мм.

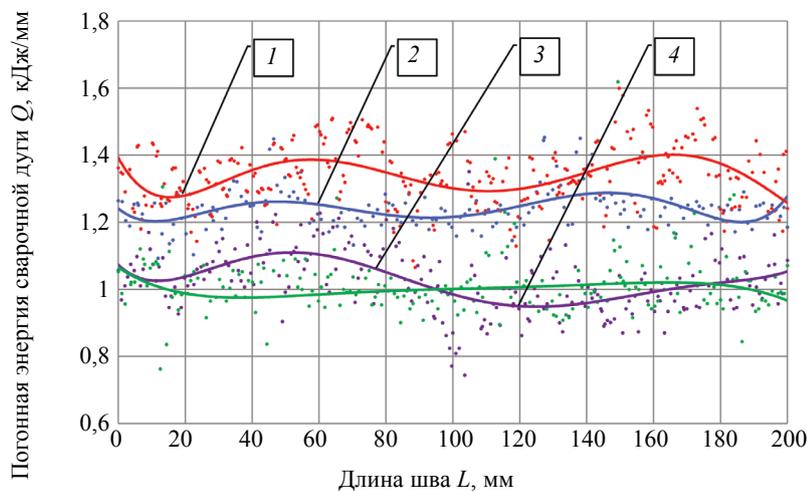


Рис. 2. Распределение погонной энергии Q при наплавке по длине шва:

1 — наплавка порошковой проволокой на воздухе; 2 — наплавка порошковой проволокой под водой; 3 — наплавка покрытым электродом на воздухе; 4 — наплавка покрытым электродом под водой.

Процесс сварки покрытым электродом под водой проходил нестабильно, что ухудшило формирование и плотность наплавленного металла. Наплавка порошковой проволокой имела высокую стабильность с небольшим образованием пор под водой, но на воздухе образование пор шло более интенсивно. Макрошлифы представлены на рис. 3.

После наплавки был проведен рентгенографический контроль образцов с применением цифрового плоскопанельного детектора с использованием аппаратно-программного комплекса «БЕРКУТ» (ООО «РаДиаТех», г. Гатчина). Результаты рентгеновского контроля представлены на рис. 4.

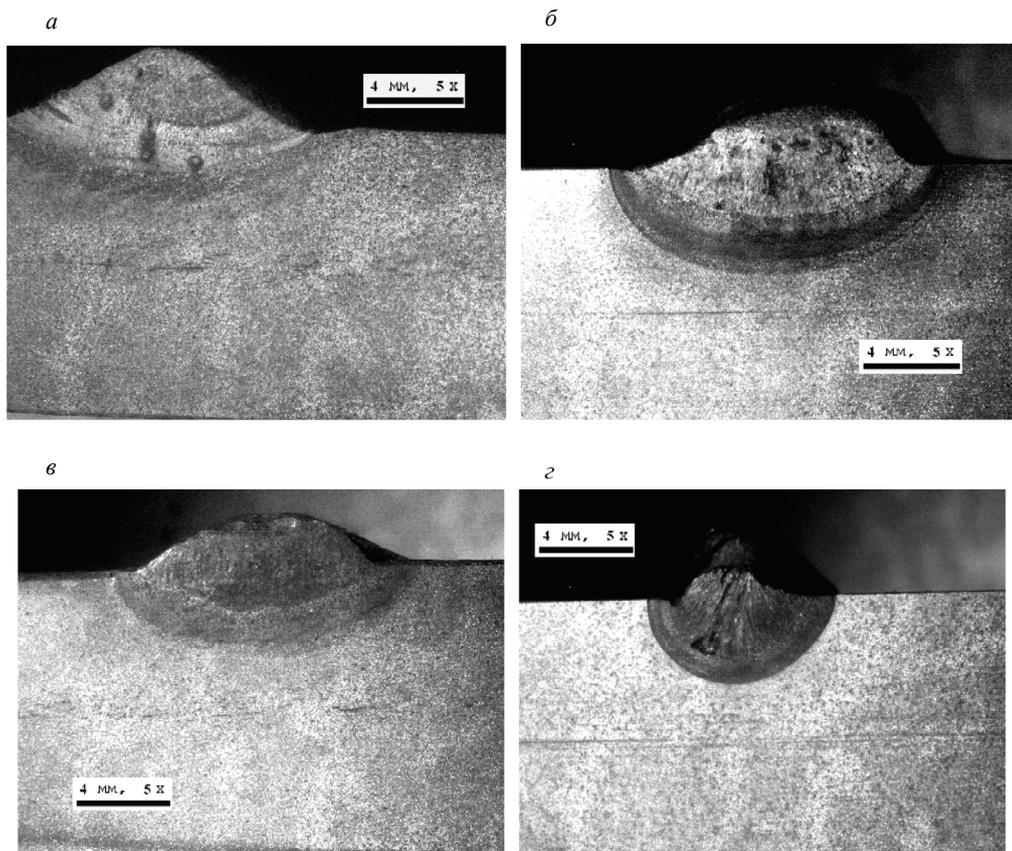


Рис. 3. Макрошлифы для образцов с наплавкой:
a — покрытым электродом на воздухе; *б* — покрытым электродом под водой; *в* — порошковой проволокой на воздухе; *г* — порошковой проволокой под водой.

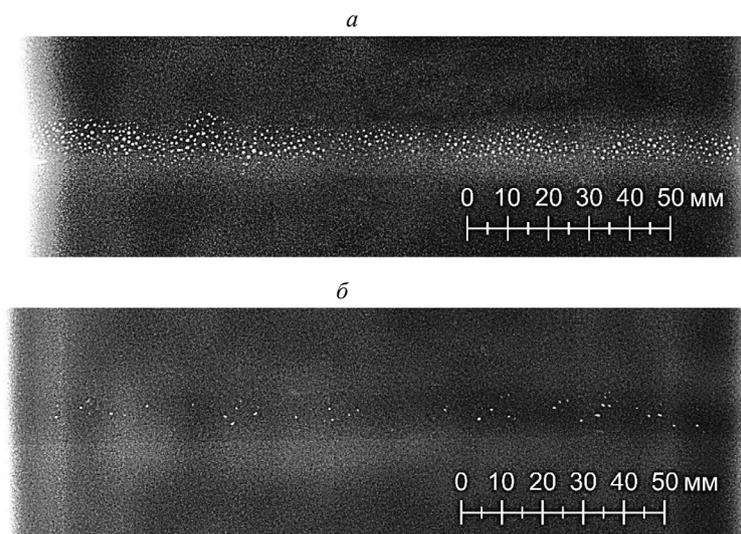


Рис. 4. Рентгенограммы для наплавки, полученной порошковой проволокой:
a — на воздухе; *б* — под водой.

Измерение остаточных напряжений с помощью МАМ

Для прибора Stressvision LAB была получена калибровочная зависимость при испытании на растяжение образца из стали PC D32 из того же листа металлопроката, что и образцы с наплавкой

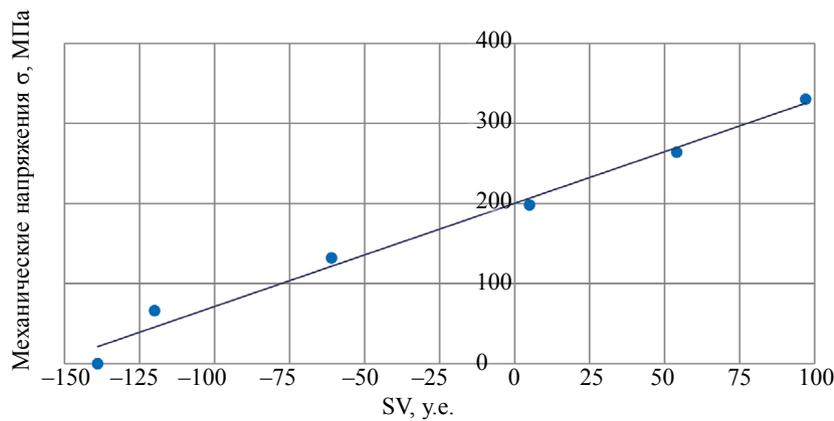


Рис. 5. Калибровочная зависимость для «Stressvision LAB» при растяжении образца из стали PC D32.

№ 1 и № 2. Результатом калибровки является зависимость величины заданных механических напряжений от показаний прибора в условных единицах (рис. 5).

По результатам испытаний на упругое растяжение была получена зависимость для конвертации результатов измерений прибором «Stressvision LAB» из условных единиц в механические напряжения МПа для одноосного напряженного состояния:

$$\sigma = 1,287 \cdot SV + 200, \quad (2)$$

где SV — результат измерений прибором «Stressvision LAB» в у.е.

Результатом контроля, полученного с помощью «Stressvision LAB», являются картограммы распределения разности нормальных напряжений, действующих на поверхности образцов. Позиционирование магнитоанизотропного преобразователя осуществляется по узлам координатной сетки вдоль оси сварного шва. Для построения координатной сетки использовали шаг 20 мм при отступе от края шва 20 мм. Общее количество узлов контроля для образцов с наплавкой составило 117 (рис. 6).

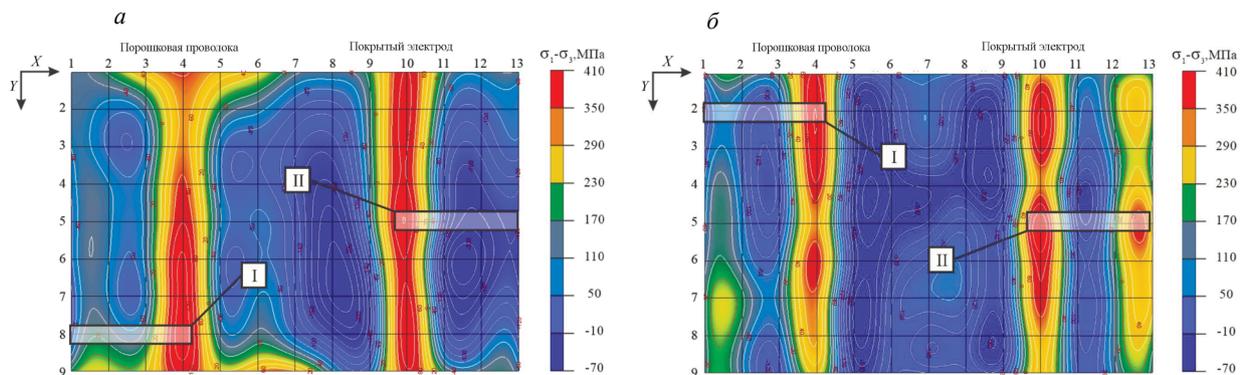


Рис. 6. Картограммы распределения остаточных напряжений для образцов с наплавкой на воздухе (а); под водой (б).

Обнаружено, что наиболее однородным с точки зрения распределения остаточных напряжений по всей длине шва является бездефектная наплавка, полученная с помощью покрытого электрода на воздухе. В то же время, наибольшие напряжения выявлены в наплавке покрытым электродом под водой, в зоне обрыва сварочной дуги.

По результатам контроля остаточных напряжений для каждой из наплавки выявлено расположение наиболее высоких значений механических напряжений. Величина напряжений и их расположение в данных точках представлено в табл. 5. Последующее применение рентгеновской дифракции проводилось в этих точках и прилегающих областях, отмеченных римскими цифрами I и II рис. 6.

Таблица 5

Максимальные остаточные напряжения, выявленные МАМ

Величина разности напряжений	Порошковая проволока на воздухе	Порошковая проволока под водой	Покрытый электрод на воздухе	Покрытый электрод под водой
$\sigma_1 - \sigma_3$, МПа	370	353	352	376
Расположение в координатах X;Y	4;8	4;2	10;5	10;5

Измерение остаточных напряжений с помощью рентгеновской дифракции

Измерение межплоскостного расстояния лежит в основе применения XRD для определения остаточных напряжений. При работе с прибором «НеРКА» использование хромовых анодов позволяет определять положение и смещение дифракционных пиков, полученных при отражении рентгеновского излучения от плоскости поверхности (211) для α -Fe. Дифракция от упругого рассеяния рентгеновского излучения на кристалле описывается законом Брэгга—Вульфа:

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda, \quad (3)$$

где d_{hkl} — межплоскостное расстояние, Å; θ — брэгговский угол; n — порядок дифракционного максимума, $n = 1$; λ — длина волны, для хромового анода $\lambda_{CrK\alpha} = 2,2897$ Å.

Для плосконапряженного состояния в условиях упругой деформации сферического элемента объема изотропного тела, его удлинение $\varepsilon_{\psi,\varphi}$ в любом направлении удобно описать уравнением для эллипсоида деформации:

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = \varepsilon_1 \sin^2\psi \cos^2\varphi + \varepsilon_2 \sin^2\psi \sin^2\varphi + \varepsilon_3 \cos^2\psi, \quad (4)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — главные удлинения (рис. 7).

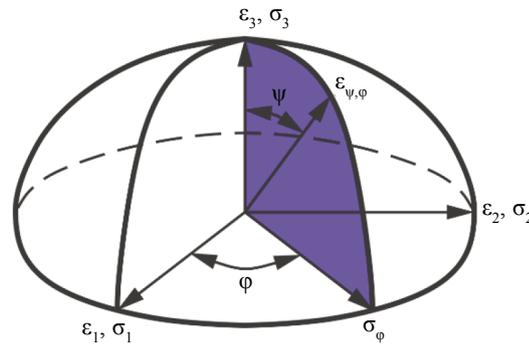


Рис. 7. Эллипсоид деформации и напряжений.

Главные удлинения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ связаны с главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ через закон Гука следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = (1/E)(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)) \\ \varepsilon_2 = (1/E)(\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)) \\ \varepsilon_3 = (1/E)(\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)) \end{cases} \quad (5)$$

Подставив значения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ из уравнения (5) в выражение (4), получим:

$$\varepsilon_{\psi,\varphi} = \frac{1-\nu}{E} (\sigma_1 (\sin \psi \cos \varphi)^2 + \sigma_2 (\sin \psi \sin \varphi)^2 + \sigma_3 \cos^2 \psi) - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (6)$$

При рассмотрении влияния рентгеновского излучения на глубину его проникновения, составляющую несколько микрометров, можно считать главное напряжение $\sigma_3 \approx 0$, однако $\varepsilon_3 \neq 0$.

Величина деформаций ε_3 определяется так же, как и в случае линейного напряженного состояния через относительное изменение межплоскостных расстояний для плоскостей, почти параллельных поверхности образца:

$$\varepsilon_3 = \frac{(d_{\perp} - d_0)}{d_0} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (7)$$

где d_{\perp} — межплоскостное расстояние при перпендикулярном излучении к плоскости кристалла, Å; d_0 — межплоскостное расстояние для недеформированного и свободного от остаточных напряжений кристалла, Å.

Определение величины отдельных компонент нормальных напряжений с помощью «НеРКА» осуществляется при одновременном использовании съемки под углами $\psi_1 = 0^\circ$ и $\psi_2 = 38^\circ$.

