

УДК: 621.165

Метод магнитной памяти металла для диагностики элементов энергетических котлов

Каранкевич В.В., Таранчук А.С.

Научный руководитель – к.т.н., доцент КАЧАН С.А.

Источниками разрушения труб поверхностей нагрева паровых энергетических котлов являются зоны концентрации механических напряжений (ЗКН), в которых процессы коррозии, ползучести и усталости протекают наиболее интенсивно.

Концентрация напряжений на отдельных участках обусловлена, в основном,

- недостатком самокомпенсации труб и возникает из-за различных нарушений и отступлений от проектной схемы перемещений труб в подвижных креплениях, допускаемых при монтаже и ремонте котлов;

- повышения теплогидравлической разверки;

- неправильной установки ремонтных вставок;

- заземления труб в ремонтных "сухарях" и в местах прохода труб и змеевиков через обмуровку.

Своевременное выявление участков труб с максимальной концентрацией напряжений является главной задачей, решаемой методом диагностики, основанном на эффекте магнитной памяти металла (МПМ). Головным разработчиком этого нового метода и приборов неразрушающего контроля для него можно назвать ООО "Энергодиагностика" - предприятие, основанное в 1992 году в Москве, которое работает в сфере обеспечения промышленной безопасности различных отраслей производства и контроля качества изделий машиностроения [1 - 7].

Кратко изложим суть метода [1].

Известно, что трубы в состоянии поставки имеют определенный уровень остаточной намагниченности, сложившейся в процессе их изготовления. В условиях монтажа остаточная намагниченность изменяется и перераспределяется под действием сварочных и монтажных напряжений. При эксплуатации котельных труб остаточная намагниченность, сформировавшаяся в процессе изготовления и монтажа, изменяется под действием рабочих нагрузок.

В специальных лабораторных и промышленных экспериментах установлено, что перераспределение остаточной намагниченности и, соответственно, собственного магнитного поля рассеяния H_p на поверхности труб обусловлено действием магнитоупругого, магнитомеханического эффектов и магнитоластики [1].

Установлено также, что изменение остаточной намагниченности и, соответственно, измеряемого поля H_p при растяжении, сжатии, кручении и циклическом нагружении ферромагнитных труб однозначно связано с максимально действовавшими рабочими напряжениями, что позволило использовать этот параметр как элемент памяти при разработке данного метода диагностики.

Известно, что потеря устойчивости труб происходит при достижении осевой силой значения критической нагрузки. При этом происходит, как правило, упругопластический прогиб трубы, исчезающий (или частично исчезающий) после снятия осевой нагрузки.

В условиях работы котельной трубы на участке, имеющем недостаток самокомпенсации (например, при наличии заземления в узлах креплений) при потере устойчивости, как правило, возникает изгиб с кручением. В ослабленном сечении такого участка трубы образуется соответствующее поле напряжений и плоскости сдвига с максимальной деформацией металла. В этой же зоне на поверхности трубы возникают устойчивые полосы и площадки скольжения дислокаций задолго до достижения условного предела текучести металла.

Устойчивые полосы скольжения возникают и в случаях локального перегрева металла вследствие недостатка самокомпенсации по периметру и толщине стенки трубы. Момент

возникновения устойчивых площадок скольжения дислокаций связан с уровнем и направлением внутренних напряжений (напряжений растяжения, сжатия, сдвига). Устойчивые полосы скольжения дислокаций, возникающие под действием повторяющихся в одном и том же месте циклических нагрузок, могут получить развитие до каналов с размерами по глубине и ширине до десятков и сотен микрон, что уже будет заметно на макроуровне. По границам этих каналов происходит развитие пластической деформации и, в итоге, зарождение трещин.

Многолетний опыт исследования магнитных полей на котельных и паропроводных трубах выявил наличие устойчивых линий смены знака нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_p в зонах развивающихся повреждений металла (линии $H_p=0$). Интерпретация этого диагностического магнитного параметра как линии максимальных напряжений, возникающей на поверхности труб под действием рабочих нагрузок, подтверждена расчетными исследованиями [2, 3]. Очевидно, что совпадение линий $H_p=0$ со сварными стыками и гибами наиболее опасно для надежности труб поверхностей нагрева.

