

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ TFM



ПЕПЕЛЯЕВ Андрей Валентинович
ООО «ТЕХКОН», Москва

Подведены итоги экспериментов, которые показывают влияние температуры объекта контроля и призмы преобразователя на результаты ультразвукового контроля, полученные методом общей фокусировки TFM.

Продолжаем цикл статей по применению метода TFM, начатый в работах [1–3]. На этот раз рассмотрим такую важную тему, как влияние температуры на результаты контроля.

От температуры зависят коэффициент затухания ультразвука и другие акустические характеристики веществ. Соответственно, температура влияет на чувствительность и другие параметры контроля. Но в данном случае рассмотрим температурную зависимость для скорости ультразвуковых волн. Это связано с теми алгоритмами пространственно-временной обработки данных и реконструкции изображений (сканов), которые применяются в методе TFM.

Как было показано в статье [3], если для метода TFM использовать неверные значения скорости ультразвука, то это может привести не только к ошибкам в определении координат отражателей, но и к уменьшению расчетной суммарной амплитуды эхосигналов от них и к «размытию» индикаций даже для крупных отражателей — вплоть до их полного отсутствия на реконструированных сканах.

Поэтому рассмотрим, как учесть изменения скорости ультразвука, связанные с температурой, чтобы не снижать надежность и достоверность контроля.

На первом этапе установим зависимость скорости ультразвука в материале от температуры данного материала:

$$c_1 = c_0(1 + k_{t1}(t_1 - t_0)), \quad (1)$$

где c_0 — скорость ультразвука при температуре t_0 ; c_1 — скорость ультразвука при температуре t_1 ; k_{t1} — температурный коэффициент.

Аналогичная формула применяется в ультразвуковом толщиномере 38DLPlus для режима автоматической температурной компенсации значений скорости ультразвука при измерениях [4].

Если температура измеряется в градусах Цельсия, то k_{t1} будет определяться в $1/^\circ\text{C}$. Для наглядности температурный коэффициент можно выразить в процентах от c_0 на 100°C и обозначить его k_{t2} .

Материалом объекта контроля (ОК) чаще всего является сталь различных марок. Кроме ОК необходимо учитывать скорость ультразвука в акустической задержке (призме) преобразователя. Для преобразователей-фазированных решеток (ПФР) применяют призмы из рексолита (rexolite).

Температурные характеристики и зависимости для углеродистой стали и рексолита приведены в табл. 1 и на рисунке. Для сравнения добавлены аналогичные характеристики одной из марок полиэтилена низкого давления (НД).

Все указанные характеристики и зависимости определены экспериментально, в некоторых случаях с линейной экстраполяцией. Отрицательные значения температурных коэффициентов указывают на уменьшение скорости ультразвука с ростом температуры, что характерно для твердых тел. Температурные характеристики для полиэтилена НД установлены при отработке методики ультразвукового контроля толщины стенок полиэтиленовых труб толщиномером 38DLPlus.

Как следует из приведенных данных, скорость ультразвука в призме из рексолита в зависимости от температуры меняется в 3,7 раза быстрее, чем в стали.

Более сильная зависимость скорости ультразвука от температуры по сравнению со сталью характерна для многих полимеров. Это, в частности, приводит к тому, что при одинаковом изменении температуры стали и наклонной призмы меняется угол ввода ультразвуковых волн в сталь (см., например, работу [5]).

Из указанных материалов сильнее всего с температурой меняется скорость ультразвука в полиэтилене НД – в 15,5 раз быстрее, чем в стали.

Влияние точности настройки скорости ультразвуковых волн в ОК на результаты контроля методом TFM рассмотрено нами в статье [3]. Теперь нужно учесть зависимость скорости ультразвука конкретно от температуры, причем сделать это не только для ОК, но и для призмы. Как показано выше, скорость ультразвука в призме гораздо сильнее зависит от температуры, чем скорость в стали. Кроме того, длина пути ультразвукового сигнала в призмах ПФР бывает достаточно большой. Поэтому и время распространения сигнала в призме, его зависимость от температуры существенно влияют на результаты контроля методом TFM.

Влияние температуры для метода TFM изучалось на образце, с оборудованием и по методике, указанными в [3]. Анализировали индикацию от дефекта в виде продольной трещины, расположенной в корне стыкового сварного шва пластин из углеродистой стали толщиной 12 мм.