Для плосконапряженного состояния при $\sigma_3 \approx 0$ из (6) следует, что

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} = \frac{1-\nu}{E}(\sigma_1(\sin \psi \cos \varphi)^2 + \sigma_2(\sin \psi \sin \varphi)^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2). \quad (8)$$

Определим разность деформаций:

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{(1-\nu)\sin^2 \psi}{E}(\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi). \quad (9)$$

Выражение $\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi$ есть напряжение σ_{φ} в направлении φ при $\psi = 90^\circ$, действующее в плоскости образца.

Преобразовав (9), получим:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2 \psi}(\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3). \quad (10)$$

Если обозначить $d_{\psi, \varphi}$ как межплоскостное расстояние для той же плоскости, что и d_0 , d_{\perp} , то получим:

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_0}{d_0} - \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}}{d_0}. \quad (11)$$

С достаточной степенью приближения можно считать, что

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}}{d_{\perp}}. \quad (12)$$

Из этого выражения следует:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2 \psi} \frac{d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}}{d_{\perp}}. \quad (13)$$

При изменении межплоскостного расстояния для плоскостей hkl на величину $\Delta d = d_{\psi, \varphi} - d_{\perp}$ происходит смещение линии hkl на угол $\Delta \theta = \theta_{\psi, \varphi} - \theta_0$, где индекс 0 относится к свободному от макронапряжений материалу. Дифференцируя выражение Вульфа—Брэгга (3):

$$\Delta d \sin \theta_0 + d_0 \cos \theta_0 \Delta \theta = 0. \quad (14)$$

Из (14) следует, что

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{\Delta d}{d_{\perp}} = -\operatorname{ctg} \theta_0 (\theta_{\psi, \varphi} - \theta_0) = \operatorname{ctg} \theta_0 (\theta_0 - \theta_{\psi, \varphi}). \quad (15)$$

При известном угле φ или при известном направлении действия главных напряжений при $\varphi = 0$ для съемки двулучевым способом можно определить отдельные компоненты нормальных напряжений σ_1 и σ_2 по смещению угла θ , опираясь на (15):

$$\sigma_{\varphi=0} = \frac{E \operatorname{ctg} \theta_0 (\theta_0 - \theta_{\psi, \varphi})}{(1 + \nu) \sin^2 \psi}. \quad (16)$$

В качестве калибровки измерительной системы для «НеРКА» проводят анализ расположения дифракционных пиков на порошке карбонильного железа, предполагая отсутствие в данном материале остаточных напряжений. Пример дифракционных пиков для порошка карбонильного железа представлен на рис. 8.

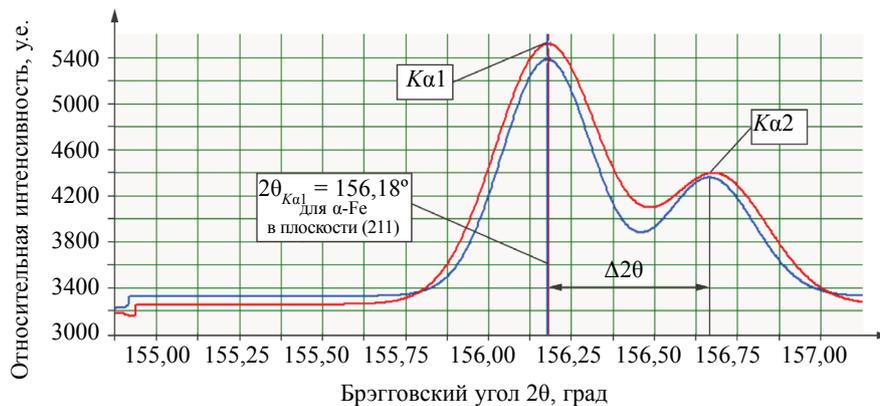


Рис. 8. Дифракционные спектры для порошка карбонильного железа.

Дифракционные пики, представленные на рис. 8 синим цветом, получены от пучка рентгеновского излучения, падающего под углом 90° к поверхности образца $\psi_1 = 0^\circ$. Красным цветом получен спектр от пучка рентгеновского излучения, падающего под углом 52° к поверхности образца $\psi_2 = 38^\circ$. На спектрах отчетливо видны вклады от $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ -переходов, $2\theta_1 = 156,18^\circ$ и междупиковое расстояние для данного угла дифракции составило $\Delta 2\theta = 0,94^\circ$, что соответствует расположению дифракционных пиков для плоскости (211) α -Fe, согласно базе порошковых дифракционных стандартов COD (crystallography open data base), PDF-2 (Powder Diffraction File).

Разделение сигнала на 2 энергетических перехода характеризует наличие механической однородности для остаточных напряжений второго рода и отсутствие микрповреждений кристаллической решетки. Совпадение дифракционных пиков, полученных при падении на плоскость кристалла рентгеновского излучения под двумя различными углами, свидетельствует о нулевых остаточных напряжениях первого рода и отсутствии деформаций кристаллической решетки.

Определение остаточных сварочных напряжений на образцах № 1 и № 2 с помощью рентгеновского дифрактометра проводилось после шлифовки и электрохимического травления поверхности сварного соединения и основного металла в областях, указанных на рис. 6. Электрохимическое травление поверхности образцов проводилось в 10 % растворе NaCl в течение 3 мин при 12 В и 3,5 А.

Время экспозиции на одно измерение составило 90 с. Измерения проводились в двух направлениях: вдоль шва и поперек шва, что позволило определить продольные σ_1 и поперечные σ_3 остаточные сварочные напряжения и остаточные напряжения в основном металле. Предполагается, что измерения дифрактометром продольных и поперечных сварочных напряжений соответствуют измерениям нормальных напряжений в направлении угла $\varphi = 0^\circ$. При этом рентгеновское излучение падает на плоскость поликристалла под углами $\psi_1 = 0^\circ$ и $\psi_2 = 38^\circ$ к нормали. На рис. 9, 10 показаны дифракционные пики для продольных напряжений в сварных швах.

Результаты анализа остаточных сварочных напряжений XRD методом в выбранных областях (см. рис. 6) представлены на графиках (рис. 11).

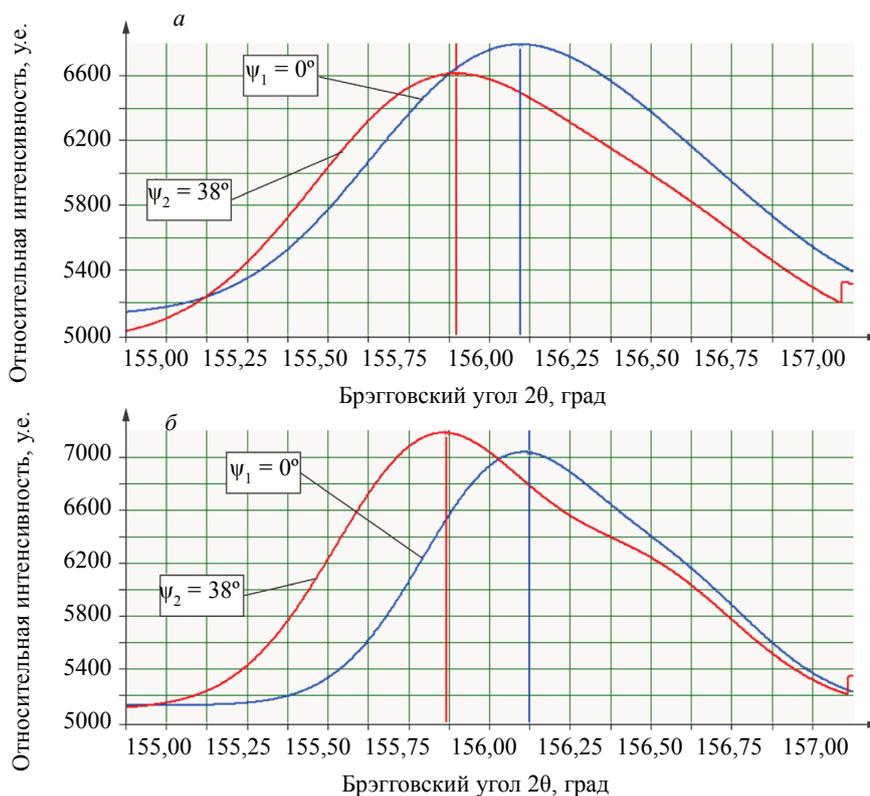


Рис. 9. Дифракционные пики на поверхности вдоль шва при наплавке порошковой проволокой на воздухе (а); под водой (б).

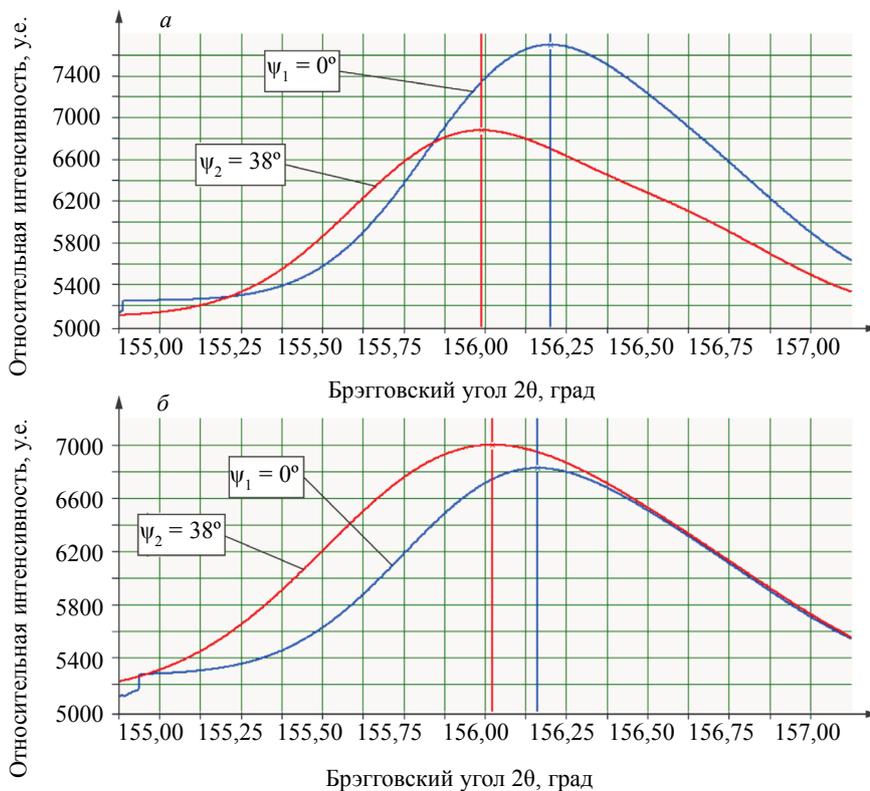


Рис. 10. Дифракционные пики на поверхности вдоль шва при наплавке покрытым электродом на воздухе (а); под водой (б).

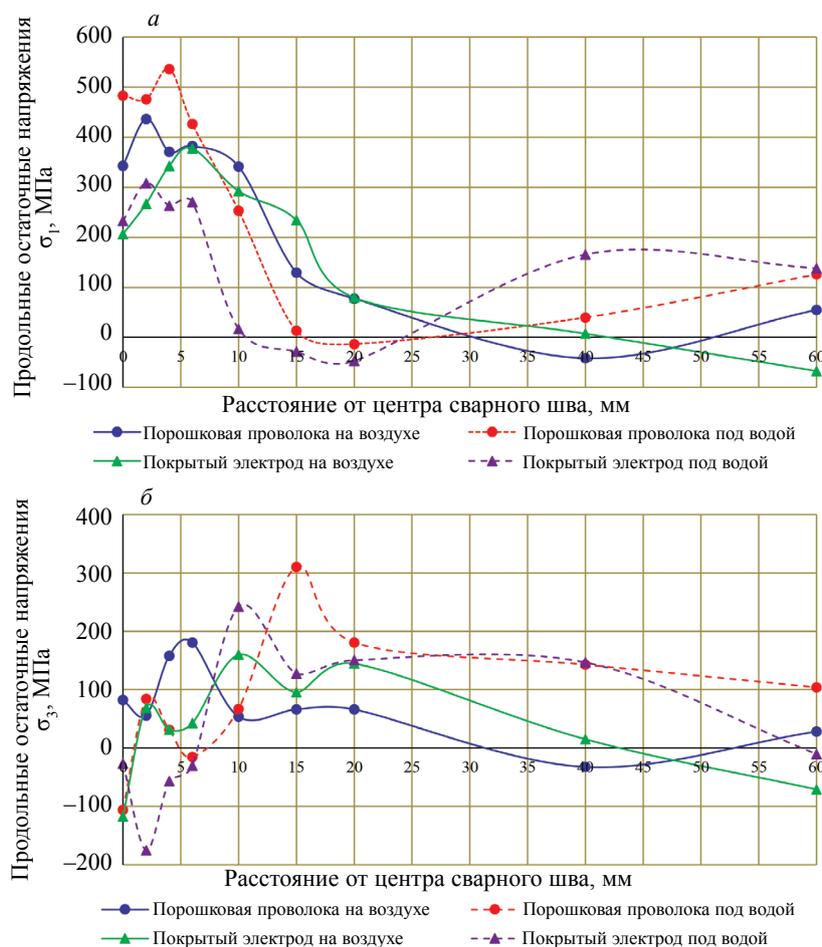


Рис. 11. Результат определения остаточных напряжений методом рентгеновской дифракции: продольные напряжения (а); поперечные напряжения (б).

На рис. 12 представлены сопоставительные результаты между МАМ и методом XRD по параметрам разности между продольными и поперечными механическими напряжениями.

Взаимосвязь между средней погонной энергией сварочной дуги и максимальной величиной остаточных продольных напряжений представлена на рис. 13.

ВЫВОДЫ

1. Подводная мокрая сварка низколегированной стали сопровождается появлением значительных остаточных сварочных напряжений, что увеличивает вероятность появления холодных трещин и может снижать работоспособность и надежность подводных сварных конструкций. Величина и распределение напряжений в продольном и поперечном направлении зависят от погонной энергии и фазовых превращений при высоких скоростях охлаждения и градиентов температур.

2. В целях снижения остаточных сварочных напряжений разработка технологий подводной мокрой сварки морских конструкций должна учитывать регулирование теплового цикла сварки для снижения скорости охлаждения и управления фазовыми превращениями в микроструктуре сварного шва и зоны термического влияния. Другим требованием является контроль напряженно-деформированного состояния сварных соединений на основе применения методов рентгеновской дифракции и магнитной анизотропии. На точность контроля напряжений оказывают влияние дефекты, которые являются концентраторами напряжений. Поэтому для учета влияния дефектов требуется разработка специальных методик контроля и стандартов для подводной мокрой сварки.

