

# **Практическая работа.**

## **Методы измерения остаточных напряжений**

### **Цель практической работы.**

Изучение различных методов измерения остаточных напряжений. Сравнение результатов. Проблема применимости различных методов.

### **Теоретическая часть.**

В последние десятилетия новые требования конструкторов современной техники сделали необходимым постановку и проведение целого ряда исследований в области разработки новых методов определения рабочих и остаточных напряжений. Это связано с тем, что исследования напряженно-деформированного состояния традиционными методами трудоемки, длительны и требуют большого объема измерительных работ с применением специального оборудования. В связи с этим актуальна задача создания методов контроля остаточных напряжений, позволяющих получать информацию на реальных конструкциях в условиях эксплуатации, оперативно, с достаточно высокой чувствительностью, точностью, при минимальном деструктирующем воздействии на объект.

Укрупнено метод определения остаточных напряжений расчленяют на две составляющие: способ воздействия на объект, нацеленный на проявление внутренних напряжений, и способ получения данных, являющихся исходными при расчете напряжений.

Специфика распределения остаточных напряжений в сварных соединениях требует разработки экспериментальных методов их определения с минимальным усреднением по базе измерения, при минимальном воздействии на объект, без специальной подготовки поверхности, бесконтактно.

С точки зрения способов воздействия, разрушающие методы позволяют получать наиболее полную информацию: данные о напряжениях по всему объему соединения. Малоразрушающие и неразрушающие методы в большинстве случаев предназначены для исследования напряженного состояния поверхности. Однако при этом первые предполагают полное разрушение, а вторые требуют лишь создания локального дефекта на поверхности при сохранении целостности объекта.

#### **1. Механические методы**

Механические методы основаны на принципе упругой разгрузки объема металла при его освобождении от остаточных напряжений путем разрезки. Измеряя деформации, возникающие при разрезке, можно вычислить остаточные напряжения по формулам теории упругости.

Разрушающие методы основаны на предположении, что разрезка или удаление части детали с остаточными напряжениями эквивалентна приложению к оставшейся части детали, на вновь появившихся поверхностях, напряжений обратного знака, равных по абсолютной величине остаточным.

К разрушающим методам можно отнести метод разреза на полосы, квадраты, кольца, разрезку на тонкие пластины перпендикулярные сварному шву, разрезку вдоль сварного шва, отрезку блока от конструкции, поэтапное срезание элементов конструкции.

Существует метод удаления напряженного слоя материала. Он реализуется или путем непрерывного травления или травлением на заданную глубину. В результате получаем распределение, как поверхностных остаточных напряжений, так и распределение по глубине.

В последние годы на основе решения задач теории трещин создана целая группа методов. В объекте создается трещиноподобный дефект, деструкция имеет вид хрупкого разрушения. Остаточные напряжения определяют с использованием соотношений линейной механики хрупкого разрушения.

Малоразрушающие методы основаны на использовании поверхностного слоя для сравнительного контроля остаточных напряжений путем выполнения на поверхности канавок, отверстий, пропилов, столбиков и контроля деформаций в зоне разрушения.

В крупных изделиях можно использовать метод столбиков – кольцевой пропил на определенную глубину. Существует метод канавки, когда тонкой фрезой на поверхности производится линейный надрез. Достаточно часто применяется и метод отверстия – высверливание отверстия (в т.ч. глухого). Этот метод удобен там, где заранее неизвестны направления главных осей напряжений.

Смысл неразрушающих механических методов состоит в фиксации имеющегося в данном конкретном образце предела текучести при растяжении или сжатии и сравнении полученных результатов с истинными величинами, характеризующими данный материал. Полученное отличие характеризует имеющиеся в данном образце остаточные напряжения. К недостаткам данной группы методов можно отнести сложности, связанные с определением начала нелинейной диаграммы, а также с необходимостью высокочувствительных регистрирующих систем, способных уловить начало течения в точке.

## 2. Физические методы

Эти методы основаны на изменении тех или иных физических свойств материалов в зависимости от степени упругого деформирования. Относительно слабая изученность необходимых свойств, применительно к измерению остаточных напряжений в сварных соединениях, существенно ограничивает их возможности. Это связано с тем, что образование сварного соединения сопровождается не только упруго-пластическими деформациями в металле, но и различными физико-химическими процессами в шве и околошовной зоне, обуславливающими остаточную неоднородность свойств материала сварного соединения.

Физические методы, в отличие от механических, не связаны с обязательным разрушением металла.