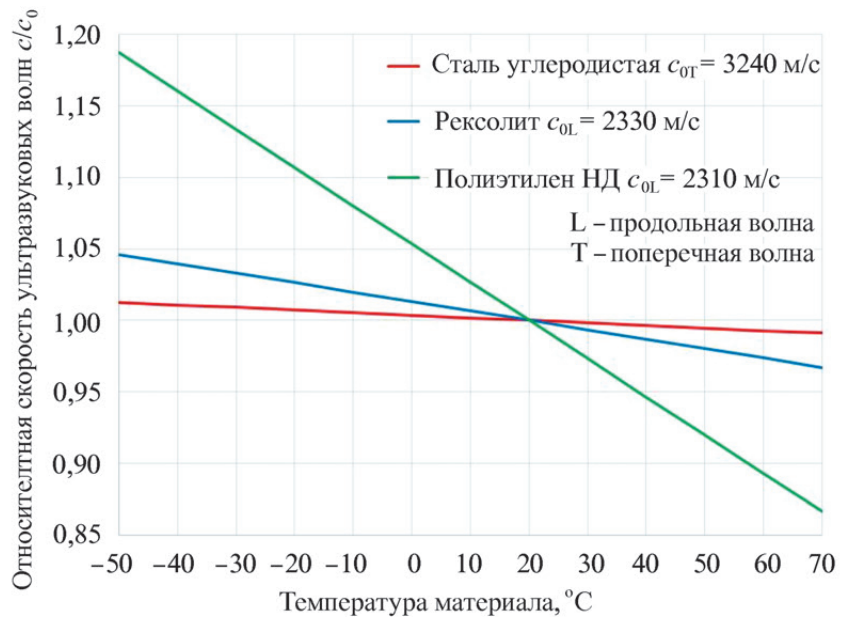
Применяли дефектоскоп OmniScan X3, метод TFM/FMC (TFM с полноматричным захватом), режим ТТТ, ПФР 5L32-A31 на 32 элемента с рабочей частотой 5 МГц, призму SA31-N55S с базовым углом ввода 55° для поперечных волн в стали.

Эксперимент по изучению влияния температуры состоял в следующем. Первоначально в ка-

Таблица 1. Температурные характеристики материалов

Параметр	Материал		
	Сталь углеродистая	Рексолит	Полиэтилен НД
Скорость ультразвуковых волн при 20°C c_0 , м/с	3240 Т	2330 L	2310 L
k_{t1} , 1/°C	-0,00018	-0,00066	-0,00279
k_{t2} , %/100°C	-1,8	-6,6	-27,9

Условные обозначения: L – продольная волна; Т – поперечная волна.



Зависимость скорости ультразвука от температуры

честве настроенных значений скорости ультразвука в ОК и в призме c_n использовали так называемые заводские настройки, заданные в базе данных дефектоскопа. Это значения 3240 и 2330 м/с для поперечных волн в углеродистой стали и продольных волн в призме из рексолита соответственно. Указанные значения скорости соответствуют температуре t_0 , приблизительно равной 20°C.

Если нагреть или охладить ОК и призму до температуры t_1 , отличной от t_0 , то действительное значение скорости ультразвука в ОК и в призме c_d перестанет соответствовать c_n , что вызовет искажение результатов контроля.

Полученные в ходе экспериментов данные по влиянию температуры на результаты контроля методом TFM приведены в табл. 2. Для каждого значения температуры ОК и призмы t показаны максимальная амплитуда эхосигнала от дефекта A_{max} в процентах от полной высоты А-скана и в децибеллах относительно A_{max} при 20°C, а также фрагмент End-скана. End-скан представляет собой отображение результатов контроля в поперечном сечении сварного шва. В табл. 2 приведены его фрагменты размером 6×3 мм с индикацией дефекта. Внизу табл. 2 показана шкала цветовой кодировки амплитуды, которая применялась для всех приведенных здесь End-сканов.

Таблица 2. Результаты контроля методом TFM при изменении температуры

Параметр	$t, ^\circ\text{C}$			
	-40	-30	-20	-10
$A_{\text{max}}, \%$	39	56	73	88
$A_{\text{max}}, \text{дБ}$	-8,2	-5,0	-2,7	-1,1
End-скан				
$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$A_{\text{max}}, \%$	99	107	100	92
$A_{\text{max}}, \text{дБ}$	-0,1	0,6	0,0	-0,7
End-скан				
$t, ^\circ\text{C}$	40	50	60	70
$A_{\text{max}}, \%$	71	52	36	25
$A_{\text{max}}, \text{дБ}$	-3,0	-5,7	-8,9	-12,0
End-скан				

Шкала цветокодировки амплитуды сигналов на End-сканах

Как следует из представленных в табл. 2 результатов, в целом, чем больше температура ОК и призма отличается от 20 °С, для которой применимы заводские настройки скорости ультразвука, тем ниже амплитуда эхосигнала и меньше четкость индикации от дефекта. При контроле это может привести к пропуску дефектов, неверному определению их характеристик, а также ошибочной оценке допустимости дефектов.