3. Применение метода рентгеновской дифракции и магнитной анизотропии позволило с высокой степенью достоверности определить величину и распределение остаточных напряжений, действующ-

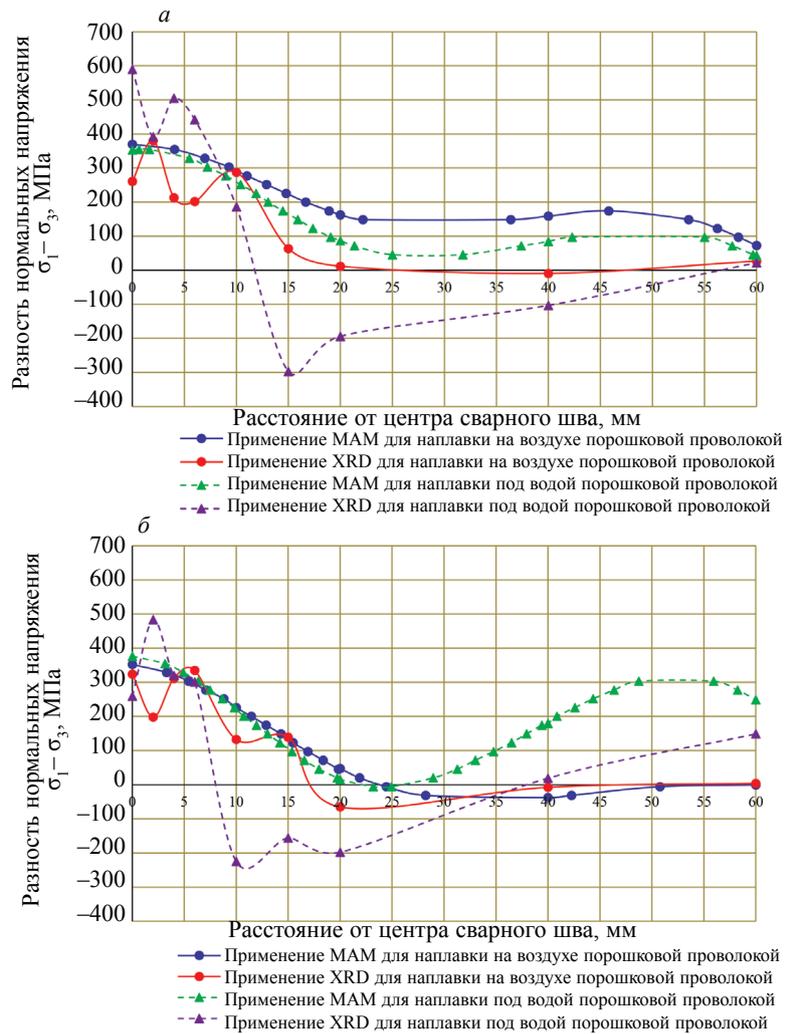


Рис. 12. Сравнение результатов магнитной анизотропии и рентгеновской дифракции при определении остаточных напряжений по параметрам разности нормальных напряжений для наплавки порошковой проволокой (а); покрытым электродом (б).

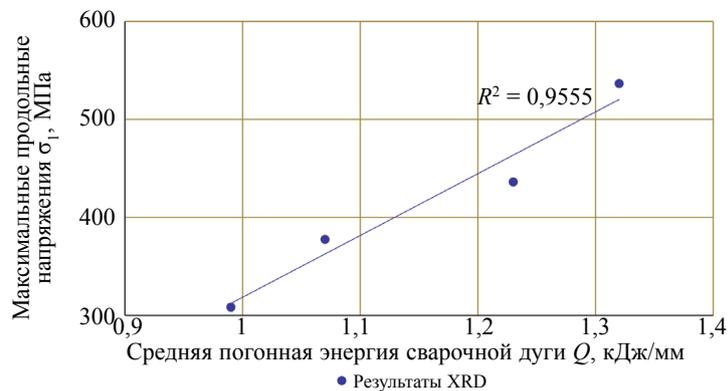


Рис. 13. Взаимосвязь между погонной энергией и максимальными остаточными сварочными продольными напряжениями с построенной линейно аппроксимацией.

щих в продольном и поперечном направлении относительно сварного шва. При мокрой наплавке порошковой проволокой в центре шва и на расстоянии 4 мм от центра шва растягивающие продольные напряжения достигают 536 и 484 МПа соответственно, что выше на 44 и 41 % по сравнению с

наплавкой на воздухе. Максимальные растягивающие поперечные напряжения при мокрой наплавке порошковой проволокой и покрытым электродом достигают 310 и 242 МПа соответственно, что выше на 71 и 51 % по сравнению с наплавкой на воздухе. Таким образом, технология подводной мокрой сварки высокопрочных сталей в целях предупреждения образования холодных трещин должна включать мероприятия по снижению уровня остаточных сварочных напряжений, включая предварительный подогрев, термическую или вибрационную обработку сварных соединений.

Авторы благодарят к.т.н. Г.Н. Вострецова, И.Л. Репина (ООО «УНТЦ Сварка» Национального Агентства Контроля Сварки) за техническую поддержку при проведении исследований, к.ф.-м.н. Б.Н. Барахтина, Н.Н. Барахтину, Н.Ф. Дроздову (НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей») за консультации и техническую поддержку при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Totten G.* Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Ohio: ASM International, 2002. 499 p.
2. *Breidenstein B., Heikebrügge S., Schaumann P., C. Dänekas.* Influence of the Measurement Parameters on Depth-Resolved Residual Stress Measurements of Deep Rolled Construction Steel using Energy Dispersive X-ray Diffraction // HTM Journal of Heat Treatment and Materials. 2020. V. 75. P. 419—432.
3. *Farajian M., Nitschke-Pagel T., Dilger K.* Stability and Relaxation of Welding Residual Stresses // Materials Science Forum. 2011. V. 681. P. 55—60.
4. *Gurova T., Estefen S.F., Leontiev A.* Time-dependent redistribution behavior of residual stress after repair welding // Welding in the World. 2017. V. 61. P. 507—515.
5. *Radaj D.* Welding residual stress and distortion. Calculation and measurement. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2003. 97 p.
6. *Gkatzogiannis S., Knoedel P., Ummenhofer T.* Simulation of welding residual stress — from theory to practice // Mathematical Modelling of Weld Phenomena. 2019. V. 12. P. 383—400.
7. *Goldak J.A., Akhlaghi M.* Computational welding mechanics. New York: Springer, 2005. 321 p.
8. *Копельман Л.А.* Основы теории прочности сварных конструкций / Учебное пособие. 2 изд. испр. СПб.: Издательство «Лань», 2010. 464 с.
9. *Паршин С.Г.* Металлургия подводной и гипербарической сварки. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 402 с.
10. *Bo Zhao, Ji Chen, Chuanbao Jia, Chuansong Wu.* Numerical analysis of molten pool behavior during underwater wet FCAW process // Journal of Manufacturing Processes. 2018. V. 32. P. 538—552.
11. *Максимов С.Ю., Ляховая И.В.* Мокрая подводная сварка низколегированных сталей повышенной прочности // Автоматическая сварка. 2013. № 8. С. 43—46.
12. *Gao Wen-Bin, Wang Dong-Po, Cheng Fang-Jie, Deng Cai-Yan, Xu Wei.* Underwater wet welding for HSLA steels: chemical composition, defects, microstructures, and mechanical properties // Acta Metallurgica Sinica-English Letters. 2015. V. 28. P. 1097—1108.
13. *Łabanowski J., Fydrych D., Rogalski G.* Underwater Welding — a review // Adv. Mater. Sci. Eng. 2008. V. 8. P. 11—22.
14. *Dariusz F., Grzegorz R.* Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal // Welding International. 2011. V. 25. P. 166—171.
15. *Parshin S., Levchenko A.* Technology and equipment for underwater wet welding and cutting of high strength steel arctic structures using flux-cored wires // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. No. 539. P. 1—10.
16. *Кархин В.А.* Тепловые процессы при сварке. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 572 с.
17. *Прилипко Е.А.* Процесс подводной мокрой сварки порошковой проволокой с внешним электромагнитным воздействием / Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. Киев: Киевский Политехнический Институт, 2013. 169 с.
18. *Fatkullin M.R., Fairushin A.M., Rizvanov R.G.* Development of technology for welding repair of steel housings using a combination of ultrasonic vibrations and forced cooling // Materials Science Forum. 2020. V. 989. P. 747—752.
19. *Ebrahimi S.M., Farahani M., Akbari D.* The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. № 102 (4). P. 2147—2158.
20. *Летуновский А.П., Антонов А.А., Стеклов О.И.* Снятие технологических остаточных напряжений в металлоконструкциях низкочастотной виброобработкой // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 8. С. 12—16.
21. *Евстратикова Я.И., Никулин В.Е.* Контроль остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанізотропного метода после применения ультразвуковой ударной обработки // Сварка и Диагностика. 2019. № 4. С. 38—41.

22. *Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G.* Methods of measuring residual stresses in components // *Materials and Design*. 2012. V. 35. P. 572—588.
23. *Schajer G.S.* Practical Residual Stress Measurement Methods, First Edition. John Wiley & Sons, Ltd. Published, 2013. 297 p.
24. *Могильнер Л.Ю., Скуридин Н.Н.* Лабораторные исследования магнитно-анизотропного метода контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта, нефти и нефтепродуктов*. 2021. № 11(2). С. 145—151.
25. *Горкунов Э.С., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е., Артемьев Б.В.* К вопросу применения магнитного метода НК для определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкций // *В мире неразрушающего контроля*. 2016. № 3 (19). С. 43—46.
26. *Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Огнева М.С. Королев А.В., Осипов А.А.* Наведенная магнитная анизотропия в пластически деформированных растяжением пластинах из низкоуглеродистой стали // *Дефектоскопия*. 2015. № 10. С. 19—23.
27. *Захаров В.А., Ульянов А.И., Горкунов Э.С.* Коэрцитивная сила ферромагнитных сталей при двухосном симметричном растяжении материала // *Дефектоскопия*. 2011. № 6. С. 3—15.
28. *Dae-Sung Kim, Ji-Hyeung Yoo, Hong-Duk Moon.* Non-destructive stress measurement of civil structural steel using magnetic anisotropy sensor // *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD)*. 2016. V. 6. P. 13—20.
29. *Uchanin V., Minakov S., Nardoni G., Ostash O., Fomichov S.* Nondestructive Determination of Stresses in Steel Components by Eddy Current Method // *Journal of Mechanical Engineering*. 2018. V. 11(64). P. 690—697.
30. *Chmielewski M., Piotrowski L., Augustyniak B.* A fast procedure of stress state evaluation in magnetically anisotropic steels with the help of a probe with adjustable magnetizing field direction // *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing. 2017. V. 28. P. 1—11.
31. *Xin Wei, Liang Lin, Ding Keqin, Zhao Yu, Wang Hongzhu.* Study on the magnetic measurement theory and method of residual stress for ferromagnetic components based on magnetic anisotropy // *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2020. No 11. P. 137—146.
32. *Ксенофонтов Н.М.* Обеспечение безопасности и эксплуатационной надежности водно-транспортных гидротехнических сооружений путем предупреждения деградиционных отказов элементов их механического оборудования / Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 2019. 183 с.
33. *Пономарев К.Е., Стрельников И.В., Антонов А.А., Бондаренко А.А.* Применение метода лазерной интерферометрии для выбора режимов вибрационной обработки по критерию уровня остаточных напряжений // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. № 86 (2). С. 54—60.
34. *Остривной А.Ф., Лобашев А.А.* Метрологическое обеспечение измерений механического напряжения // *В мире неразрушающего контроля*. 2017. № 3. С. 58—61.
35. *Gutiérrez P.H., Rodríguez F.C., Mondragón J.J.R., Dávila J.L.A., Mata M.P.G., Chavez C.A.G.* Thermo-mechanic and Microstructural Analysis of an Underwater Welding Joint // *Soldagem & Inspeção*. 2016. V. 21. P. 56—164.
36. *Yong Zhang, Chuanbao Jia, Bo Zhao, Jiakun Hu, Chuansong Wu.* Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. V. 238. P. 373—382.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ФОН ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА, СНИМАЕМОГО С ИНДУКЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ГОЛОВКИ

© 2021 г. В.В. Павлюченко¹, Е.С. Дорошевич^{1,*}

¹Белорусский Национальный Технический Университет,
Беларусь 220013 Минск, пр-т Независимости, 65
E-mail: ess.doroshevich@gmail.com

Поступила в редакцию 17.05.2021; после доработки 22.06.2021

Принята к публикации 25.06.2021

Представлены экспериментальные зависимости $U(t)$ электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки (МГ), движущейся относительно магнитного носителя (МН). Выявлены и исследованы фоны краев МН, локальных дефектов МН, фон неоднородного магнитного поля локального источника, фоны дефектов и структурных неоднородностей объекта, эфирный электромагнитный фон, фон качества поверхности объекта и поверхностных микроскопических неоднородностей материала. Выявлены и исследованы резонансные фоны самовозбуждения измерительной системы на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей. Резонансные пики являются следствием самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ, и возникают на задних фронтах любых сигналов достаточной величины, длительность заднего фронта которых составляет порядка четверти периода собственных колебаний измерительной системы. Определены амплитудный и частотный спектры фона сигналов дефектов объекта, МН и помех и описывающие их аналитические выражения. Показаны результаты выделения полезного сигнала из полного сигнала, записанного на МН. Исследования дифференциального фона электрического сигнала позволяют совместно с разработанными авторами ранее методами гистерезисной интерференции вести контроль свойств объектов в автоматическом режиме с программным управлением, что значительно повышает чувствительность и точность контроля. Для достижения этой цели рекомендовано устанавливать параметры системы измерения на пороге возникновения в ней собственных свободных колебаний.

Ключевые слова: магнитный носитель, магнитная головка, дефект, дифференциальный фон электрического сигнала.

DOI: 10.31857/S0130308221080054

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения точности контроля свойств объектов разными методами неразрушающего контроля необходимо уменьшать влияние различных отрицательных факторов, сопутствующих процессу контроля. Эти факторы создают фон сигнала, снимаемого с датчика, который следует исключать из полного сигнала для выделения полезной информации. В случае магнитографического контроля [1, 2] такой фон создают сигналы краев магнитного носителя, сигналы электромагнитных помех и другие сигналы. Различные помехи могут присутствовать и в сигналах датчиков вихретоковой дефектоскопии при их предварительной обработке [3], а также при определении внешних параметров электропроводящего объекта по измерениям возмущений переменного магнитного поля [4].

Выделение полезной информации об объектах при использовании магнитного гистерезиса в импульсных магнитных полях и обнаружении дефектов сплошности в образцах из алюминия магнитоимпульсным методом проведено нами в [5, 6] и при нахождении распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов [7].

Для разработки способов выделения сигнала дефекта из полного сигнала могут быть использованы результаты теоретических и экспериментальных работ по выявлению дефектов: анализ топографии магнитных полей рассеяния в ферромагнитных изделиях [8], моделирование определения геометрических параметров внутренних дефектов методом магнитной дефектоскопии [9], исследование магнитного поля рассеяния от дефектов трубопровода [10], изучение поля рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном поле [11]. Для этого может быть полезным компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов в ферромагнитной пластине методом пространственных интегральных уравнений [12], результаты магнитографической дефектоскопии изделий с использованием постоянных магнитов [13] и способ оценки параметров дефектов в сталях [14].

При выделении сигналов, считываемых с магнитного носителя, следует учитывать исследования наложения друг на друга электрических сигналов преобразователей магнитного поля при гистерезисной интерференции перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля [15] и формировании изобразжений электрических сигналов для контроля металлов в импульсных маг-

нитных полях с использованием гистерезисной интерференции [16]. Надо также отметить большое количество не достаточно изученных причин возникновения фона сигнала при магнитографической дефектоскопии, затрудняющих процесс контроля и понижающих его качество. Поэтому целью настоящей работы является наиболее полное изучение фона электрического сигнала, снимаемого с индукционной магнитной головки при сканировании ею магнитного носителя для повышения точности контроля удельной электропроводности, магнитной проницаемости и геометрических параметров объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях, а также контроля дефектов сплошности в этих объектах.

