

УДК 621.4

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ**

**чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, В.Е. КОТОВ**  
**(Полоцкий государственный университет)**

*Рассмотрена методика диагностирования объектов повышенной опасности на основе неразрушающих методов контроля напряженно-деформированного состояния методом магнитной памяти металла, полевых металлографических исследований и косвенной оценки механических свойств металла.*

Основу промышленного комплекса Полоцко-Новополоцкого региона составляют крупнейшие нефтехимические предприятия республики ОАО «Нафтан», ОАО «Полимир», ОАО «Полоцк-Стекловолокно», НРУПТН «Дружба», которые дают более 50 % валового продукта Витебской области. На этих предприятиях эксплуатируется большое количество потенциально опасных объектов (тысячи сосудов и аппаратов, работающих под давлением; сотни километров технологических трубопроводов, сотни резервуаров, грузоподъемных машин и т.п.). Сырьем и продукцией на производствах являются взрывопожароопасные (нефть, бензин, этилен и т.д.), а также высокотоксичные химические продукты (сероводород, синильная кислота и др.). Технологические процессы протекают при высоких и сверхвысоких давлениях и температурах, при высокой коррозионной активности рабочих сред.

Особую остроту проблеме надежности и безопасности объектов нефтехимического комплекса придает прогрессирующее изнашивание основного технологического оборудования: на ОАО «Нафтан» средний срок эксплуатации приближается к 40 годам, на ОАО «Полимир» - 30 годам. При этом в последние годы возникли проблемы с обновлением основных фондов предприятий, а освоение новых технологий осуществляется преимущественно за счет реконструкции старых производств.

Учитывая актуальность проблемы, для оперативного проведения работ по диагностированию большого количества оборудования различного типа была создана контрольно-испытательная лаборатория Полоцкого государственного университета, аккредитованная Проматомнадзором на техническую компетентность в области неразрушающего контроля и испытания металлов, сплавов и сварных соединений. Лаборатория основана на базе кафедры технологии конструкционных материалов в сентябре 1999 г. для решения научных и практических задач:

- испытание механических свойств и металлография металлов, сплавов и сварных соединений при исследовании и аттестации технологии сварки, наплавки, нанесения диффузионных, порошковых, электролитических и других покрытий;

- экспертиза металлов и сплавов, а также неметаллических материалов;

- неразрушающий контроль и техническая диагностика объектов, поднадзорных Проматомнадзору Республики Беларусь.

Лаборатория располагает необходимым оборудованием по следующим методам неразрушающего контроля и испытаний:

- оптическому (визуально-измерительный метод) контролю;

- капиллярному (цветная и люминесцентная дефектоскопия) контролю;

- акустическому (ультразвуковая дефектоскопия и толщинометрия) контролю;

- радиографическому (рентгенографическая дефектоскопия) контролю;

- магнитному (магнитопорошковая дефектоскопия, метод магнитной памяти металла) контролю;

- измерению твердости;

- испытанию механических свойств металлов и сварных соединений при комнатных, повышенных и пониженных температурах;

- металлографии, в том числе полевой (испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии);

- спектральному анализу химического состава металлов, в том числе в полевых условиях.

Лаборатория имеет лицензии и разрешения Проматомнадзора Республики Беларусь на диагностирование технических устройств, применяемых на опасных производственных объектах;

- сосудов, работающих под давлением, 1 - 4 групп;

- паровых и водогрейных котлов;