Чтобы избежать подобного, при контроле нужно как можно точнее настроить скорость ультразвуковых волн в ОК и в призме преобразователя, в том числе с учетом их действительной температуры.

Для примера в табл. 3 представлены результаты контроля в виде End-сканов с индикацией дефекта. Эти результаты получены с призмой, нагретой до температуры примерно 70 °С. Они наглядно показывают, как настройка скорости ультразвука в призме, выполненная с учетом ее температуры, улучшает результаты контроля. При этом остальные параметры контроля и по-

ложение ПФР относительно дефекта не изменяются.

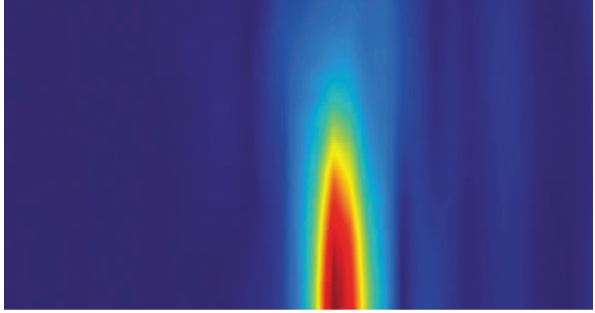
Для настройки скорости ультразвука в призме, отличной от заводской, использовали специальный раздел программного меню дефектоскопа OmniScan X3, который позволяет задать и сохранить для дальнейшего применения все заданные характеристики призмы. При этом в базе данных дефектоскопа создается так называемая пользовательская модель призмы – в дополнение к имеющимся заводским моделям.

В ходе проведенных экспериментов изучались зависимость скорости ультразвуковых волн в ОК и призме преобразователя от температуры и ее влияние на результаты контроля методом TFM. Влияние коэффициента затухания ультразвука и других параметров, также зависящих от температуры, следует рассматривать дополнительно.

Выводы и рекомендации

1. Температурная зависимость скорости ультразвуковых волн в материалах особенно важна

Таблица 3. Результаты контроля при температуре призмы 70 °С

	
<p>В дефектоскопе задана скорость ультразвука в призме 2330 м/с, что соответствует заводской настройке для температуры 20 °С. Четкая индикация от дефекта отсутствует</p>	<p>В дефектоскопе задана скорость ультразвука в призме 2253 м/с, что соответствует действительной температуре призмы 70 °С. Имеется четкая индикация от дефекта, которая позволяет надежно его выявить, определить координаты, а также оценить форму и размеры</p>

для метода TFM. Если настроенное в дефектоскопе значение скорости ультразвука не соответствует своему действительному значению, то это может привести не только к ошибкам в определении координат дефектов, но и к уменьшению расчетной амплитуды эхосигнала, размытию индикации от дефекта, вплоть до полного ее отсутствия на реконструированных сканах. Это в свою очередь ведет к пропуску дефектов, включая недопустимые, и другим ошибкам при контроле.

- Чтобы не снижать надежность и достоверность контроля методом TFM, следует с максимальной возможной точностью настроить в дефектоскопе скорость ультразвука в ОК и в призме преобразователя, причем сделать это нужно с учетом их действительной температуры при контроле. Температурную зависимость скорости ультразвуковых волн для материалов ОК и призмы можно определить экспериментально, например как это показано в данной статье.
- На настройку скорости ультразвука в призме нужно обратить особое внимание, поскольку она намного сильнее зависит от температуры, чем скорость ультразвука в стали. Чтобы настроить скорость ультразвука в призме для различных значений температуры, в дефектоскопе Omni-Scan X3 можно использовать специальный раздел программного меню, который позволяет создавать и сохранять в базе данных дефектоскопа пользовательские модели призм с характеристиками, отличными от заводских.
- Примеры влияния температуры на результаты контроля с соответствующими температурными характеристиками, приведенные в настоящей статье, относятся к конкретному случаю применения метода TFM и не распространяются на

другие применения без экспериментальной проверки.

- Настройку дефектоскопа нужно выполнять при той же температуре ОК и призмы с преобразователем, что и при контроле. Если при настройке используются настроечные или калибровочные образцы, то их температура также должна соответствовать температуре ОК. При настройке следует применять ту же контактную жидкость, что и при контроле, включая контактную жидкость, наносимую между преобразователем и сменной призмой. Все это, вместе взятое, позволит учесть влияние температуры на различные параметры контроля.
- В методе TFM и других методах УЗК часто используют преобразователи с диапазоном рабочих температур от -20 до $+50$ °С. Для контроля объектов с более высокой температурой, кроме учета температурных зависимостей, рекомендуется применять высокотемпературные средства контроля: преобразователи, акустические держки (призмы), а также контактные жидкости. Например, серийно выпускаются прямые и наклонные (со сменной высокотемпературной призмой) преобразователи с рабочей температурой до 500 °С. При этом нужно также сокращать время контакта преобразователя с «горячим» ОК (например, до 5...10 с) с последующим охлаждением преобразователя. В некоторых случаях при высокой температуре ОК можно использовать бесконтактные электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи.