Актуальность проведения данных исследований состоит, в частности, в том, что при осуществлении контроля объектов, в том числе объектов ответственного назначения, в настоящее время требуется повышение точности контроля, его производительности и разрешающей способности, возможности контроля труднодоступных частей объекта, а также использования одновременно нескольких методов контроля. Магнитографический метод позволяет получать мгновенное распределение информационных магнитных полей на площадях в десятки квадратных сантиметров и существенно больших (порядка 1 м^2) с разрешением по площади $0,01 \text{ мм}^2$. При считывании информации магнитного носителя с помощью магнитооптической пленки с визуализацией полей контроль осуществляется в режиме, близком к режиму реального времени с задержкой на несколько десятков микросекунд. Более того, разрабатываемые методы контроля с помощью МН могут быть применены при использовании вихретоковых преобразователей, магнитооптической пленки, флюкс-детекторов, преобразователей Холла и во многих других случаях.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

При сканировании магнитного носителя (МН) индукционной магнитной головкой (МГ) электрический сигнал, снимаемый с нее, пропорционален производной от напряженности магнитного поля по времени при осуществлении временной развертки сигнала или производной по пространственной координате, вдоль которой происходит движение МГ. Поэтому естественно назвать такой фон дифференциальным. Наличие этого фона обусловлено многими причинами, исследование которых проведено в данной работе.

При нахождении дефектов сплошности в диамагнитных и парамагнитных металлических объектах, а также при получении гистерезисной интерференции (HI) для контроля толщины и удельной электропроводности материала объектов авторами найдены значительные отклонения зависимости электрического напряжения от времени развертки $U(t)$ от нулевого уровня сигнала в отсутствие сигналов полей дефектов исследуемых объектов.

Известно [1, 2, 6], что при движении магнитной головки над краем намагниченного магнитного носителя в ней индуцируется однополярный сигнал и его амплитуда зависит от величины остаточной намагниченности МН. Возникает задача нахождения зависимости величины этого сигнала от расстояния МГ до края МН по линии сканирования и высоте над МН.

Найдем зависимость величины сигнала от длины участка МН, пробегаемого магнитной головкой на минимальном расстоянии МГ от поверхности МН, то есть на расстоянии толщины диэлектрической подложки МН. Характеристики используемого магнитного носителя такие же, как и в [15, 16].

Зависимость $U(t)$, снимаемого с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями магнитных полей, для участков МН разной длины изображена на рис. 1. Здесь показаны также пики сигналов, обусловленные началом и концом участков МН, резонансные пики и локальные максимумы и минимумы сигнала зависимости $U(t)$. Расстояние от МГ до рабочего слоя датчика МН составляет $0,16 \text{ мм}$. На рис. 1 и на всех последующих рисунках отрезку времени 1 мс соответствует отрезок расстояния, равный $1,1 \text{ см}$.

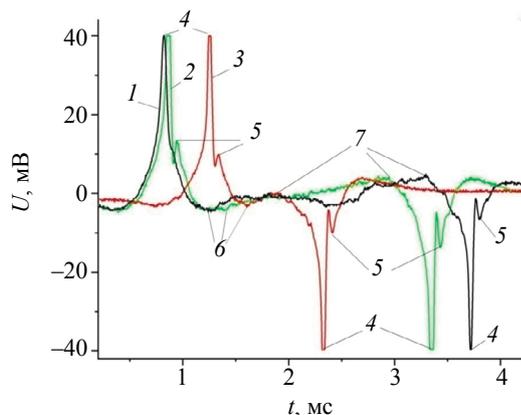


Рис. 1. Зависимости $U(t)$, снимаемого с МГ, сканирующей участок МН длиной:

1 — 32 мм; 2 — 27 мм; 3 — 12 мм; 4 — пики сигналов от краев МН; 5 — вторые резонансные пики; 6 — минимумы и 7 — максимумы сигнала.

Из графиков на рис. 1 следует, что магнитная головка начинает воспринимать намагниченный носитель уже на расстоянии, равном примерно 3 мм от ближнего края МН. Сначала величина сигнала падает до $-4,38$ мВ при 0,33 мс. МГ перестает воспринимать МН на расстоянии около 2 мм от его дальнего края. В промежутке между пиками 4, соответствующими краям участков МН разной длины, зависимость $U(t)$ не является горизонтальным линейным отрезком, а имеет минимумы 6 и максимумы 7, что затрудняет процесс контроля объекта. С увеличением амплитуды воздействующего магнитного поля величина этих максимумов растет (значит, растут и искажения измеряемого сигнала) и достигает величины пиковых значений сигнала 4 от краев МН. Временные (пространственные) зависимости сигнала края МН могут быть описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида.

Для получения реального фона $U(t)$ выбран магнитный носитель с многочисленными локальными дефектами, такими, как локальные изломы, потертости, мятые участки МН, повреждения рабочего слоя и так далее. Влияние всех этих дефектов МН должно быть устранено или скомпенсировано. Скомпенсирован должен быть также фон неоднородного магнитного поля локального источника, используемого при измерениях.

Авторами обнаружено самовозбуждение используемой измерительной системы. Его влияние на результаты контроля пояснено графиками на рис. 2, где показана зависимость $U(t)$, снимаемого с МГ, сканирующей участок МН длиной 32 и 12 мм с пиками сигналов от краев МН и резонансными пиками сигнала. Резонансные пики являются следствием самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ. Эти пики возникают при приближении частоты локальных изменений $U(t)$ к частоте собственных колебаний этой измерительной системы.

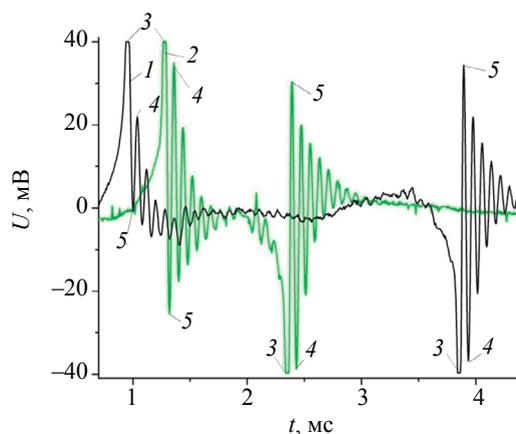


Рис. 2. Зависимости $U(t)$, снимаемого с МГ, сканирующей участок МН длиной: 1 — 32 мм, 2 — 12 мм; 3 — пики сигналов от краев МН; 4 — вторые резонансные пики; 5 — первые резонансные пики.

В результате корректировки величины активного и реактивного сопротивлений в контуре, содержащем МГ, получили зависимости 1 и 2 на рис. 2, соответствующие зависимостям 1 и 3 на рис. 1. На нисходящих ветвях пиковых участков этих зависимостей $U(t)$ появились дополнительные пики сигнала, то есть в контуре измерительной системы возникли свободные затухающие гармонические колебания. Из сопоставления указанных зависимостей $U(t)$ на рис. 1 и рис. 2 видно, что практически незаметному резонансному пику 5 кривой 1 на рис. 1 соответствует пик 4 кривой 1 на рис. 2, а резонансному пику 5 кривой 3 на рис. 1 соответствует резонансный пик 4 (см. рис. 2) значительно большей величины. В случае самовозбуждения возникли также первые резонансные пики 5 (см. рис. 2), являющиеся продолжением нисходящих ветвей сигнала. Нами установлено, что резонансные пики могут возникать на задних фронтах любых одиночных сигналов достаточной величины, длительность заднего фронта которых составляет порядка четверти периода собственных колебаний контура.

Примером этого могут служить пики (2,05 мс; $-5,94$ мВ; 2,08 мс; 3,75 мВ; 2,13 мс; $-8,75$ мВ; 2,16 мс; $-2,81$ мВ; 2,22 мс; $-10,94$ мВ; 2,24 мс; $-8,13$ мВ) зависимости 2 на рис. 2. Локальные отклонения, соответствующие указанным пикам, видны уже на рис. 1, зависимость 3.

Таким образом, для того чтобы не возникали дополнительные погрешности измерений следует найти такое соотношение индуктивных и активных сопротивлений в контуре измерительной системы, при которых не происходит ее самовозбуждение. При этом следует отметить, что чувствительность данной измерительной системы является максимальной именно вблизи ее резонансной частоты и с удалением от нее чувствительность падает.

С целью повышения точности измерений разработали способы уменьшения дифференциального фона путем использования эталонного дифференциального фона. Для этого изготовили датчик из магнитного носителя с дефектом в нем в виде полосы с полностью удаленным рабочим слоем. Намагнитили этот участок полем известного источника, считали с него информацию с помощью МГ и получили зависимость $U(t)$ дифференциального фона, изображенную на рис. 3. На этом рисунке показаны также минимумы сигнала 2, 7, 8, пики сигнала от краев датчика 3 и 4 и пики сигнала поля дефекта 5 и 6. Расстояние от МГ до рабочего слоя датчика МН составляет 0,16 мм, а над передним краем датчика оно равно 0,3 мм. Ширину дефекта МН нашли по временным координатам пиков 5 (4,06 мс) и 6 (4,13 мс) с преобразованием в зависимость величины сигнала от пространственной координаты x и получили величину, равную 0,77 мм.

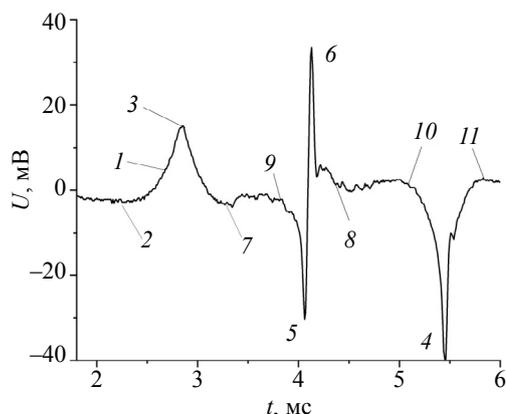


Рис. 3. Зависимость $U(t)$ дифференциального фона; 2, 7, 8, 9, 10, 11 — минимумы и максимумы сигнала; 3 и 4 — пики сигнала от краев МН; 5 и 6 — пики сигнала дефекта МН.

Изготовили второй датчик из такого же магнитного носителя, создали в нем дефект в виде полосы с частично удаленным рабочим слоем. Намагнитили этот датчик в таком же поле, как и первый, но с противоположным направлением напряженности. Совместили оба датчика друг с другом вплотную рабочими слоями, намагничеными противоположно, считали записанную на них информацию с помощью МГ и получили разностную зависимость $U(t)$ дифференциального фона, изображенную на рис. 4. Здесь также показаны пик от ближнего края датчиков 2, пики сигналов двух дефектов МН; 3, 4, 5, 6 — пики сигналов двух дефектов МН; 7 и 8 — максимумы и минимумы сигнала; 9 — координата краев датчиков.

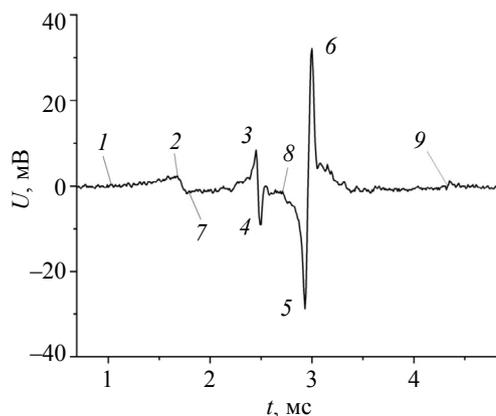


Рис. 4. Разностная зависимость $U(t)$ дифференциального фона; 2 — пик от ближнего края датчиков; 3, 4, 5, 6 — пики сигналов двух дефектов МН; 7 и 8 — максимумы и минимумы сигнала; 9 — координата краев датчиков.

сигнала поля дефекта с частично удаленным рабочим слоем 3 и 4, пики сигнала поля дефекта с полностью удаленным рабочим слоем 5 и 6, максимумы и минимумы разностного сигнала 7 и 8. Здесь же показана точка 9, соответствующая координате дальних краев совмещенных датчиков.

По координатам пиков сигналов дефектов 3 (2,45 мс) и 4 (2,49 мс) нашли, что ширина полосы с частично удаленным рабочим слоем равна 0,44 мм.

Из рис. 4 следует, что фон сигнала на рис. 3 почти полностью скомпенсирован фоном второго датчика. Так, вместо пика сигнала дефекта 4 (5,45 мс; $-39,68$ мВ) на рис. 3 получена соответствующая ему точка 9 (4,31 мс; 0 мВ) на рис. 4, где случайным образом скомпенсированы также локальные сигналы помех, составляющие около 0,9 мВ. Вместе с тем пик 3 (2,83 мс; 0,015 мВ) от ближнего края датчика на рис. 3 скомпенсирован не полностью. Ему соответствует пик 2 (1,67 мс; 2,19 мВ) на рис. 4. При этом образовался минимум сигнала 7 (1,77 мс; $-1,88$ мВ). По временным координатам пика 2 и минимума 7 установлено, что длина первого датчика больше, чем длина второго на 1,1 мм.

Таким образом, при совмещении двух датчиков МН удалось скомпенсировать сигналы фона, обусловленные краями датчиков МН и ростом сигнала при движении МГ в однородном магнитном поле МН. Однако остаются некомпенсированными локальные сигналы помех и наводок. Кроме того, на участок датчика с дефектом в виде полностью удаленного рабочего слоя невозможно записать какую-либо информацию, а поврежденный (с частично удаленным рабочим слоем) участок существенно искажает информацию при ее записи и считывании.

Обратим внимание также на тот факт, что при возникновении пиков сигналов от дефектов МН (и дефектов объектов) происходит резкий спад величины электрического напряжения МГ после прохождения ею записей полей этих дефектов на МН. Этот спад в силу инерционных свойств МГ не может происходить мгновенно. Это означает, что дополнительно возникают зоны контроля с пониженной чувствительностью и искажения измеряемых полей.

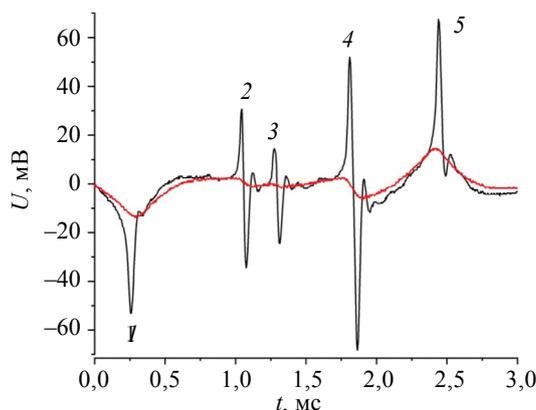


Рис. 5. Зависимости пиков $U(t)$ на разных расстояниях МГ от МН:
1, 5 — от краев МН; 2, 3 и 4 — для дефектов МН шириной 0,38, 0,33 и 0,61 мм.

