

Измерение фактических размеров отражателей ультразвуком с применением TOFD метода, технологий ФР и SAFT обработки

Н.В. Мелешко, И.А. Богомолов¹

¹Национальный исследовательский университет (МЭИ)

Аннотация

Приведены результаты измерений фактических размеров отражателей (высоты засверловки) тремя типами ультразвуковых дефектоскопов – Harfang VEO, реализующим дифракционно-временной метод, A1550 IntroVisor с цифровой фокусировкой антенной решетки и Harfang X32, работающим с фазированными решетками.

Была экспериментально установлена минимально возможная измеряемая высота засверловки. Проведено сравнение различных методов, сделан вывод о погрешности и коэффициенте корреляции. Получено уравнение регрессии для каждого способа измерения, что позволяет оценить совместное влияние диаметра и высоты засверловки на относительную погрешность.

В результате проведенных экспериментов сделан вывод о возможности измерений ультразвуковым видом неразрушающего контроля фактических (не условных) размеров несплошностей, в т.ч. трещин в сварных соединениях, тремя методами - TOFD (погрешность не более 10%), SAFT (погрешность не более 15%) и по S-скану, полученному с помощью ФР (погрешность не более 20%).

Ключевые слова (Keys)

Неразрушающий контроль (НК) - Nondestructive testing (NDT);

Техника синтетической фокусировки апертуры - Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT);

Дифракционно-временной метод - Time of Flight Diffraction (TOFD);

Фазированные решетки (ФР) - Phased Arrays (PA);

Ультразвуковой контроль (УК) - ultrasonic testing (UT).

Результатом ультразвукового контроля дефектоскопами с пьезоэлектрическими преобразователями является амплитуда эхо-сигнала, которая сравнивается с амплитудой эхо-сигнала от контрольного отражателя – бокового цилиндрического отверстия (БЦО), плоского углового отражателя типа «зарубка», плоскодонного отверстия и других [1, 2, 3, 4]. В настоящее время отбраковка изделий осуществляется по амплитудному признаку и по условным размерам дефектов, которые также связаны с амплитудой эхо-сигнала.

Для проведения измерений использовались три современных дефектоскопа - Harfang VEO с преобразователями для дифракционно-временного метода (TOFD), Harfang X-32 с фазированной решеткой (ФР) и A1550 IntroVisor, реализующий технику синтетической фокусировки апертуры (SAFT метод).

Ультразвуковой дифракционно-временной метод (TOFD) основан на приеме волн, дифрагированных на вершинах дефекта. Могут излучаться и применяться как продольные, так и поперечные волны [5]. Главная информационная характеристика – время прихода сигнала. Время прохождения регистрируемых сигналов является мерой оценки высоты несплошности, тем самым позволяя измерить дефект. Амплитуда сигнала не используется для определения размера. Вид экрана показан на рисунке 1.