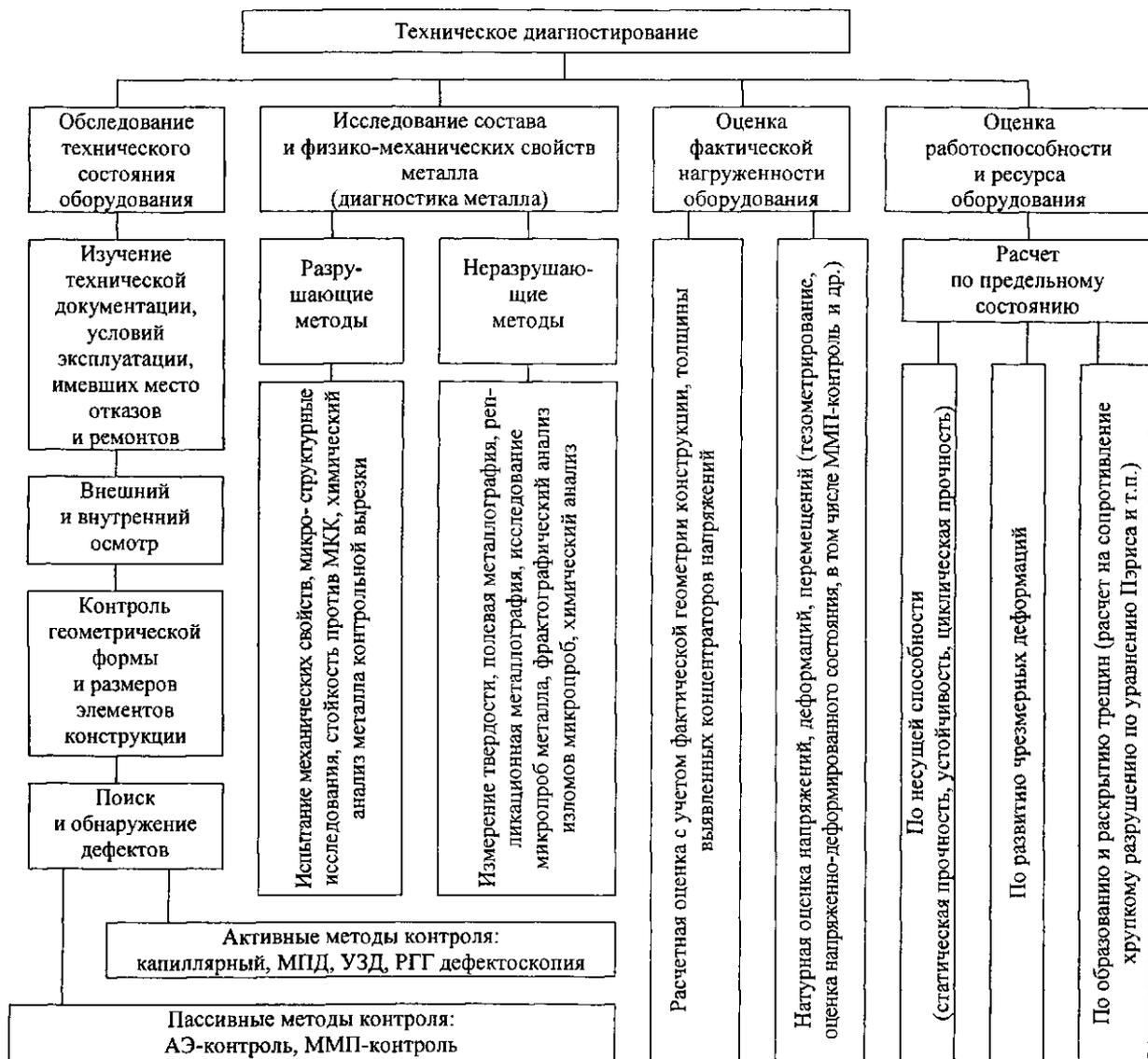
- трубопроводов пара и горячей воды I - III категории (составление паспортов трубопроводов пара и горячей воды IV категории);

- резервуаров для хранения взрывопожароопасных продуктов;

- пассажирских, грузовых и больничных лифтов;

- грузоподъемных кранов, ремонт грузоподъемных кранов (без права капитального).

