



Исследование зависимости амплитуды акустического эхо-сигнала от среднего размера зерен в сварном соединении

Глоба Руслан Анатольевич, аспирант кафедры АКид ОИАТЭ НИЯУ МИФИ,
ведущий инженер
Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская АЭС» (г. Сосновый Бор, Россия)
Трофимов Максим Адольфович, д.т.н., профессор кафедры АКид
ОИАТЭ НИЯУ МИФИ (г. Обнинск, Россия)

Аннотация. В данной статье описывается процедура установления зависимости амплитуды акустического эхо-сигнала от среднего размера зерен в зоне термического воздействия сварного соединения ультразвуковым методом с помощью дефектоскопа А 1212 Мастер «ПРОФИ» и сравнение полученной информации с результатами металлографических исследований зоны термического воздействия в сварном соединении.

Ключевые слова: ультразвуковой дефектоскоп А 1212 Мастер «ПРОФИ», прямой раздельно-совмещенный пьезоэлектрический преобразователь, средний размер зерна, металлографические исследования, зона термического воздействия сварного соединения.

Research of dependence of amplitude of an acoustic echo signal on the average size of grains in welded connection

Globa Ruslan, graduate student of AKID chair OIATE NIYaU of MEPHI, leading engineer
Rosenergoatom Concern branch of JSC "Leningrad NPP" (Sosnovy Bor, Russia)
Trofimov Maxim, Dr.Sci.Tech., professor of AKID chair
OIATE NIYaU of MEPHI (Obninsk, Russia)

Abstract. In this article procedure of establishment of dependence of amplitude of an acoustic echo signal on the average size of grains in a zone of thermal impact of welded connection by an ultrasonic method by means of the defectoscope A 1212 Master of "PRO" and comparison of the received information with results of metalgraphic researches of a zone of thermal influence in welded connection is described.

Keywords: the ultrasonic defectoscope A 1212 Master of "PRO", the direct separate combined piezoelectric converter, the average size of grain, metalgraphic researches, a zone of thermal impact of welded connection.

Введение

С середины 1990-х годов организация, эксплуатирующая российские АЭС, совместно с обеспечивающими предприятиями реализует задачи продления срока службы своих АЭС, которые в последние годы рассматриваются в контексте более широкой задачи управления сроком службы энергоблоков.

Одной из причин снижения срока службы оборудования АЭС, как показывает практика, является разрушение сварных соединений трубопроводов. Данное разрушение провоцирует одна из причин — наличие большого зерна в металле зоны термического воздействия, которое в свою очередь ведет к заметному снижению коррозионной стойкости материала. Примером вышеописанного является разрушение сварного соединения питательного трубопровода РУ ВК-50, разрушение сварного соединения канала аварийного охлаждения реактора и т.д. Разрушения сварных соединений происходят, преимущественно, в зоне термического воздействия и обусловлены наличием большого зерна в данной зоне. При выполнении сварочных работ на АЭС режимы сварки, зачастую, не соблюдаются. Это приводит к перегреву металла в сварном соединении и увеличению размеров зерен. Средний размер зерна основного металла и сварного соединения является важным конструкционным параметром.

В атомной энергетике контроль величины зерна прово-

дят с помощью металлографических исследований. Из сварного соединения вырезаются образцы, которые в дальнейшем используются в исследовании.

Помимо разрушающего метода контроля, позволяющего определять размер зерен в металлах, в последние годы было разработано несколько ультразвуковых методов (неразрушающий метод). Эти методы основаны на измерении различных физических ультразвуковых параметров, с помощью которых можно определить размер зерна:

1. Затухание.
2. Спектр затухания.
3. Обратное рассеяние.
4. Относительное затухание.
5. Поверхностные волны Рэлея.
6. Скорость.
7. Спектральный подход.

В настоящее время существуют нормативные документы (ГОСТ, ОСТ), регламентирующие процедуру определения среднего размера зерна только основного металла с помощью ультразвукового метода. Определение же среднего размера зерна в сварных соединениях с помощью ультразвука нормативно-техническими документами не регламентируется и, как следствие, на АЭС не проводится.

Цель работы.

Установление зависимости амплитуды акустического

эхо-сигнала от среднего размера зерен в зоне термического воздействия сварного соединения ультразвуковым методом с целью дальнейшего продления срока эксплуатации трубопроводов и оборудования АЭС.

Содержание работы.

Рассмотрим формирование структуры зоны термического воздействия сварного соединения.