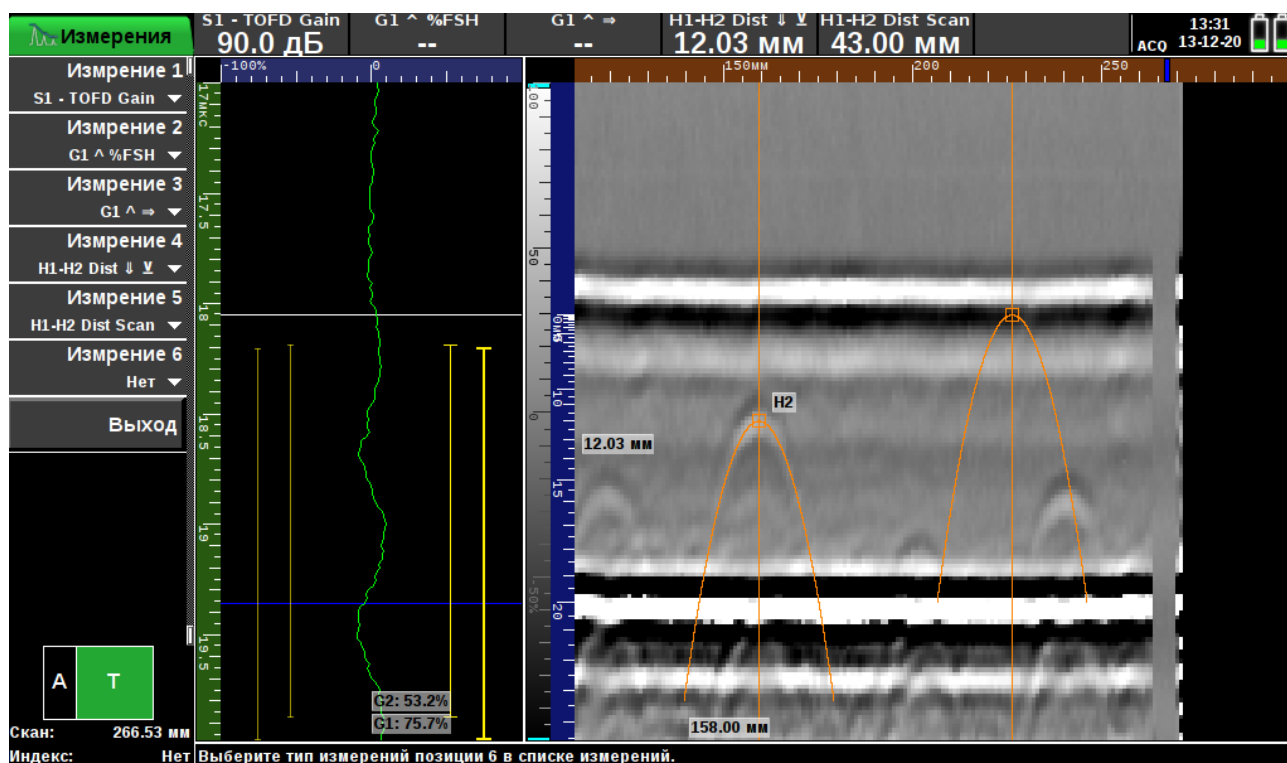


Рис. 1 Вид экрана при измерении методом TOFD (прибор Harfang VEO)

Наиболее существенные отличия от стандартного эхо-импульсного метода заключаются в следующем:

1. возможность достижения более высокой точности при проведении измерений, как правило, ± 1 мм, а при повторном обследовании $\pm 0,3$ мм;
2. независимость обнаружения дефекта от его углового положения;
3. измерение параметров дефекта основано на времени прохождения пути дифракционных сигналов и не зависит от амплитуды сигнала;
4. высокая производительность контроля, так как сканирование проводится вдоль одной линии с контролем всего объема шва;
5. документирование и хранение результатов контроля;
6. 100% воспроизводимость результатов контроля;
7. изменение величины эрозии металла внутренней поверхности;
8. альтернатива радиационному методу НК.

Метод ультразвуковой фазированной решетки (ФР) основан на преобразовании и генерировании ультразвуковых волн. Преобразователь (кристалл) решетки представляет собой множество пьезоэлектрических элементов. Генератор контролирует все элементы для формирования лучей.

Выходом генератора является обычный амплитудный сигнал в реальном времени, эквивалентный стандартному А-скану.

В результате контроля дефектоскопами с ФР с электронным сканированием формируется секторная развертка области сканирования (S-scan), на которой амплитуда эхо-сигнала от отражателя кодируется цветом. Применение дефектоскопов с ФР позволяет излучать в объект контроля качающийся в плоскости падения ультразвуковой волны ультразвуковой луч, фокусировать его и получать изображения (рис. 2).

