

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА В СРАВНЕНИИ С РАДИАЦИОННЫМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

А. А. ДУБОВ, С. М. КОЛОКОЛЬНИКОВ, В. И. ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ

*Показана связь между параметрами собственного магнитного поля рассеяния и характеристиками дефектов сварных соединений. Представлены критерии оценки состояния сварных соединений трубопроводов по результатам контроля методом магнитной памяти металла. Приведены результаты сравнительного контроля сварных соединений трубопроводов различных типоразмеров этим методом и радиационным методом НК.*

*A connection between the parameters of the self-magnetic leakage field and characteristics of welded joint defects is shown. Criteria of evaluation of the condition of pipeline welded joints by the results of control by the metal magnetic memory method are presented. Results of comparative testing of welded joints of pipelines of different typesizes by this method and radiation ND method are given.*

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», 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.

Традиционная дефектоскопия, ориентированная только на поиск несплошностей в сварных соединениях, не может обеспечить достоверную оценку их качества, так как она не учитывает напряженно-деформированное состояние металла шва и околошовной зоны. Опираясь только на результаты дефектоскопии, технолог-сварщику трудно выявлять причины дефектности шва и совершенствовать технологию сварки. На надежность сварных соединений влияет множество факторов, поэтому необходим метод НК, который бы интегрально оценивал состояние металла сварного соединения.

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).

В соответствии с ГОСТ Р 52081–2003 магнитная память металла — последствие, которое проявляется в виде остаточной намагниченности металла изделий и сварных соединений, сформирова-

овавшейся в процессе их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле, или в виде необратимого изменения намагниченности изделий в зонах концентрации напряжений и повреждений от рабочих нагрузок.

Метод МПМ — метод НК, основанный на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности изделий с целью определения ЗКН, дефектов и неоднородности структуры металла и сварных соединений.

СМПР — магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах скопления дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений и в зонах максимальной неоднородности структуры металла. Более подробно физические основы и практические возможности метода МПМ представлены в работах [1–4].

Путем считывания СМПР, отображающего остаточную намагниченность, сформировавшуюся естественным образом в процессе сварки, представляется уникальная возможность выполнять интегральную оценку фактического состояния сварного шва с учетом структурной неоднородности, распределения остаточных напряжений и дефектов сварки.

Все дефекты (несплошности), появляющиеся в сварных соединениях на этапе изготовления, являются концентраторами напряжений. Однако не все будут развиваться в процессе эксплуатации, так как плотности механической энергии в зоне концентрации напряжений может быть недостаточно, чтобы обеспечить развитие дефекта. Определение параметров дефектов при одновременной оценке их напряженного состояния является основной задачей метода МПМ.

В настоящее время накоплен значительный опыт контроля сварных соединений и разработана

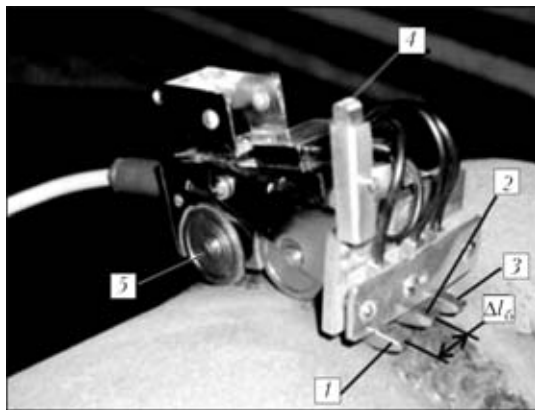


Рис. 1. Устройство для контроля стыковых сварных соединений труб многоканальным сканирующим устройством прибора типа ИКН: 1–3 — феррозондовые преобразователи сканирующего устройства для регистрации поля  $H_p$  на поверхности сварного шва; 4 — феррозондовый преобразователь для отстройки от внешнего магнитного поля  $H_p$ ; 5 — колеса привода измерителя длины;  $\Delta L$  — базовое расстояние между феррозондовыми преобразователями

методология расшифровки магнитных сигналов, когда по амплитуде и ширине сигнала можно определять длину и глубину дефекта. Использование метода МПМ в области дефектоскопии в настоящее время активно развивается. При этом наиболее эффективным является сочетание метода МПМ с радиационным контролем (РК) или ультразвуковым контролем (УК).

