



Где есть слабое звено

Контроль напряженно-деформированного состояния сварных соединений

Анатолий ДУБОВ,

генеральный директор ООО «Энергодиагностика», профессор, д.т.н. (Москва)

Одной из важных и сложных проблем современного неразрушающего контроля (НК) качества сварных соединений разных типов является поиск и определение в них «слабого звена» в единой комплексной системе факторов «структурно-механическая неоднородность – дефекты сварного шва – конструктивный и технологический концентратор напряжений», то есть зон с высокой неоднородностью напряженно-деформированного состояния или зон концентрации напряжений (ЗКН). Это важно как при изготовлении сварных соединений, так и при их эксплуатации.

Традиционные методы НК сварных соединений, указанные в отраслевых нормативных документах, направлены на выявление дефектов по критериям несплошности (макротрефов) и геометрии. Самый главный фактор, определяющий надежность сварного соединения – распределение остаточных сварочных напряжений, до сих пор в широкой практике не контролируется. Физические методы оценки напряженного состояния сварных соединений по критериям деформационной и структурной неоднородности в отраслевых документах, как пра-

вило, не представлены.

Широко применяемые методы дефектоскопии, ориентированные только на поиск несплошностей в сварных соединениях, не могут обеспечить достоверную оценку их качества. Кроме того, проблемными задачами традиционной диагностики являются контроль угловых, тавровых, тройниковых сварных соединений, соединений контактной сварки, тонких пластин. Опираясь только на результаты дефектоскопии, технологу-сварщику трудно выявлять причины дефектности шва и совершенствовать технологию сварки.

Широко применяемые методы дефектоскопии, ориентированные только на поиск несплошностей в сварных соединениях, не могут обеспечить достоверную оценку их качества

Очень важной и актуальной проблемой является также контроль остаточных напряжений (ОН) до и после термической обработки сварных соединений при выполнении различных технологических наплавов в результате коррозий. Анализ известных методов контроля ОН позволяет заявить об их непригодности к широкому практическому внедрению, прежде всего, из-за больших подготовительных работ – зачистки поверхности с удалением валика шва, построения тарировочных графиков и других.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод, что на сегодня не существует ни одного метода и прибора НК для оперативного контроля качества сварных соединений, позволяющих без специальной подготовки поверхности определять слабое звено в единой комплексной системе «концентрация напряжений – дефект».

В этой связи метод магнитной памяти металла (МПМ) представляет большие практические возможности, прежде всего, как инженерный метод экспресс-контроля качества и как метод комплексной оценки сварных соединений по магнитным полям рассеяния, возникновение которых обусловлено формированием остаточной намагниченности в процессе сварки.

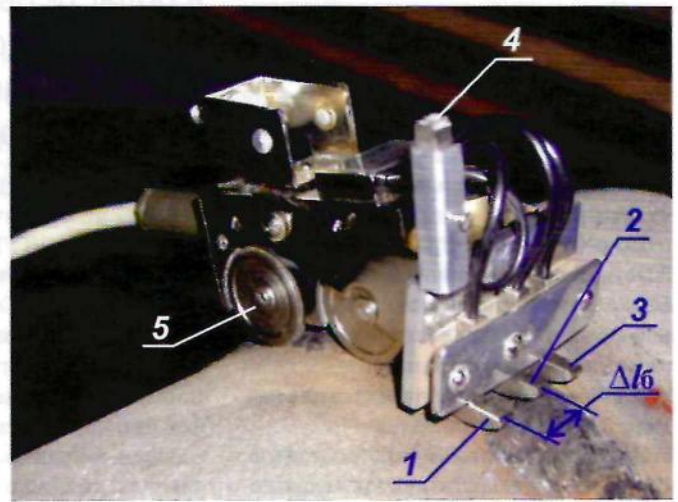


Рис. 1. Схема контроля стыковых сварных соединений труб многоканальным сканирующим устройством прибора ИКН: 1, 2, 3 – датчики сканирующего устройства для регистрации одновременно нормальной (H_y) и тангенциальной (H_x) составляющих поля на поверхности сварного шва; 4 – датчик для отстройки от внешнего магнитного поля; 5 – колеса привода измерителя длины; Δl_0 – базовое расстояние между датчиками.