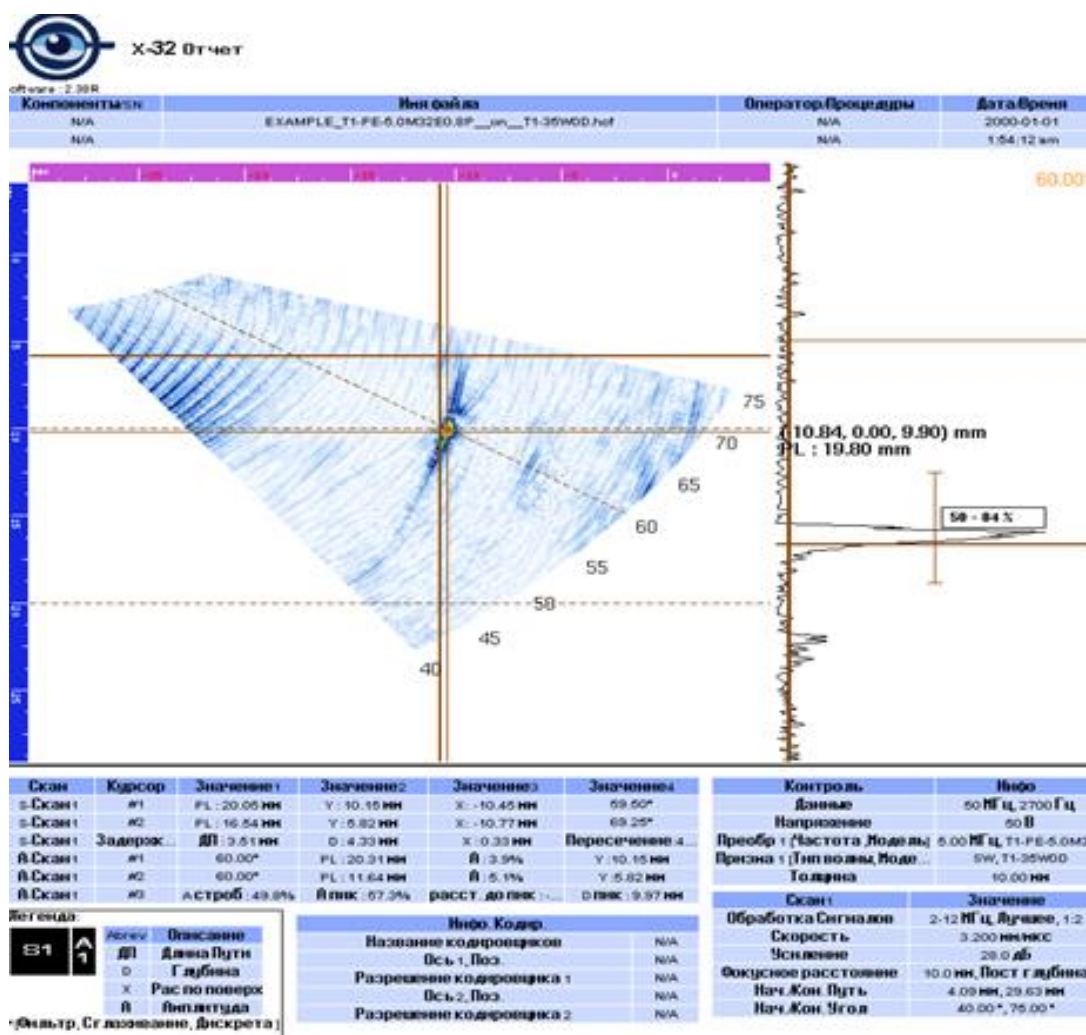


Рис. 2 Вид экрана при использовании ФР (прибор Harfang X-32)

SAFT относится к методам визуализации изображения внутренних структур при проведении контроля посредством сканирования ультразвуковыми импульсами. Она применяется для получения изображения внутренней структуры объекта контроля по эхосигналам, полученным при перемещении пьезоэлектрического преобразователя по доступной для ввода ультразвука

поверхности. При контроле дефектоскопом с решеткой, использующем SAFT-метод, для получения изображения в точке из каждой записанной реализации выбирается фрагмент длительностью τ_i с временем задержки. Все эти фрагменты содержат эхо-импульсы от отражателя в точке, полученных при разных ракурсах падения в эту точку и отражения. Выбранные фрагменты совмещаются по времени t с точностью до фазы и суммируются. Вычисляется огибающая результирующего эхо-импульса, максимум функции записывается в память прибора. Этому значению присваивается определенный цвет или яркость точки на экране прибора (рис. 3).