- Рентгеновский метод

Метод основан на прецизионном измерении изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Иначе: основан на явлении дифракции рентгеновских лучей при прохождении через кристаллическую решетку.

Рентгеновский метод позволяет определять напряжения в деталях сложной геометрической формы, неограниченных размеров, исследовать напряжения на весьма малых участках поверхности образца, измерять градиенты напряжений, определять мгновенные напряжения в деталях, подвергающихся периодическим нагрузкам.

Недостатки: пониженная точность при работе с сильнодеформируемыми и крупнозернистыми материалами, невозможность одновременного измерения в нескольких точках. Есть ограничения по геометрии исследуемых образцов. Значительное влияние на результат может оказать состояние поверхностного слоя (влияние шлифовки, образование окалины,ковки, прокатки, коррозии). Сравнительно высокая стоимость оборудования. Дополнительные погрешности возникают при исследовании напряжений на участках, претерпевших в процессе сварки пластическую деформацию.

- Акустические (ультразвуковые) методы

Ультразвуковой метод основывается на зависимости скорости распространения ультразвуковой волны от напряженного состояния. Это неразрушающий метод, что позволяет применять его при исследовании ответственных конструкций. Однако, неоднородность механических свойств оказывает существенное влияние на скорость упругих волн, что ограничивает применение метода в сварных конструкциях.

Метод позволяет измерять как поверхностные, так и внутренние напряжения. Чаще всего применяется для изучения одноосных остаточных напряжений. На основе нелинейной теории упругости получены соотношения, описывающие волновую скорость как функцию внутренних напряжений.

- Электромагнитные методы

Данная группа методов базируется на зависимости между магнитными свойствами металла и величиной действующих в данном объеме остаточных напряжений. Однако, помимо данной зависимости, имеется и зависимость от величины зерна, химического состава, структуры. Поэтому результаты измерений, полученные на образцах со структурной неоднородностью, например, в сварных швах, носят неоднозначный характер. Метод пригоден для измерения остаточных напряжений только в образцах из металлов и сплавов, обладающих магнитными свойствами. Глубина проникновения электромагнитных волн в ферромагнетик зависит от рабочей частоты волн. Минимальная толщина измеряемого слоя составляет 0,5мм, максимальная 1,5мм.

Измерения проводят с использованием индуктивных преобразователей. С уменьшением площади поперечного сечения магнитопровода накладного индуктивного первичного преобразователя погрешность измерения уменьшается но снижается чувствительность.

*Электромагнитный метод* значительно более производителен, чем тензометрический, оптический. Но точность его невысока. Наиболее целесообразно его применение для оперативного контроля (оценки) изменения остаточных напряжений. Для измерений остаточных напряжений используются эталоны, изготовленные из того же сплава и свободные от наличия в них остаточных напряжений.

*Магнитоупругий метод* основан на изменении магнитной проницаемости под действием механических напряжений. Изменение магнитной проницаемости обнаруживается по изменению магнитной индукции при постоянстве внешнего намагничивающего поля. Требуется предварительная тарировка метода на эталонных образцах, в том числе под нагрузкой. Измерения можно производить только на ферромагнитных материалах. Малоприменим для измерения остаточных напряжений в сварных швах из-за возникающей в них неоднородности физических свойств.

В последнее время привлекает внимание *магнитошумовой метод*. Метод основан на эффекте Баркгаузена, заключающегося в скачкообразном изменении намагниченности при плавном изменении перемагничивающего поля. Скачки в намагниченности связаны с задержкой движения доменных границ в местах концентрации остаточных напряжений. На участке контролируемого материала, подвергающегося воздействию переменного магнитного поля, фиксируется возникающий магнитный шум, как следствие скачкообразного изменения намагниченности. Параметры шума говорят о величине остаточных напряжений. Метод не требует подготовки поверхности, позволяет использовать портативную аппаратуру. Но, т.к. на показатели магнитных шумов влияют ряд факторов, таких как размер немагнитного зазора между первичным преобразователем и поверхностью изделия, изменение химсостава и структуры, метод обладает низкой

точностью. Чувствительность метода можно повысить, уменьшив частоту перемагничивания и амплитуду индукции.

- Метод магнитной памяти (ММП).

Метод основан на регистрации собственных магнитных полей рассеяния, возникающих на оборудовании в локальных зонах концентрации напряжений под действием рабочих нагрузок в магнитном поле Земли. При этом величина магнитных полей рассеяния в объекте контроля отражает тензор деформации и напряжения.

