

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА

А. А. ДУБОВ, д-р техн. наук (ООО «Энергодиагностика», Москва, РФ)

Сварка существует более 100 лет, а самый главный фактор, определяющий надежность сварного соединения — распределение остаточных сварочных напряжений — до сих пор не контролируется из-за отсутствия методов НК, пригодных для использования в практике. В статье показана связь между параметрами собственного магнитного рассеивания и напряженным состоянием сварных соединений. Представлены критерии оценки состояния сварных соединений по результатам контроля методом магнитной памяти металла. Приведены отдельные примеры результатов контроля качества сварных соединений.

Welding has been in existence for more than 100 years, and the main factor determining welded joint reliability, namely, distribution of residual welding stresses, still cannot be controlled, because of the absence of NDT methods suitable for application in practice. A correlation is shown between the parameters of inherent magnetic dispersion and stressed state of welded joints. Criteria of assessment of the condition of welded joints by the results of control by metal magnetic memory method are presented. Some examples of the results of welded joint quality control are given.

Для объективной оценки надежности сварных соединений недостаточно выявления дефектов с определением геометрических размеров и мест их расположения. Необходима интегральная диагностика с учетом напряженно-деформированного состояния, позволяющего определить степень опасности дефектов и, в конечном итоге, достоверно оценить надежность сварного соединения и принять решение об его ремонте или замене.

В настоящее время в России разработан и успешно внедряется в различных отраслях промышленности принципиально новый метод диагностики металла изделий и сварных соединений, основанный на использовании эффекта магнитной памяти металла (МПМ).

Метод МПМ — метод НК, основанный на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР), сформировавшегося естественным образом в процессе сварки. Путем считывания СМПР предоставляется уникальная возможность выполнять интегральную оценку фактического состояния сварного шва с учетом структурной неоднородности, распределения остаточных напряжений и дефектов сварки.

Одной из важных и сложных проблем современного 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», т. е. зон с высокой неоднородностью напряженно-деформированного состояния или зон концентрации напряжений (ЗКН). Это важно как при изготовлении сварных соединений, т. е. непосред-

ственно после сварки для оптимизации технологического процесса, так и при их эксплуатации.

Традиционная дефектоскопия, ориентированная только на поиск несплошностей в сварных соединениях, не может обеспечить достоверную оценку их качества. Кроме того, проблемными задачами традиционной дефектоскопии 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.

Очень важной и актуальной проблемой является также контроль остаточных напряжений (ОН) до и после термической обработки сварных соединений, при выполнении различных технологических наплавов, контроль ОН в результате коробления.

Анализ известных методов НК остаточных напряжений сварных соединений позволяет заявить об их непригодности к широкому практическому внедрению прежде всего из-за большого объема подготовительных работ (зачистка поверхности с удалением валика шва, построение тарировочных графиков и др.).

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 МПМ представляет большие практические возможности прежде всего как инженерный метод экспресс-контроля качества и как метод комплексной оценки сварных соединений по магнитным полям рассеяния, возникнове-



ние которых обусловлено формированием остаточной намагниченности в процессе сварки.

Формирование магнитной (доменной) структуры в сварных соединениях происходит одновременно с кристаллизацией при остывании металла в магнитном поле Земли и прохождении через точку Кюри (для железа ~ 768 °С). На возникающих дефектах сварки образуются узлы закрепления доменных границ с выходом на поверхность сварного шва в виде СМПР. Таким образом, путем считывания СМПР, которые формируются в процессе сварки, нам предоставляется возможность выполнять интегральную оценку фактического состояния сварного шва. Одновременно с дефектоскопией предоставляется возможность выполнять оценку напряженно-деформированного состояния сварного соединения.

Контроль осуществляется с использованием специализированных приборов. На рис. 1 представлена схема контроля стыковых сварных соединений труб. Зачистки и какой-либо подготовки поверхности сварного шва не требуется. При контроле используется естественная намагниченность, сформировавшаяся в процессе сварки.

На рис. 2, *а* показано типичное распределение остаточных напряжений на сварном соединении пластин, на рис. 2, *б* — распределение тангенциальной составляющей магнитного поля рассеяния H_p^x , которое фиксируется при контроле методом МПМ. Из рисунков видна хорошая качественная сходимость этих распределений.

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

На рис. 4, *а* показано распределение поля H_p на сварном соединении трубы, зафиксированное в ЗТВ шва, на рис. 4, *б* — распределение остаточных напряжений, измеренное на сварном шве рентгеновским дифрактометром в этих же зонах.

