

УДК 681.142

## Использование магнитной памяти металла и компьютерных приборов для контроля качества сварных соединений

А. А. Дубов, Е. А. Дёмин  
ООО "Энергодиагностика", Москва, Россия

*Рассмотрены проблемы неразрушающего контроля (НК) качества сварных соединений оборудования и конструкций. Показаны практические возможности метода магнитной памяти металла (ММП) для неразрушающего экспресс-контроля сварных соединений по неоднородности напряженно-деформированного состояния (НДС) одновременно с их дефектоскопией. Приведены краткие сведения о компьютерных приборах неразрушающего контроля для работы методом ММП.*

Одна из важных и сложных проблем современного неразрушающего контроля качества сварных соединений разных типов — поиск и определение в них "слабого звена" в единой комплексной системе факторов "структурно-механическая неоднородность — дефекты сварного шва — конструктивный и технологический концентратор напряжений", т. е. зон с высокой неоднородностью напряженно-деформированного состояния или зон концентрации напряжений (ЗКН). Это важно как при изготовлении сварных соединений, т. е. непосредственно после сварки, для оптимизации технологического процесса, так и при их эксплуатации. При этом наиболее опасным является случай, когда дефекты сварного соединения, являясь концентраторами напряжений, совпадают с максимальными напряжениями от рабочих нагрузок.

Анализ критичности различных технологических дефектов сварных соединений в работе [1] показал, что, например, в ряде случаев концентрация напряжений, вызванная формой стыкового шва, может быть более опасной, чем от выявленных внутренних технологических дефектов в виде пор и включений. С другой стороны, технологические дефекты в виде пор, включений, подрезов, отдельных несплавлений в сварных швах, как правило, работают как объемные концентраторы напряжений, а непровары на значительной длине шва и форма шва — как плоские концентраторы напряжений. Поэтому наиболее объективно проводить оценку качества сварных соединений методом НК, позволяющим определять фактическую концентрацию напряжений.

Анализ известных методов НК и измерения напряжений и деформаций в металле и сварных соединениях позволяет выявить их основные недостатки:

- локальность контроля, большая трудоемкость и непригодность для контроля протяженных участков и поверхностей конструкций;
- необходимость специальной подготовки контролируемой поверхности металла (зачистка, намагничивание и пр.);
- несравнимость глубины и площади контроля разными методами НК и, как правило, значительная погрешность результатов;
- сложность определения положения датчиков контроля по отношению к направлению действия главных напряжений и деформаций;

- обязательность построения градуировочных графиков на предварительно изготовленных образцах;
- большая неопределенность попасть при контроле в ЗКН (или определить ее);
- возможность проведения измерений только в тонком поверхностном слое металла (менее 0,1 мм) или определения средних по толщине напряжений [2];
- относительно невысокая оперативность контроля.

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”, т. е. зону развивающегося дефекта.

В этой связи ММП металла, по нашему мнению, представляет большую перспективу и 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 в магнитном поле Земли.

Формирование магнитной (доменной) структуры в сварных соединениях происходит при остывании металла в магнитном поле Земли при прохождении через точку Кюри (768 °С) одновременно с кристаллизацией. На возникающих дефектах сварки образуются узлы закрепления доменов с выходом на поверхность сварного шва в виде магнитных полей рассеяния (МПР). Таким образом, путем считывания МПР, которые формируются в процессе сварки, нам представляется возможность выполнить оценку фактического состояния сварного шва. При этом МПР напрямую отображают все дефекты сварки и фактические остаточные напряжения.

В специальных экспериментальных исследованиях установлена степень влияния на формирование остаточной намагниченности и, соответственно, МПР собственного магнитного поля сварки и схемы заземления, условий закрепления свариваемых узлов и деталей, их расположения относительно поля Земли, параметров и технологии сварки.

Установлено, что при одинаковых параметрах сварки и других вышеперечисленных факторах различие в распределении остаточной намагниченности и МПР в однотипных сварных соединениях обусловлено различием в распределении остаточных сварочных напряжений и засоренностью дефектами сварки.