Для количественной оценки уровня концентрации напряжений определяется градиент (интенсивность изменения) нормальной и/или тангенциальной составляющих магнитного поля H_p [4]:

$$K_{ин} = |\Delta H_p| / \Delta x, \quad (1)$$

где $K_{ин}$ – градиент магнитного поля рассеяния, характеризующийся интенсивностью изменения намагниченности металла в зоне концентрации напряжений и, соответственно, интенсивностью изменения поля H_p ;

$|\Delta H_p|$ – модуль разности поля H_p между двумя точками контроля;

Δx – расстояние между двумя точками контроля.

Предложенные в методике критерии позволяют отличать участки труб, работающие в упругой зоне деформаций металла от участков, работающих в зоне пластической деформации металла и находящихся в состоянии предразрушения металла.

Как правило, нулевые линии нормальной составляющей магнитного поля (линии $H_p=0$) соответствуют зонам концентрации напряжений, являющимися источниками развития повреждений труб. Однако, в отдельных случаях развитых локальных дефектов (например, язвы коррозии) имеет место локальное изменение поля H_p без изменения знака. Общим признаком ЗКН и развитых дефектов является резкое локальное изменение поля H_p и его градиента $K_{ин}$. Зоны с максимальной концентрацией напряжений соответствуют зонам с максимальными градиентами поля $K_{ин}$.

Рассматриваемый магнитный метод диагностики поверхностей нагрева может быть использован самостоятельно и в сочетании с другими разрушающими и неразрушающими методами контроля.

Для выполнения контроля котельных труб используются приборы типа ИКН (измерители концентрации напряжений магнитометрические) и специализированные сканирующие устройства, изготавливаемые ООО "Энергодиагностика".

Контроль выполняется на остановленном в ремонт или резерв котле. Для проведения измерений напряженности магнитного поля рассеяния (H_p) вдоль образующих труб контролируемой поверхности нагрева специальной зачистки не требуется, но шлаковую корку необходимо удалить.

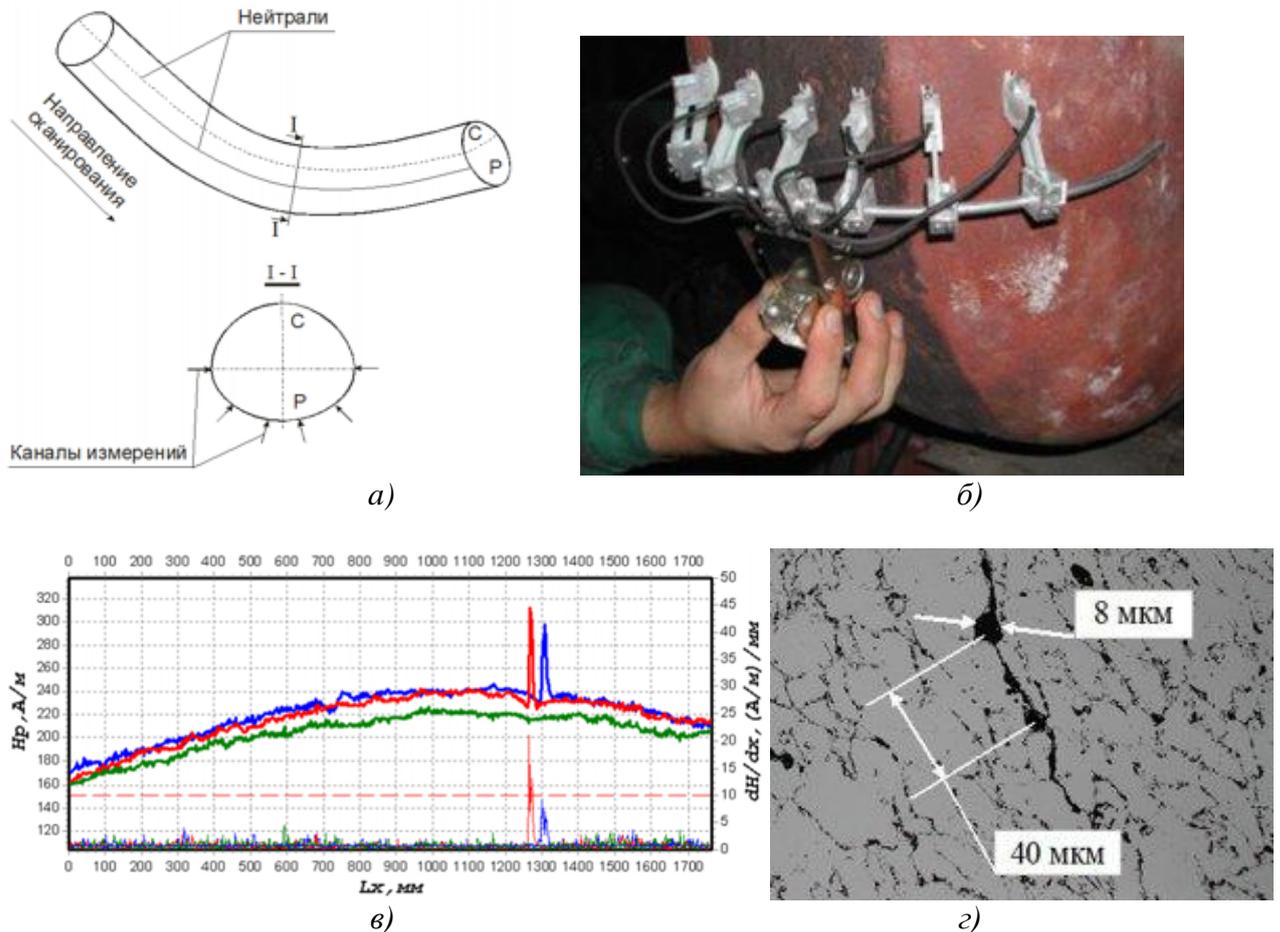
Выполнение контроля осуществляют два оператора. Один из них выполняет сканирование датчиком прибора вдоль поверхности трубы. Другой оператор производит запись измеренных величин H_p в журнал регистрации результатов контроля.