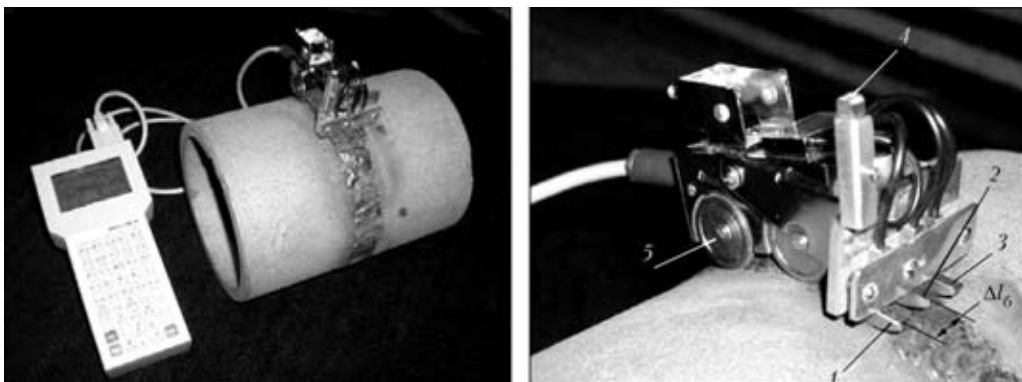


Рис. 1. Контроль стыковых сварных соединений труб четырехканальным датчиком прибора ИКН-1М-4: 1-3 — феррозондовые преобразователи сканирующего устройства для регистрации поля H_p на поверхности сварного шва; 4 — феррозондовый преобразователь для отстройки от внешнего магнитного поля H_p ; 5 — колеса привода измерителя длины; ΔL_6 — базовое расстояние между феррозондовыми преобразователями

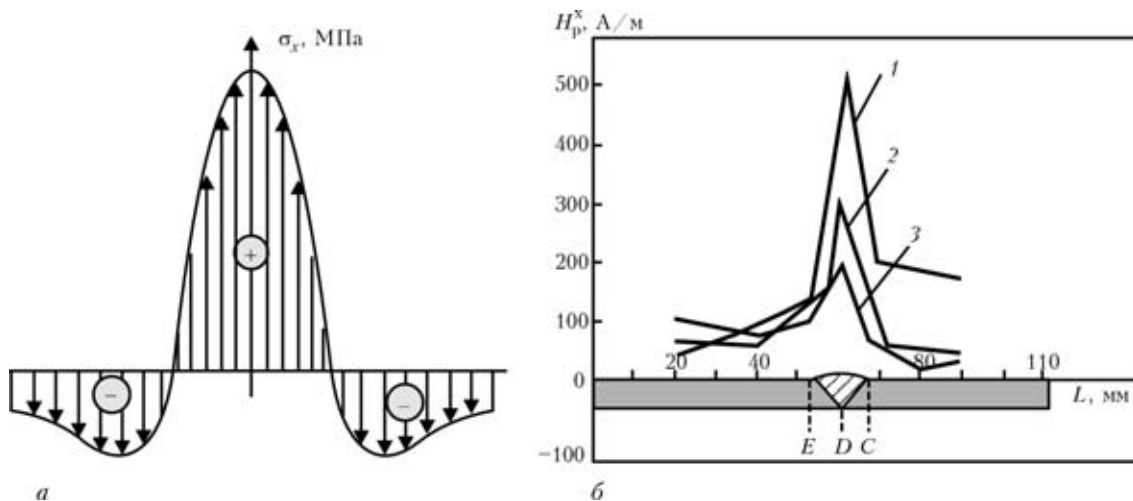


Рис. 2. Типичное распределение остаточных напряжений на сварном шве пластины (*а*); распределение поля H_p^x перпендикулярно сварному шву пластины (*б*): 1-3 — разные сечения пластины; *EC* — зона термического влияния; *D* — центр шва



На рис. 5 представлены результаты контроля участка сварного стыка паропровода (диаметром 273×32, 12Х1МФ) с применением метода МПМ и анализа макроструктуры шлифа.