Контроль методом МПМ осуществляется без зачистки металла и специального намагничивания и позволяет выполнять экспресс-контроль качества сварных соединений в ручном и автоматическом режимах при массовом производстве на различных изделиях из углеродистых, аустенитных\* и ферритно-аустенитных марок сталей [5].

Контроль выполняется с помощью специализированных малогабаритных приборов, имеющих автономное питание, сканирующие и регистрирующие устройства. Приборы типа ИКН (измерители концентрации напряжений магнитометрические) не имеют аналогов, серийное их изготовление организовано в России на предприятии «Энергодиагностика» (г. Москва). Приборы аттестованы в Госстандарте РФ и включены в государственный реестр средств измерений.

На рис. 1 показано расположение многоканального сканирующего устройства (СУ) на стыковом сварном соединении трубы при проведении контроля методом МПМ. Как видно из рисунка, феррозондовые преобразователи 1 и 3 располагаются напротив зон термического влияния (ЗТВ) с обеих сторон шва, преобразователь 2 расположен между ними посередине, а преобразователь 4, разверну-

\* Проведенные экспериментальные исследования образцов из аустенитных сталей в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины показали, что значения  $H_p$  для сварных швов и околошовной зоны изменяются от  $-300$  до  $+200$  А/м, что показывает возможность их контроля методом МПМ.

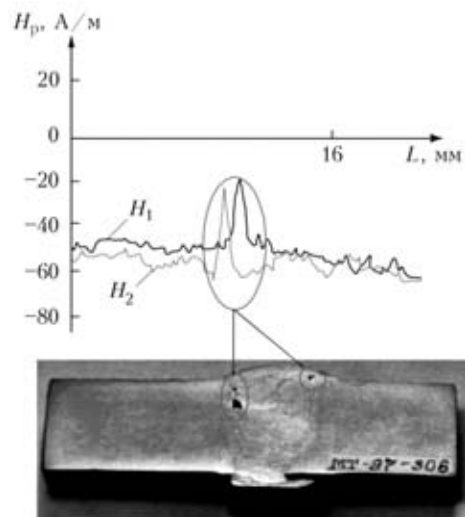


Рис. 2. Результаты обследования участка сварного стыка паропровода ( $\varnothing 273 \times 32$  мм, 12Х1МФ) с применением МПМ и анализа макроструктуры шлифа ( $H_1$ ,  $H_2$  — напряженность магнитного поля рассеяния по первому и второму каналу соответственно)

тый в противоположную сторону, предназначен для отстройки от внешнего магнитного поля.

На рис. 2 представлены результаты контроля участка сварного стыка паропровода ( $\varnothing 273 \times 32$ , 12Х1МФ) с применением метода МПМ и анализа макроструктуры шлифа.

Локальные изменения поля  $H_p$  в данном примере соответствуют расположению дефектов в металле сварного шва, заложенных при изготовлении (шлаковые включения, газовые поры).

На рис. 3 представлен фрагмент результата контроля сварного шва реактора полимеризации полихлорвинила R-701/2. Ширина сварного шва 15 мм. Стенки корпуса реактора изготовлены из углеродистой стали толщиной 21 мм. Внутренняя поверхность реактора, со стороны которой проводился контроль, плакирована нержавеющей коррозионностойкой сталью 316L (Стандарт AISI (США) толщиной 3 мм.

В зоне  $KH_{max}$  характеризуемой скачкообразным изменением поля  $H_p$ , зафиксирован максимальный градиент поля  $dH/dx$  по третьему каналу  $H_{p3}$ . При контроле феррозондовый преобразователь по этому каналу располагали напротив ЗТВ сварного шва (см. рис. 1).

Из рис. 3, а видно, что общая протяженность зоны  $KH_{max}$  составляет 40 мм. Однако протяженность участка, на котором градиент поля  $dH/dx$  имел максимальное значение и который соответствовал расположению локального дефекта, выявленного УЗК, составляла 10 мм. На рис. 3, б показана диаграмма эхо-сигнала УЗК от дефекта на глубине шва 7,5 мм, зафиксированного в зоне максимального градиента поля.

