

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ: ОТ СПЕКТРАЛЬНОГО ОБРАЗА ДО КОГЕРЕНТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОРТРЕТА ДЕФЕКТОВ\*

## ЧАСТЬ 1. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО И ДИФРАКЦИОННОГО ОБРАЗОВ



**ВОПИЛКИН Алексей Харитонович**

Д-р техн. наук, проф., ген. директор, ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва

2 апреля 2020 г. ООО «НПЦ «ЭХО+» отмечает 30-летие образования. За эти годы коллективом пройден невероятно большой путь в развитии технологии, приборов и систем, реализующих главное направление деятельности фирмы – «ультразвуковую дефектometriю». Именно это направление было выбрано при организации компании. Почему так? Дело в том, что я до создания компании 22 года проработал в НПО «ЦНИИТМАШ» и там тоже занимался созданием методов и приборов определения типа и размеров дефектов на основе изучения волн дифракции на отражателях различной формы. Этому были посвящены мои кандидатская и докторская диссертации. Тогда это направление еще не называлось ультразвуковой дефектometriей. Слишком грубыми были методы. Получается, что в теме «Ультразвуковая дефектometriя» я нахожусь уже более полувека. Оглядываясь назад, на прой-

*Приведена история развития одного из актуальных направлений ультразвукового контроля – ультразвуковой дефектometriи за 50-летний период работы автора сначала в НПО «ЦНИИТМАШ», затем в НПЦ «ЭХО+». Начинались работы с применения дифракционных методов оценки типа и размеров дефектов, затем на смену им пришли ультразвуковые голографические методы, которые сослужили хорошую службу на атомных электростанциях. В последние годы активно развиваются методы и аппаратура ультразвуковой дефектometriи с использованием фазированных решеток (ФР). Апогеем создания приборов ФР явился выпущенный на рынок ФР-дефектоскоп на 128 каналов, в котором реализованы одновременно три технологии контроля.*

денный путь, и анализируя сегодняшнее состояние этой темы, я решил подготовить обзорную статью, охватывающую мои работы с 1968 г. по дифракционным методам и их продолжение уже в НПЦ «ЭХО+» на принципиально новом уровне – с применением голографических методов, а сегодня – основанных на использовании технологии фазированных антенных решеток (ФР-технологии).

Публикуя эту статью, я хочу рассказать читателям об истории развития этого одного из самых важных направлений ультразвукового контроля. Сегодня технологический процесс развивается с такой стремительностью, что сделанное вчера уже неактуально. Даже свои разработки десятилетней давности мы не все помним. В свое время наш классик И. Н. Ермолов опубликовал серию статей под названием «Дефектоскопические истории». Эта статья в том же ключе.

\* Статья из книги «Ультразвуковая дефектometriя. 30 лет»: юбилейный сборник трудов ООО «НПЦ «ЭХО+». М.: Издательский дом «Спектр», 2020. С. 7–24.

Когда я был студентом 5-го курса Московского горного института, мой руководитель диплома Игорь Николаевич Ермолов подкинул мне статью американского ученого Герике, в которой автор развивал идею, что дефектам различного типа соответствует свой спектральный отклик отраженного сигнала в частотном представлении. Например, спектр плоскостного дефекта при наклонном падении ультразвукового пучка на него имеет периодический осциллирующий характер, а для объемного дефекта характерно плавное изменение спектра. Игорь Николаевич предложил мне в дипломной работе проверить выводы Герике. На дворе был 1968 год. Я собрал установку для проведения экспериментов, разработал генератор линейно-частотно-модулированных колебаний, провел кое-какие эксперименты, мало что интересного получил, но диплом защитил на отлично. Далее я последовал за моим учителем в ЦНИИТМАШ и продолжил заниматься этой темой.

Почему тема распознавания типа дефектов по самым различным критериям (не только по спектру) так волновала не только меня (я тогда был еще новичком), но и многих ученых во всем мире? Дело в том, что нет прямой корреляции между типом дефектов и его амплитудным откликом. В то же время именно тип дефекта является критерием его опасности для конструкции. Все дело в различном коэффициенте концентрации напряжении  $K_c$  для дефектов различного типа. Например, пора округлой формы имеет  $K_c = 3$ , а трещина имеет  $K_c = 25$  и более. Отсюда следует, что трещины на порядок опаснее, чем поры и, как результат, именно по трещинам происходит разрушение.

