

Метод магнитной памяти металла и возможности его применения для диагностики элементов энергетических котлов

Дубов А. А., инж.

ООО “Энергодиагностика”, Москва

Рассмотрены причины повреждений котельных труб и существующие проблемы диагностики этих повреждений на раннем этапе их развития. Представлены возможности применения метода магнитной памяти металла для ранней диагностики развивающихся повреждений гибов паропроводных и экранных труб энергетических котлов.

Ключевые слова: энергетические котлы, повреждения котельных труб, паропроводы, гибы, диагностика повреждений, новые методы, магнитная память металла.

Основными источниками разрушения труб поверхностей нагрева (ПН) 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 вследствие различных нарушений и отступлений от проектной схемы перемещений труб в подвижных креплениях при монтаже и ремонте котлов, а также в результате 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 — главная задача, решаемая методом диагностики, основанном на эффекте магнитной памяти металла (МПМ).

Правомочность использования метода МПМ подтверждена международными стандартами ISO 24497-1:2007(Е), 24497-2:2007(Е), 24497-3:2007(Е). На их основе введены в действие национальные стандарты в России, Украине, Польше, Китае, Монголии, Иране. В России метод МПМ включен Ростехнадзором в перечень основных методов неразрушающего контроля, рекомендуемых для применения на опасных промышленных объектах (ОПО). Более 50 руководящих документов Ростехнадзора предназначено для различных отраслей промышленности, где метод МПМ применяют для контроля трубопроводов, сосудов, оборудования и конструкций. В 2011 г. получен сертификат TUV Rheinland Inter Cert Kft (01202 HU/V 11-3420), допускающий применение метода МПМ на ОПО.

Известно, что трубы в состоянии поставки имеют определенный уровень остаточной намагниченности, сложившейся в ходе их из-

готовления. 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.

Специальными лабораторными и промышленными экспериментами установлено, что перераспределение остаточной намагниченности и соответственно собственного магнитного поля рассеяния (СМПП) H_p на поверхности труб обусловлено действием магнитоупругого, магнитомеханического эффектов и магнитопластики [1]. Доказано 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.

Потеря устойчивости труб происходит при достижении осевой силой критической нагрузки. При этом, как правило, возникает упругопластический прогиб, исчезающий (полностью или частично) после снятия осевой нагрузки.

В условиях работы котельной трубы на участке, имеющем недостаток самокомпенсации (например, при наличии заземления в узлах креплений) при потере устойчивости, часто происходит изгиб с кручением. В ослабленном сечении такого участка трубы образуются соответствующее поле напряжений и плоскость сдвига с максимальной деформацией металла. В этой же зоне на поверхности трубы появляются 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 (растяжения, сжатия, сдвига). Устойчивые полосы скольжения дислокаций, образующиеся 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 в котельных и на паропроводных трубах выявил наличие устойчивых линий смены знака нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_p в зонах развивающихся повреждений металла (линий $H_p = 0$). 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 в отношении надежности труб ПН.

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

$$K_{ин} = |\Delta H_p| / \Delta x,$$

где $K_{ин}$ — градиент магнитного поля рассеяния, характеризующийся интенсивностью изменения намагниченности металла в ЗКН и соответственно интенсивностью изменения поля H_p ; $|\Delta H_p|$ и Δx — модуль разности поля H_p и расстояние между двумя точками контроля.

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

Как правило, нулевые линии нормальной составляющей магнитного поля (линии $H_p = 0$) соответствуют ЗКН, являющимся источниками развития повреждений труб. Од-

нако в отдельных случаях развитых локальных дефектов (например, язвы коррозии) отмечаются локальные изменения поля H_p без изменения знака. Общий признак ЗКН и развитых дефектов — 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 или в сочетании с другими (разрушающими и неразрушающими) методами контроля.

Для контроля за котельными трубами используют приборы типа ИКН (магнитометрические измерители концентрации напряжений) и специализированные сканирующие устройства, изготавливаемые ООО “Энергодиагностика”. Контроль выполняют на остановленном в ремонт или в 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.

Контроль осуществляют два оператора. Один из них выполняет сканирование датчиком прибора поверхности трубы. Другой записывает измеренные значения H_p в журнал регистрации результатов контроля. Разрешается проводить контроль только одному оператору при условии соблюдения правил техники безопасности, а также при наличии у него соответствующих квалификации и опыта.

Рассмотрим примеры из практики применения метода МПМ при диагностике котельных и паропроводных труб. В настоящее время на тепловых и атомных электростанциях существует проблема обнаружения ЗКН на гибах паропроводных труб, являющихся источниками развития повреждений.