На рис. 4, а представлены результаты контроля методом МПМ участка радиального сварного шва

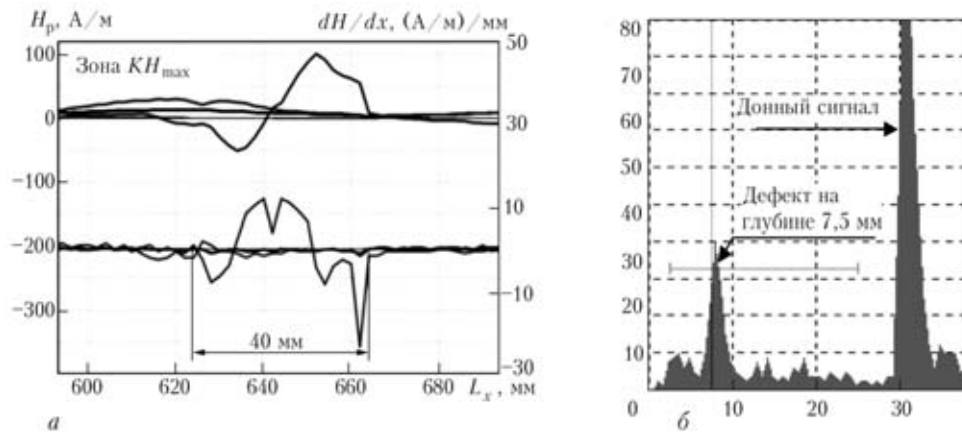


Рис. 3. Результаты контроля участка кольцевого сварного шва химического реактора методом МПМ УЗК: а — результаты контроля участка сварного шва в зоне  $KH_{max}$ ; б — диаграмма эхо-сигнала при УЗК прямым ПЭП в зоне  $KH_{max}$  ( $L_x$  — длина зоны концентрации напряжений)

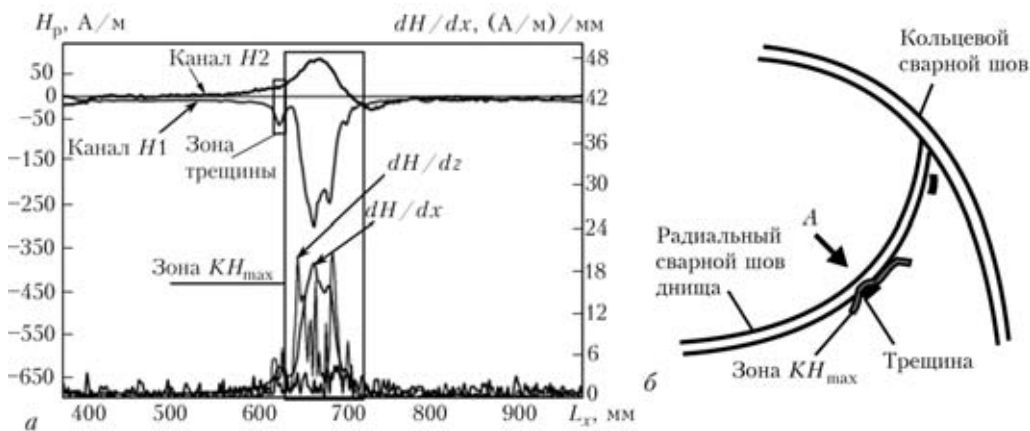


Рис. 4. Результаты контроля радиального сварного шва нижнего дна химического реактора R-701/1 (а) и схематическое изображение зоны контроля (б)