В сварных конструкциях под действием рабочих нагрузок остаточная намагниченность перераспределяется и необратимо изменяется в направлении действия главных напряжений. Эта магнитная текстура сохраняется в металле сварного шва после снятия рабочей нагрузки, т. е. металл “запоминает” области максимального деформационного воздействия. Поэтому необратимое изменение намагниченности в областях действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок, а также остаточную намагниченность деталей и сварных соединений после их изготовления назвали “магнитной памятью металла”. В то же время, несмотря на многочисленные убедительные практические результаты, эффект ММП требует дополнительного изучения.

Выполненный комплекс исследований позволяет сделать вывод о том, что величина МПР в каждой точке контроля отражает тензор магнитной проницаемости, соответствующей тензору остаточных напряжений и деформаций. Выявлена возможность качественной и количественной оценки уровня и направления распределения остаточных сварочных напряжений.

ММП на данном этапе развития не дает прямую количественную оценку величины действующих (или остаточных) напряжений, но по сравнению с известными методами НК напряжений имеет ряд преимуществ:

- применение метода не требует специальной подготовки контролируемой поверхности металла (локальной или протяженной);
- в поле остаточных или действующих напряжений места концентрации напряжений (ЗКН) заранее неизвестны и определяются в процессе контроля;
- контроль выполняется портативными приборами НК, имеющими малые габаритные размеры, автономное питание и регистрирующее и запоминающее устройства с возможностью их документирования в виде графических распечаток;
- возможность упрощения и уточнения процедуры и объемов штатной дефектоскопии;
- высокая производительность (до 100 м/ч и более в зависимости от сложности и вида геометрической формы контролируемой поверхности), а по трудоемкости контроля метод относится к экспресс-контролю.

Наиболее эффективно применение ММП в сочетании с УЗД и другими методами НК.

При контроле качества любых сварных соединений на основе ММП оперативно можно оценить:

- степень “засоренности” сварных швов дефектами (число мест с возможными дефектами), наличие развивающихся дефектов;
- распределение остаточных напряжений и ЗКН, а для однотипных соединений — относительный уровень напряжений в ЗКН;
- качество и эффективность термообработки;
- качество сварных соединений при аттестации, выборе, оптимизации и сертификации технологий сварки.

К недостаткам ММП при контроле качества сварных соединений следует отнести:

- необходимость дополнительного использования в ЗКН традиционных методов дефектоскопического объемного контроля (толщинометрия, УЗД, рентгенография) для установления точного вида дефекта и определения его размеров (за исключением наружных поверхностных трещин);
- отсутствие (на данном уровне исследований) количественных критериев разбраковки (допустимо—недопустимо) по виду и размерам внутренних дефектов.

Методология контроля изложена в публикациях [3—6]. На рис. 1 показана схема контроля стыковки сварных соединений труб четырехканальным датчиком прибора ИКН-1М-4.

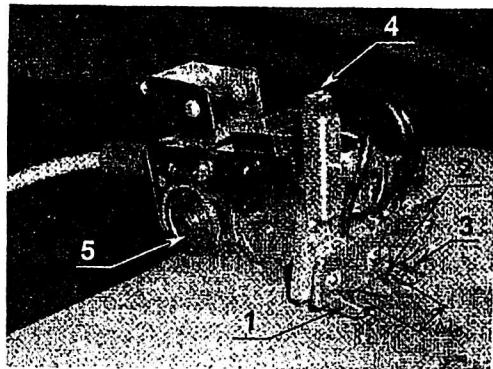
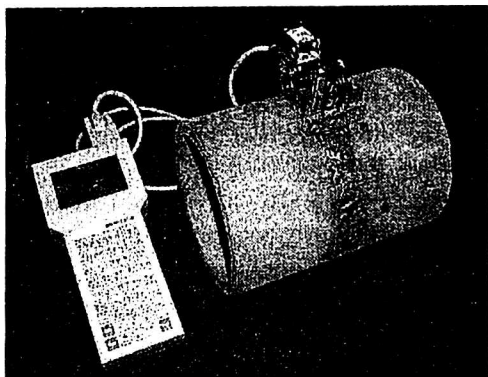