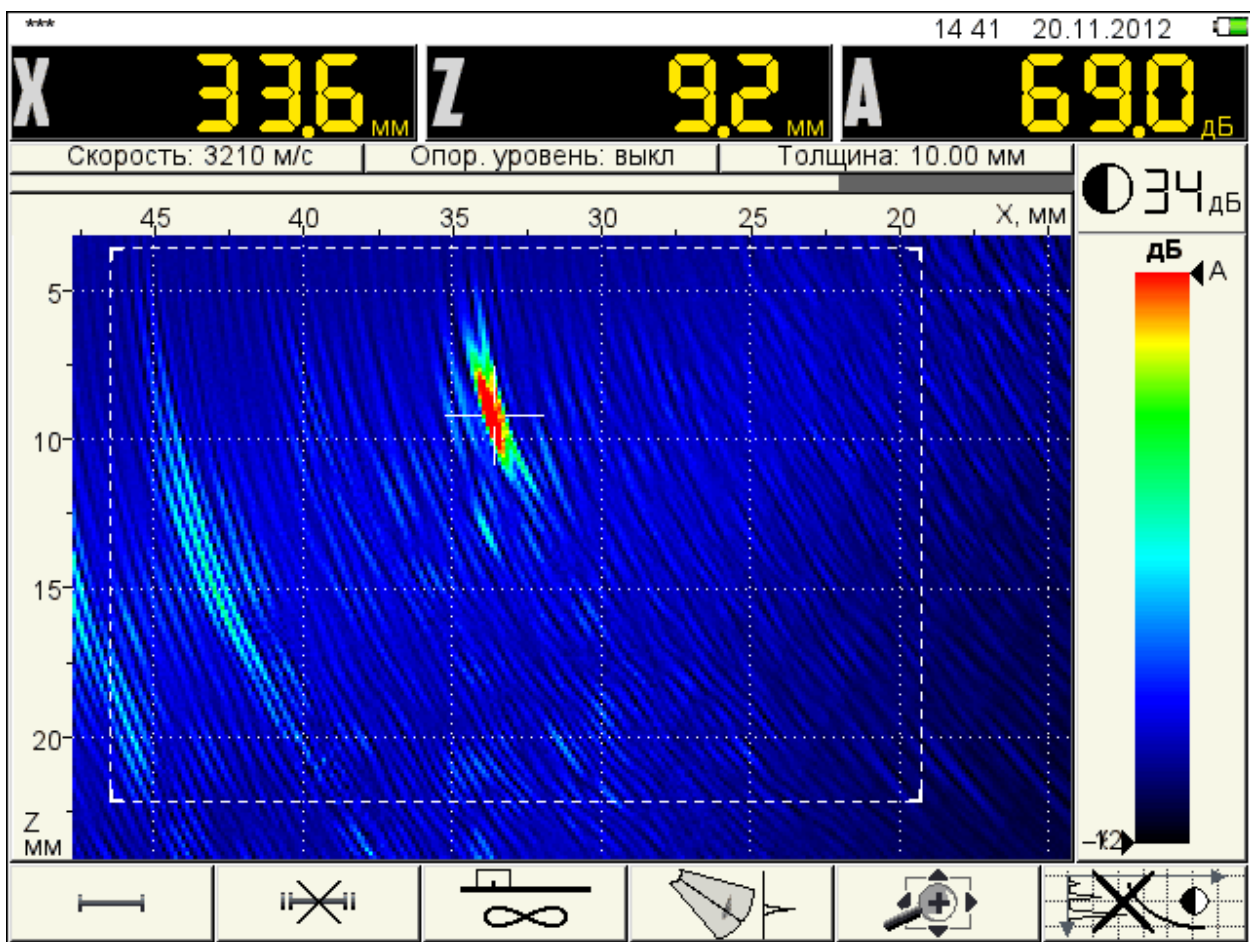


Рис. 3 Вид экрана при использовании SAFT (прибор A1550 IntroVisor)

Для получения экспериментальных данных в образце выполнены отражатели типа «засверловка» различного размера: диаметром от 2 до 5 мм и высотой от 1,6 до 7,6 мм (рис. 4, 5).