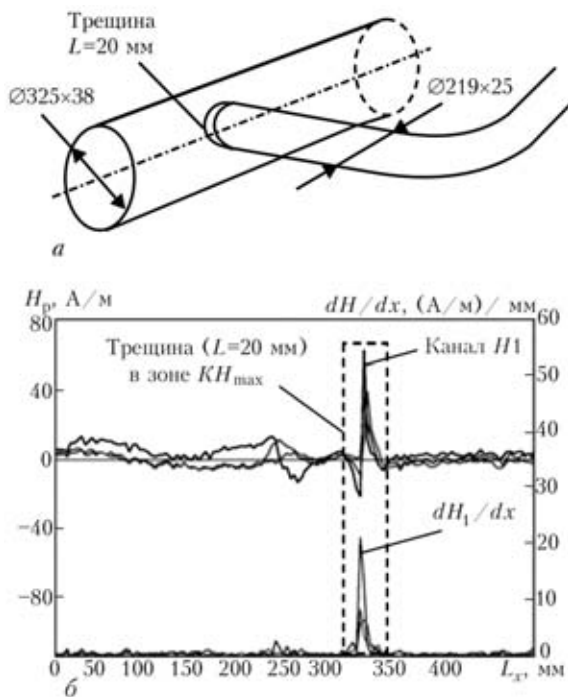


Рис. 5. Схематическое изображение зоны контроля тройникового сварного соединения паропровода (а) и результаты контроля (б)

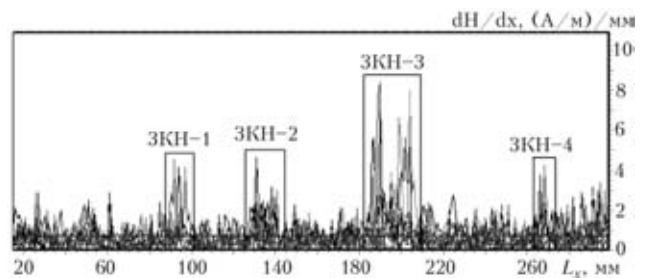


Рис. 6. Результаты контроля сварного шва из двух пластин методом МПМ и РК

дна химического реактора. При контроле в зоне  $KH_{max}$  методом УЗК была выявлена трещина. На рис. 4, б отмечено расположение выявленной трещины (длина трещины 15 мм).

Следует отметить, что вблизи трещины выявлена зона  $KH_{max}$ , характеризуемая разнополярным распределением поля  $H_p$  по каналам Н1 и Н2 с максимальным градиентом поля по базе  $dH/dz$ . Феррозондовые преобразователи каналов Н1 и Н2 при контроле методом МПМ располагали напротив ЗТВ с обеих сторон шва.

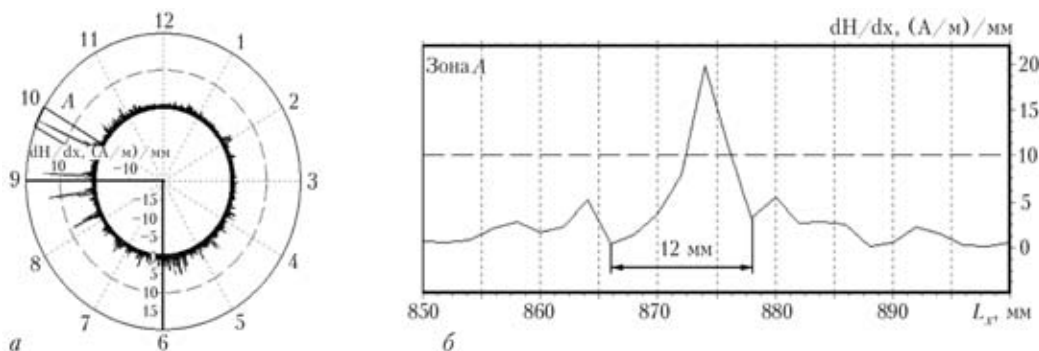


Рис. 7. Результаты контроля «поворотного» кольцевого сварного стыка № 12-13 магистрального газопровода  $\varnothing 720 \times 7$  мм: а — круговая магнитограмма распределения градиента магнитного поля  $dH_p/dx$ ; б — фрагмент распределения градиента поля  $dH_p/dx$  в дефектной зоне А

На рис. 5 представлены результаты контроля методом МПМ тройникового сварного соединения паропровода ( $\varnothing 325 \times 38$  мм и  $\varnothing 219 \times 25$  мм).

На рис. 5, б показано распределение поля  $H_p$  и его градиента  $dH/dx$  вдоль сварного шва и отмечена зона  $KH_{max}$ , характеризующаяся знакопеременным распределением поля  $H_p$  с максимальными значениями градиента поля  $dH/dx$  по всем трем каналам измерений.