Найдены зависимости пиков $U(t)$ дефектов МН в виде полос разной ширины с частично поврежденным рабочим слоем на разных расстояниях МГ от МН, изображенные на рис. 5. Здесь показана зависимость $U(t)$, полученная на расстоянии 0,03 мм МГ от МН (с большими амплитудами пиков) и зависимость на расстоянии 1,03 мм (с меньшими амплитудами). По координатам пиков сигналов дефектов 2 (1,04 мс и 1,075 мс), 3 (1,28 мс и 1,31 мс) и 4 (1,81 мс и 1,865 мс) нашли, что ширина дефектов соответственно равна 0,38 мм, 0,33 мм и 0,61 мм.

Указанные зависимости в виде отдельных участков, содержащих максимумы и минимумы сигналов, изображены на рис. 6. В порядке уменьшения амплитуды сигналов пиков эти зависимости соответствуют расстояниям МГ от МН 0,03 мм, 0,013 мм, 0,23 мм, 1,03 мм и 1,53 мм. Здесь показаны также резонансные пики. Исходя из анализа графиков на рис. 6 зависимость амплитуды сигнала дефектов от расстояния магнитной головки до магнитного носителя может быть представлена обратной или экспоненциальной зависимостью.

Полученные в данной работе временные и соответствующие им пространственные зависимости величины сигнала от края МН, края дефекта и вызванные другими причинами могут быть

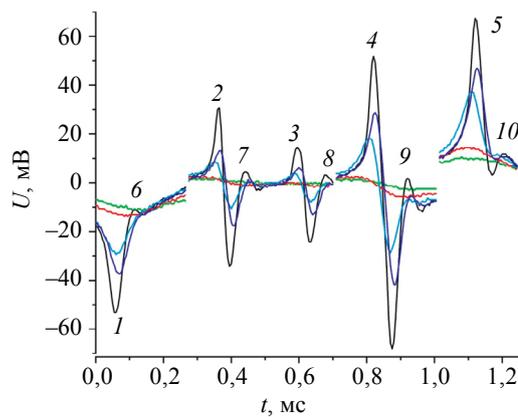


Рис. 6. Зависимости пиков $U(t)$ на разных расстояниях МГ от МН:
1, 5 — от краев МН; 2, 3 и 4 — для дефектов МН шириной соответственно 0,38, 0,33 и 0,61 мм; 6, 7, 8, 9, 10 — резонансные пики.

представлены в цифровом табличном виде или описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида.

Покажем, что достаточно точный контроль объектов можно производить с помощью источника, формирующего неоднородное импульсное магнитное поле в плоскости измерения. Фон сигнала, обусловленный неоднородностью магнитного поля локального источника, накладывается на фоны остальных сигналов и увеличивает погрешности измерений.

На рис. 7 показан дифференциальный фон 1 плоского индуктора с максимумами сигнала 2 и 3 от краев МН. Здесь же показан интегральный фон 4 этого индуктора, полученный с помощью индикатора в виде дискретного датчика магнитного поля (ДДМП) [5]. ДДМП состоит из полос МН, укрепленных параллельно на тонкой гибкой диэлектрической основе на расстоянии порядка их ширины друг от друга. Шаг используемого ДДМП составляет 1,18 мм и соответствует расстоянию между соседними пиками одной полярности на рис. 7.

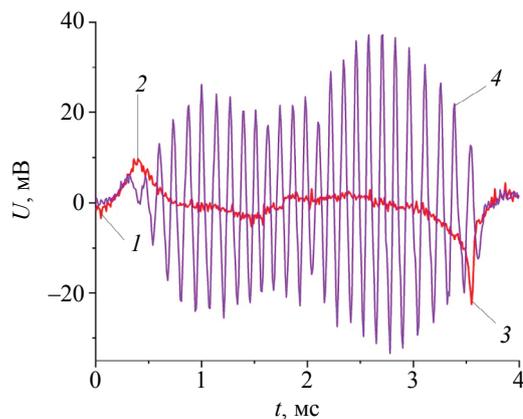


Рис. 7. Фон плоского индуктора:
1 — дифференциальный; 4 — интегральный; 2 и 3 — максимумы сигнала от краев МН.

Размеры плоского индуктора составляют $4,5 \times 4,0$ см, плотность намотки индуктора — 16 витков·см⁻¹. Измерения проведены на расстоянии 3,3 мм от плоскости магнитного носителя. Неоднородность фона локального источника обусловлена конечностью его размеров, разной плотностью намотки, влиянием остальных сторон контура индуктора и другими факторами. С помощью ДДМП определяли абсолютную величину напряженности магнитного поля. Максимальной величине электрического напряжения 75 мВ ДДМП соответствует напряженность магнитного поля порядка 180 А/см, а величине электрического напряжения 40 мВ — напряженность магнитного поля около 150 А/см. Таким образом, из рис. 7 следует, что максимальная неоднородность поля источника равна примерно 17 %.

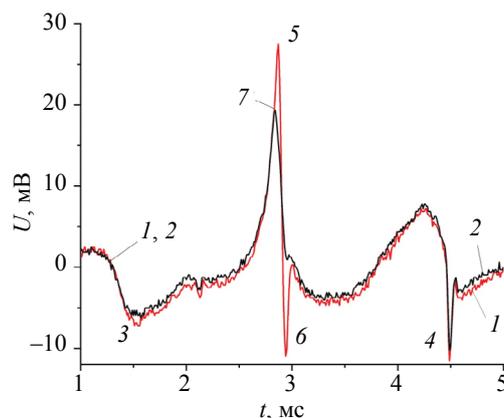


Рис. 8. Зависимости $U(t)$:
 1 — с сигналом дефекта; 2 — без сигнала дефекта; 3 и 4 — сигналы от краев МН; 5 и 6 — пики сигналов дефекта; 7 — пик сигнала края дополнительной пластины из алюминия.

Разработанные нами методы гистерезисной интерференции [5—7, 15, 16] позволяют значительно уменьшить влияние неоднородности поля источника и других отрицательных факторов на результаты контроля. Покажем, что с помощью указанного источника неоднородного поля с применением гистерезисных методов можно достаточно точно определять параметры дефектов металлических объектов. Зависимости электрического напряжения от времени $U(t)$, снимаемого с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель с записями магнитных полей, полученные для участков образца из алюминия с дефектом и без дефекта показаны на рис. 8. Образец представлял собой алюминиевую пластину толщиной 0,06 мм с дефектом в виде отверстия диаметром 0,8 мм. На пластину наложена алюминиевая фольга толщиной 0,015 мм. Под указанной пластиной была установлена дополнительная пластина из алюминия толщиной 0,06 мм, не перекрывающая дефект. Край этой пластины был расположен на расстоянии около 0,8 мм от оси дефекта. Такие параметры образца выбраны для того, чтобы определить возможности данного метода при контроле перекрывающих друг друга сигналов полей дефектов и неоднородностей объекта. При этом выбран один из наиболее трудных вариантов, при котором сигнал поля дефекта и сигнал края дополнительной пластины сравнимы по величине.

На рис. 8 изображена зависимость $U(t)$ 1 с сигналом дефекта и сигналом края дополнительной пластины. Здесь же показана зависимость 2 с сигналом края дополнительной пластины и не содержащая сигнал дефекта. Зависимость 2 является эталонной зависимостью. На рис. 8 также показаны сигналы краев МН 3 и 4, пики сигналов дефекта 5 и 6 и пик сигнала края дополнительной пластины из алюминия 7.

На рис. 9 показана зависимость 1, являющаяся разностью зависимостей $U(t)$ 1 и 2, представленных на рис. 8. Здесь же изображен фон 2, создаваемый сетевыми, приборными, эфирными и другими помехами, а также пики выделенного дефекта 3 и 4 и участки $U(t)$ с усредненными

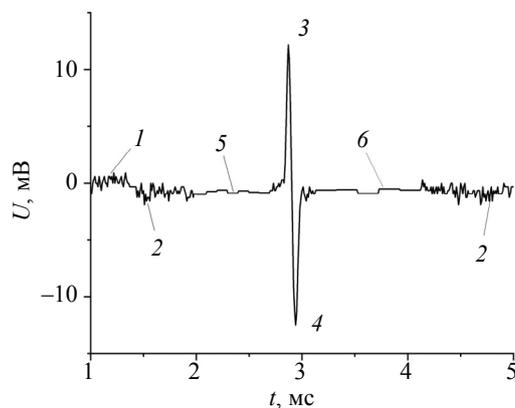


Рис. 9. Разностная зависимость $U(t)$:
 1, 2 — фон помех; 3 и 4 — пики дефекта; 5 и 6 — участки $U(t)$ с усредненными значениями сигнала.

значениями сигнала 5 и 6 соответственно по 10 и 20 точкам зависимостей. Этот фон зависит также от класса обработки поверхности объекта, параметров царапин, шероховатостей и других поверхностных микроскопических неоднородностей материала объекта.

Перечисленные факторы создают частотный спектр фона помех и наводок. В данном случае диапазон этого спектра начинается со времени дискретизации измерений цифрового осциллографа 10 мкс и заканчивается согласно параметрам зависимости 1 на рис. 9 величиной порядка 200 мкс.

Выделить более точно временные координаты дефекта и края дополнительной пластины, а также наложение сигналов дефекта и края дополнительной пластины можно с использованием графиков на рис. 10 и рис. 11.

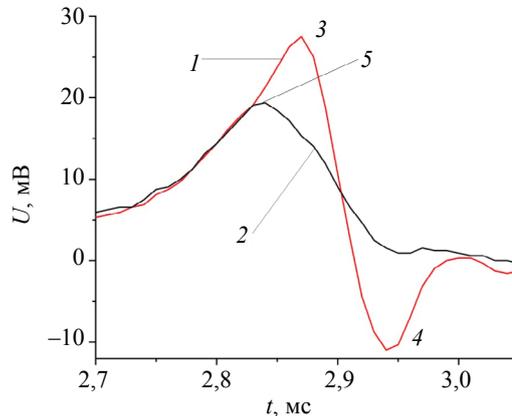


Рис. 10. Прямые зависимости $U(t)$:

1 — с сигналом дефекта; 2 — без сигнала дефекта; 3 и 4 — пики сигналов дефекта; 5 — пик сигнала края дополнительной пластины.

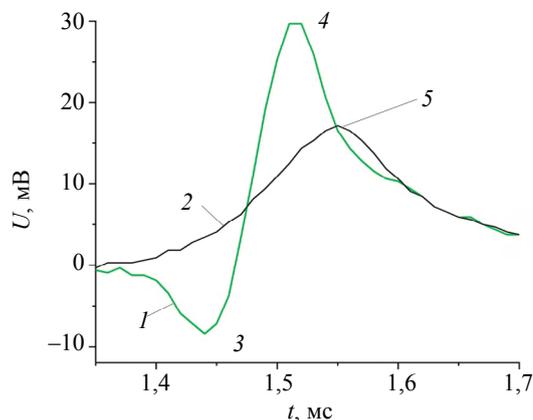


Рис. 11. Обратные зависимости $U(t)$:

1 — с сигналом дефекта; 2 — без сигнала дефекта; 3 и 4 — пики сигналов дефекта; 5 — пик сигнала края дополнительной пластины.

Здесь прямые зависимости получены при сканировании МН магнитной головкой в направлении от края дополнительной пластины к дефекту (как на рис. 8), а обратные — в противоположном направлении. Из рис. 9 находим временные координаты дефекта и отрезок времени между максимумом 3 и минимумом 4, равный 70 мкс, что соответствует диаметру дефекта около 0,08 мм. Отсюда следует, что временные параметры дефекта находятся внутри найденного частотного спектра фона.

Таким образом, выявлен и исследован фон сигнала, обусловленный неоднородностью магнитного поля локального источника, фоны протяженных и локальных дефектов и структурных неоднородностей МН и объекта, эфирный электромагнитный фон. Так, фон сигнала дефекта МН оказывает двойное влияние на полезный сигнал. Во-первых, не осуществляется в полной мере запись поля и воспроизведение сигнала объекта на дефектном участке МН. Во-вторых, происходит

искажение сигнала объекта: резкий спад уровня сигнала на переднем крае дефектного участка и скачек с обратным выбросом на задней границе дефектного и бездефектного участков МН.

В случайные искажения фона сигнала вносят вклад погрешности считывания информации магнитной головкой. Изображенный на рис. 9 фон 2, создаваемый сетевыми, приборными, эфирными и другими помехами, содержит также сигналы помех, создаваемых нарушениями контакта МГ и МН, локальным физическим износом МН, искажениями, вносимыми контактным коллекторным съемом напряжения с вращающейся МГ или локальными нелинейными искажениями сигнала при трансформаторном съеме. Ввиду того, что этот фон зависит также от класса обработки поверхности объекта, царапин, шероховатостей и других поверхностных микроскопических неоднородностей материала объекта, его следует сравнивать с оптическим изображением поверхности объекта, содержащим в объемном виде всю геометрию поверхности.

Анализ графиков, изображенных на рис. 1—7, позволил выявить и исследовать резонансные фоны самовозбуждения измерительной системы на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей.

Выявлены и исследованы многопараметровые фоны при наложении сигналов разного происхождения (краев МН, неоднородностей МН, локальных дефектов и неоднородностей объекта, приборный и сетевой фон электрических наводок и помех, эфирный электромагнитный фон). В качестве примера представлено наложение и выделение сигналов локального дефекта сплошности и неоднородности объекта в виде его утолщения (см. рис. 8—11).

Установлены закономерности изменения параметров переднего и заднего фронтов сигналов фона разного рода. Временные (пространственные) зависимости сигнала края МН, края дефекта и вызванные другими причинами представлены в цифровом табличном виде и могут быть описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида. Найден частотный спектр фона помех используемой измерительной системы. Диапазон этого спектра составляет 10 — 200 мкс. При этом линейная скорость движения МГ относительно МН равна 11 м/с. Установка с такими параметрами позволяет выявлять поверхностные дефекты, например, царапины, шириной от 0,005 мм.

При контроле свойств объектов должен быть учтен также фон сигнала, создаваемый формой поверхности объекта, в том числе, валиком сварного шва объектов, изготовленных как из ферромагнитных, так и диамагнитных и парамагнитных металлов.

Найдена резонансная частота используемой измерительной системы. Согласно зависимостям 1 и 2, на рис. 2 она составляет порядка 12 кГц. Величина пиков 3 на рис. 2 (на рисунке они ограничены масштабом изображения) более чем на 15 % превосходит величину пиков 4 на рис. 1, полученных на большем удалении рабочего диапазона измерительной системы от резонансной частоты. Для повышения чувствительности и точности контроля следует устанавливать параметры электрических элементов систем измерения на пороге возникновения в ней свободных колебаний. Проведенные исследования полученного дифференциального фона электрического сигнала позволяют совместно с разработанными авторами ранее методами гистерезисной интерференции в импульсных магнитных полях [5, 7, 15, 16] вести контроль свойств объектов в автоматическом режиме с программным управлением, что значительно повышает чувствительность и точность контроля.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ составляющих фона электрического сигнала, снимаемого с магнитной головки. Выявлены и исследованы следующие фоны $U(t)$: намагниченного магнитного носителя, его краев, локальных дефектов МН (локальных изломов, потертостей, мятых участков МН, поврежденный рабочий слой).