Обобщенно методология технического диагностирования опасных производственных объектов в контрольно-испытательной лаборатории УО «ПГУ» может быть представлена в следующем виде:



Опыт работы по диагностированию более ста потенциально опасных промышленных объектов за последние пять лет показал, что достоверное диагностирование их технического состояния и остаточного ресурса обеспечивается выявлением наиболее опасных зон элементов конструкций, диагностированием напряженно-деформированного состояния, применением эффективных методов и средств выявления дефектов, выявлением степени деградации структуры и физико-механических свойств материала опасных зон под воздействием эксплуатационных факторов.

На эффективность и достоверность дефектоскопического контроля влияют многочисленные объективные (большая протяженность сварных швов, их труднодоступность, недефектоскопичность и т.д.) и субъективные факторы (квалификация дефектоскописта и другие факторы, влияющие на достоверность контроля). Эффективность дефектоскопического контроля можно повысить, если его вести по объективным показаниям - в местах проявления активности дефектов или местах наибольшей концентрации напряжений, а не выборочно (по результатам визуального контроля и анализа конструкции) или сплошным контролем.

Эффективность диагностики технического состояния значительно повышается при использовании пассивных методов контроля:

- метода акустической эмиссии (АЭ-контроль) - локализация склонных к развитию дефектов;
- метода магнитной памяти металла (ММП-контроль) - выявление зон концентрации напряжений в металле и сварных швах.

Достоинства АЭ-контроля хорошо известны - одновременный контроль больших и протяженных объектов, минимальная подготовка к контролю, выявление наиболее опасных, склонных к развитию дефектов. Метод имеет один, но существенный недостаток - чрезвычайно высокая стоимость контроля.

Нами установлено, что весьма чувствительным и эффективным для оценки характера напряженно-деформированного состояния является метод магнитной памяти металла. Метод позволяет проводить экспресс-диагностику зон концентрации напряжений в элементах конструкции на основе анализа распределения собственных магнитных полей рассеяния, отображающих структурную наследственность металла изделий и сварных соединений. В методе реализуется магнитострикционный эффект, возникающий при упругопластичном воздействии на материал в магнитном поле Земли [1]. Метод позволяет качественно оценить напряженно-деформированное состояние объекта контроля. При возникновении на вершинах трещин и других дефектов зон упруго пластической деформации метод магнитной памяти металла проявляет себя как дефектоскопический [2].

Реагируя на изменение ориентации зон магнитострикции под воздействием упругих и упруго-пластических напряжений, он позволяет фиксировать линии концентрации напряжений. В данном случае прибор для обнаружения линий концентрации напряжений используется как структур о скоп.

Эффективность метода магнитной памяти обусловлена минимальной подготовкой к контролю (доступ к одной из сторон объекта, отсутствие необходимости зачистки контролируемой поверхности), высокая скорость контроля, контроль недефектоскопичных сварных соединений.

Эффективность метода магнитной памяти металла возрастает в сочетании с полевой металлографией при диагностировании технического состояния объектов с развившимися и развивающимися дефектами. При воздействии циклических эксплуатационных нагрузок в конструкции возникают зоны с повышенным уровнем напряжений. При определенном уровне напряжений в них развиваются локальные зоны пластической деформации. Метод магнитной памяти металла выявляет эти зоны локализации пластической деформации, по существу, еще на стадии предразрушения, а полевой металлографией можно выявить появившиеся микроповреждения.

В настоящее время метод магнитной памяти и полевая металлография стали незаменимыми инструментами в нашей работе, особенно при диагностировании технического состояния после различных отказов, аварий и инцидентов.

Рассмотрим несколько наиболее характерных примеров применения изложенной выше методологии.

*Пример 1.* Трансферная линия ОАО «Нафтан» Ду900 (Ø920×10 мм) из стали 15X5M.

В сентябре 2002 г. при сварке в цеховых условиях (укрупнительная сборка) трубопроводов Ду900 трансферной линии установки АВТ-6 на ОАО «Нафтан» произошло разрушение 17 сварных стыков. Материал труб Ø920×10 мм сталь 12CrMo19.5 – аналог стали 15X5M, электроды CROMOCORD 5 – аналог электродов ЦЛ-17.