В зоне  $KH_{max}$  при дополнительном контроле после шлифовки металла шва выявлена поперечная трещина длиной 20 мм, развивающаяся с наружной поверхности трубы  $\varnothing 219 \times 25$  перпендикулярно шву. При этом максимальное изменение поля и его градиента выявлено по каналу  $H_I$ , расположенному в ЗТВ шва со стороны трубы  $\varnothing 219 \times 25$  (см. рис. 5, б).

На рис. 6 представлены результаты сравнительного контроля сварного шва двух пластин ( $L = 290$  мм,  $S = 10$  мм, сталь 20) методом МПМ и РК. Шов изготовлен ручной дуговой сваркой под флюсом. Внизу на магнитограмме отмечены участки с ЗКН, характеризующиеся максимальными градиентами поля  $dH/dx$  (ЗКН-1, ЗКН-2, ЗКН-3 и ЗКН-4). В ЗКН-3 с максимальными значениями градиента поля радиационным контролем был выявлен максимальный дефект несплавления, а в ЗКН-1 и ЗКН-2 дефекты в виде мелких пор. В зоне ЗКН-4 явных дефектов радиационным контролем не выявлено.

На круговой (часовой) магнитограмме рис. 7, а представлено распределение градиента поля  $dH/dx$  вдоль периметра кольцевого шва газопровода  $\varnothing 720 \times 7$  мм. Контроль выполнялся с помощью устройства, показанного на рис. 1. На рис. 7, б представлен фрагмент распределения градиента поля  $dH/dx$  в дефектной зоне А по одному каналу измерения, проходящему по центру шва. Ширина сигнала, соответствующая по методу МПМ длине дефекта, составляет 12 мм. По данным радиационного контроля этого шва в дефектной зоне А был обнаружен недопустимый дефект

типа  $Da_{10} > 0,1S$  — непровар в корне шва длиной не менее 10 мм.

На круговой (часовой) магнитограмме рис. 8, а представлены результаты контроля другого кольцевого сварного шва газопровода  $\varnothing 720 \times 7$  мм. На магнитограмме отмечены зоны локального изменения градиента поля  $dH/dx$ , соответствующие по методу МПМ зонам концентрации напряжений. Как правило, в этих зонах другими методами НК выявляются дефекты. На рис. 8, б представлен фрагмент распределения градиента поля  $dH/dx$  в дефектной зоне А по одному каналу измерения, проходящему по ЗТВ сварного шва. Ширина магнитных сигналов, соответствующая по методу МПМ длине дефектов, составляет 14 и 20 мм. По данным РК этого шва в зоне А были выявлены недопустимые дефекты типа  $Da_{10} > 0,1S$  — непровар в корне шва длиной не менее 10 мм.

Следует отметить смещение расположения магнитных сигналов, фиксируемых на поверхности шва, от расположения глубинного дефекта, фиксируемого РК или УК. Такое смещение обусловлено тем, что магнитный сигнал соответствует площадкам скольжения, смещенным по глубине шва примерно на  $45^\circ$  в относительно максимальной концентрации напряжений от острого края дефекта. Дальнейшие поля напряжений формируют дальнейшие границы доменов вдоль площадок скольжения с выходом на поверхность шва в виде локальных изменений магнитного поля и его градиента [2, 3].

Примерный расчет глубины залегания  $h$  дефектной зоны по методу МПМ проводится с помощью тригонометрических зависимостей в соответствии со схемой, представленной на рис. 9:

$$h = l/2,$$

где  $l$  — длина дефекта, определяемая по графику градиента поля.

В соответствии с примером, представленным на рис. 7 (зона А), глубина залегания дефекта  $h$  составит:  $h = 12 \text{ мм}/2 = 6 \text{ мм}$ .