На протяжении многих лет практической работы я сталкивался с одним и тем же вопросом, который задавали сварщики, конструктора, технологи при обнаружении дефекта: какой это дефект и каких размеров? И дефектоскописты всегда уходили от ответа на этот вопрос, поскольку не существовали методы и средства определения истинных размеров и типа дефектов. Взамен наши ученые-классики И. Н. Ермолов и А. К. Гурвич ввели понятие эквивалентных и условных размеров, чтобы хоть как-то оценивать качество контролируемых изделий. Многочисленные исследования, проведенные различными авторами

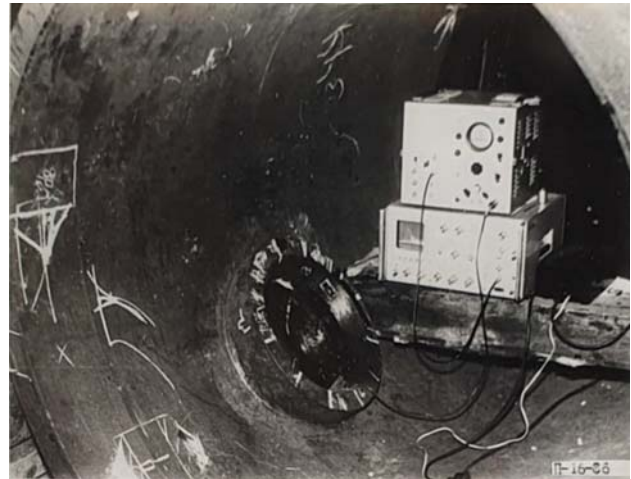


Рис. 1. Ультразвуковой спектроскоп конструкции НПО «ЦНИИТМАШ»

(В.Г. Щербинский, А.З. Райхман, В.Е. Белый и др.), показали, что между ними практически нет корреляции. Вследствие этого принимались очень жесткие нормы, многократно превышающие минимально необходимые. Отсюда возникали многочисленные необоснованные ремонты и бракование годных по качеству изделий. С другой стороны, наиболее опасные дефекты типа трещин, имеющие, как правило, небольшую отражательную способность (ниже браковочных норм), допускались в эксплуатацию и зачастую приводили к авариям.

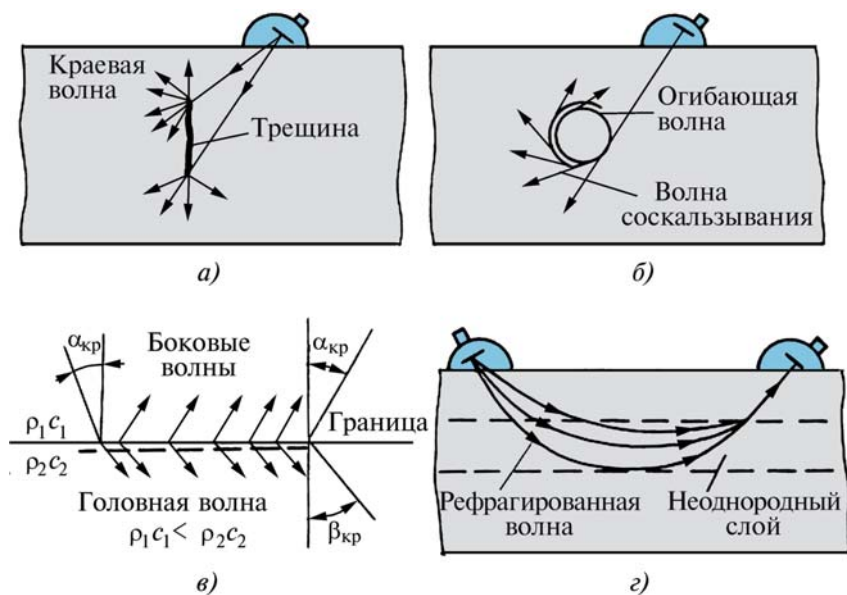


Рис. 2. Классификация типов дифракции:

а – дифракция на краях плоскостных отражателей; б – дифракция на объемных отражателях; в – дифракция на границе раздела двух сред; г – дифракция в слоисто-неоднородных средах

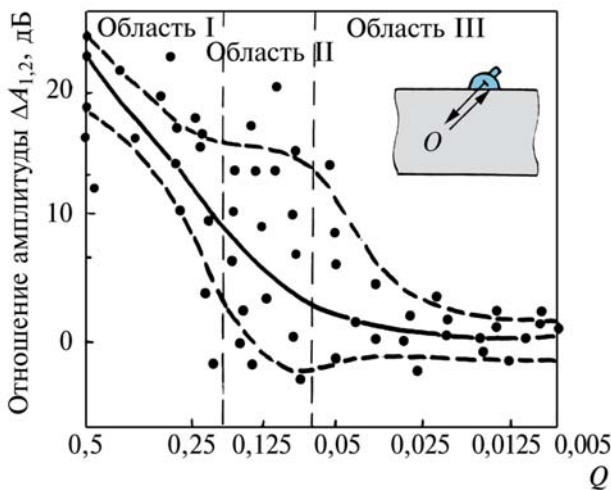


Рис. 3. Зависимость отношения первых двух сигналов волн, дифрагированных на эллиптических отражателях, от коэффициента формы  $Q$

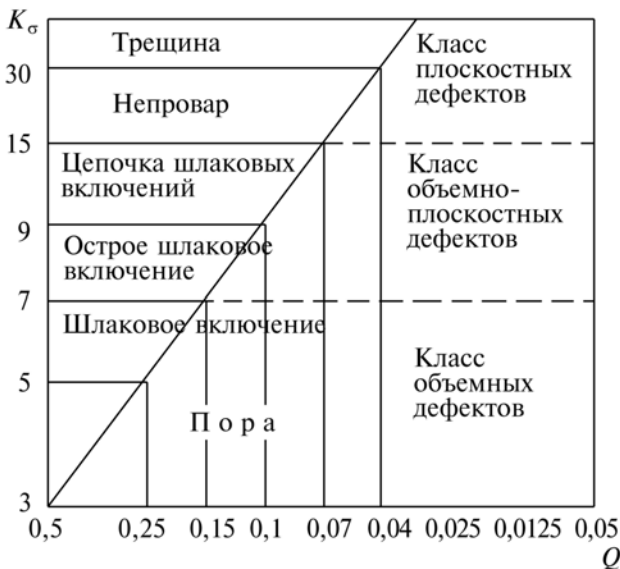


Рис. 4. Трехуровневая система классификации эллиптических отражателей, связывающая коэффициент концентрации напряжений  $K\sigma$  и коэффициент формы отражателей  $Q$

Проблема определения типа и размеров дефектов захватила меня и сопровождала в научной деятельности всю жизнь. Не оставляет она меня и сейчас. Потому что в ультразвуковом неразрушающем контроле нет более актуальной темы, чем эта. Разумеется, на разных временных этапах она решалась по-разному. Начались исследования со спектрального метода, и это стало темой моей кандидатской диссертации. Далее исследования продолжились с применением волн дифракции различных типов и составили основу моей докторской диссертации. И уже в «ЭХО+» исследования развернулись на

новом уровне — на основе применения когерентных голографических методов, а в последнее время с применением фазированных антенных решеток (ФАР).

Теперь все по порядку.

Как только я начал работать в ЦНИИТМАШе, я развернул работы по спектральному методу. Конечно, при поддержке и общем руководстве Игоря Николаевича (ИН). По ходу аппаратной разработки надо было решить несколько научных и технических задач. Одна из них состояла в том, чтобы создать широкополосные преобразователи, работающие в диапазоне 1–10 МГц.

Я предложил и реализовал технологию преобразователя с переменным управляемым профилем поверхности пьезоэлемента. Эти преобразователи были запатентованы во многих странах. Надо сказать, что по этой теме началось плодотворное сотрудничество с чешскими институтами SVUM и SVUSS. От них руководил работами давний приятель ИН Ярослав Образ. Мы разрабатывали свой вариант прибора — ультразвукового спектроскопа, они — свой. Потом мы провели сравнительные испытания обоих приборов и лучшие решения применили в опытном образце.