Ручную дуговую сварку проводили специалисты ОАО «Нефтезаводмонтаж» по следующей технологии: предварительный подогрев 350 – 400 °С, местная термообработка 750 °С в течение 2,5 часов.

Неразрушающим контролем (УЗД, ЦД) после термообработки дефекты сварных швов не были выявлены. Трещины обнаружены визуально и УЗД через 1 – 2 недели после сварки.

Причиной разрушения всех стыков являются холодные трещины, трещины имеют типичный хрупкий характер и распространяются от корня вдоль вертикальной оси шва.

Для качественной оценки напряженного состояния был проведен ММП-контроль кольцевых сварных швов трубопроводов Ø920×10 мм. На рис. 1 представлены магнитограммы заводских стыков, выполненных фирмой «Лавимонт» (Чехия) автоматической дуговой сваркой с объемной термообработкой (нормализация) в печи 680 – 700 °С в течение 2 часов.

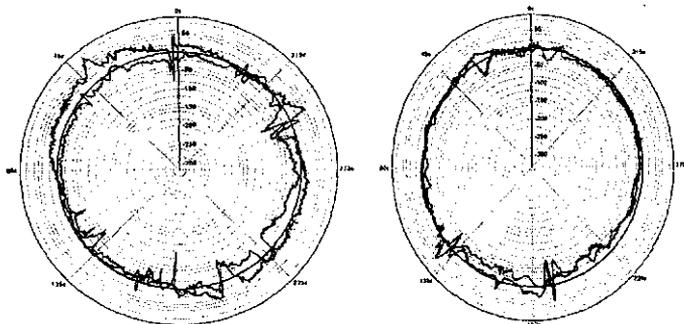


Рис. 1. Магнитограммы заводских сварных швов (автоматическая сварка)

Низкий уровень остаточных напряжений характеризует небольшая амплитуда напряженности собственного магнитного поля рассеяния по каналам (зонам термического влияния) и разность амплитуд напряженности поля между каналами.

На рис. 2 показаны магнитограммы заводских стыков, выполненные ручной дуговой сваркой с термообработкой в печи.

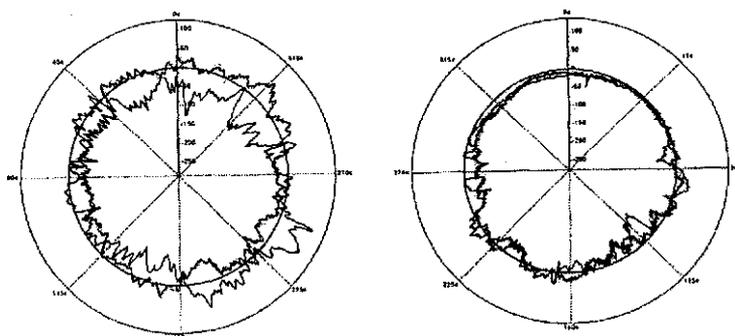


Рис. 2 Магнитограммы заводских сварных швов, ручная дуговая сварка

На рис. 3 представлены магнитограммы, характеризующие напряжения в сварных стыках укрупнительной сборки, выполненные ОАО «Нефтезаводмонтаж» ручной дуговой сваркой с местной термообработкой (отпуск).