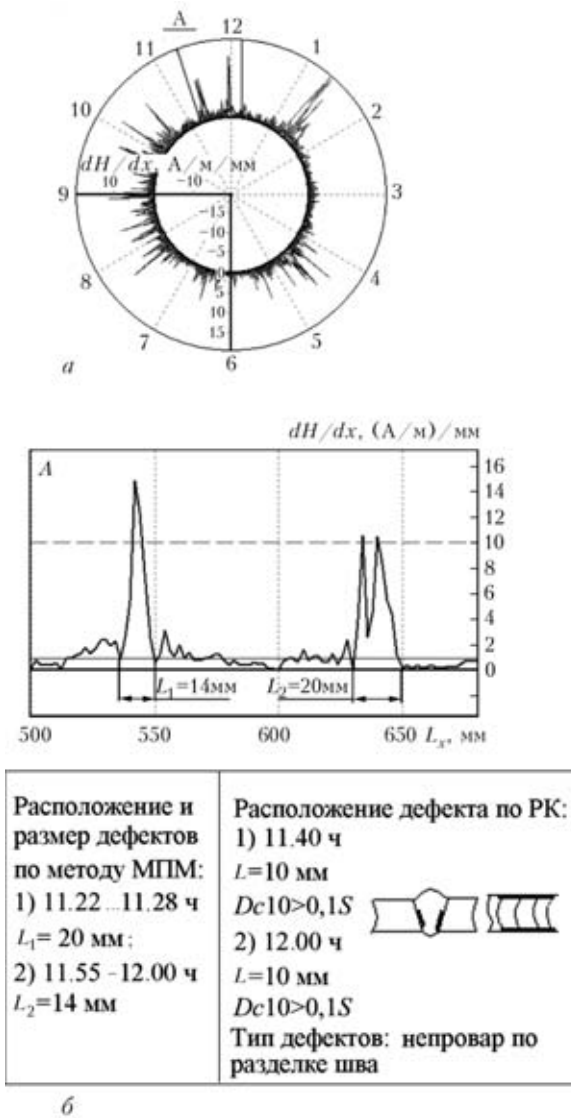


Рис. 8. Результаты контроля монтажного кольцевого сварного стыка № 19-20 магистрального газопровода  $\varnothing 720 \times 7$  мм: а — круговая магнитограмма распределения градиента магнитного поля  $dH_p/dx$ ; б — фрагмент распределения градиента поля  $dH_p/dx$  в дефектной зоне и расположение дефектов по методу МПМ и РК

На основании выполненного расчета можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов контроля методом МПМ и РК. Как было отмечено выше, по данным РК в зоне А на глубине 6...7 мм в корне шва был выявлен непровар длиной 10 мм.

В случае протяженного дефекта в виде непровара в корне или разделке шва по методу МПМ на поверхности шва фиксируются знакопеременные сигналы градиента поля  $dH/dx$ . На рис. 10 представлено распределение градиента поля в зоне непровара по разделке монтажного сварного стыка № 12 магистрального газопровода  $\varnothing 720 \times 7$  мм. Длина дефектного участка по методу МПМ в этом шве составила 124 мм. По данным РК этого шва длина непровара по разделке шва составила 130 мм.

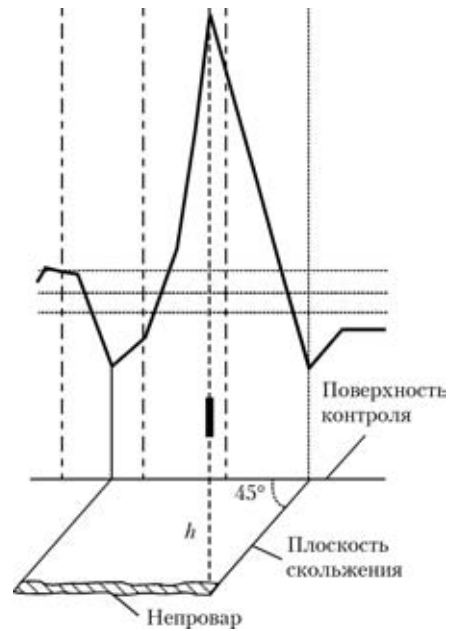


Рис. 9. Схема определения глубины залегания дефекта по методу МПМ

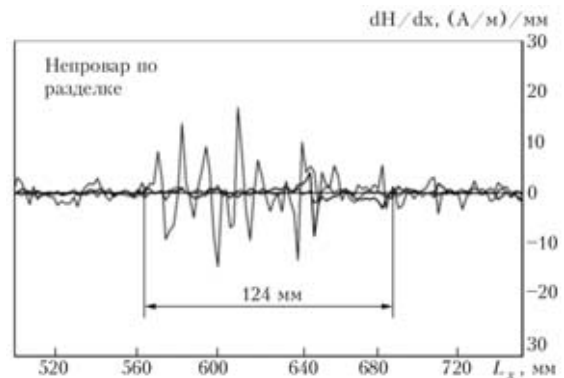


Рис. 10. Распределение поля  $H_p$  в зоне непровара по разделке монтажного кольцевого сварного стыка № 12 магистрального газопровода  $\varnothing 720 \times 7$  мм