Ультразвуковой спектральный метод основан на различной реакции отраженного сигнала при падении на дефект различной формы. Для плоскостного дефекта спектр носит периодический осциллирующий характер, а для объемного дефекта спектр имеет равномерный характер без осцилляций. Этот метод реализован в ультразвуковом спектроскопе, внедренном на ряде предприятий (рис. 1).

Конечно, в те годы элементная база не позволяла сделать прибор компактным. Прибор был достаточно громоздким и неудобным в цеховых условиях. В то же время я понимал, что деления дефектов на два класса — плоскостные и объемные — недостаточно, поскольку большинство дефектов находятся в промежутке между этими двумя полярными классами. Это с одной стороны, а с другой — специалисты по прочности моделируют при расчетах дефекты в виде эллипсов с соотношением полуосей эллипсов от 0,5 для сферы до 0,001 для трещины. Я его назвал коэффициентом формы  $Q$ . Такая шкала эллипсов перекрывает все возможные размеры дефектов. Понимая это, я заказал на ижорском заводе серию образцов с моделями эллиптических дефектов, перекрывающих всю шкалу эллипсов. Перед началом исследований я предложил классификацию типов дифракции [1], состоящую из четырех типов (рис. 2):

- дифракция на острых краях трещины; отраженное поле формируется как суперпозиция двух сигналов от кончиков трещины, причем фазы обоих сигналов отличаются на  $180^\circ$ ;

- дифракция на гладкой выпуклой поверхности; здесь формируется волна обегания-соскальзывания, но осцилляции отсутствуют;
- дифракция на границе раздела двух сред; этот тип дифракции характерен для излучения волны вблизи первого критического угла. В этом случае образуется головная волна, распространяющаяся вдоль поверхности и переизлучающая боковую волну. Головная волна широко используется для контроля подповерхностных дефектов. Она нечувствительна к неровности поверхности;
- дифракция в слоисто-неоднородных средах. Этот тип дифракции наблюдается в поверхностно-закаленных слоях валков холодной прокатки, в аустенитных сварных швах, в которых вследствие неравномерной кристаллизации по его сечению изменяется скорость распространения волн [1, 2].

Эти четыре типа дифракции описывают все возможные типы формирования отраженного луча от любого отражателя при контроле объемными волнами.

Возвращаясь к образцам с эллиптическими дефектами. Я провел большой цикл измерений первых двух отраженных сигналов, соответствующих дифракции первого и второго типов.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуд двух первых сигналов волн, дифрагированных на эллиптических дефектах от коэффициента формы  $Q$ . Из рис. 3 видно, что для  $Q$ , равного 0,50–0,23, соотношение амплитуд составляет 10–20 дБ (область I), а для  $Q$ , равного 0,1 и менее, соотношение амплитуд стремится к нулю (область III). Эти эксперименты позволили сформулировать трехуровневую классификацию типов дефектов по соотношению амплитуд дифрагированных сигналов (рис. 4).

Данная классификация оказалась применима и к спектральному методу распознавания типа дефектов. На рис. 5 показаны спектральные отклики отраженных сигналов от дефектов различных классов.

Для объемных дефектов огибающая спектра плавная, неосциллирующая, а для плоскостных дефектов огибающая представляет собой периодическую осциллирующую кривую. Причем период осцилляций напрямую связан с размером и углом наклона дефекта. Спектральная технология использовалась в спорных случаях для оценки необходимости ремонта сварного шва. Однако реализуется этот метод весьма непросто: надо иметь генератор качающейся частоты, широкополосный излучающий и приемный тракты, что всегда создавало проблемы.