На рис. 1 представлены результаты контроля методом МПМ растянутой зоны гiba диаметром 219×19 мм пароперепускной трубы (сталь 15Х1МФ). На рис. 1, а показана схема контроля гiba, на рис. 1, б — сканирующее устройство. В зоне резкого локального изменения поля и его градиента с поверхности гiba была взята “реплика” для анализа структуры металла. На рис. 1, в показана структура металла, зафиксированная в зоне локального изменения магнитного поля. В данном случае для удаления поврежденного слоя металла с наружной поверхности вы-

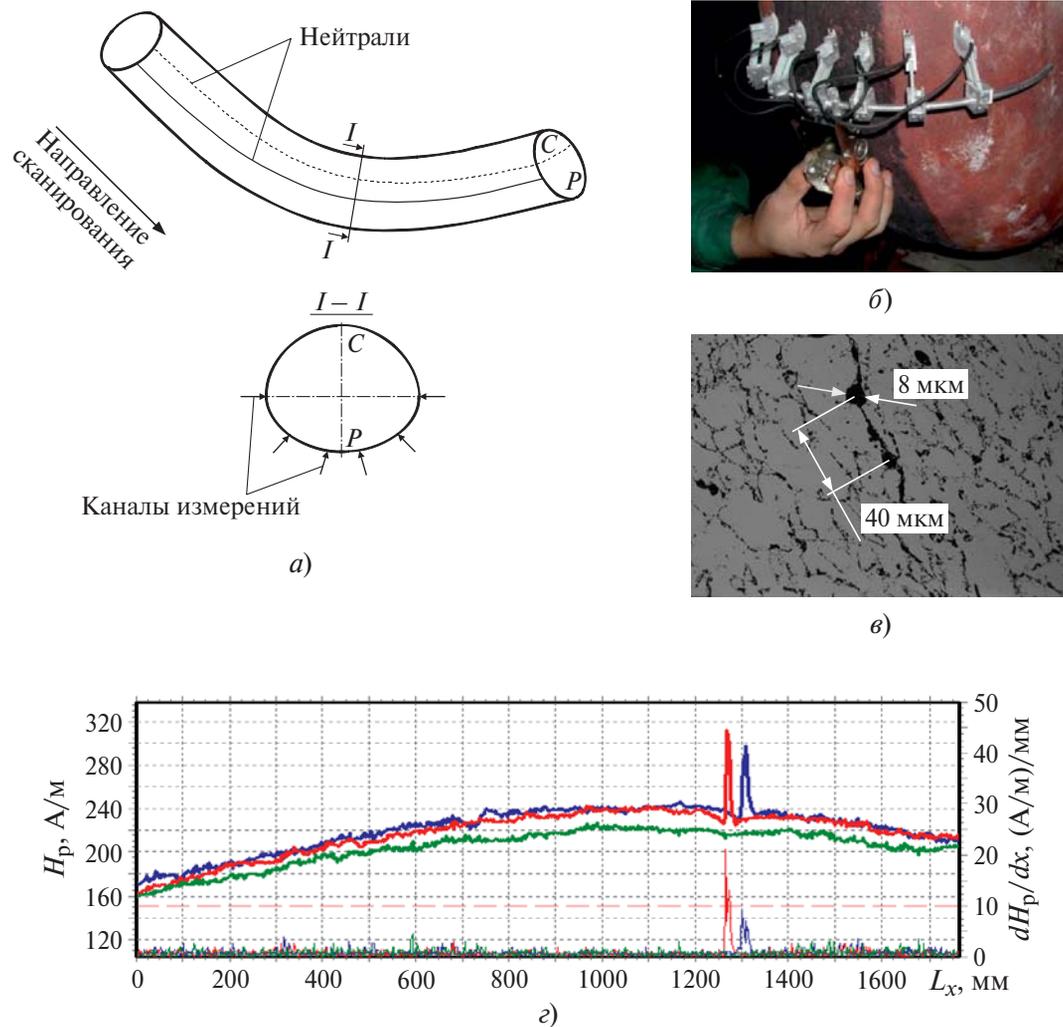


Рис. 1

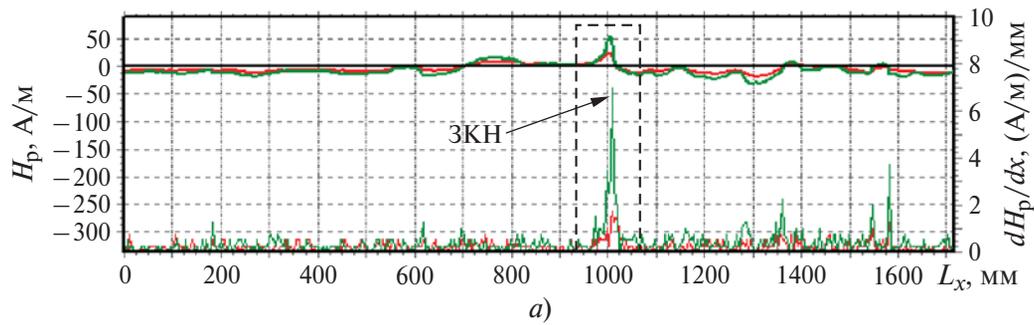
полнена шлифовка на глубину 100 – 150 мкм. После удаления поврежденного слоя металла в ЗКН гиб был допущен в дальнейшую эксплуатацию. На рис. 1, *г* приведена магнитограмма, зафиксированная при контроле. В верхней части магнитограммы показано распределение собственного магнитного полягиба H_p , в нижней части — распределение градиента этого поля dH_p/dx .