В данном примере большое количество магнитных сигналов знакопеременного характера от протяженного непровара в соответствии со схемой, представленной на рис. 9, обусловлено соответствующим количеством плоскостей скольжения, возникающих в зонах концентрации напряжений на краях дефектной зоны.

В таблице представлены результаты контроля методом МПМ отдельных сварных швов газопроводов  $\varnothing 720 \times 7$  мм в сравнении с результатами контроля этих швов РК. Как видно, процент сходимости результатов контроля (или выявляемости дефектов) методом МПМ по сравнению с РК колеблется от 70 до 100 %.

Всего на газопроводе  $\varnothing 720 \times 7$  мм методом МПМ и РК проконтролировано 17 кольцевых швов и по всем этим швам был сделан сопоставительный анализ результатов контроля.



Сравнительные данные результатов контроля методами МПМ и РК

Номер стыка	Градиент $dH/dx$ ( $dH/dz$ ), (А/м)/мм	Расположение ЗКН по результатам контроля методом МПМ (час. мин)	Результаты РК	Расположение дефектов по результатам РК (ч)	Выявляемость дефектов методом МПМ, %
12-13	6	5.25...5.50	Dc 8 > 0,1S	5...6	67
	15	9.05...9.10	Da 10 > 0,1S	9...10	
	20	9.45...9.49			
	4	10.53...10.56	Ba 10 > 0,1S	11...12	
	—	—	Da 10 > 0,1S	11...12	
	—	—	Dc 6 > 0,1S	12	
22	3	0.15...0.21	Fa 7,0 > 2мм	0...1	100
	8	1.25...1.45	Da 180 > 0,1S	1...2	
			Fa 9,0 > 2мм	1...2	
	4	2.38...2.42	Ba 7,0 > 0,1S	2...3	
	5	3.04...3.10	Fc 100 > 0,5мм	3	
	5	3.18...3.20			
	6	3.48...3.52	Fa 12 > 2мм	3...4	
	5	4.00...4.07	Aa 2,0 > 0,2S	8...9	
	8	8.45...8.55			
	8	9.02...9.05	Bd 7,0 > 0,1S	9...10	
	11	9.12...9.18			
	7	10.25...10.30	Aa 2,0 > 0,2S	10...11	
			Aa 3,0 > 0,2S	10...11	
	3	11.15...11.35	Ba 2,0 > 0,1S	10...12	
3	11.15...11.35	Ba 42,0 > 0,1S	11...12		
		Ba 2,5 > 0,1S	11...12		
12	7	1.18...1.21	Fc 20 > 0,5мм	0...1	90
	3	2.08...2.10	Da 30 > 0,1S	2...3	
	3	2.28...2.30	Ac 10; 1,5 > 0,1S	2...3	
	6	2.43...2.45	Fc 90 > 0,5мм	2...3	
	4	3.33...3.36	Bb 130; 4,0 > 0,1S	3...4	
	3	9.17...9.18	Ac 70; 4,0 > 0,1S	9...10	
	—	—	Dc 50 > 0,1S	9...10	
	5	10.25...10.26	Da 30 > 0,1S	10	
			Fc 55 > 0,5мм	10	
17	11.15...11.43	Dc 270 > 0,1S	11		
19-20	11	4.28...4.38	Dc 130 > 0,1S	5	100
	8	4.49...4.51			
	8	5.17...5.19	Dc 70,0 > 0,1S	5...6	
	5	5.28...5.30			
	12	7.39...7.42	Dc 10,0 > 0,1S	7...8	
	10	8.22...8.26	Ac 18; 5,0 > 0,1S	8...9	
	6	8.35...8.42	Bc 15; 2,0 > 0,1S	8...9	
	13	10.07...10.12	Da 5 > 0,1S	10	
15	11.55...12.00	Dc 10 > 0,1S	11...12		

Примечание. Dc, Da, Ba, Bb, Fc — обозначения дефектов согласно технической документации.