Наибольшее практическое применение нашли первый и третий типы дифракции. Принцип формирования дифракционных волн по третьему типу

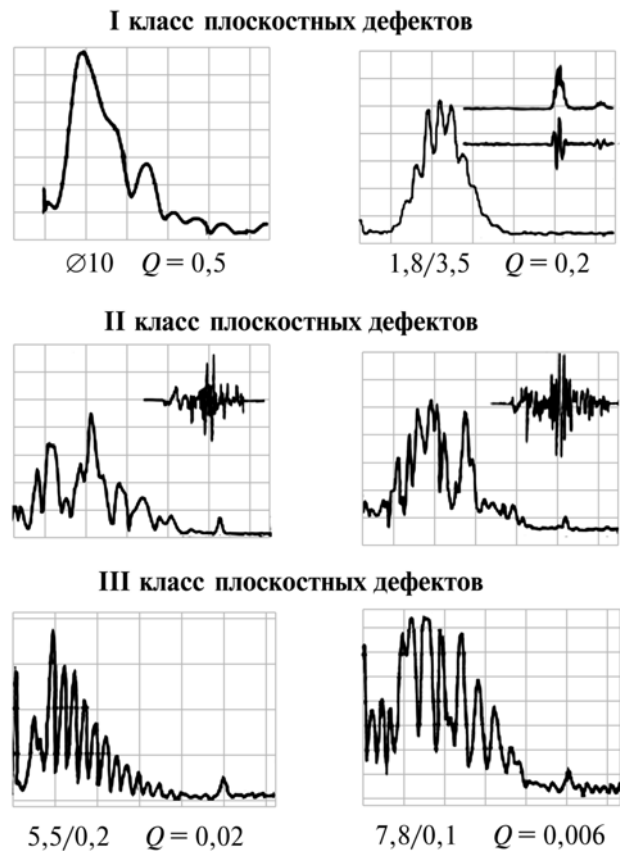


Рис. 5. Спектральные отклики отраженных сигналов от дефектов различных классов

показан на рис. 6. Волна, излученная в металл под первым критическим углом (для пары плексиглас–сталь этот угол составляет  $27,5^\circ$ ), вдоль свободной поверхности металла распространяется как головная волна, которая является неоднородной, самостоятельно существовать не может и в каждой точке своего распространения переизлучает боковую поперечную волну. Эта волна, дойдя до нижней свободной поверхности, переизлучается во вторичную головную волну. Головная волна имеет ряд позитивных особенностей. В частности, она нечувствительна к неровностям поверхности и может быть применена для выявления подповерхностных дефектов. Именно это свойство головной волны использовал Н.П. Разыграев (НПО «ЦНИ-ИТМАШ») и разработал ряд эффективных методик для контроля подповерхностных слоев, в том числе под валиком усиления.

Приведу еще один пример. На рис. 7 показана схема формирования дифрагированных волн на вертикальной трещине. Если излучить импульс прямым преобразователем вдоль трещины, то, с одной стороны, будет наблюдаться уменьшение донного сигнала пропорционально высоте трещи-

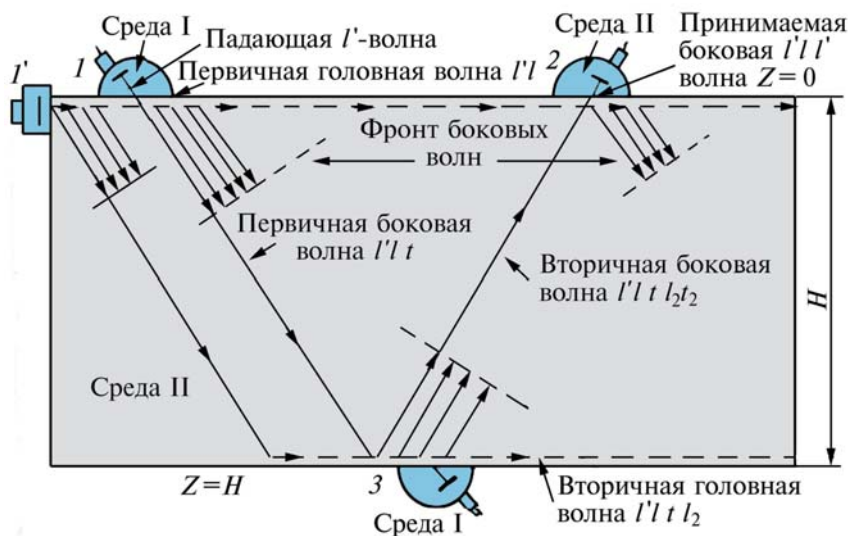


Рис. 6. Формирование головных и боковых дифракционных волн при излучении в металл под первым критическим углом