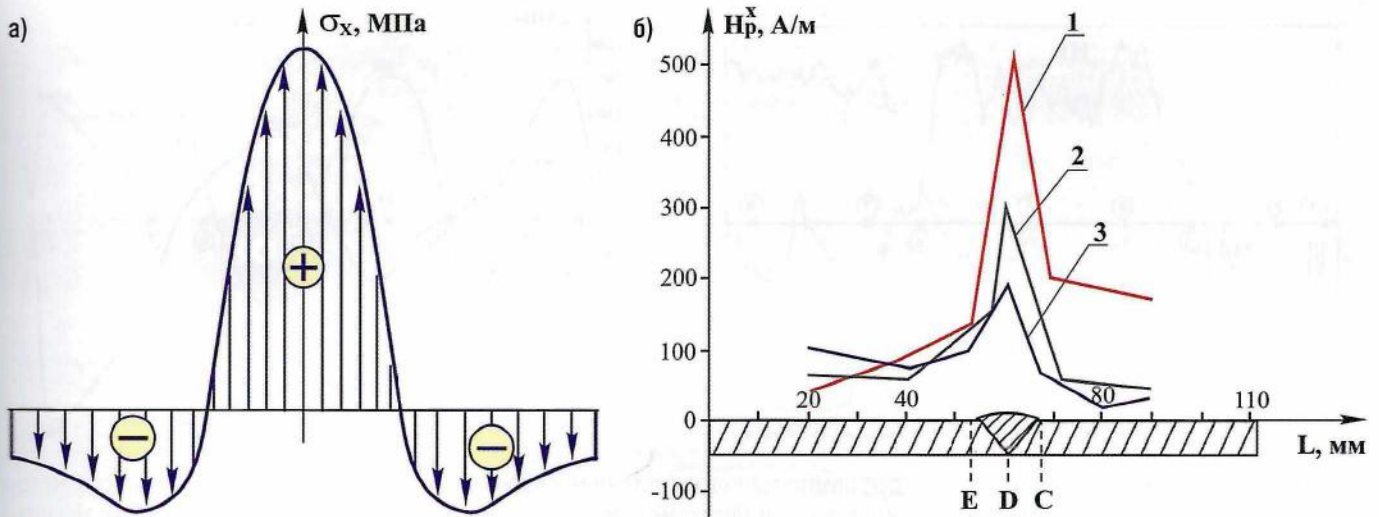


Рис. 2. Типичное распределение остаточных напряжений на сварном шве пластины (а) и распределение поля H_x перпендикулярно сварному шву пластины (б): 1, 2, 3 – разные сечения пластины.

Формирование магнитной (доменной) структуры в сварных соединениях происходит при остывании металла в магнитном поле Земли и прохождении через точку Кюри ($\sim 760\text{--}770^\circ\text{C}$ для углеродистых марок сталей). На возникающих дефектах сварки и в ЗКН образуются узлы закрепления доменных границ с выходом на поверхность сварного шва в виде собственных магнитных полей рассеяния (СМПР). В условиях, когда энергия термической деформации и напряжений на порядок больше энергии слабого внешнего магнитного поля, распределение остаточной намагниченности в металле шва об-

условлено соответствующим распределением ОН. Таким образом, путем считывания СМПР, которые формируются в процессе сварки, нам предоставляется возможность выполнять интегральную оценку фактического состояния сварного шва – определять наличие дефектов одновременно с распределением остаточных напряжений.

Контроль осуществляется с использованием специализированных приборов и сканирующих устройств (СУ). На рисунке 1 представлена схема контроля стыковых сварных соединений труб.

Зачистки и какой-либо подготовки поверхности сварного шва не требует-

ся. Как видно из рисунка 1, датчики 1 и 3 располагаются при контроле по зонам термического влияния с обеих сторон шва, датчик 2 размещен посередине, а датчик 4 развернут в противоположную сторону и предназначен для отстройки от внешнего магнитного поля.

Критерием оценки результатов контроля методом МПМ при выявлении ЗКН по магнитным параметрам является комплекс градиентов для каждой составляющей напряженности поля на одинаковом расстоянии Δx между соседними точками контроля (dH_y/dx , dH_x/dx , dH_z/dx). Единица измерения градиента поля – A/m^2 .