Рис. 1. Схема контроля стыковых сварных соединений труб четырехканальным датчиком прибора ИКН-1М-4:

- 1, 2, 3 — феррозондовые преобразователи сканирующего устройства для регистрации поля  $H_p$  на поверхности сварного шва; 4 — феррозондовый преобразователь для отстройки от внешнего магнитного поля  $H_p$ ; 5 — колеса привода измерителя длины;  $\Delta l_0$  — базовое расстояние между феррозондовыми преобразователями

Для выполнения измерений магнитного поля  $H_p$  используются специализированные портативные малогабаритные приборы НК — магнитометры типа ИКНМ-2ФП (одноканальный режим, цифровая индикация, блок памяти) или ИКН-1М-4 (многоканальный 1—4 режима работы, сканирующее устройство, экран, компьютерная обработка).

Приборы имеют автономное питание. В качестве датчиков используются феррозондовые преобразователи (полимеры или градиентометры). При перемещении или расположении датчика на поверхности металла (или на небольшом расстоянии от поверхности металла) в обмотке феррозонда при взаимодействии с остаточным магнитным полем возникает сигнал постоянного тока, который принимается и обрабатывается электронным блоком прибора. При регистрации (или пересечении) области с нулевым значением нормальной составляющей  $H_p$  остаточного магнитного поля магнитометр дает звуковой сигнал, информирующий о смене знака поля, являющегося одним из основных диагностических признаков наличия ЗКН в металле шва.

Специализированные приборы концентрации напряжений магнитометрические ИКНМ-2ФП и ИКН-1М-4 изготавливаются предприятием ООО «Энергодиагностика» (Москва) и сертифицированы в Госстандарте Российской Федерации.

Качество сварных соединений при контроле ММП оценивается по характеру распределения магнитного поля  $H_p$  вдоль поверхности шва и по зонам термического влияния. При этом наличие дефекта определяется по локальному «всплеску» магнитного поля  $H_p$ , а уровень концентрации остаточных напряжений косвенно определяется по градиенту изменения магнитного поля

$$|\Delta H_p| \text{ между соседними точками контроля } \Delta l_k \left( K_{\text{инт}} = \frac{|\Delta H_p|}{\Delta l_k} \right).$$

Максимальное значение  $K_{\text{инт max}} = \frac{|\Delta H_p|}{\Delta l_k}$  характеризует ЗКН, где  $|\Delta H_p|$  — максимальное изменение магнитного поля  $H_p$  между точками контроля на

расстоянии  $\Delta l_k$  между ними. Среднее значение  $K_{ср}$  для всего периметра сварного шва (или продольного участка) определяется по зависимости

$$K_{ср} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta H_p^i|}{\Delta l_k^i},$$

где  $|\Delta H_p^i|$  — изменение поля  $H_p$  между двумя соседними точками контроля на участке  $\Delta l_k^i$ ;

$n$  — количество участков контроля.

На основе опытных данных можно разделить две категории качества сварного соединения:

- допустимо — для  $K_{ин\ max} \leq NK_{ср}$ ;
- недопустимо — для  $K_{ин\ max} \geq NK_{ср}$ .

Значение коэффициента  $N$  характеризует прочностные свойства металла шва и определяется технологией сварки, маркой стали и типоразмером сварного соединения.

Для выявления ЗКН, расположенных по ширине сварного шва между двумя датчиками контроля (каналами измерений), дополнительно определяется

значение  $K_{max} = \frac{|\Delta H_p^6|}{\Delta l_6}$  и  $K_{ср}^6$ , где  $|\Delta H_p^6|$  — максимальное изменение поля

между двумя датчиками контроля (каналами измерений) ( $H_{p1}$  и  $H_{p2}$ ) на базовом расстоянии  $\Delta l_6$ , равном ширине сварного шва.

Рассмотрим отдельные результаты контроля качества сварных соединений ММП металла на образцах сварных соединений.

На рис. 2 и 3 приведены результаты контроля качества сварных стыковых соединений пластинчатых образцов. Образцы сваривали в нижнем положении ручной аргонодуговой сваркой и полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа.