Выявлен и исследован фон сигнала, обусловленный неоднородностью магнитного поля локального источника, фоны протяженных и локальных дефектов и структурных неоднородностей объекта, эфирный электромагнитный фон.

Выявлены и исследованы резонансные фоны самовозбуждения измерительной системы на сигналах краев МН, дефектов МН, приборных и сетевых наводок и помех, дефектов объекта, эфирных электромагнитных полей.

Выявлены и исследованы многопараметровые фоны при наложении и выделении сигналов разного происхождения (краев МН, неоднородностей МН, локальных дефектов и неоднородностей объекта, приборный и сетевой фон электрических наводок и помех, эфирный электромагнитный фон).

Установлены закономерности изменения параметров переднего и заднего фронтов сигналов фона разного рода. Временные (пространственные) зависимости сигнала края МН, края дефекта и вызванные другими причинами представлены в цифровом табличном виде и могут быть описаны экспоненциальными, обратными квадратичными функциями и функциями близкого к ним вида.

Показано, что резонансные пики являются следствием самовозбуждения измерительной системы, включающей МГ. Эти пики возникают при приближении частоты локальных изменений $U(t)$ к частоте собственных колебаний этой измерительной системы. Путем корректировки активных и реактивных сопротивлений в контуре, содержащем МГ, получены свободные гармонические колебания на нисходящих ветвях пиковых участков $U(t)$ с разной амплитудой и коэффициентом затухания. При этом возникли также первые резонансные пики, являющиеся продолжением нисходящих ветвей пиков сигнала. Установлено, что резонансные пики возникают на задних фронтах любых сигналов достаточной величины, длительность заднего фронта которых составляет порядка четверти периода собственных колебаний измерительной системы.

Получены временные зависимости величины сигнала дефектов объекта и дефектов МН, снимаемого с МГ, на разных расстояниях МГ до магнитного носителя, учет которых позволяет повысить точность контроля.

При контроле свойств объектов должен быть учтен также фон сигнала, создаваемый формой поверхности объекта, в том числе, валиком сварного шва объектов, изготовленных как из ферромагнитных, так и диамагнитных и парамагнитных металлов.

Найден частотный спектр фона помех используемой измерительной системы. Диапазон этого спектра начинается со времени дискретизации измерений используемого цифрового осциллографа 10 мкс и заканчивается согласно параметрам представленных экспериментальных зависимостей величиной порядка 200 мкс. Указанный фон содержит также сигналы помех, создаваемых нарушением контакта МГ и МН, локальным физическим износом МН, искажениями, вносимыми контактным коллекторным съемом напряжения с вращающейся МГ или локальными нелинейными искажениями сигнала при трансформаторном съеме. Этот фон зависит также от класса обработки поверхности объекта, параметров царпин, шероховатостей и других поверхностных микроскопических неоднородностей материала объекта и его следует сравнивать с оптическим изображением поверхности объекта.

Установлено, что в промежутке между пиками, соответствующими краям участков МН, участок зависимости $U(t)$ является отрезком горизонтальной прямой, а с увеличением амплитуды сигнала угол его наклона к горизонту растет и на этом отрезке появляются минимумы и максимумы сигнала. С увеличением амплитуды воздействующего магнитного поля величина этих максимумов и минимумов растет и достигает величины пиковых значений сигнала от краев МН.

Найдена резонансная частота используемой измерительной системы. Для повышения чувствительности и точности контроля рекомендовано устанавливать такие параметры электрических элементов систем измерения, которые выводят измерительную систему в состояние, близкое к состоянию возбуждения в ней свободных колебаний.

Проведенные исследования полученного дифференциального фона электрического сигнала, снимаемого с индукционной магнитной головки, позволяют совместно с найденными авторами ранее амплитудными и частотными спектрами импульсных магнитных полей при осуществлении гистерезисной интерференции вести контроль свойств объектов в автоматическом режиме с программным управлением, что значительно повышает чувствительность и точность контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.С. Техника магнитографической дефектоскопии. Мн.: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
2. Михайлов С.П., Щербинин В.Е. Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
3. Жданов А.Г., Щукис Е.Г., Лунин В.П., Столяров А.А. Алгоритмы предварительной обработки вихрековых сигналов при контроле теплообменных труб парогенераторов АЭС // Дефектоскопия. 2018. № 4. С. 54—64.
4. Суханов Д.Я., Гончарик М.А. Определение формы электропроводящего объекта по дистанционным измерениям возмущений переменного магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 8/2. С. 41—43.
5. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Using magnetic hysteresis for testing electroconductive objects in pulsed magnetic fields // Russ. J. Nondetr. Test. 2013. V. 49. No. 6. P. 334—346.

6. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Выявление дефектов сплошности в образцах из алюминия магнитоимпульсным методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 4. С. 28—32.

7. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S., Pivovarov V.L. Computer-assisted methods for finding pulsed magnetic-field distributions near current-conducting objects // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 3. P. 166—174.

8. Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Анализ топографии магнитных полей рассеяния в ферромагнитных изделиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 2. С. 33—37.

9. Черепанов А.А., Кротов Л.Н., Кротова Е.Л. Математическое моделирование определения геометрических параметров внутренних дефектов различных форм методом магнитной дефектоскопии // Перспективы науки. 2013. № 12 (51). С. 60—63.

10. Крапивский Е.И., Абакумов А.А., Венков Ю.А. Экспериментальное исследование магнитного поля рассеяния от дефектов трубопровода // Газовая промышленность. 2015. № 2 (718). С. 64—66.

11. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Поле рассеяния пластины с поверхностным дефектом в однородном внешнем поле // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 22—29. [Dyakin V.V., Kudryashova O.V. Stray Field of Plate with a Surface Defect in a Homogeneous External Field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 12. P. 840—848.]

12. Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений // Дефектоскопия. 2009. № 3. С. 56—66.

13. Новиков В.А., Терешко А.М. Применение постоянных магнитов для магнитографической дефектоскопии изделий // Дефектоскопия. 1998. № 7. С. 67—71.

14. Новослугина А.П., Смородинский Я.Г. Расчетный способ оценки параметров дефектов в сталях // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 13—19.

15. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956.

16. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 907—914.

СРАВНЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ КОРРОЗИОННО-АГРЕССИВНОГО ГАЗА

© 2021 г. Р.К. Вагапов^{1,*}

¹ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Россия 142717 Московская обл., г. Видное,
п. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, влад. 15, стр. 1
*E-mail: R_Vagapov@vniigaz.gazprom.ru

Поступила в редакцию 11.05.2021; после доработки 07.07.2021
Принята к публикации 09.07.2021

Многие газовые и газоконденсатные месторождения (Бованенковское, Уренгойское, Киринское и др.) отличаются присутствием в добываемой продукции коррозионно-агрессивного диоксида углерода, который при наличии влаги приводит к образованию локальных коррозионных повреждений (питтингов, язв и их скоплений). Одним из способов контроля коррозионного состояния трубопроводов является внутритрубная диагностика (ВТД), проводимая методом рассеяния магнитного потока. Особенно актуальна ВТД для трубопроводов подземного и подводного расположения, когда использование других методов коррозионного мониторинга ограничено или затратно. В условиях добычи газа, в отличие от нефти, коррозия может иметь место, как по нижней образующей трубы (6-часовая коррозия), так и при конденсации влаги на верхней образующей трубы (12-часовая коррозия). Важным процессом являются правильное планирование ВТД, последующие обработка и интерпретация полученного массива данных, которые должны осуществляться с учетом особенностей развития углекислотной коррозии в газопроводе и в сравнительном анализе с другими данными коррозионного контроля. При интерпретации данных ВТД следует учитывать механизмы развития коррозии, эксплуатационные условия (рельеф трассы и др.) и данные коррозионного мониторинга, получаемые другими методами исследований (имитационные испытания, результаты, полученные на других смежных участках трубопроводов, и др.). Корректная и полезная информация по данным ВТД позволит обеспечить надежную защиту газопроводов и планирование мер защиты от внутренней коррозии.

Ключевые слова: внутритрубная диагностика, коррозионный мониторинг, углекислотная коррозия, скорость коррозии, локальная коррозия.

DOI: 10.31857/S0130308221080066

ВВЕДЕНИЕ

При освоении многих углеводородсодержащих месторождений возникают коррозионные повреждения, в том числе локального характера, в связи с присутствием в добываемой продукции агрессивных компонентов: диоксид углерода (CO_2) и/или сероводорода (H_2S). В последнее время развитие добычной базы в РФ преимущественно связано с перспективными газовыми и газоконденсатными месторождениями, в продукции которых присутствует коррозионно-активный CO_2 (Бованенковское, Уренгойское, Киринское и другие месторождения) [1—4].

Особую опасность внутренней углекислотной коррозии (УКК) придает ее локальный характер развития на поверхности стального оборудования и элементов трубопроводной системы [5, 6]. При эксплуатации промышленного оборудования и трубопроводов контроль их технического состояния является одной из приоритетных задач в процессе эксплуатации объектов добычи углеводородного сырья [7, 8]. Оценка и анализ коррозионной ситуации, а также организация мер противокоррозионной защиты (ингибиторов коррозии и др.), будут основными элементами в системе обеспечения безопасной эксплуатации нефтегазовых месторождений [9, 10]. В таких условиях налаживание и успешное функционирование системы контроля за техническим состоянием играют важную роль при оценке степени агрессивности внутренних сред по отношению к стальному оборудованию и трубопроводам [11].

Применительно к условиям газопровода, в отличие от нефтепровода, коррозия может возникнуть [12]:

в нижней части трубы при скоплении влаги (6-часовая коррозия или bottom-of-line corrosion, BOL-коррозия);

в верхней части трубы при конденсации влаги (12-часовая коррозия или top-of-line corrosion, TOL-коррозия);

в местах скопления влаги (щели, зазоры, застойные зоны, перепад высот и др.).

При выходе из пласта на поверхность нагретого газа с его остыванием создаются термобарические условия для конденсации водной фазы на наземных участках обвязки скважин. В таких

условиях риску УКК подвергаются как первоначальные трубопроводные участки обвязки скважин, где создаются условия конденсации (коррозия на 12 ч), так и последующие за ним трубопроводы-шлейфы, когда происходит транспорт жидкого потока влаги (коррозия на 6 ч). Важность и возможность использования коррозионного мониторинга на обвязках скважин, где имеет место ТОЛ-коррозия, были рассмотрены ранее [13]. По трубопроводу транспортируются газ и жидкостный поток (по нижней составляющей трубы).

Для контроля коррозионного состояния объектов используются различные методы коррозионного мониторинга, включающие использование датчиков коррозии (гравиметрических и др.), имитационные испытания, проведение анализов среды. Внутритрубная диагностика (ВТД) и диагностические способы обследования (измерение толщины, обнаружение утонения и дефектов труб и оборудования методом ультразвуковой толщинометрии (УЗТ) или радиографическим контролем) также относятся к методам коррозионного контроля [13]. Анализ и обработку результатов ВТД следует проводить с учетом данных, получаемых другими методами коррозионного мониторинга, что позволит повысить эффективность интерпретации данных.

Одним из основных способов контроля коррозионного состояния трубопроводов-шлейфов является ВТД. Наибольшее применение для ВТД коррозионных повреждений на газопроводах получил метод рассеяния магнитного потока (MFL, Magnetic Flux Leakage, далее — магнитный метод). Этим методом диагностируются как общее утонение стенки трубы, так и локальные дефекты [14—16].

Подземное (и особенно подводное) расположение трубопроводов-шлейфов сильно ограничивает применение других методов коррозионного мониторинга (наружной ультразвуковой толщинометрии, интрузивных датчиков, визуальный осмотр и др.). Для трубопроводов подземного расположения от точности результатов ВТД зависит правильность выбора наиболее опасных с точки зрения утонения мест для последующего шурфования (с проведением УЗТ), которое является затратной процедурой как по времени, так и финансово. Во многих случаях ВТД остается одним из основных источников информации для данных трубопроводов-шлейфов при обеспечении безопасности всей трубопроводной системы. Поэтому важным является методический подход к обработке и интерпретации данных по толщине стенки трубы, получаемых методом ВТД, с учетом коррозионных особенностей эксплуатации трубопроводов-шлейфов в условиях УКК и последующим сравнительным анализом с данными коррозионного мониторинга за внутренней коррозией.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При УКК наблюдается развитие локальных дефектов (питтингов и язв) на поверхности трубопроводов, примеры которых приведены на рис. 1. Как видно, длина или диаметр коррозионных поражений достигает до 3 см, глубина — до 2—3 см.

В ходе эксплуатации современных газовых и газоконденсатных месторождений, в продукции которых присутствует коррозионно-активный CO_2 , фиксируются коррозионные дефекты:

на Бованенковском месторождении скорость развития локальной коррозии составляет 0,25—2,8 мм/год и находится в зависимости от содержания CO_2 [1];

на Юбилейном месторождении глубина коррозионных повреждений достигла 0,8—3,7 мм, что соответствует локальной скорости коррозии 0,26—1,23 мм/год [4].

По результатам измерения остаточной толщины стенки трубы и оборудования определяется возможность их дальнейшей работы и выдаются рекомендации по продлению безопасного срока эксплуатации в рамках экспертизы промышленной безопасности [17].

По результатам ВТД получают тысячи замеров толщины стенки трубы по всей длине трубопроводной системы. При эксплуатации трубопровода основными значениями по данным ВТД являются остаточная толщина стенки трубы, наличие, размеры и глубина коррозионных дефектов. Все это влияет на конструкционную прочность, а следовательно, и на допустимое рабочее давление в обследуемом газопроводе. Такая оценка свидетельствует о текущем состоянии объекта и наиболее глубоких локальных дефектах, которые угрожают безопасной работе всего месторождения. Участки с такими глубокими повреждениями могут быть вырезаны и заменены. Но остаются другие достаточно глубокие повреждения, которые требуют пристального внимания. С другой стороны, с точки зрения развития внутреннего коррозионного процесса наибольшее значение имеют общие коррозионные потери толщины стенки трубы, рассчитанные за соответствующий период, т.е. скорость коррозии в мм/год. В данном случае речь идет об имеющихся коррозионных повреждениях с наибольшей скоростью коррозии, которые пока позволяют



Рис. 1. Вид локальных дефектов разной формы на внутренней поверхности трубы после эксплуатации в условиях УКК.

эксплуатировать объект, но требуют особого внимания с точки зрения развития коррозионного процесса. Фактором протекания коррозии являются значения, когда скорость коррозии выше «опасного» уровня в 0,1 мм/год. Данная величина является основным параметром, характеризующим особенности протекания коррозии, и принимается для расчета коррозионного допуска при проектировании трубопроводов [5, 6].

По данным ВТД может быть оценено распределение количества коррозионных повреждений со скоростью проникновения коррозионного процесса более 0,1 мм/год по длине трубопровода (рис. 2). С течением по трубопроводу газа и выпавшей жидкости (по нижней составляющей трубы) происходит расход коррозионных компонентов и изменение эксплуатационных характеристик, например, снижение температуры.