Теплота, выделяемая сварочным источником нагрева, распространяется на прилегающие ко шву участки основного металла. При нагреве и последующем остывании в этих участках изменяются структура и свойства металла. Участок основного металла, подвергающийся в процессе сварки нагреву до температуры, при которой происходят видимые или невидимые структурные изменения, называют зоной термического воздействия (околошовной зоной). Наряду с тепловым воздействием основной металл околошовной зоны, как правило, претерпевает и пластическую деформацию.

Температура нагрева различных участков зоны термического воздействия находится в пределах от точки плавления металла (у шва) до начальной температуры основного металла. Строение и размеры зоны термического воздействия зависят от химического состава и теплофизических характеристик свариваемого материала, а также от термического цикла сварки.

Зона термического воздействия является обязательным спутником шва при всех видах электрической сварки плавлением. Ширина ее изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от способа и режима сварки, состава и толщины основного металла и ряда других факторов. Меньшая ширина зоны относится к условиям сварки, характеризуемым большим перепадом температур.

На рисунке 1 приведена схема строения зоны термического воздействия при сварке однослойного стыкового шва на конструкционных сталях.

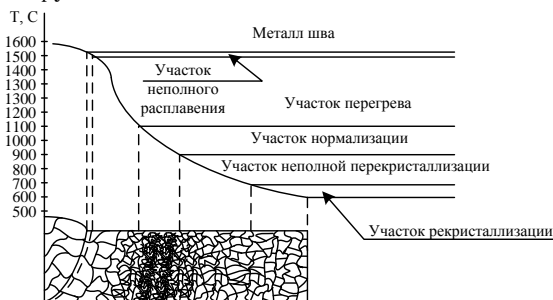


Рис. 1. Схема строения ЗТВ сварного соединения

Рассмотрим на этом примере структурные превращения в околошовной зоне. Первый участок зоны примыкает непосредственно к металлу шва. Основной металл на этом участке находится в твердожидком состоянии. Здесь и происходит собственно сварка, т.е. формирование кристаллитов шва на частично оплавленных зернах основного металла. Участок имеет небольшую ширину. По своему составу и структуре он отличается от соседнего участка основного металла. За время контакта жидкой и твердой фаз в нем протекают диффузионные процессы и развивается химическая неоднородность.

Совокупность первого участка околошовной зоны и приграничного участка металла шва именуют зоной сплавления или переходной зоной (зона неполного расплавления).

Свойства переходной зоны оказывают подчас решающее влияние на работоспособность сварной конструкции. На этом участке часто образуются трещины, ножевая коррозия, усталостные разрушения при вибрационной нагрузке, хрупкие разрушения и т. п. Поэтому дальнейшее изучение свойств переходной зоны представляет первостепенный интерес. Ширина переходной зоны зависит от природы источника нагрева, теплофизических свойств, состава и толщины (до определенных пределов) основного металла, режима сварки и других факторов.

Второй участок околошовной зоны, получивший название участка перегрева (участка крупного зерна), включает металл, нагретый до температуры примерно 1200°C до температуры плавления. Металл на этом участке претерпевает аллотропические превращения. При нагреве α -железо переходит в γ -железо, причем в результате значительного перегрева происходит рост аустенитного зерна.

Характер вторичной структуры металла на этом участке зависит от его состава и термического цикла сварки. Обычно, особенно в тех случаях, когда перегрев сочетается с последующей закалкой, металл на втором участке околошовной зоны обладает худшими свойствами (меньшая пластичность, меньшая стойкость против перехода в хрупкое состояние), чем основной металл вне зоны термического влияния. Задача выбора рациональной технологии сварки сводится в первую очередь к обеспечению наименьшего ухудшения свойств металла на этом участке.

Третий участок околошовной зоны получил название участка перекристаллизации (нормализации). Он включает металл, приобретший в процессе нагрева полностью аустенитную структуру.

Четвертый участок околошовной зоны, получивший название участка неполной перекристаллизации, включает металл, нагретый от температуры, при которой во время нагрева начинаются аллотропические превращения (~720°C), до температуры около 880°C. Металл на этом участке подвергается только частичной перекристаллизации. Поэтому здесь наряду с зернами основного металла, не изменившимися в процессе сварки, присутствуют зерна, образовавшиеся при перекристаллизации. Изменения структуры металла на этом участке значительно меньше влияют на качество сварного соединения.