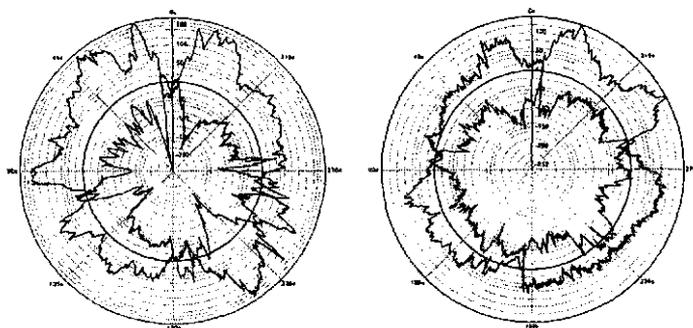


Рис. 3. Магнитограммы монтажных сварных швов, ручная дуговая сварка

Высокий уровень напряжений характеризует большая амплитуда напряженности поля. Овальная форма обоих каналов на магнитограммах свидетельствует о перераспределении макронапряжений, обусловленных устранением овальности труб (до 18 мм) усилиями домкратов при сборке и последующей сварке под напряжением.

По результатам исследований магнитограмм сделан вывод, что основной причиной трещинообразования явился высокий уровень остаточных напряжений 1-го рода в сварных соединениях, обусловленных сваркой под напряжением.

Метод магнитной памяти позволяет успешно диагностировать и аустенитную сталь, обнаруживать аномалию напряжений в имеющейся в аустенитном сварном шве ферритной составляющей (рис. 4).

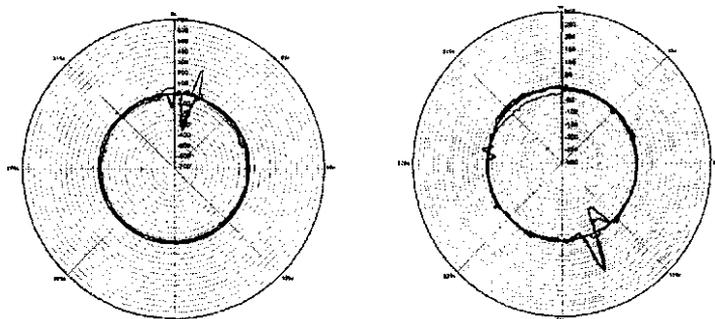


Рис. 4. Магнитограммы сварных швов труб из стали 08X18H10T (ферритная фаза в сварном шве)

**Пример 2.** Переходные детали из никелевого сплава ХН60ВТ газотурбинной энергетической установки КГТУ ОАО «Нафтан».

Проведены исследования в цеховых условиях переходных элементов (переходник и проставка коллектора термопар) от газогенератора к турбине в связи с исчерпанием установленного ресурса. Элементы работают в потоке раскаленных газов при температуре 750 °С. Программа исследований неразрушающими методами включала полевую металлографию переходника и проставки коллектора термопар, измерение твердости, анализ химического состава переносным прибором.

Исследования, проведенные после наработки деталей 19000 часов и 21500 часов, позволили отследить процессы деградации химического состава, структуры и свойств элементов. Металл переходника претерпел незначительные изменения - выявлена начальная стадия коагуляции вторичных фаз (рис. 5).

Химический состав у-твердого раствора металла переходника соответствует стандарту. Переходник находится в работоспособном состоянии и ему продлен ресурс сверх установленного при условии периодического контроля структуры неразрушающим методом через каждые 2000 часов.

В металле проставки коллектора термопар выявлена значительная интенсификация деградиционных процессов (рис. 6), сопровождающаяся коагуляцией вторичных фаз (карбиды, интерметаллиды). По результатам рентгеноспектрального химического состава выявлено падение содержания в состав у-твердом растворе в растворе хрома с 25 % до 18 % вследствие выделения вторичных фаз, что вызвало снижение жаро- и коррозионной стойкости сплава. Проставку коллектора термопар рекомендовано заменить в плановый ремонт блока.