Все это может влиять как на снижение коррозионной активности транспортируемой среды по длине трубопровода, так и на степень образования локальных дефектов. Дополнительным фактором может быть выпадение по длине трубы жидкости и скоплению ее на пониженных участках трубы.

В отчете по ВТД были приведены коррозионные потери металла, превышающие 5 % от толщины стенки трубопровода. Для трубы с толщиной стенки 11 мм это будет соответствовать потерям от 0,55 мм и более. Если пересчитать потери на период эксплуатации до проведения ВТД, который нередко проводится не чаще 1 раза в 5 лет, то получится, что минимально определенная при ВТД скорость коррозии составляет 0,11 мм/год. Для более глубоких коррозионных повреждений при ВТД шаг измерений глубины дефекта составлял около 1 % от толщины стенки трубы, что соответствовало изменению стенки трубы на 0,11 мм (для 11 мм трубы) и скорости

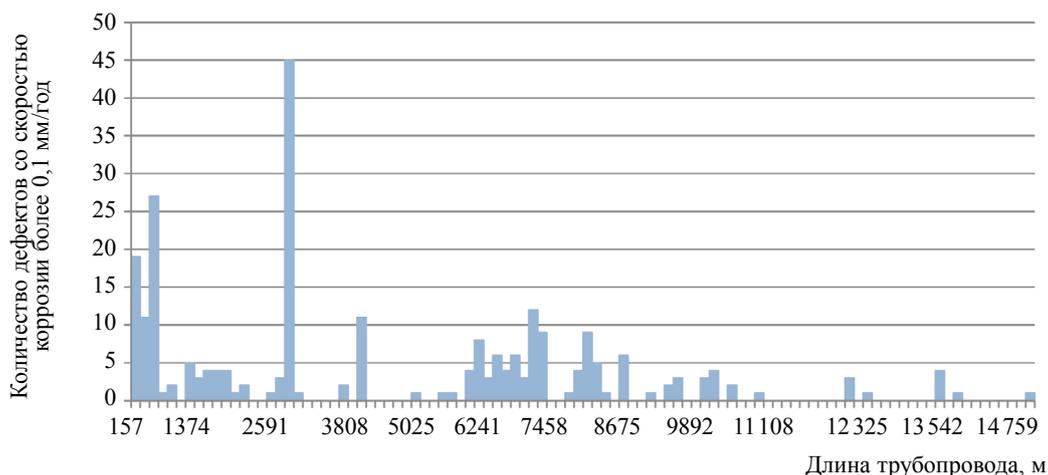


Рис. 2. Распределение количества локальных наиболее глубоких коррозионных повреждений со скоростью проникновения коррозионного процесса более 0,1 мм/год по длине трубопровода.

коррозии $\approx 0,022$ мм/г. Конечно, для обсуждаемых данных по ВТД возможен пропуск коррозионных дефектов с малыми размерами, например, для точечных питтинговых поражений. С учетом разрешающей способности оборудования ВТД возможно ошибочное определение локального дефекта. Для подтверждения глубоких питтингов, обнаруженных ВТД, может использоваться УЗТ для наружного замера выявленных при ВТД дефектов при шурфовании. Как видно из таблицы, глубина основных повреждений составляет 16—29 % от исходной толщины стенки трубы. Судя по длине и ширине дефектов, по форме они представляют собой округлые или продолговатые коррозионные образования, схожие с представленными на рис. 1. Сравнение замеров толщины стенки трубы показывают, что на части дефектов может наблюдаться разница до 50 % между измерениями двумя разными методами (ВТД и УЗТ). По результатам УЗТ измеренное значение толщины стенки оказывается, преимущественно, несколько меньше, чем по данным ВТД.

По данным авторов [18], при эксплуатации трубопровода была получена более низкая скорость потока жидкости, объем которой в процессе эксплуатации оказался ниже, чем было предусмотрено диаметром трубы. Скопление водной фазы на нижней части трубы привело к развитию коррозии. При ВТД были обнаружены 1600 внутренних дефектов, преимущественно, по нижней составляющей трубы (ВОЛ-коррозия), со средней скоростью коррозии 0,8—1,7 мм/год. На участках, где коррозия развивалась менее интенсивно, средняя скорость коррозии составляла 0,3—0,8 мм/год. Проведенные в последующие периоды времени замеры УЗТ с наружной поверхности трубопровода подтвердили наиболее глубокие локальные дефекты, выявленные ВТД. По данным установленных гравиметрических образцов в эксплуатационной среде были получены близкие значения скорости коррозии 0,76—0,96 мм/год.

Для оценки возможности роста имеющихся локальных дефектов могут быть использованы имитационные испытания, которые позволяют оценить потенциальную коррозионную агрессивность воздействия условий эксплуатации на сталь трубы, в том числе и с учетом изменения факторов коррозии (парциальное давление CO_2 , минерального состава водной фазы, температуры и др.) как со временем, так и по длине трубопровода [13].

По результатам анализа коррозионных дефектов на вырезанных участках могут быть отобраны образцы образовавшихся продуктов коррозии для проведения их анализа. Продукты коррозии могут быть получены и проанализированы как после эксплуатации (с поверхности вырезанных участков трубы), так и после имитационных автоклавных испытаний. Рентгеноструктурный анализ позволяет определить морфологию продуктов коррозии [19]. Это важно для изучения локальных дефектов, т.к. продукты коррозии могут быть как кристаллические, так и аморфные. Кристаллические соединения, например, карбонат железа (сидерит), образующийся в присутствии CO_2 , будучи более плотноупакованными, обладают большим защитным (изолирующим) эффектом. В присутствии аморфных соединений образует пористая пленка, которая не будет препятствовать проникновению агрессивных компонентов к стальной поверхности. От адгезионной прочности образующихся пленок неорганических

**Сводные данные по наиболее глубоким зафиксированным ВТД поражениям
и сравнительным замерам УЗТ-методом**

Расположение по длине трубы, м	Ориентация в трубе, час : мин	ВТД					УЗТ		Разница толщин между замерами ВТД и УЗТ, мм
		Исходная толщина стенки, мм	Длина дефекта, мм	Ширина дефекта, мм	Максимальная глубина дефекта, % от исходной толщины стенки	Толщина стенки, мм	Толщина стенки, мм		
145,611	5:57	11	36	27	19	8,91	7,5	1,41	
152,368	5:58	11	23	22	18	9,02	8,2	0,82	
169,920	5:56	11	23	27	19	8,91	7,2	1,71	
172,552	5:54	11	45	26	18	9,02	9,0	0,02	
376,154	6:05	11	26	23	23	10,01	9,4	0,61	
391,337	6:05	11	25	26	19	8,91	9,2	-0,29	
396,179	6:01	11	43	33	19	8,91	7,3	1,61	
411,966	7:40	11	43	91	22	10,14	9,5	0,64	
1244,964	5:57	11	19	24	18	9,02	8,1	0,92	
1324,322	5:56	11	15	25	18	9,02	7,7	1,32	
1586,581	6:01	11	17	27	20	8,8	7,6	1,20	
1735,580	5:57	11	18	25	19	8,91	8,2	0,71	
2461,721	5:54	11	20	27	19	8,91	8,1	0,81	
2633,728	5:33	11	58	72	18	9,02	8,6	0,42	
2633,818	5:40	11	17	27	21	8,69	7,8	0,89	
2639,686	6:55	11	21	27	20	10,4	12,5	-2,10	
2640,116	4:43	11	65	60	23	8,47	7,4	1,07	
2641,626	4:29	11	31	34	23	8,47	6,2	2,27	
2667,745	5:33	11	16	25	20	8,8	9,4	-0,60	
2707,050	8:47	11	48	57	19	8,91	8,7	0,21	
2709,981	5:39	11	20	26	19	8,91	8,1	0,81	
2728,509	5:39	11	37	54	18	9,02	8,0	1,02	
2733,018	5:48	11	28	29	20	8,8	9,9	-1,10	
2734,919	5:47	11	48	26	18	9,02	8,4	0,62	
2737,493	5:50	11	24	25	19	8,91	8	0,91	
2742,569	5:25	11	25	23	19	8,91	8,5	0,41	
3837,156	5:53	11	19	24	19	8,91	11,2	-2,29	
3892,895	6:01	11	19	25	20	8,8	7,2	1,60	
3910,697	5:19	11	18	26	25	8,25	10,7	-2,45	
4866,404	5:56	11	22	25	25	8,25	11,1	-2,85	
5255,859	5:59	11	35	29	18	9,02	8,6	0,42	
5714,854	5:56	11	27	28	29	7,81	6,3	1,51	
5755,056	5:53	11	41	31	27	8,03	8,7	-0,67	
5787,564	5:57	11	32	30	18	9,02	8,4	0,62	
5916,630	5:56	11	42	29	20	8,8	9,1	-0,30	
5918,214	5:53	11	28	21	20	8,8	8,2	0,60	
5947,514	5:55	11	20	25	18	9,02	8,7	0,32	
6162,057	5:52	11	45	36	18	9,02	7,7	1,32	
6353,005	6:07	11	17	26	19	8,91	8,5	0,41	

6354,245	6:00	11	31	24	20	8,8	8,8	0,00
6470,143	6:00	11	23	29	20	8,8	7,8	1,00
6759,816	6:02	11	19	25	19	8,91	8,9	0,01
6821,120	6:03	11	22	22	18	9,02	9,7	-0,68
6882,698	5:57	11	59	35	19	8,91	8,7	0,21
6908,868	5:58	11	42	45	23	8,47	4,3	4,17
7548,171	5:53	11	43	49	19	8,91	8,3	0,61
7569,443	5:56	11	31	37	20	8,8	9,7	-0,90
7641,376	5:57	11	17	24	18	9,02	8,5	0,52
7669,728	5:58	11	18	25	19	8,91	8,4	0,51
7794,577	5:58	11	15	24	21	8,69	9,4	-0,71
9265,958	5:57	11	26	31	25	8,25	6,9	1,35
9833,646	6:02	11	23	28	19	8,91	9,8	-0,89

соединений зависит повышенная или пониженная возможность образования локальных дефектов в местах удаления пленок продуктов коррозии.

Анализ получаемых при ВТД данных может показать распределение количества коррозионных повреждений в поперечном сечении трубы. Такая обработка данных может быть проведена на различных участках трубы, что позволяет оценить тип коррозии (BOL или TOL). На рис. 3 приведены данные по распределению количества коррозионных повреждений в поперечном

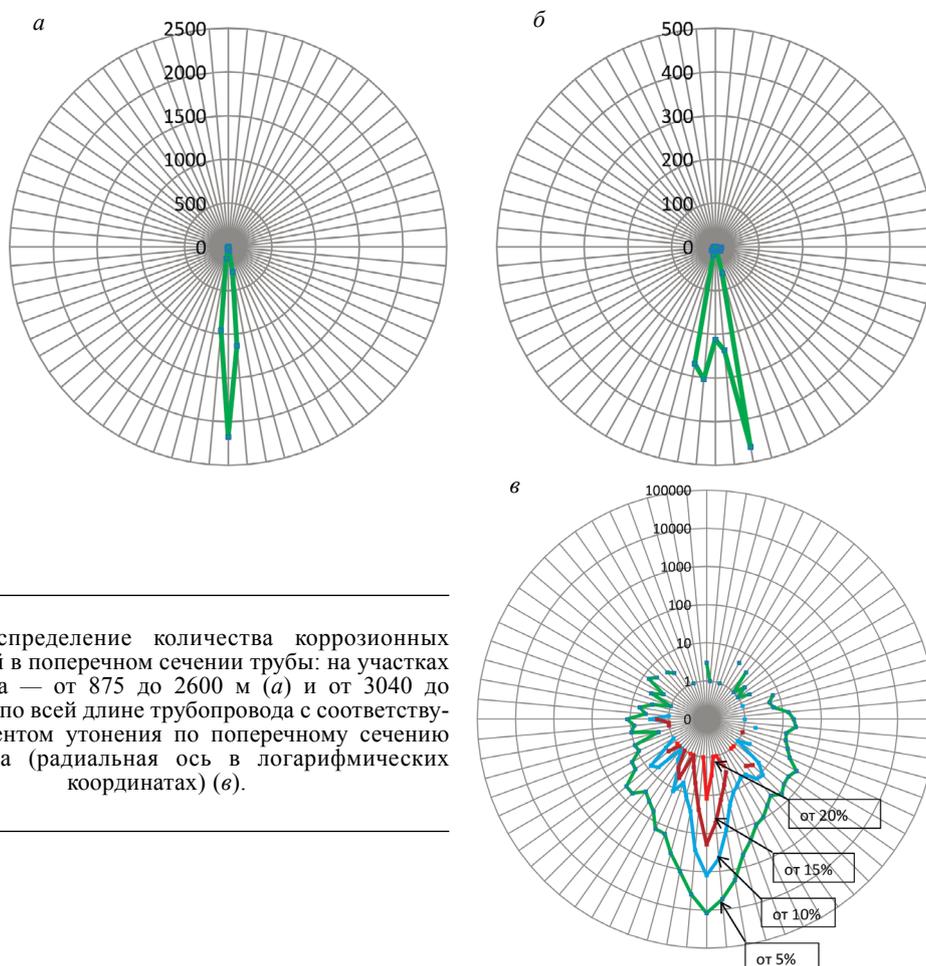


Рис. 3. Распределение количества коррозионных повреждений в поперечном сечении трубы: на участках трубопровода — от 875 до 2600 м (*a*) и от 3040 до 38080 м (*б*); по всей длине трубопровода с соответствующим процентом утонения по поперечному сечению трубопровода (радиальная ось в логарифмических координатах) (*в*).

сечении трубы как на различных участках трубопровода, так и сводные данные в целом по всей длине трубопровода с соответствующим процентом утонения по поперечному сечению трубопровода. Как видно на рис. 3а и б, преобладающей является 6-часовая коррозия, по нижней составляющей трубы. Сведение данных по всей длине трубопровода дает возможность оценить динамику образования и плотность расположения и нахождения большинства наиболее опасных коррозионных аномалий (рис. 3в): количество точек с утонением более 20 % не превышает 12 значений, а от 15 до 20 % — 191 замер по данным ВТД по всей трубе.

Важную роль играет необходимость более прецизионного измерения локальных дефектов и последующий анализ в наиболее вероятных коррозионных местах зарождения и образования коррозионных дефектов. С учетом того, что основным интенсификатором коррозионного процесса является влага, места скопления водной фазы по длине трубы являются наиболее опасными. Рельеф прокладки трубопровода не всегда является прямолинейным, что может способствовать накоплению жидкой фазы. Долговременный контакт стальной поверхности с водной фазой и ее движение по трубе предоставляет постоянный доступ коррозионных компонентов и отвод образующихся продуктов коррозии.