Оценка напряженного состояния сварного соединения в перпендикулярном направлении к шву выполняется по градиенту магнитного поля на базовом расстоянии Δl_0 между одноименными каналами измерений. Например, градиент между

В отличие от других методов контроля остаточных напряжений, метод МПМ интегрально оценивает НДС металла шва с учетом упругой и пластической деформаций

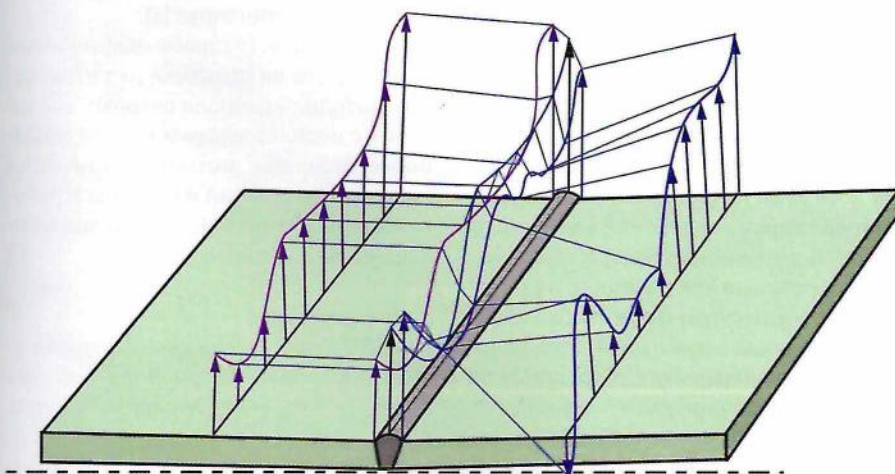


Рис. 3. Результаты измерения нормальной составляющей поля H_y , характеризующей распределение остаточных напряжений и деформаций после сварки двух одинаковых пластин.

Поиск и определение «слабого звена» в единой комплексной системе факторов «структурно-механическая неоднородность – дефекты сварного шва – конструктивный и технологический концентратор напряжений» важны как при изготовлении сварных соединений, то есть непосредственно после сварки для оптимизации технологического процесса, так и при их эксплуатации.

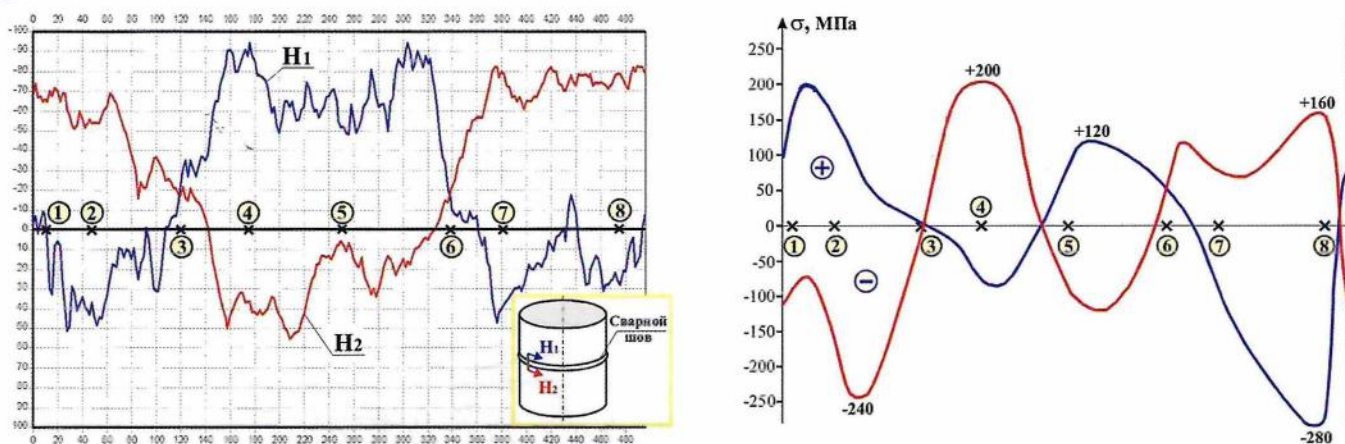


Рис. 4. Результаты контроля напряженно-деформированного состояния сварного шва трубы ($\varnothing 160 \times 8$ мм, сталь 3) методом магнитной памяти металла (а) и рентгеновским дифрактометром (б): H_1 и H_2 – распределение напряженности магнитного поля H_y , соответственно, по первому и второму каналу измерений; ①...⑧ – точки измерения напряжений рентгеновским дифрактометром симметрично с двух сторон шва по ЗТВ.