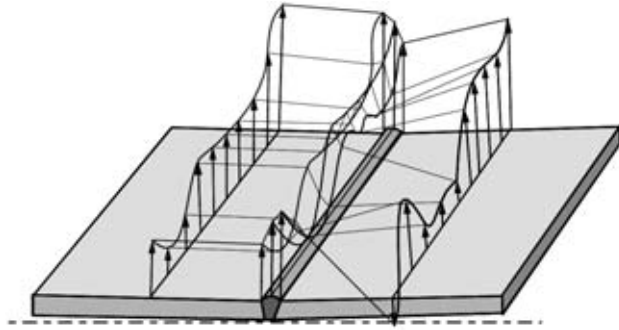
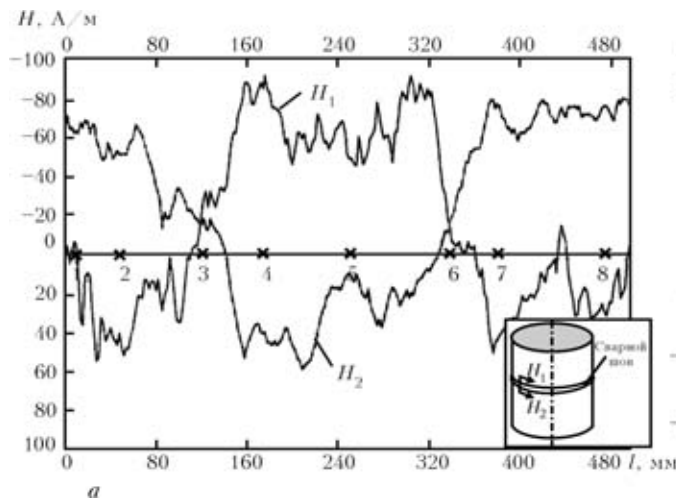


Рис. 3. Результаты измерения нормальной составляющей поля H_p , характеризующей распределение остаточных напряжений и деформаций после сварки двух одинаковых пластин



Рассмотрим далее возможности метода МПМ при контроле контактной сварки.

В мировом опыте НК 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.

В 2001 г. ООО «Энергодиагностика» и южнокорейской фирмой LG разработаны способ и устройство для контроля контактной сварки клапана с поршнем с использованием метода МПМ.

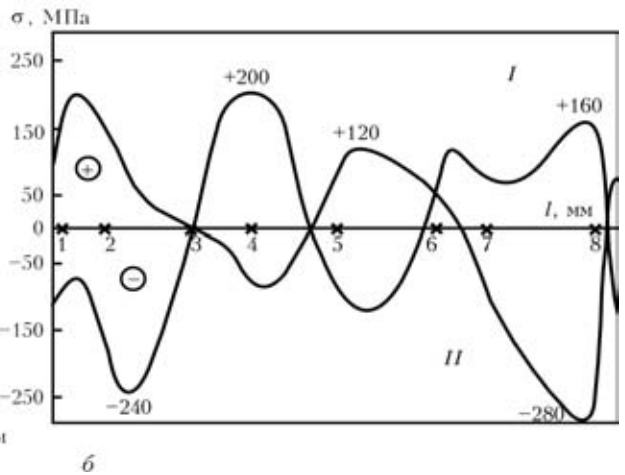


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние сварного соединения трубы (диаметром 160×8мм, Ст3) по результатам контроля: а — методом МПМ: H_1 и H_2 — распределение напряженности магнитного поля H_p соответственно по первому и второму каналу измерений; б — рентгеновским дифрактометром: 1–8 — точки измерения напряжений рентгеновским дифрактометром симметрично с двух сторон шва по ЗТВ; I, II — результаты измерений напряжений, соответствующие полю H_1 и H_2

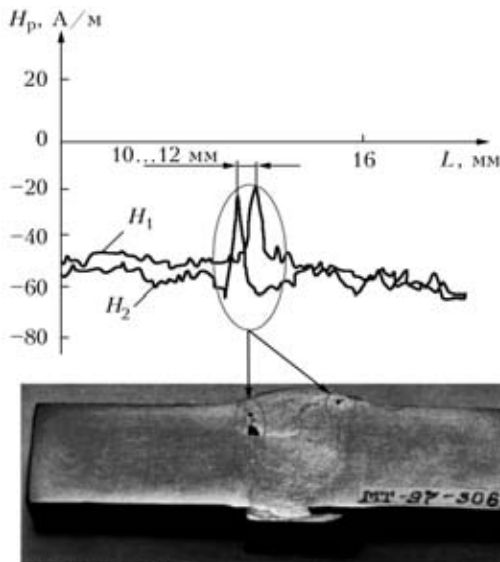


Рис. 5. Результаты контроля участка сварного стыка паропровода (диаметром 273×32, 12Х1МФ) с применением метода МПМ и анализа макроструктуры шлифа