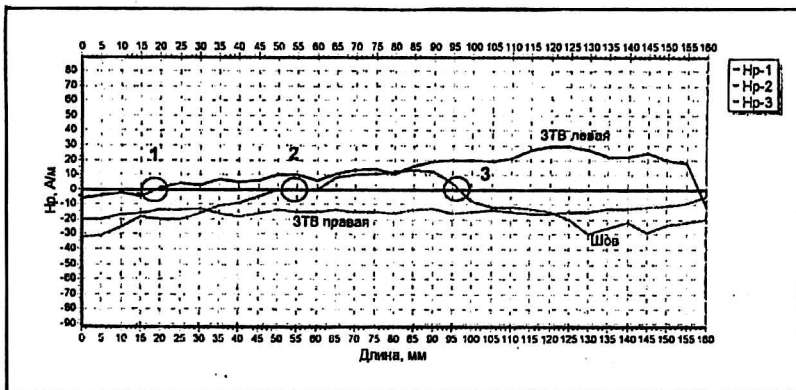


Рис. 2. Сварное стыковое соединение пластин  $100 \times 50 \times 2,5$  мм.  
Сварка аргонодуговая ручная за два прохода.  
Пластины в свободном состоянии при сварке

На рис. 2 по относительно однородному распределению поля  $H_p$  выделены три ЗКН невысокого уровня на участках 1, 2, 3. В этом случае можно говорить об удовлетворительном качестве сварного соединения, а незначительные

ЗКН образованы неравномерной деформацией пластин слева и справа от стыкового сварного шва при сварке.

Пример, приведенный на рис. 3, показывает высокую неоднородность поля остаточных сварочных напряжений в ЗТВ, а в сварном шве выделены участки 1 и 2 с зонами КН и с внутришовными дефектами. Вид внутреннего дефекта сварного шва требует уточнения одним из объемных методов дефектоскопии (УЗД, рентгено- или  $\gamma$ -графия), т. е. использования дополнительного метода дефектоскопического НК.

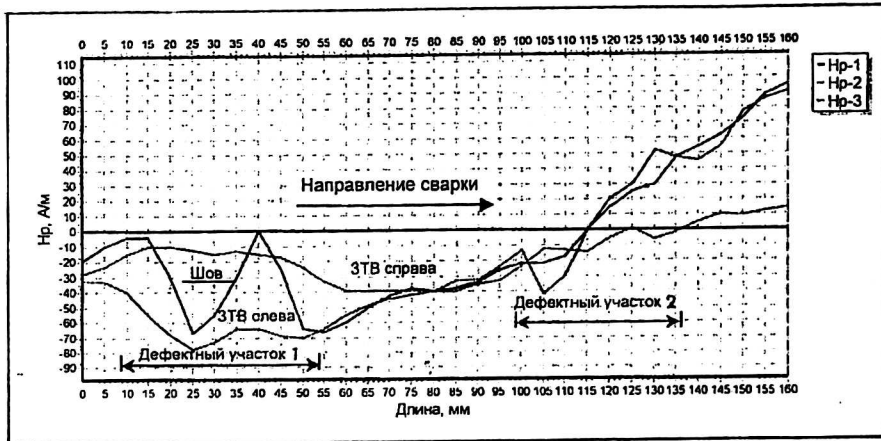


Рис. 3. Сварное стыковое соединение пластин 200x50x8 мм.

Сварка в углекислом газе полуавтоматическая. Участки несплавления во втором проходе сварного шва (вертикальное положение при измерении  $H_p$ )

Рассмотрим отдельные примеры контроля качества сварных соединений с использованием ММП из практической диагностики.

Так, на рис. 4 показаны результаты контроля двух стыковых соединений трубопровода  $\varnothing 1020 \times 16$  мм на действующем газопроводе. Распределение поля  $H_p$  вдоль периметра сварных соединений регистрировалось в двухканальном режиме. Видно различное напряженно-деформированное состояние по неоднородности распределения  $H_p$ .