Допускается проводить контроль только одному оператору, при условии соблюдения правил техники безопасности, а также при наличии у оператора соответствующей квалификации и опыта контроля.

Рассмотрим далее отдельные примеры из практики применения метода МПМ при диагностике котельных и паропроводных труб.

На тепловых и атомных электростанциях существует проблема обнаружения зон концентрации напряжений на гихах паропроводных труб, являющихся источниками развития повреждений.

На рисунке 1 представлены результаты контроля методом МПМ растянутой зоны гига $\varnothing 219 \times 19$ мм пароперепускной трубы, сталь 15Х1МФ.



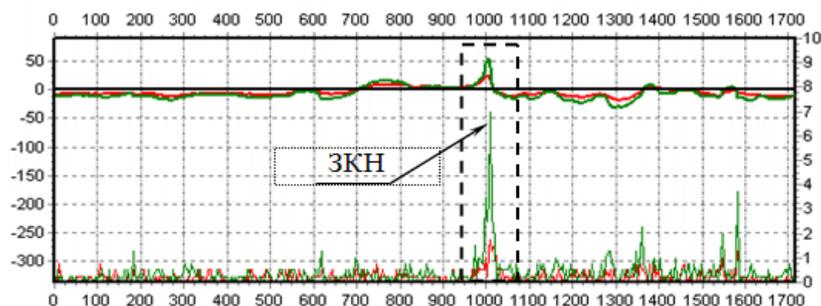
а - схема контроля гига; *б* - сканирующее устройство, используемое при контроле; *в* - распределение магнитного поля H_p и его градиента dH_p/dx вдоль растянутой образующей гига; *г* - структура металла, зафиксированная в зоне локального изменения магнитного поля
 Рисунок 1 – Контроль методом МПМ растянутой зоны гига:

На верхней части магнитограммы (рисунок 1,в), зафиксированная при контроле, показано распределение собственного магнитного поля гига, а в нижней части - распределение градиента этого поля.

В зоне резкого локального изменения поля и его градиента с поверхности гига была взята "реплика" для анализа структуры металла (рисунок 1,г). Для удаления поврежденного слоя металла с наружной поверхности была выполнена шлифовка металла на глубину 100-150 мкм, после чего гиб был допущен в дальнейшую эксплуатацию.

Метод МПМ может применяться для определения язвин коррозии на внутренних поверхностях нагрева энергетических котлов.

На рисунке 2,а показаны результаты контроля экранной трубы $\varnothing 60 \times 6$ мм (сталь 12Х1МФ) энергетического котла, а на рисунке 2,б - вырезанный участок трубы из ЗКН, выявленной методом МПМ, на внутренней поверхности которого обнаружены язвину коррозии.