На пятом участке околошовной зоны, именуемом участком старения при рекристаллизации, металл нагревается от температуры примерно 500°C до температуры несколько ниже температуры 720°C. Здесь происходит срастивание раздробленных при нагартовке (ковке, прокатке) зерен основного металла и некоторое разупрочнение его по сравнению с исходным состоянием. Снижение прочности наблюдается также при сварке основного металла, подвергнувшегося упрочняющей термообработке.

Выше была описана схема строения зоны термического воздействия при однопроходной сварке конструкционных сталей. При сварке других металлов и сплавов характер структур в околошовной зоне может быть другим.

При многопроходных швах строение околошовной зоны другое. При сварке длинными участками, когда ко времени формирования последующего прохода металл успел остыть до температуры окружающей среды, различие проявляется в менее четком строении околошовной зоны по всему сечению, кроме участка, расположенного у последнего слоя. Это обусловлено повторным термическим воз-

действием источника нагрева при наложении последующего слоя. При сварке короткими участками околошовная зона длительное время находится при малоизменяющейся температуре, что приводит к замедленному ее остыванию и соответствующему изменению ширины и строения.

Под влиянием теплового и деформационного воздействия сварочного процесса может наблюдаться ухудшение свойств металла зоны термического воздействия по сравнению со свойствами основного металла. Принятый технологический процесс сварки должен обеспечивать по возможности оптимальные условия формирования этой зоны и получение необходимого и достаточного качества металла на этом участке, от которого в значительной мере зависит работоспособность сварных конструкций.

Изучив влияние теплового воздействия сварочного процесса, возникает необходимость в определении размеров зерен, а, следовательно, и решению частной задачи в установлении зависимости давления (амплитуды) акустического поля от среднего размера зерен.

Для установления зависимости изменения амплитуды акустического сигнала от среднего размера зерен металла были изготовлены четыре образца из стали 20 (№№ 1, 2, 3 и 4) и четыре образца из стали 12Х18Н10Т (№№ 5, 6, 7, и 8), которые имели плоскопараллельные поверхности.

С целью исключения влияния на результат температуры объекта контроля, шероховатости двух поверхностей (поверхность ввода и донная поверхность) все перечисленные параметры остаются постоянными. Величина шероховатости поверхностей образцов была измерена с помощью измерителя шероховатости TR-100 и численно равнялась $Rz = 20$ мкм. Температура контролировалась с помощью пирометра Optris MS и численно равнялась 20°C . Эскиз образцов представлен на рисунке 2.

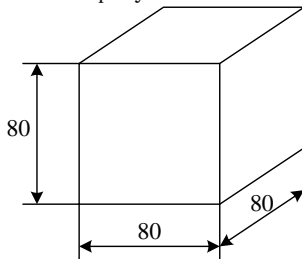


Рис. 2. Эскиз образца

Для определения среднего размера зерен металла из каждого образца было вырезано по одному темплету. В дальнейшем на поверхности каждого темплета был выполнен шлиф, площадью сечения $2,0\text{ см}^2$. Используя метод травления, были выявлены границы зерен, а в дальнейшем методом подсчета зерен были определены размеры зерен по ГОСТ 5639-82. В результате металлографических исследований были установлены следующие величины размеров зерен металла образцов: образец № 1 – $0,25$ мм, образец № 2 – $0,12$ мм, образец № 3 – $0,135$ мм, образец № 4 – $0,15$ мм, образец № 5 – $0,115$ мм, образец № 6 – $0,155$ мм, образец № 7 – $0,235$ мм и образец № 8 – $0,19$ мм.

Для определения рабочей частоты пьезоэлектрического преобразователя, применялось условие (1) с учетом формулы (2).

$$4 \leq \frac{\lambda}{d_{cp}} \leq 15, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

где c – скорость распространения ультразвуковой волны, f – частота ультразвука.

Средний размер зерен в зоне термического воздействия в сварном соединении, при котором происходит разрушение сварного соединения, равен $0,25$ мм. Рабочая частота ультразвуковых волн, с помощью которых мы можем регистрировать зерна, имеющие средний размер в диапазоне от $0,115$ до $0,25$ мм должна была удовлетворять ниже приведенным условиям.