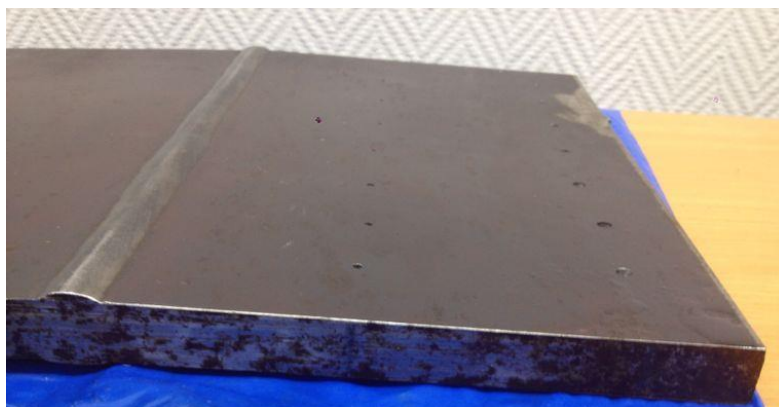


Рис. 4 Образец для измерений

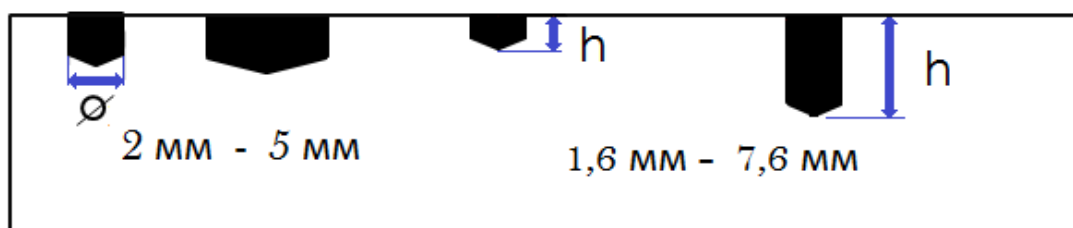


Рис. 5 Эскиз образца с засверловками

Результаты проведения измерения TOFD, ФР и SAFT методами на объекте контроля толщиной 20 мм представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения глубин засверловки различными методами

Диаметр засверловки	Фактическая высота	TOFD	ФР	SAFT
2	1,6	1,39	1,55	1,5
2	2,5	2,20	2,20	2,8
2	4,3	4,00	4,03	4,4
2	7,6	7,08	7,34	7,4
3	1,9	1,62	1,47	1,7
3	4,4	4,17	3,77	3,6
3	6,5	6,00	5,85	6,2
4	2,1	1,86	1,76	2,8
4	3,1	2,88	3,13	3,1
4	4,9	4,27	4,71	5,3

4	6,1	5,58	5,42	5,6
5	3,5	3,18	2,57	3,2
5	4,9	5,12	3,58	4,9
5	6,3	5,70	6,24	7,1

График зависимости измеренной высоты засверловки от фактической представлен на рис. 6.

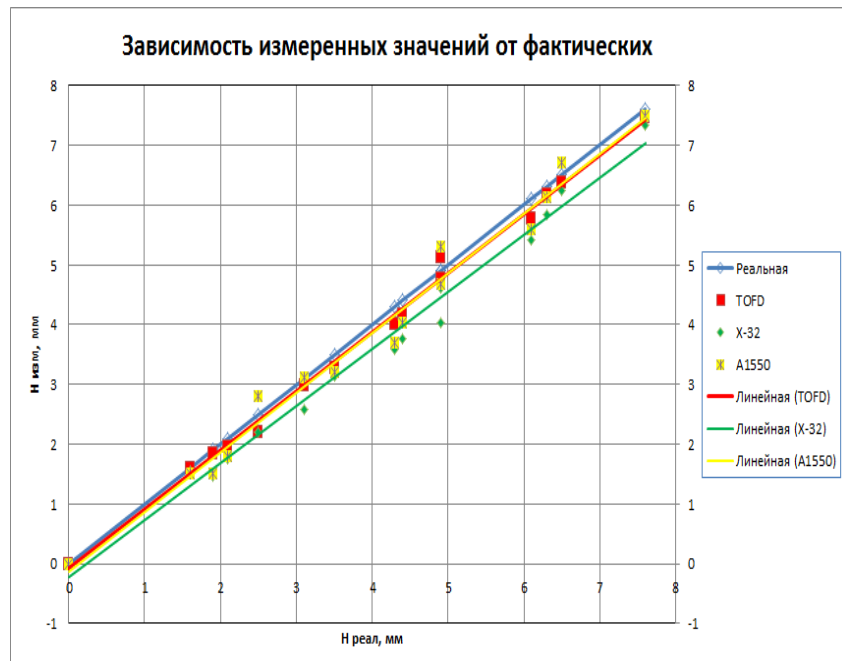


Рис. 6 Зависимости измеренной высоты засверловки от фактической

Зависимость относительной погрешности δ в процентах от фактической высоты засверловки в миллиметрах показана на рис. 7.