Преимущества – не влияет на состояние материала в процессе измерения.

Не используются намагничивающие устройства. Не требует предварительной подготовки поверхности.

Магнитная память металла – необратимое изменение намагниченности, обусловленное напряжениями, превышающими средний уровень внутренних напряжений, возникающими на объекте контроля под действием рабочих нагрузок в слабом магнитном поле. Для деталей машин и сварных соединений магнитная память металла проявляется в виде остаточной намагниченности, сформировавшейся после изготовления и охлаждения в магнитном поле Земли, и отображает их структурную и технологическую наследственность.

Этот метод позволяет получать объемную картину распределения внутренних напряжений с количественными характеристиками и определять величину разрушающей энергии, накопленной в активно растущей несплошности.

Контроль осуществляется путем измерения магнитного поля.

Плюсы, можно оперативно оценить:

- Оперативная оценка степени «засоренности» сварных швов дефектами, наличие развивающихся дефектов.
- Распределение ОН в зонах концентрации напряжений, а для однотипных соединений – относительный уровень напряжений в ЗКН
- Качество и эффективность ТО
- Качество сварных соединений при аттестации, выборе режимов и технологии

Недостатки:

- Необходимость дополнительного использования в ЗКН традиционных методов дефектоскопического объемного контроля (толщинометрия, УЗД, рентгенография) для установления точного вида дефекта и определения его размеров
- Отсутствие количественных критериев разбраковки по виду и по размерам внутренних дефектов (методика еще не разработана)

- Поляризационно-оптический метод измерения напряжений.

Данный метод основан на использовании упруго-оптического эффекта для измерения остаточных напряжений или напряжений от внешних нагрузок. Упруго-оптический эффект выражается в появлении в прозрачных материалах двойного лучепреломления под действием напряжений. Количественно этот эффект выражается через порядок изохромы как функции двух переменных: относительного удлинения и нормального напряжения. Исследуемый объект помещают между поляризатором и анализатором.

Остаточные напряжения определяют с использованием оптически чувствительных материалов в качестве покрытий. Для этого на определенные участки изделия

наклеиваются оптически-чувствительные пластины определенной толщины и состава (на базе эпоксидных и полиамидных смол).

Для исследования напряжений, возникающих под действием внешних усилий, используют метод моделирования. Изготавливается механически подобная модель из материалов, характеризующихся упругим двойным преломлением.

- Метод хрупких покрытий.

Метод дает возможность наблюдать напряженное состояние в изделии. На поверхность исследуемого объекта наносят специальный лак, дающий после высыхания очень хрупкое покрытие, прочно соединенное с изделием. В процессе исследования фиксируется направление и длина трещин, расстояние между смежными трещинами. Чувствительность лака определяется предварительной тарировкой. Трещины в лаке возникают лишь в результате растягивающих напряжений, поэтому для исследования сжимающих напряжений изделие подвергается предварительному сжатию. Трещины возникают при разгрузке изделия. В местах появления первых трещин имеется наибольшее напряжение в поверхностном слое.

- Контроль остаточных напряжений по электропроводности металла.

Изменения электропроводности регистрируется либо путем ее прямого измерения, либо токовихревым методом. Прямой метод измерения требует наличия аппаратуры с высокой чувствительностью, а токовихревой – прост в использовании и пригоден для промышленного применения.

Для проведения измерений требуется наличия градуировочного образца из того же материала и с той же термомеханической предысторией, что и исследуемый образец. Метод позволяет определять знак, направление и величину изменения значений остаточных напряжений.

Точность токовихревого метода существенно зависит от базы датчика и от размера и постоянства зазора между изделием и преобразователем. Основной источник погрешности – немагнитный зазор, зависящий от шероховатости поверхности детали.

- Метод твердости

Основан на изменении твердости под воздействием остаточных напряжений. Позволяет без разрушения детали определять сравнительное изменение величины остаточных напряжений в поверхностном слое материала. Можно оценить уровень и знак напряжений по разности твердостей изделия и эталонного образца, в котором заведомо отсутствуют остаточные напряжения.

Метод пригоден лишь для качественной оценки остаточных напряжений, что связано с его низкой точностью. Низкая точность объясняется тем, что в процессе вдавливания индикатора образуется зона пластической деформации, которая способствует изменению показателей остаточных напряжений.

Области применения и погрешности физических методов определения остаточных напряжений.