**Выводы**

Выявлен высокий уровень сходимости результатов контроля методом МПМ и РК. По количеству дефектов сходимость составила 75 %, а по распо-

ложению дефектов — 85 %. Большинство дефектов (80 %), выявленные методами МПМ и рентгеновским, оказались расположенными в ЗКН (предварительно были зафиксированы методом МПМ).



Несоответствие в результатах контроля по количеству дефектов (~25 %) и по расположению дефектов (~15 %) можно объяснить в определенной степени субъективным фактором, зависящим от подготовки дефектоскописта и различием в физической природе методов МПМ и рентгеновского. Метод МПМ слабо реагирует на дефекты, не создающие концентрацию напряжений (поры и шлаковые включения), но такие дефекты, в пределах допустимых, неопасны. С помощью рентгеновского метода выявляются поры и шлаковые включения независимо от концентрации напряжений, но не выявляются дефекты типа трещин.

Визуализация и документирование дефектов, выявленных методом МПМ, осуществляется оперативно в виде магнитограмм на экране прибора и распечаток на принтере.

Учитывая высокую сходимость результатов контроля методом МПМ и РК, целесообразно в дальнейшем применять комплексный контроль. Методом МПМ без какой-либо подготовки повер-

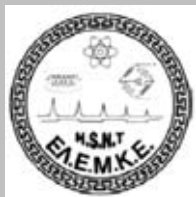
хности шва в режиме экспресс-контроля выявляются ЗКН, затем в ЗКН делается дополнительный РК.

Практический опыт обследования методом МПМ сварных стыков магистральных газопроводов также показал, что недопустимые по нормам (РК или УЗК) дефекты, заложенные при изготовлении, но без КН, не развиваются в процессе длительной эксплуатации (30 лет и более).

1. Дубов А. А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 112 с.
2. Власов В. Т., Дубов А. А. Физические основы метода магнитной памяти металла. — М.: ЗАО «ТИССО», 2004. — 424 с.
3. Дубов А. А., Дубов Ал. Ан., Колокольников С. М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля / Уч. пособие. — М.: ЗАО «ТИССО», 2003. — 320 с.
4. А. с. 1769105 РФ 5G01 № 27/83. Способ определения эксплуатационной стойкости труб из ферромагнитных материалов / Дубов А. А. — Бюл. № 38, 1992.
5. ГОСТ Р 52005–2003. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования.

ООО «Энергодиагностика», Москва  
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила в редакцию  
17.04.2006



#### **4-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ГРЕЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ПО НК**

11–14 октября 2007 г.

о. Крит, Греция

International Conference on Non-Destructive Testing  
of the Hellenic Society of NDT

October 11–14, 2007, Chania — Crete, Greece

Греческое общество по неразрушающему контролю приглашает ученых, пользователей, производителей и сервисные компании, работающих во всех областях НК, принять участие в 4-й Международной конференции по неразрушающему контролю, цель которой — собрать вместе ученых и инженеров для обмена опытом в проведении исследований и разработок в области НК.

Конференция будет включать пленарные, секционные и стендовые доклады **по следующей тематике:**

- ✓ Применения и инновации методов НК
- ✓ Подготовка и сертификация персонала
- ✓ Композитные материалы, сварка и адгезия
- ✓ Цифровая радиография
- ✓ НК для диагностики и восстановления исторических памятников
- ✓ Применения НК в судостроительной и аэрокосмической отраслях
- ✓ Применения НК для энергетики (включая атомную)
- ✓ Теоретическое моделирование
- ✓ Применения НК в гражданском строительстве
- ✓ Безконтактные методы НК и др.

Более подробную информацию относительно конференции можно получить на сайте

<http://www.hsnt.gr/4thICNDT/4thICNDT.htm>

или непосредственно в Оргкомитете конференции по

**E-mail: [prasian@central.ntua.gr](mailto:prasian@central.ntua.gr), [gpapan@mech.upatras.gr](mailto:gpapan@mech.upatras.gr)**