а)



б)

Рисунок 2 – Результаты контроля экранной трубы 60х6 мм фронтного экрана котла ТГМП-206

Известно, что газоплотные панели обеспечивают уплотнение топки от присосов холодного воздуха, увеличивают площадь поверхностей нагрева и, таким образом, повышают экономичность котлов. Однако, с самого начала эксплуатации котлов с газоплотными панелями была выявлена их низкая ремонтпригодность. Кроме того, в процессе эксплуатации была обнаружена более высокая чувствительность газоплотных панелей к теплогидравлическим разверкам и, особенно, к локальным перегревам металла. Даже незначительные нарушения соотношений "вода-топливо" или "топливо-воздух", допускаемые для обычных котлов, могут вызвать массовые повреждения труб газоплотных панелей с выходом их из строя.

На рисунке 3 представлен фрагмент повреждений труб газоплотных панелей заднего экрана в виде массового их прогиба в зоне монтажных сварных стыков. Такой вид повреждений был выявлен специалистами ООО "Энергодиагностика" в марте 2004 года на газоплотном котле паропроизводительностью 525 т/ч, ст. № 4 ТЭС "Дора" (Ирак).



Рисунок 3 – Массовый прогиб экранных труб газоплотной панели в зоне монтажных стыков

Эксплуатация и ремонт котлов с газоплотными панелями требуют высокого уровня квалификации персонала электростанций, обслуживающего эти котлы, а технология их ремонта - применения современных методов технической диагностики.

При исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) труб газоплотных панелей с использованием метода МПМ установлено, что более 90% всех ЗКН и развивающихся в них повреждений расположено вблизи заводских, монтажных и ремонтных сварных стыков. Только в отдельных случаях ЗКН и повреждения в них происходят на участках труб, расположенных между сварными стыками. При этом повреждения металла находятся преимущественно в зонах термического влияния сварки, являющимися, как известно, технологическими и конструктивными концентраторами напряжений.

Установленная закономерность преимущественного расположения повреждений труб вблизи сварных стыков характерна для газоплотных котлов и очевидно обусловлена их конструктивными особенностями и принципиально другим распределением напряжений и деформацией при температурной компенсации по сравнению с экранными трубами, имеющими подвижные узлы креплений через каждые 2-4 м по высоте топки.

В случае недостатка самокомпенсации отдельной трубы и/или нескольких труб внутри газоплотной панели распределение возникающих при этом напряжений и деформаций на каждой трубе в отдельности обусловлено взаимным влиянием всей массы труб, жестко связанных между собой внутри панели. При этом наиболее восприимчивыми к напряжениям от недостатка температурной компенсации оказываются зоны термического влияния сварки, как наиболее слабое звено по условиям прочности.

В подтверждение сказанного рассмотрим пример из практики применения метода МПМ при диагностике НДС газоплотных панелей.

На рисунке 4 представлены результаты контроля отдельных труб газоплотных панелей на котле 525 т/ч, ст. № 4 ТЭС "Дора" (Ирак). Видно, что вблизи монтажных сварных стыков зафиксировано резкое увеличение магнитного поля H_p и его градиента dH_p/dx .