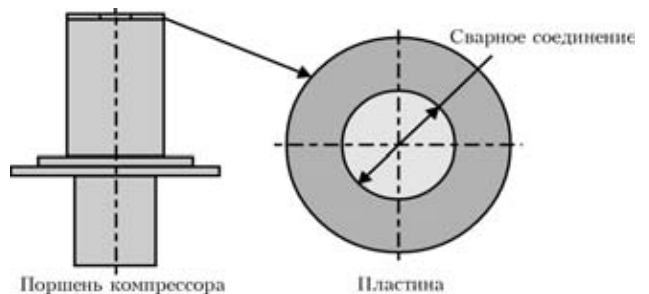


Рис. 6. Общий вид поршня и клапана в виде пластины

При оптимальном качестве сварки обеспечивается сварное соединение поршня диаметром 4,5 мм и шириной шва не более 0,5 мм. Контактная сварка выполняется электродом конической формы с использованием инверторного режима сварки. Общий вид поршня и клапана приведен на рис. 6. Клапан выполнен в виде тонкой пластины толщиной 0,3 мм.

На рис. 7 представлены результаты контроля методом МПМ кольцевого сварного соединения контактной сварки клапана с поршнем, используемым в компрессорном производстве.

Эпюры распределения магнитного поля H_p , измеренные вдоль периметра сварного шва, характеризуют недогрев металла (рис. 7, а), перегрев (рис. 7, б) и оптимальное качество сварки (рис. 7, в).

Для решения задачи по выявлению оптимального качества сварки клапана с поршнем разработаны специализированный датчик и алгоритм обработки результатов контроля.

Критерии отбраковки по методу МПМ в ходе выполнения экспериментальных работ подтверждались разрушением образцов при испытаниях на циклическую прочность и металлографическим исследованием.

В таблице приведены результаты сравнительных испытаний промышленных образцов методом МПМ и на циклическую прочность (K_{cp} — среднее значение градиента магнитного поля, рас-

считанное по результатам измерений поля на сварном соединении и в центре пластины).

Испытания на циклическую прочность сварного соединения выполнялись на специальной установке, имитирующей работу клапана. Качественное (оптимальное) сплавление клапана и поршня должно было выдержать 10^8 циклов нагрузок. Этому значению циклов нагрузки стабильно соответствовало значение $K_{cp} = 20...21 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$.

В этих сравнительных экспериментах была достигнута эффективность контроля 96 %.

На первом этапе контроль качества контактной сварки выполнялся с использованием метода МПМ и специализированного датчика в «ручном» варианте, на втором были разработаны критерии отбраковки, специализированный программный продукт и установка по контролю контактной сварки поршней с клапанами.

На рис. 8 приведены результаты классификации качества сварки клапана и поршня по значению коэффициента K_{cp} (выделена область, соответствующая оптимальному качеству сварки). Обработка результатов контроля, представленных на рис. 8, выполнена с использованием программного продукта.

На рис. 9 представлена схема контроля поршней с использованием специализированного датчика и приборно-компьютерного комплекса. Отбраковка поршней по качеству контактной сварки

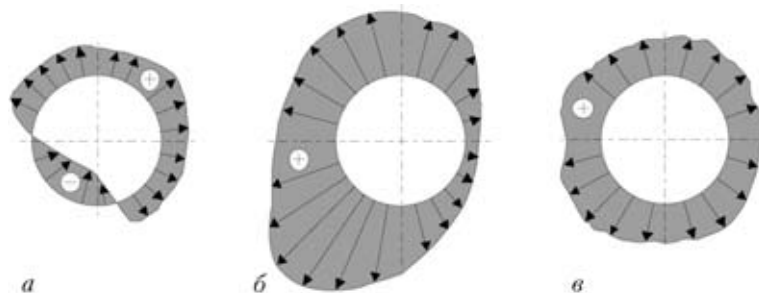


Рис. 7. Эпюры распределения магнитного поля H_p вдоль кольцевого сварного соединения контактной сварки клапана с поршнем: а — недогрев металла; б — перегрев; в — оптимальное качество сварки

Сравнение результатов контроля сварки методом МПМ и результатов испытаний поршней на циклическую прочность