Другой пример применения метода МПМ — определение язвин коррозии на внутренних поверхностях нагрева энергетических котлов. На рис. 2, *а* приведены результаты контроля экранной трубы диаметром 60 × 6 мм (сталь 12Х1МФ) мощного энергетического котла. На рис. 2, *б* показан вырезанный участок трубы из ЗКН, выявленной методом МПМ. На его внутренней поверхности были обнаружены язвину коррозии.

Известно, что газоплотные панели обеспечивают уплотнение топки от присосов холодного воздуха, увеличивают площадь поверх-

ностей нагрева и таким образом повышают экономичность котлов. Однако с самого начала эксплуатации котлов с газоплотными панелями были выявлены их низкая ремонтопригодность и 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 многочисленные повреждения труб газоплотных панелей и выход их из строя.

На рис. 3 представлен фрагмент поврежденной 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 г. на газоплотном котле паропроизводительностью 525 т/ч ТЭС “Дора” (Ирак). Аналогичные повреждения



б)

Рис. 2

наблюдаются и на газоплотных котлах электростанций России.

Понятно, что эксплуатация и ремонт котлов с газоплотными панелями требуют более высокого уровня квалификации обслуживающего их персонала. Очевидно также, что технология ремонта газоплотных панелей нуждается в совершенствовании и применении 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 находится вблизи заводских, монтажных и ремонтных сварных стыков. Только в отдельных случаях ЗКН и повреждения в них возникают на участках труб, расположенных между сварными стыками. Выявлено также, что повреждения металла происходят преимущественно в зонах термического влияния (ЗТВ) сварки, являющихся, как известно, технологическими и конструктивными концентраторами напряжений. Такая закономерность преимущественного расположения повреждений труб вблизи сварных стыков характерна для газоплотных котлов и, очевидно, обусловлена их конструктивными особенностями и принципиально другим распределением напряжений и деформаций 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 тру-



Рис. 3

бы и/или нескольких труб внутри газоплотной панели распределение возникающих при этом напряжений и деформаций на каждой трубе в отдельности определяется взаимным влиянием всей массы труб, жестко связанных между собой внутри панели. При этом наиболее восприимчивыми к напряжениям от недостатка температурной компенсации оказываются ЗТВ сварки как наиболее слабые звенья по условиям прочности.

Рассмотрим пример из практики применения метода МПМ при диагностике НДС газоплотных панелей. На рис. 4 приведены результаты контроля отдельных труб газоплотных панелей на котле производительностью 525 т/ч ТЭС «Дора». Как видно, вблизи монтажных сварных стыков зафиксировано резкое увели-