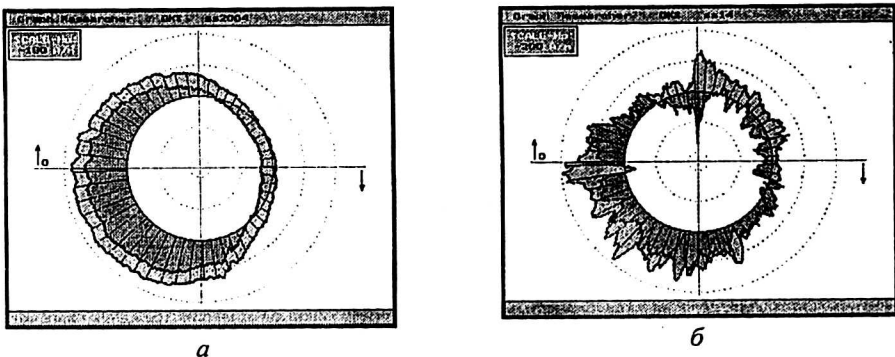


Рис. 4. Результаты контроля стыковых сварных соединений труб  $\varnothing 1020 \times 16$  мм, Ст. X70 на действующем газопроводе:

а — распределение поля остаточной намагниченности  $H_p$  с двух сторон стыка, характеризующее его удовлетворительное состояние; б — неудовлетворительное состояние стыка с зонами концентрации напряжений

Рис. 4, а характеризует относительно однородное распределение  $H_p$  по ЗТВ с обеих сторон от сварного шва с некоторым смещением относительно оси трубы, что характеризует удовлетворительное качество сварного соединения. Распределение магнитного поля  $H_p$  на рис. 4, б характеризует неудовлетворительное качество сварного шва с явно выраженными зонами концентрации напряжений ЗКН, т. е. имеет место высокая неоднородность напряженно-деформированного состояния сварного соединения.

В ЗКН зафиксирован максимальный градиент поля  $H_p$  между каналами измерения ( $K_{ин} \geq 10$ ). В этих ЗКН при дополнительном контроле УЗД выявлены дефекты в корне шва чуть ниже предельно допустимых по нормам ВСН 012—88. Эти зоны предложено выделить в контрольные при последующих обследованиях технического состояния сварных соединений трубопровода.

На рис. 5 приведен пример контроля качества стыковых сварных соединений с кольцевыми швами на корпусе конвертора аммиака (подогреватель питательной воды) в АО "Невинномысский Азот". Размеры окружной геометрии конвертора  $\varnothing 1550 \times 200$  мм. Конвертер изготовлен в Италии из стали