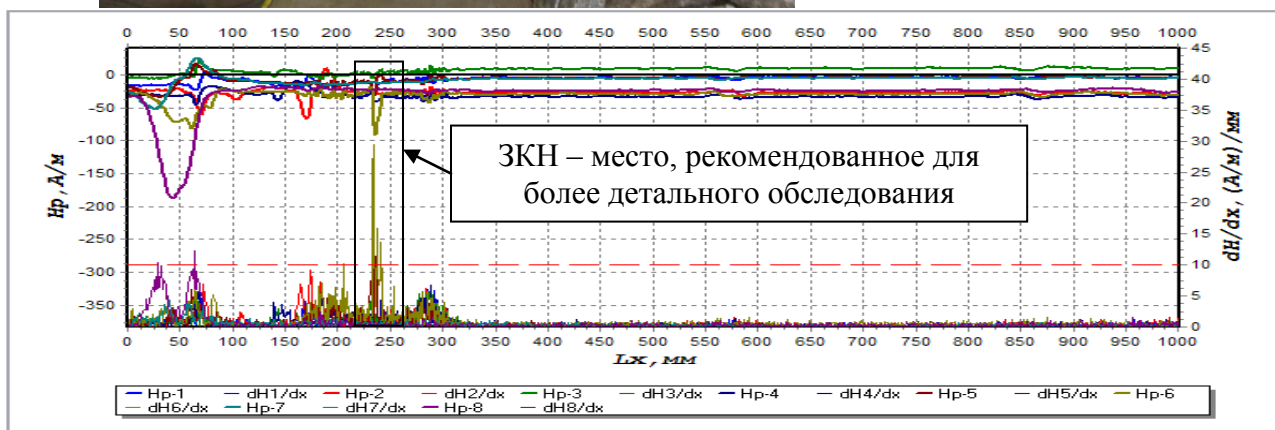
Каждый из описанных выше методов имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее достоверны механические методы. Однако они требуют «разрушения» или нарушения целостности конструкции. Кроме того, механические методы измеряют конкретные значения напряжений в конкретной области. Определение полей напряжений с различными величинами в зависимости от координаты требует проведение целого ряда измерений.

Ряд физических методов позволяет «визуализировать» поле напряжений. Они не требуют разрушения конструкции. Однако им необходимы образцы-эталоны, сделанные из того же материала, но свободные от остаточных напряжений. Без них результаты измерений могут быть интерпретированы совершенно некорректно.

Большой эффект может дать комплексное использование различных методов.

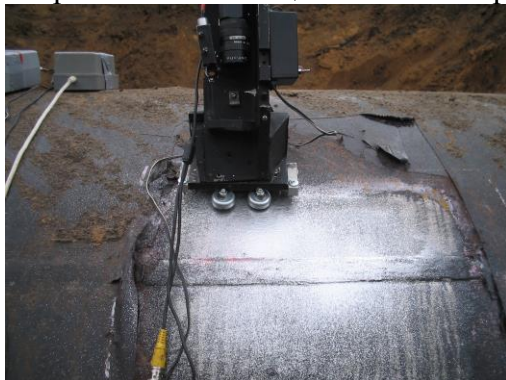
### Общий порядок выполнения работы

1. На образце трубы выполнить измерения методом магнитной памяти (в соответствии с инструкцией).



Образец магнитограммы распределением поля  $H_r$  и его градиента  $dH/dx$  и выделением ЗКН (зоны концентрации напряжений)

2. Зоны, в которых прибор показал повышенные уровни остаточных напряжений, помечаются мелом по поверхности трубы
3. Помеченные места осматриваются визуально на предмет поиска нарушения геометрии или других дефектов, возникших в результате производства, монтажа и эксплуатации, которые могли повлиять на показания магнитометра.
4. Производятся измерения остаточных напряжений в выбранных зонах (методика измерения приведена в Практической работе «Измерение полей остаточных напряжений с помощью спекл-интерферометра «ДОН-4».



5. Результаты измерений методом магнитной памяти и методов высверливания отверстия с регистрацией перемещений с помощью спекл-интерферометрии сравниваются. Делается вывод о возможностях методов.

### **Общие контрольные вопросы**

1. Какие группы методов определения остаточных напряжений вы знаете?
2. Какие преимущества и недостатки у механических методов?
3. Что необходимо для правильного измерения остаточных напряжений большинством физических методов?
4. На каком физическом принципе построен метод магнитной памяти?