Непровар (несплавление)			Качественное сплавление (норма)			Перегрев металла		
Номер поршня	K_{cp}	Результаты испытаний	Номер поршня	K_{cp}	Результаты испытаний	Номер поршня	K_{cp}	Результаты испытаний
4	16,0	$6,3 \times 10^6$	1	20,0	$9,87 \times 10^7$	2	25,0	$6,8 \times 10^6$
18	10,0	$1,9 \times 10^7$	9	21,0	$1,27 \times 10^8$	3	18,0	$1,03 \times 10^7$
20	12,0	$3,5 \times 10^7$	10	20,0	$1,5 \times 10^8$	5	28,0	$6,5 \times 10^6$
21	10,0	$3,7 \times 10^7$	11	20,0	$1,08 \times 10^8$	6	24,0	$3,9 \times 10^6$
22	14,0	$1,2 \times 10^7$	12	21,0	$9,98 \times 10^7$	7	25,0	$4,5 \times 10^6$
23	11,0	$3,6 \times 10^7$	13	22,0	$1,7 \times 10^8$	8	25,0	$6,7 \times 10^6$
24	16,0	$3,9 \times 10^7$	14	20,0	$9,8 \times 10^7$	17	33,0	$1,07 \times 10^7$
25	17,0	$1,89 \times 10^7$	15	21,0	$1,3 \times 10^8$	-	-	-
-	-	-	16	21,0	$1,18 \times 10^8$	-	-	-
-	-	-	19	20,0	$1,29 \times 10^8$	-	-	-

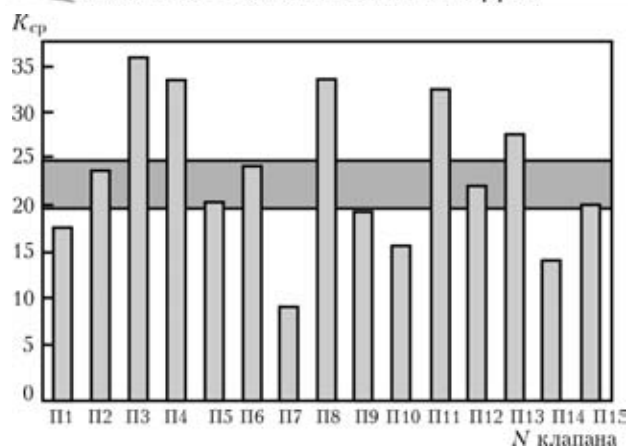


Рис. 8. Классификация качества сварки клапана и поршня

в этой схеме может осуществляться автоматически при движении поршней в поточной линии в соответствии с магнитными критериями, полученными в ходе экспериментальных исследований.

В технологии контактной сварки широко применяется робототехника, а в НК до сих пор применяется выборочная проверка отдельных точек сварки путем удара на отрыв.

Представленный пример решения задачи контроля поршней для фирмы LG наглядно демонстрирует потенциальные возможности метода МПМ и соответствующих приборов. Возможна организация автоматического контроля с использованием роботов. На первом этапе метод МПМ можно использовать для отработки технологии контактной сварки и периодической проверки отклонений этой технологии от нормы.

В настоящее время в энергетике, нефтехимии, газпроме и в других отраслях промышленности России на основе метода МПМ разработаны и применяются на практике более 40 руководящих документов Ростехнадзора.

В 2010 г. на основе международных стандартов ИСО по методу МПМ Росстандартом на территории России введены в действие стандарты [1–3].



Рис. 9. Схема контроля поршней с использованием специализированного датчика и приборно-компьютерного комплекса

Аналогичные национальные стандарты по методу МПМ на базе международных стандартов ИСО введены в действие в Польше, Украине, Китае, Монголии. Метод МПМ и соответствующие приборы контроля используются более чем на 1000 предприятиях России. Кроме России метод опробован и внедрен на отдельных предприятиях в 30 странах мира.

В Москве, начиная с 1996 г., действует российский и международный центр подготовки специалистов по методу МПМ (независимый орган по аттестации персонала в области НК НОАП НК ООО «Энергодиагностика»).

В 2010 г. экспертным советом Ростехнадзора метод МПМ включен в перечень основных магнитных методов НК, рекомендуемых к применению на опасных производственных объектах.

1. ГОСТ Р ИСО 24497-1-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 1. Термины и определения.
2. ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 2. Общие требования.
3. ГОСТ Р ИСО 24497-3-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 3. Контроль сварных соединений.

Поступила в редакцию
29.07.2011