Первое граничное условие:

$$4 \leq \frac{c}{fd_{cp}} \Rightarrow f \leq \frac{c}{4d_{cp}} \quad (3)$$

Второе граничное условие:

$$15 \geq \frac{c}{fd_{cp}} \Rightarrow f \geq \frac{c}{15d_{cp}} \quad (4)$$

Следовательно, рабочая частота пьезоэлектрического преобразователя (МГц) для определения среднего размера зерен металла равного $0,115$ мм находится в диапазоне:

$$3,45 \leq f \leq 12,9 \quad (5)$$

Рабочая частота пьезоэлектрического преобразователя (МГц) для определения среднего размера зерен металла равного $0,25$ мм находится в диапазоне:

$$1,58 \leq f \leq 5,95 \quad (6)$$

Для регистрации размеров зерен в диапазоне от $0,115$ мм до $0,25$ мм, с учетом условий (5) и (6) необходимо применять пьезоэлектрический преобразователь с рабочей частотой, которая должна находиться в диапазоне $3,45 \leq f \leq 5,95$. Следовательно, применяли прямой раздельно-совмещенный пьезоэлектрический преобразователь с рабочей частотой 5 МГц.

Настройка ультразвукового дефектоскопа А 1212 Мастер «ПРОФИ» производилась с использованием временной регулировки чувствительности таким образом, чтобы временная регулировка чувствительности была линейна и постоянна на всем пути распространения ультразвука в металле образца. После подключался прямой пьезоэлектрический преобразователь с рабочей частотой 5 МГц и этот преобразователь устанавливался на образец. Изменением длительности развертки и усиления ультразвукового прибора получали на экране ультразвукового дефектоскопа изображение первого и второго донных эхо-сигналов, при этом амплитуда первого донного эхо-сигнала соответствовала 100% размеру экрана прибора.

На каждом образце производилось по три измерения амплитуды второго донного эхо-сигнала. После каждого измерения пьезоэлектрический преобразователь смещался на величину не менее 5 мм. Усредненные результаты эксперимента представлены ниже на графике (рисунок 3 линия «эксперимент»). После чего была выполнена аппроксимация полученных результатов (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,97$) и найдено уравнение, описывающее зависимость изменения амплитуды акустического сигнала от величины среднего размера зерна металла (рисунок 3 линия «экспоненциальная (эксперимент)»).

Зависимость амплитуды сигнала от среднего размера зерен металла описывается уравнением приведенным ниже:

$$P = 3707,4e^{-32,6D}, \quad (7)$$

где D – средний размер зерен, P – амплитуда донного эхо-сигнала.

Выводы

1. С увеличением размера зерен металла амплитуда второго донного эхо-сигнала уменьшается.

2. В результате проведения этой работы была установлена зависимость амплитуды акустического эхо-сигнала от среднего размера зерен в зоне термического воздействия сварного соединения ультразвуковым методом, которая

описывается уравнением $P = 3707,4e^{-32,6D}$.

3. При ремонте оборудования и трубопроводов АЭС рассмотреть возможность использования ультразвукового метода для определения размеров зерен в зоне термического воздействия сварного соединения с целью подтверждения соблюдения режимов сварки.

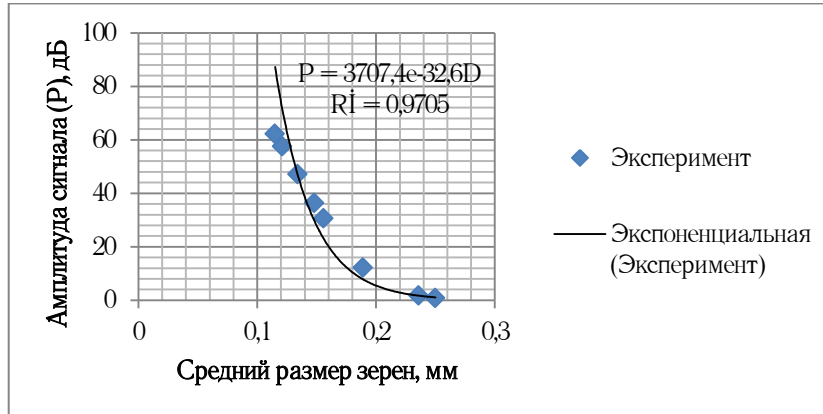


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала от среднего размера зерен

Литература:

1. Алешин Н.П., Лупачев В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия. Справочное пособие. – Минск, издательство «Высшая школа», 1987. – 276 с.
2. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Введ. 01.01.1983. – Москва, 1994 – 24 с.
3. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. – Москва, издательство «Металлургия», 1991. – 673 с.
4. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. – Санкт-Петербург, издательство Радиоавионика, 1995. – 317 с.
5. РД 153-34.1-17.404-00. Методика ультразвукового контроля размера зерна в пароперегревательных трубах из стали 12X18H12T. – Введ. 29.12.2000. – Москва, 2001 – 8 с.
6. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. – Москва, издательство «Тиссо», 2005. – 326 с.