Результат проведенного анализа распределения коррозионных повреждений по всей длине трубопровода и по радиальному распределению с наложением данных по профилю трубопровода на местности представлен на рис. 4. На них графики высоты трубопровода на местности наложены на распределение коррозионных повреждений в развертке, где по оси X представлено расстояние

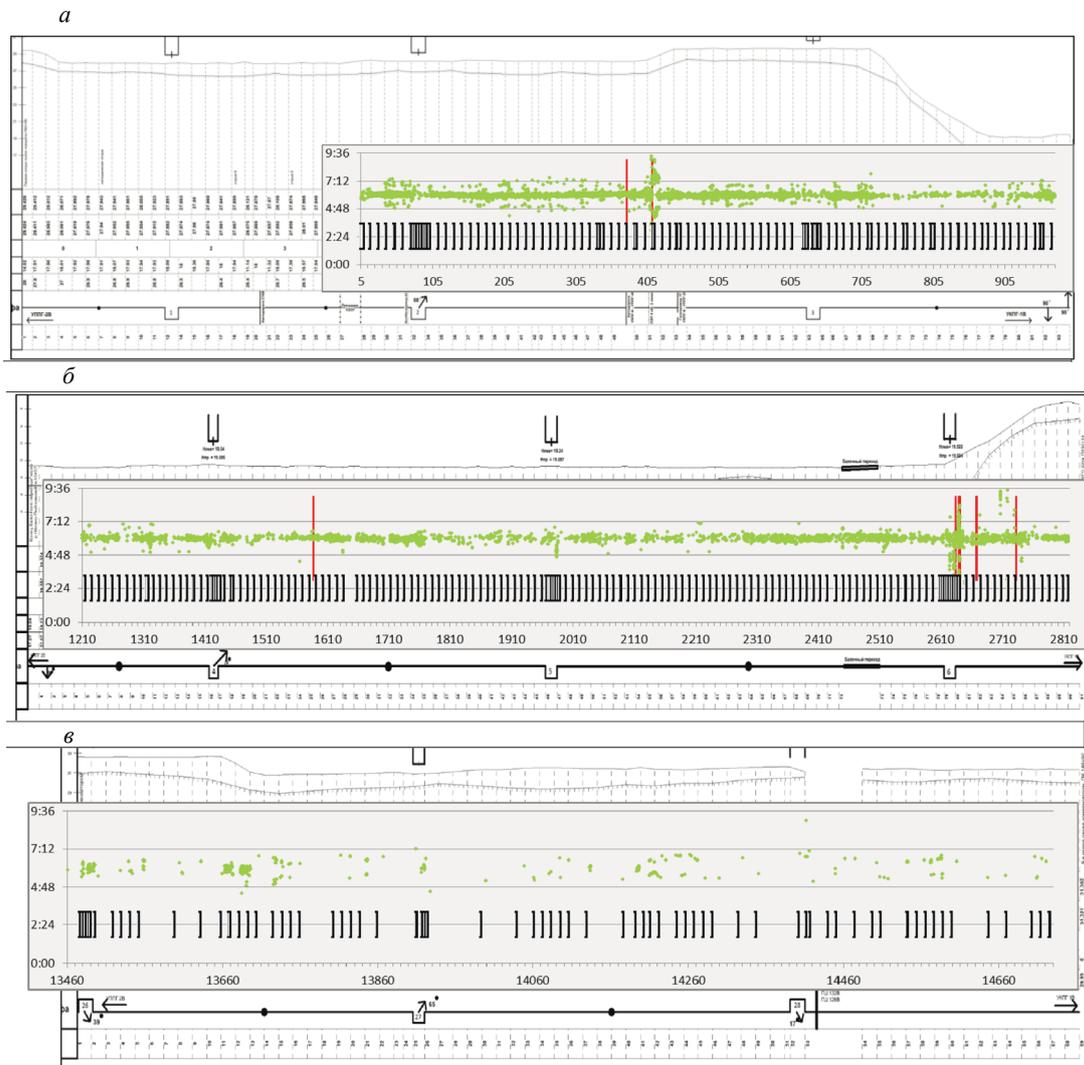


Рис. 4. Распределение коррозионных повреждений по длине трубопровода и в радиальном направлении (на сером поле вертикальные линии — это места расположения наиболее опасных аномалий по ВТД, скобки на 2:24 показывают положение сварных швов), наложенные на график профиля трубопровода на местности.

(в метрах) по длине трубопровода, по оси Y — распределение в перпендикулярном направлении трубопровода («по часам»). Дополнительно на графике распределения коррозионных повреждений вертикальными линиями отмечены места расположения наиболее опасных аномалий по данным ВТД. Подавляющее большинство наиболее опасных аномалий (от 20 % утонение и выше) находятся в местах подъемов трубопровода на местности и на «6 часов» (см. рис. 4б) или могут быть ассоциированы с этими местами.

Это может объясняться образованием скоплений агрессивных жидких фаз и быть вызвано локальными условиями равновесия в местах увеличения высоты трубопровода на местности, когда движущая сила потока газа, переносящая жидкие фазы вдоль трубопровода, уравновешивается стеканием/удержанием жидких фаз под действием гравитации. Нередко, по причине динамического типа этого равновесия таких скоплений немного, и они могут не иметь постоянного места расположения, так как переносятся вдоль участка подъема трубопровода с волнообразным характером движения жидких фаз. Возможный волнообразный режим течения на подъемах трубопровода также является причиной того, что повышенная агрессивность, наблюдаемая для этих участков, может распространяться на некоторое расстояние до подъема.

При этом коррозионные повреждения локализуются не в самой жидкой фазе, а по краю поверхности жидкости, где «обычная» коррозионная агрессивность среды дополнительно осложняется краевым углом смачивания при колебаниях уровня жидкой фазы. Это видно на рис. 4а, где наиболее глубокие повреждения наблюдаются по краям движения потока жидкости.

На начальном участке коррозионные дефекты могут быть ассоциированы с ТОЛ-коррозией, случаи которой были рассмотрены ранее [13]. Как видно на рис. 4а, локальные дефекты располагаются в достаточно широком промежутке от 3 до 6 ч. Это может быть связано как с конденсацией, так и со стеканием конденсационной жидкости.

Для повышения точности привязки коррозионных данных к геометрии трубопровода на рис. 4 обозначены места расположения сварных швов (скобки, смещенные вниз от максимальной плотности коррозионных повреждений). Это актуально, поскольку локальным местом удержания влаги является также выпуклость сварного шва. С учетом повышенной гетерогенности околосшовной зоны и самого сварного шва скопление на них влаги превращает их в еще одно потенциально опасное место для развития локальной УКК. Глубокие коррозионные дефекты на рис. 4а могут быть связаны не только с ТОЛ-коррозией, но и с местами расположения сварных швов. Наиболее наглядно связь между образованием локальных дефектов, обнаруженных при ВТД, и участком трубопровода показана на рис. 4в.

Опыт эксплуатации российских и зарубежных газовых месторождений с УКК подтверждает высказанные подходы к анализу данных ВТД.

На одном из зарубежных объектов, с эксплуатационными условиями оптимальными для развития УКК (2,3 % CO_2 , давление 11 МПа, температура 34—68 °С, минерализация водной среды 18 г/л), отмечается [20], что через 2—3 года эксплуатации по данным ВТД было выявлено 680 локальных дефекта (2 наибольших питтинга до 4,5 и 8,0 мм глубиной; между 3 и 6 ч) на трубе толщиной 11,4 мм. Рельеф трубопровода включает участки с углублениями и подъемами. Наибольшее скопление и наиболее глубокие питтинги были обнаружены в пониженных местах, где создаются условия для скопления влаги.

Авторы [21] сообщают о результатах проведения магнитным дефектоскопом ВТД на газопроводах-шлейфах Уренгойского НГКМ (1,8 % CO_2 , давление 12 МПа, температура 20—30 °С, минерализация водной среды 2—3 г/л). По данным обследований, наибольшая плотность распределения потерь металла на газопроводе наблюдалась по нижней его части. Условия эксплуатации трубопроводов с небольшой скоростью потока приводят к выделению водного электролита путем его конденсации и выпадения с последующим выделением в отдельную фазу в нижней части трубы газопровода-шлейфа. ВТД показала, что, преимущественно, повреждения наблюдались в конце участков газопровода с небольшими уклонами перед резким подъемом трубы с большим уклоном, где создаются условия для скопления водной фазы. Дополнительным, усугубляющим коррозию, фактором может стать динамическое состояние (перемешивание/ барботирование) накопившейся влаги в условиях потока газа.

ВЫВОДЫ

Эксплуатации в условиях присутствия CO_2 приводит к образованию опасных локальных дефектов в газопроводе. Применение вместе с ВТД других прямых методов коррозионного мониторинга помогает более правильному планированию процедуры ВТД, выбору мест прецизионного

контроля, интерпретации получаемых данных. Получаемые при ВТД данные представляют собой большой массив информации, который требует оптимизации методических подходов при обработке и оценке данных по толщине стенки трубы. На протекание УКК и образование дефектов влияют особенности эксплуатации, факторы коррозии и другие параметры, которые следует учитывать при анализе данных ВТД. Дополнительную информацию можно получать по данным косвенных методов, например, по анализу получаемых продуктов коррозии, гравиметрическому измерению скорости коррозии и др. С помощью данных комплекса диагностических обследований принимается решение о возможности безопасной эксплуатации объекта, необходимости ремонта или реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слугин П.П., Полянский А.В. Оптимальный метод борьбы с углекислотной коррозией трубопроводов на Бованенковском НГКМ // Наука и техника в газовой промышленности. 2018. Т. 74. № 2. С. 104—109.
2. Петренко В.Е., Нуриев М.Ф., Шевелев М.Б., Семенов Ю.В., Шологин Р.А., Мотовилов В.Ю. Опыт разработки месторождения на шельфе Российской Федерации, оборудованного подводно-добычным комплексом // Газовая промышленность. 2018. Т. 777. № 11. С. 8—13.
3. Корякин А.Ю., Дикамов Д.В., Колинченко И.В., Юсупов А.Д., Запезалов Д.Н., Вагапов Р.К. Опыт подбора ингибиторов коррозии для защиты от углекислотной коррозии объектов второго участка ачимовских отложений Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 6. С. 48—55. DOI: 10.30713/1999-6934-2018-6-48-55
4. Байдин И.И., Харитонов А.Н., Величкин А.В., Ильин А.В., Подольский Е.С. Влияние углекислоты в природном газе газоконденсатной залежи нижнемеловых отложений Юбилейного нефтегазоконденсатного месторождения на эксплуатацию УКПГ-НТС // Наука и техника в газовой промышленности. 2018. Т. 74. № 2. С. 23—35.
5. Кантюков Р.Р., Запезалов Д.Н., Вагапов Р.К. Оценка опасности внутренней углекислотной коррозии по отношению к промышленным оборудованию и трубопроводам на газовых и газоконденсатных месторождениях // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 2. С. 56—62. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-56-62
6. Запезалов Д.Н., Вагапов Р.К. Анализ нормативных требований при оценке углекислотной коррозии на объектах добычи газа // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 2. С. 60—71. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-2-60-71>
7. Велиюлин И.И., Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гиниятуллин Р.Р., Нургалеев А.Р. О коррозии трубопроводов // Наука и техника в газовой промышленности. 2015. № 1 (61). С. 45—50.
8. Вагапов Р.К. Коррозионное разрушение стального оборудования и трубопроводов на объектах газовых месторождений в присутствии агрессивных компонентов // Технология металлов. 2021. № 3. С. 47—54. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-3-47-54
9. Велиюлин И.И., Кантюков Р.А., Якупов Н.М., Тамеев И.М., Якупов С.Н., Кантюков Р.Р., Гиниятуллин Р.Р., Нургалеев А.Р. Модели коррозионного износа // Наука и техника в газовой промышленности. 2015. № 1 (61). С. 57—67.
10. Vagapov R.K., Zapevalov D.N. Corrosion Activity of Operating Conditions for the Steel Equipment and Pipelines in the Plants Extracting CO₂-Containing Gases // Metallurgist. 2021. V. 65. P. 50—61. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01132-x>
11. Кантюков Р.Р., Бутусов О.Б., Мешалкин В.П., Панарин В.М. Система поддержки принятия решений по управлению рисками опасных ситуаций в сложных системах газоснабжения // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 250—256. DOI: 10.15827/0236-235X.130.250-256.
12. Vagapov R.K., Ibatullin K.A., Zapevalov D.N. Corrosion Processes on Steel Under Conditions of Moisture Condensation and in the Presence of Carbon Dioxide // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. V. 56. № 7—8. P. 673—680. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00825-5>
13. Вагапов Р.К., Запезалов Д.Н. Практические аспекты использования диагностических методов совместно с другими данными контроля коррозии и имитационными испытаниями при эксплуатации объектов добычи газа в коррозионно-агрессивных условиях // Дефектоскопия. 2020. № 7. С. 61—76. DOI: 10.31857/S0130308220070076
14. Wei Liang, Peiwen Que, Guang Yang. Ultrasonic Flaw Detection in the NDE of Oil Pipeline Using Resonance Filter // Дефектоскопия. 2006. № 6. С. 67—73.
15. Лоскутов В.Е., Матвиенко А.Ф., Патраманский Б.В., Щербинин В.Е. Магнитный метод внутритрубной дефектоскопии газо- и нефтепроводов: прошлое и настоящее // Дефектоскопия. 2006. № 8. С. 3—19.
16. Yunwei Zhang, Guozheng Yan. Detection of Gas Pipe Wall Thickness Based on Electromagnetic Flux Leakage // Дефектоскопия. 2007. № 2. С. 78—89.

17. *Ерехинский Б.А.* Диагностическое обслуживание объектов добычи газа. Прогнозирование и продление ресурса. Оценка риска. Изд-во АО «Воронежская областная типография», 2020. 168 с.
18. *Abdul Wahab Al-Mithin, Shabbir Safri, Andreas Pfanger.* UT-ILI and Fitness-for-Purpose Analysis for Severely Internally Corroded Crude Oil Pipeline // Pipeline Technology Conference. 2013.
19. *Михалкина О.Г.* Применение метода рентгеновской дифракции для исследования зерна и техногенных продуктов // Вести газовой науки. 2016. № 4 (28). С. 96—107.
20. *Mansoori H., Mirzaee R., Esmailzadeh F., Vojoood A., Dowrani A.S.* Pitting corrosion failure analysis of a wet gas pipeline // Engineering Failure Analysis. 2017. V. 82. P. 16—25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.08.012>
21. *Корякин А.Ю., Дикамов Д.В., Неудахин А.Ю., Колинченко И.В., Лашков Е.В., Юсупов А.Д.* Разработка методики прогнозирования возможных мест локализации коррозионных дефектов газосборного коллектора по результатам внутритрубной диагностики схожих трубопроводов // Газовая промышленность. 2018. Т. 773. Спецвып. № 3. С. 30—35.

Правила отправки статей в журнал «Дефектоскопия»

Уважаемые авторы, напоминаем вам, что согласно требованиям издательства ООО «ИКЦ АКАДЕМКНИГА» и РАН, с 2020 года статьи в журнал «Дефектоскопия» принимаются и отправляются на рецензирование только через портал электронной редакционно-издательской системы (РИС). Для отправки статьи Вам необходимо зарегистрироваться как автору и загрузить Вашу статью в журнал через портал РИС по адресу: <https://publish.sciencejournals.ru/login?lang=ru>

Подробные инструкции по работе на портале будут доступны в Вашем личном кабинете. Для корректной работы рекомендуется использовать следующие браузеры: Google Chrome версии 60 и выше, Safari версия 11 и выше.

Редколлегия