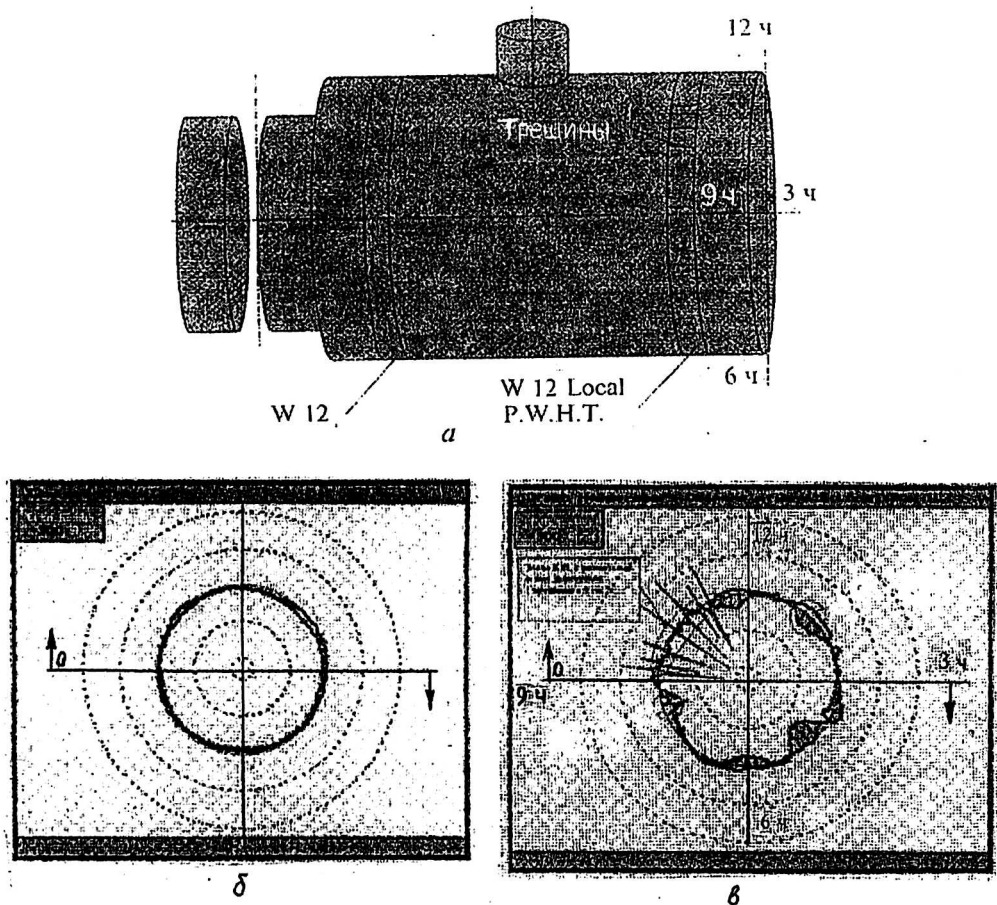


Рис. 5. Расположение сварных стыков:

а — W12 и W12 Local P.W.H.T. на подогревателе питательной воды "AMMONIA CONVERTER": 123-с2; б — однородное напряженно-деформированное состояние металла сварного соединения W12; в — неоднородность напряженно-деформированного состояния сварного соединения W12 Local

СМ2-1G ( $\sigma_B = 620$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 540$  МПа) и имел наработку  $\sim 20$  тыс. ч на рабочих параметрах азотно-водородной смеси  $P = 240$  атм и  $T = 330$  °С (температура металла на наружной поверхности более 100 °С). Контроль ММП проводили на работающем конвертере. На рис. 5, б показаны результаты контроля неповрежденного сварного соединения W12, имеющего однородное распределение поля  $H_p$ , т. е. однородное напряженно-деформированное состояние металла сварного соединения. Рис. 5, в показывает высокую неоднородность напряженно-деформированного состояния сварного соединения W12 Local, особенно интенсивную скачкообразную, на участке между 9—12 ч. На этом участке сварного соединения образовались поперечные сварному шву трещины различной глубины, включая отдельные сквозные (см. рис. 5, а). На этом же сварном соединении имеются еще две зоны высокой неоднородности напряженно-деформированного состояния (между 8—9-ю и 13—14-ю ч), где также активно развиваются повреждения или могут иметь место реальные дефекты. По этим зонам также необходим дополнительный дефектоскопический объемный контроль известными методами НК.

### Л и т е р а т у р а

1. Макаров И. И. Критерии оценки технологических дефектов в сварных конструкциях// Сварочное производство. 1975. № 12. С. 9—11.
2. Экспериментальная механика. Т. 2/Под ред. А. Кобаяши. — М.: Мир, 1990.
3. Дубов А. А. Экспресс-метод контроля сварных соединений с использованием магнитной памяти металла//Сварочное производство. 1996. № 11. С. 33—36.
4. РД 51-1—98. Методика оперативной компьютерной диагностики локальных участков газопроводов с использованием магнитной памяти металла. — М.: Энергодиагностика, 1998.
5. РД 34.17.435—95. Неразрушающий магнитный метод диагностирования сварных соединений трубных систем котлов и трубопроводов энергетических установок. — М.: Энергодиагностика, 1996.
6. Дубов А. А., Демин Е. А., Стеклов О. И., Вайсберг П. М. Оперативная диагностика газопроводов//Газовая промышленность. 1999. № 3. С. 47—49.

## Application of the metal magnetic memory and computer devices for control of welding quality

A. A. Dubov, E. A. Demin

ООО "Energodagnostika Ltd.", Moscow, Russia

*Problems of nondestructive testing (NT) of welding quality are considered in the article. Shown are possibilities of the metal magnetic memory (MMM) method for an express-control. Given are short data on computer devices for the NT work with the MMM method.*