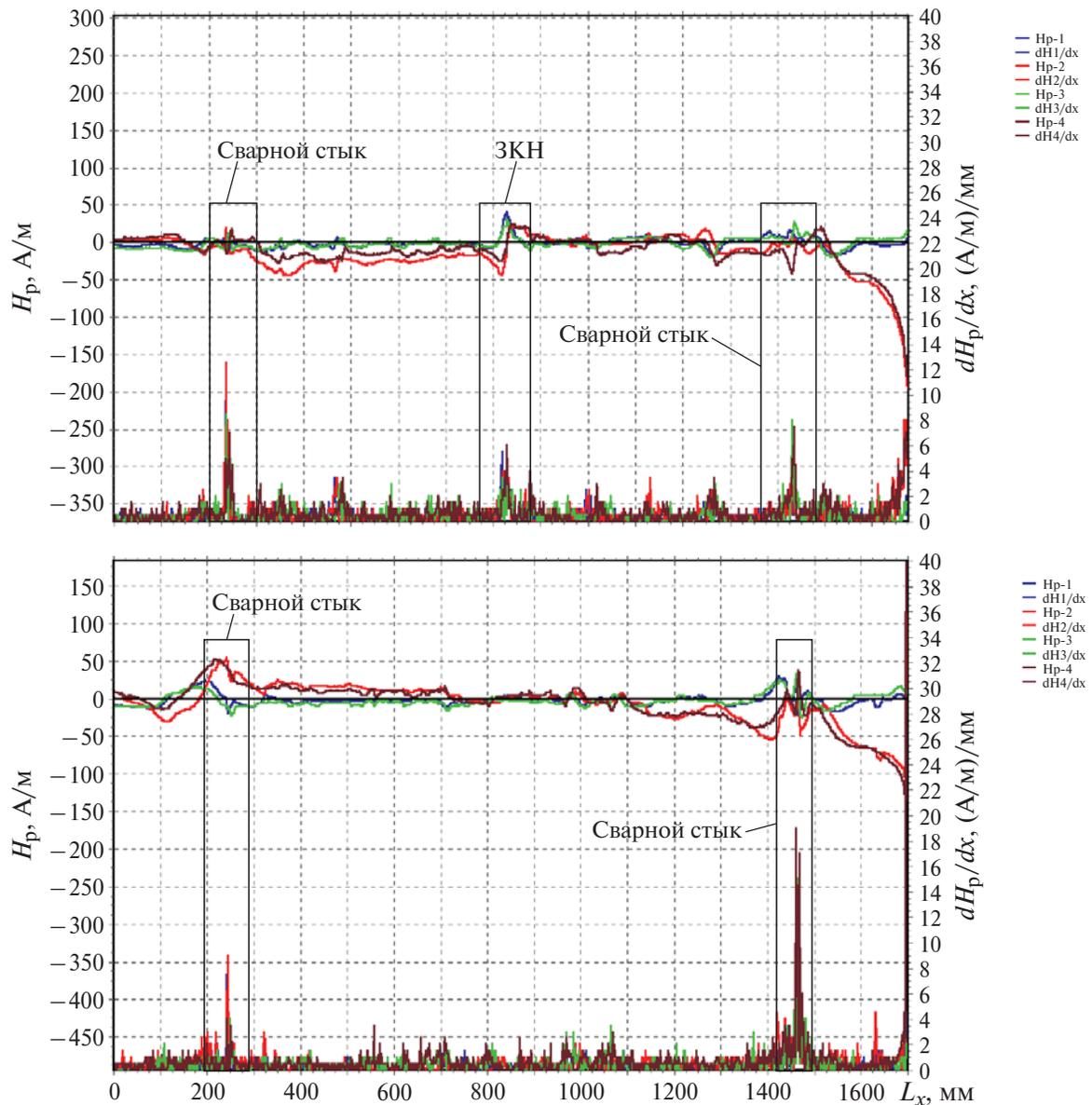


Рис. 4

чение магнитного поля H_p и его градиента dH_p/dx .

Представленные здесь фрагменты распределения магнитного поля характерны для отдельных труб внутри панелей. Путем вырезки образцов и анализа их состояния выявлено, что именно на участках труб с максимальным значением градиента магнитного поля развиваются повреждения металла. Характер повреждений в ЗКН, 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.

Повреждения в ЗКН преимущественно развиваются на внутренней поверхности трубы при низком качестве 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 (см. рис. 2), а на наружной поверхности — в виде поперечных рисок с частотой, кратной толщине стенки трубы.

В [5, 6] рассмотрены возможности применения метода МПМ с целью решения различных задач обеспечения надежности труб поверхностей нагрева энергетических котлов:

при выявлении участков с развивающимися повреждениями из-за перегрева металла, контроле сварных соединений в узлах с контактной сваркой и узлах приварки змеевиков к коллекторам, определении межкристаллитной коррозии на аустенитных трубах, выявлении мест заземлений на трубах и в опорно-подвесной системе котлов, вызывающих развитие повреждений вследствие недостатка самокомпенсации температурных расширений.

В заключение следует отметить, что пока на большинстве тепловых электростанций и в котельных России основным мероприятием по обеспечению надежности котлов в случае возникновения повреждений труб является их массовая замена. Одна из причин такого подхода — отсутствие эффективных методов для ранней диагностики участков труб с развивающимися повреждениями. Опыт длительного (более 30 лет) применения метода МПМ на ряде энергетических и водогрейных котлов электростанций России, Польши, Китая, Болгарии, Индии и других стран свидетельствует об эффективности этого метода при решении указанных задач.

Список литературы

1. **Власов В. Т., Дубов А. А.** Физические основы метода магнитной памяти металла. — М.: ЗАО “Тиссо”, 2004.
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.
4. **Дубов А. А., Дубов Ал. А., Колокольников С. М.** Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: Учеб. пособие. — М.: ЗАО “Тиссо”, 2008.
5. **Дубов А. А.** Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. — М.: Энергоатомиздат, 1995.
6. **Дубов А. А., Дубов Ал. А., Колокольников С. М.** Техническое диагностирование труб поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов с использованием магнитной памяти металла: Учеб.-методич. пособие. — ИПК Госслужбы, 2006.

mail@enegodiagnostika.ru