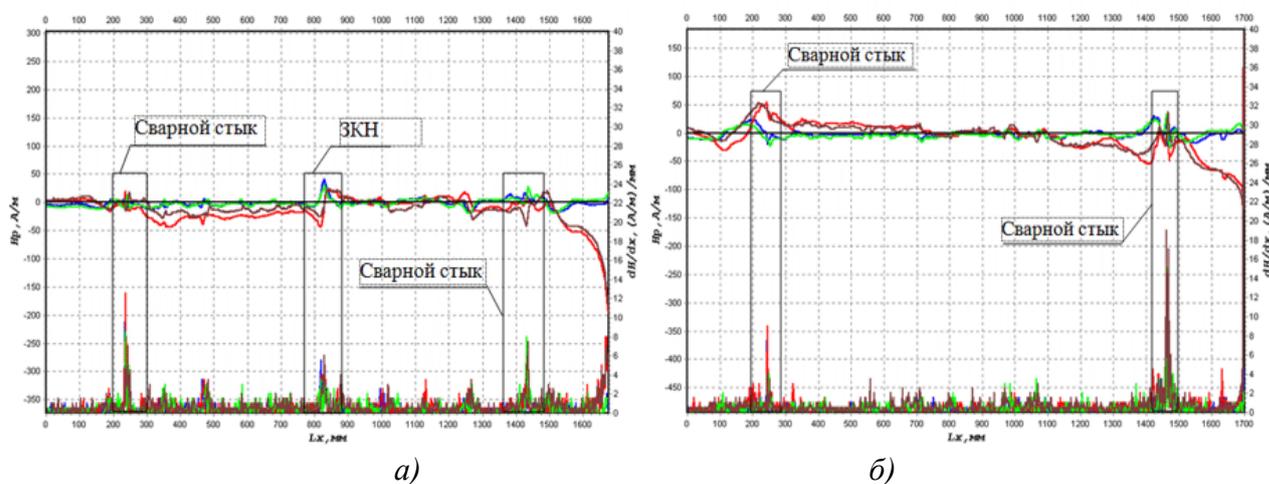


Рисунок 4 – Результаты контроля трубы №26 (а) и трубы №28 (б) фронтального экрана на уровне верхнего яруса горелок котла ст. №4 ТЭС "Дора" (Ирак)

Представленные на рисунке 4 фрагменты распределения магнитного поля являются характерными для отдельных труб внутри панелей. Путем вырезки образцов и анализа их состояния установлено, что именно на участках труб с максимальным значением градиента магнитного поля развиваются повреждения металла. Характер повреждений в зоне концентрации напряжений, расположенных вблизи сварных стыков, может быть разным в зависимости от ряда эксплуатационных факторов. На основе выполненных исследований состояния металла образцов, вырезанных из участков труб с ЗКН, установлено, что повреждения могут развиваться как с внутренней поверхности, так и с наружной.

Повреждение в ЗКН преимущественно развивается на внутренней поверхности трубы в случае низкого качества котловой воды и с наружной поверхности при наличии агрессивных компонентов в топочных газах (например, при сжигании низкокачественного топлива и недостатке воздуха). На внутренней поверхности труб повреждения развиваются, как правило, в виде отдельных язвин или цепочки язвин (рисунок 2), а на наружной поверхности - в виде поперечных рисок с частотой, кратной толщине стенки трубы.

В работах [6, 7] рассматриваются возможности метода МПМ при решении различных задач обеспечения надежности труб поверхностей нагрева энергетических котлов. В частности, в указанных работах [6, 7] рассматриваются возможности метода МПМ при выявлении участков с развивающимися повреждениями из-за перегрева металла, при контроле сварных соединений в узлах с контактной сваркой и в узлах приварки змеевиков к коллекторам, при определении межкристаллитной коррозии на аустенитных трубах, при выявлении мест заземлений на трубах и в опорно-подвесной системе котлов, вызывающих развитие повреждений из-за недостатка самокомпенсации температурных расширений.

В заключение отметим, что на основе длительного периода (более 30 лет) применения метода МПМ на ряде энергетических и водогрейных котлов электростанций России, Польши, Китая, Болгарии, Индии и других стран можно заявить об эффективности метода при решении задач диагностики.

Литература

1. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО "Тиссо", 2004. 424 с.
2. Встовский Г.В., Дубов А.А. Решение обратной задачи расчета полей напряжений в стенках труб по магнитным полям рассеяния на основе нелинейной модели магнитоупругого эффекта // Заводская лаборатория, 2000, №3.
3. Кулеев В.Г., Дубов А.А., Лопатин В.В. Нулевые линии нормального поля рассеяния на поверхности бездефектной трубы при ее упругом изгибе в любом внешнем магнитном поле // Дефектоскопия, 2002, №1. С.13-26.
4. Дубов А.А., Дубов Ал.А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: Учебное пособие. М.: ЗАО "Тиссо", 2008. 363 с.
5. Дубов А.А. Метод магнитной памяти металла и его возможности для диагностики элементов энергетических котлов / ООО "Энергодиагностика" // <http://www.energodagnostika.ru/article-about-mmm-power-boiler.html>
6. Дубов А.А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. М.: Энергоатомиздат, 1995. 112 с.
7. Дубов А.А., Дубов Ал.А., Колокольников С.М. Техническое диагностирование труб поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов с использованием магнитной памяти металла: Учебно-методическое пособие. ИПК Госслужбы, 2006. 110 с.