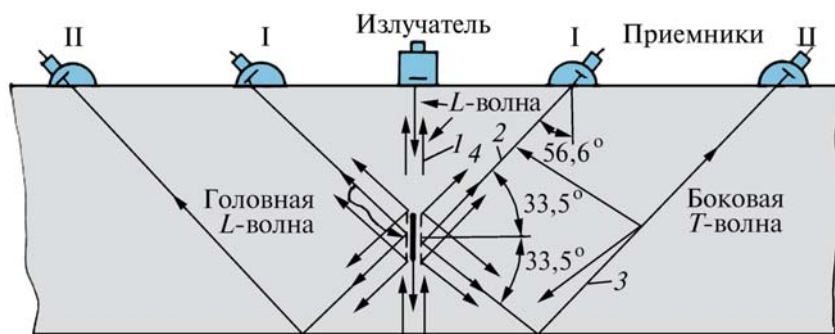


Рис. 7. Формирование головных и боковых волн на вертикальной трещине

ны. С другой стороны, вдоль берегов трещины будет формироваться импульс боковой волны, принимаемой на поверхности под третьим критическим углом. Причем амплитуда сигнала соизмерима с амплитудой отраженного сигнала от плоскостонного отверстия, равного высоте трещины. Это так называемый дельта-метод, предложенный в 1970-х годах А.К. Гурвичем и М.В. Григорьевым. В моей докторской диссертации, защищенной в 1987 г. в НПО «ЦНИИТМАШ», посвященной дифракционным методам в ультразвуковом контроле, я привел примерно 10 методов классификации дефектов для различных методов контроля.

Расскажу о последней моей работе в НПО «ЦНИИТМАШ».

В 1985 г. мы поставили на Челябинский металлургический комбинат установку для автоматизированного ультразвукового контроля цилиндрических поковок диаметром от 100 до 800 мм. С этой целью в кузнечно-прессовом цехе было построено помещение площадью 110 м<sup>2</sup>, в котором размещались две автоматизированные установки, одна для малых диаметров, другая для больших диаметров поковок. Акустические блоки реализовывали как раз дельта-методику, упомянутую выше. В этом помещении была построена отдельная комната, в которой была установлена самая современная на то время вычислительная машина СМ-1. Все сигналы от выявляемых дефектов поступали на эту

ЭМВ, по специально разработанной программе обрабатывались и анализировались выявляемые дефекты, их эквивалентный размер и классифицировались по типу. Это была первая установка в СССР (а может быть, и в мире!), дававшая возможность в автоматическом режиме не только выявлять, но и классифицировать дефекты по типу.

Примечательна судьба этой установки. Она эксплуатировалась на полную мощность вплоть до 1991 г. Разработчики осуществляли постоянное эксплуатационное обслуживание. После распада СССР все очень быстро пришло в упадок и на заводе, и в НПО «ЦНИИТМАШ», и установку забросили. Но спустя несколько лет завод преодолел кризис и переориентировался на экспорт своей продукции. Импортёры потребовали проведения автоматизированного ультразвукового контроля с выдачей паспорта на каждую поковку. Вот тут-то и началась вторая жизнь нашей системы. Но это уже было без меня, поскольку я уволился в 1990 г. и создал свою компанию НПЦ «ЭХО+».

На протяжении всех 22 лет работы в НПО ЦНИИТМАШ во время работы над темой ультразвуковой дефектометрии меня не оставляла мысль о том, что все многочисленные методы, которые я разрабатывал, все-таки не в полной мере решали поставленную задачу. Слишком высока погрешность измерения параметров дефектов и слишком много неопределенных факторов, влияющих на результаты, иногда сводящих на нет результаты измерений. Но других подходов в решении поставленной задачи мы в то время не знали.

Части 2 и 3 читайте  
в № 3 и 4, 2020  
«Территория NDT»