Библиографический список

- Чи-Ханг Кван. Оптимизация выбора преобразователя для контроля методом TFM/FMC // Территория NDT. 2019. № 4. С. 36–43.

2. Пепеляев А.В. Преимущества нового дефектоскопа с фазированными решетками OmniScan X3 и метода общей фокусировки TFM при ультразвуковом контроле сварных швов // Территория NDT. 2021. № 4. С. 47–49.
3. Пепеляев А.В. Настройка дефектоскопа OmniScan X3 для метода TFM. Скорость ультразвуковых волн и толщина объекта контроля // Территория NDT. 2022. № 1. С. 34–38.
4. 38DLPlus — ультразвуковой толщиномер: руководство по эксплуатации. DMTA-10004-01RU-Версия С. П. 10.7, с. 171 / Olympus, 2016.
5. РД 34.17.302–97 (ОП 501 ЦД–97). Котлы паровые и водогрейные. Трубопроводы пара и горячей воды, сосуды. Сварные соединения. Контроль качества. Ультразвуковой контроль. Основные положения (с Изменением № 1). П. 4.2.10. М.: PAO «ЕЭС России» — Госгортехнадзор России, 1997. ■

ГОЛОВНЫЕ ВОЛНЫ

Из книги Н.П. Разыграева, А.Н. Разыграева
«Головные волны в ультразвуковой
дефектоскопии металлов»

Повествование от первого лица —
доктора технических наук
РАЗЫГРАЕВА Николая Павловича

В августе 1972 года я несколько раз ездил в Ленинград на флагман энергомашиностроения СССР — Ижорский завод. В результате в ЦНИИТ-МАШ были доставлены специальные образцы металла сосудов атомных электростанций с антикоррозионной аустенитной наплавкой. Там я познакомился и подружился на всю оставшуюся жизнь с Е.Ф. Кретовым.

На этих образцах были проведены исследования акустических характеристик основного металла и антикоррозионной наплавки с использованием продольных и поперечных волн с разными углами наклонных преобразователей. Тогда искатели определяли по углу призм: 30, 40 и 50°.

В ноябре 1972 года при исследовании образцов толщиной от 110 до 122 мм с помощью дефектоскопа фирмы «Крауткремер» USIP-10 и преобразователя с углом призмы 30° зеркально-теневым методом мне удалось увидеть неизвестные импульсы, которые очень быстро распространяются в металле. Первичные исследования и анализ показали, что эти импульсы распространяются со скоростью продольной волны в металле вдоль контактной поверхности. Мы обсудили полученные результаты с И. Н. Ермоловым и коллегами. Первичный вывод был весьма и весьма смелым: мы обнаружили неизвестные в ультразвуковой дефектоскопии волны. Во время обсуждения я высказал предположение, что мы

видим боковые (головные) волны, известные в геофизике и сейсмоакустике. Ставился вопрос о подаче заявки на открытие.

Первые исследования были продолжены, выявлены первичные закономерности, определены оптимальные углы возбуждения и приема — первый критический угол. Обнаружению головных волн способствовало то, что дефектоскоп USIP-10 имеет динамический диапазон 36 дБ. Это обеспечило одномоментное наблюдение и фиксацию сигналов с большой разницей в амплитудах: 20 дБ и более. Сигналы головных волн на 1–2 порядка меньше (слабее) объемных продольных и поперечной волн. Других дефектоскопов с таким динамическим диапазоном экрана в то время в СССР не было.

Мы продолжили интенсивное изучение головных волн. Была поставлена работа по изучению этих волн. Когда физика явления стала проясняться, И. Н. Ермолов предложил мне подавать заявку на изобретение и я в полной мере прислушался к его мнению. В дальнейшем было получено авторское свидетельство № 491092 на «Способ ультразвукового контроля материалов» с приоритетом от 1 июня 1973 г. Уже в мае 1974 года мы доложили о нашей работе на Всесоюзной конференции по неразрушающему контролю в Киеве.

В 1979 году исследования головных волн и разработка технологий УЗК головными волнами позволили мне защитить кандидатскую диссертацию, в чем большая заслуга моего научного руководителя Игоря Николаевича Ермолова. При этом хочу отметить, что Игорь Николаевич как научный руководитель никогда не занимался мелочной опекой, но всегда был открыт для обсуждений и поддержки при разработке методик исследований, анализе результатов исследований.