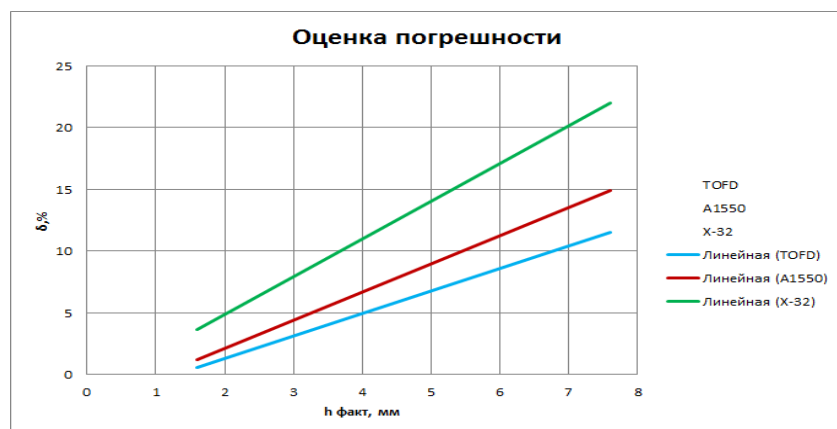


Рис.7. Зависимости относительной погрешности от высоты

По полученным графикам рассчитанный коэффициент корреляции для каждого метода указан в таблице 2.

Коэффициент корреляции различных методов

	TOFD - метод	SAFT	ФР
Коэффициент корреляции	0.997791	0.990302	0.986610

Для TOFD-метода коэффициент корреляции ближе всего к единице, этот метод является наиболее точным.

Для оценки совместного влияние диаметра и высоты засверловки на относительную погрешность было получено уравнение множественной регрессии:

1. Для TOFD метода: $y = 0,14 - 0,037 \cdot x_1 + 0,009949 \cdot x_2$

Коэффициент ($- 0,037$) при факторе x_1 означает, что при увеличении диаметра засверловки на 1 мм, относительная погрешность измерения уменьшается на 0,037%, при условии, что высота засверловки останется неизменной. Коэффициент ($+ 0,009949$) при факторе x_2 говорит о том, что при увеличении высоты засверловки на 1 мм, относительная погрешность измерения увеличится на 0,00949%, при условии, что диаметр засверловки останется неизменным.

2. Для дефектоскопа с ФР: $y = 0,151 + 0,031 \cdot x_1 - 0,037 \cdot x_2$

Коэффициент ($+ 0,031$) при факторе x_1 означает, что при увеличении диаметра засверловки на 1 мм, относительная погрешность измерения увеличивается на 0,031%, при условии, что высота засверловки останется неизменной. Коэффициент ($- 0,037$) при факторе x_2 говорит о том, что при увеличении высоты засверловки на 1 мм, относительная погрешность измерения уменьшится на 0,037%, при условии, что диаметр засверловки останется неизменным.

3. Для SAFT: $y = 0,17 - 0,056 \cdot x_1 + 0,023 \cdot x_2$

Коэффициент ($- 0,056$) при факторе x_1 означает, что при увеличении диаметра засверловки на 1 мм, относительная погрешность измерения уменьшается на 0,056%, при условии, что высота засверловки останется

неизменной. Коэффициент (+ 0,023) при факторе x_2 говорит о том, что при увеличении высоты засверловки на 1 мм, относительная погрешность измерения увеличится на 0,023%, при условии, что диаметр засверловки останется неизменным.

В результате сравнения уравнений делаем вывод, что меньше всего изменение одного из параметров влияет на погрешность в TOFD-методе. Далее A1550 IntroVisor и Harfang X-32, соответственно.

В результате проведенных экспериментов делаем вывод о возможности измерений ультразвуковым видом неразрушающего контроля фактических (не условных) размеров несплошностей, в т.ч. трещин в сварных соединениях, тремя методами - TOFD (погрешность не более 10%), SAFT (погрешность не более 15%) и по S-скану, полученному с помощью ФР (погрешность не более 20%).

Литература

1. *Ермолов И.Н., Н.П. Алешин Н.П., Потапов А.И.* Неразрушающий контроль. – Кн. 2. Акустические методы контроля. – М.: В.Ш., 1991. – 283 с.
2. *Мезон У.* Физическая акустика. – Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. – М.: изд. «МИР», 1966. – 589 с.
3. *Кретов Е.Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. – СПб.: изд. «Радиоавионика». - 1995. - 330 с.
4. *Щербинский В.Г.* Технология ультразвукового контроля сварных соединений. – СПб.: Издательство «СВЕН». – 2014. – 500 с.
5. *Букли Джо* Рекомендации по настройке TOFD сканирования на системе VEO, 2011 г.