нормальными составляющими поля H_{y1} и H_{y3} (рис. 1) будет равен $|H_{y1} - H_{y3}| / \Delta L_0$.

Эффективность оценки фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) сварных соединений рассмотрим на следующих примерах.

На рисунке 2а представлено типичное распределение остаточных напряжений на сварном соединении пластин. На рисунке 2б показано распределение тангенциальной составляющей магнитного поля рассеяния H_x , которое фиксируется при контроле методом МПМ. Из рисунков видна хорошая качественная сходимость этих распределений.

На рисунке 3 приведены результаты измерения нормальной составляющей поля H_y , характеризующей распределение остаточных напряжений и деформаций после сварки двух одинаковых пластин. Пластины в процессе сварки были свободны и прогнулись немного вверх. Распределение поля H_y в рассматриваемом случае наглядно показывает влияние геометрических размеров пластин и их коробления на уровень и характер распределения остаточных сварочных деформаций и напряжений.

На рисунке 4а представлено распределение поля H_y на сварном соединении трубы, зафиксированное в зонах термического влияния шва, а на рисунке 4б – распределение остаточных напряжений, измеренное на сварном шве рентгеновским дифрактометром в этих же зонах. Магнитограмма на рисунке 4а характеризуется разнонаправленным изменением нормальных составляющих магнитного поля между каналами измерений H_1 и H_2 , которые были установлены на базовом расстоянии ΔL_0 (рис. 1). Такое

распределение СМПП на сварном соединении со значительным градиентом на базовом расстоянии между каналами измерений, установленными в зоне термического влияния, характеризует высокое значение знакопеременных ОН в перпендикулярном направлении к шву.

Здесь также следует отметить, что магнитограмма на рисунке 4а соответствует упругопластическим остаточным напряжениям, сформировавшимся в металле шва, а распределение ОН на рисунке 4б, по данным контроля рентгеновским дифрактометром, соответствует области упругой деформации. Известно, что в металле лобового шва имеют место упругая и пластическая деформации.

Метод МПМ интегрально оценивает напряженно-деформированное (энергетическое) состояние металла шва с учетом упругой и пластической деформаций. Рентген и многие другие методы контроля ОН, которые калибруются в области упругой деформации, делают оценку только упругой составляющей ОН. В этом заключается принципиальное отличие метода МПМ от других методов контроля ОН.

В мировом опыте неразрушающего контроля до сих пор не решена проблема контроля качества контактной точечной сварки соединений различных узлов оборудования. Эта проблема особенно актуальна для серийного или массового производства и при сварке особо ответственных элементов. В этих условиях, когда на надежность соединений контактной сварки влияет множество факторов, необходим метод НК, который бы интегрально оценивал состояние металла сварного соединения.

По договору между ООО «Энергодиагностика» и южнокорейской фирмой LG разработаны способ и устройство кон-

троля методом МПМ контактной сварки клапана с поршнем, используемым в компрессорном производстве.

Критерии отбраковки по методу МПМ в ходе выполнения экспериментальных работ подтверждались разрушением образцов при испытаниях на циклическую прочность и металлографическим исследованием. В этих сравнительных экспериментах была достигнута эффективность контроля 96%.

В настоящее время в технологии контактной сварки широко используется робототехника. А в неразрушающем контроле до сих пор применяется выборочная проверка отдельных точек сварки путем удара на отрыв. Выполненные работы показали принципиальную возможность организации автоматического контроля контактной сварки с использованием роботов.

Рассматриваемая технология НК сварных соединений доведена до уровня международного стандарта [1].

В энергетике, газпроме, нефтехимии применяется на практике ряд отраслевых методик контроля сварных соединений с использованием метода МПМ. Более подробно методики контроля сварных соединений изложены в работе «Метод магнитной памяти металла и приборы контроля» [2].

Литература:

1. ISO 24497-2:2020(E). *Неразрушающий контроль – Магнитная память металла – Часть 2: Контроль сварных соединений.*
2. Дубов А.А., Дубов Ал.А., Колокольников С.М. *Метод магнитной памяти металла и приборы контроля / Учебное пособие, 5-е изд. М.: ИД «Спектр», 2012 год. 395 с.*