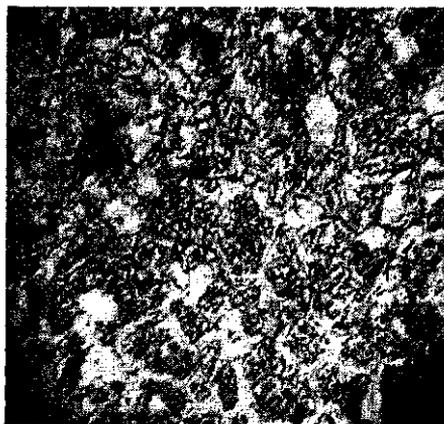
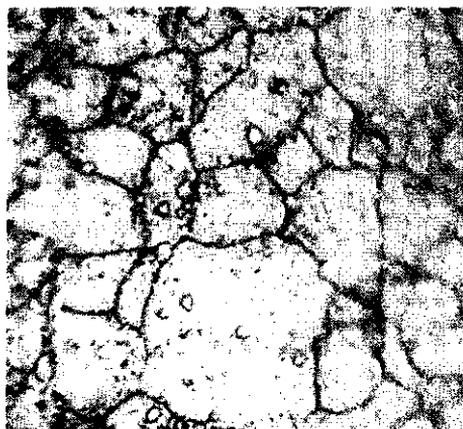


Рис. 5 Микроструктура металла переходника (×250)

Рис. 6. Микроструктура металла проставки (×250)

**Пример 3.** Исследование металла газопровода после пожара (рис. 7).

В сентябре 2002 г. на пересечении газопровода среднего давления 1,2 МПа Ду1000 с высоковольтной линией электропередач 110 кВ произошел инцидент. Оборвавшийся провод упал на защитное ограждение (металлическую сетку) газопровода, при этом произошло короткое замыкание ( $I_{кз} = 25$  кА,  $U_{ост} = 25$  кВ,  $t_{кз} = 0,16$  с).



Рис. 7. Поврежденный газопровод

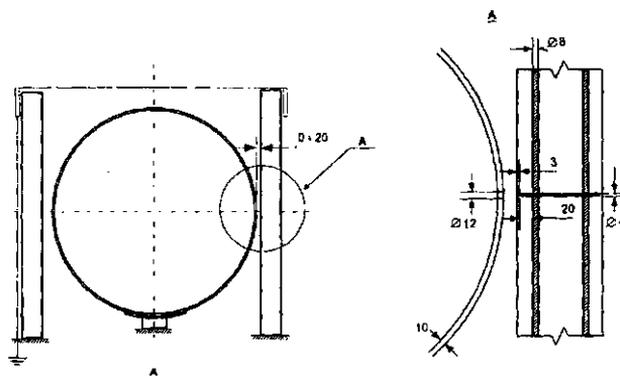


Рис. 8. Схема газопровода в месте повреждения

Несмотря на наличие контура заземления защитного ограждения, произошел высоковольтный пробой через арматуру столба ограждения на газопровод. Этому способствовал дождь и то, что зазор

между арматурой столба и трубой был минимальным (3-10 мм). Высоковольтный искровой пробой инициировал зажигание низковольтного дугового разряда в промежутке «труба - проволока арматуры». За время короткого замыкания электрической дугой в трубе было прожжено сквозное отверстие 012 мм и произошло загорание газа (рис. 8).

Аналогичный пробой и дуговой разряд имел место между арматурной проволокой другого столба и трубой. При этом в стенке трубы образовался прожог глубиной 6 мм.

Анализ физических процессов, имевших место при падении высоковольтного провода на ограждение газопровода, показал, что напряженность электрического поля между арматурой железобетонного столба и трубой в несколько раз превосходила необходимую для пробоя воздушного зазора и облицовочного слоя бетона столба; за время короткого замыкания при электрическом пробое и горении дуги выделилось количество энергии, достаточное для прожога в стенке трубы отверстия 012 мм.

В результате внешнего осмотра газопровода установлено, что огневому воздействию факела горящего газа подвергся участок газопровода длиной 6 м, и хотя видимых деформаций трубы не обнаружено, однако под действием высокой температуры и веса газопровода деформирована подвижная опора (см. рис. 7).

При контроле трубы методом магнитной памяти металла зон и линий концентрации напряжений, свидетельствующих о переходе отдельных участков газопровода в пластическое состояние, не выявлено.

Ультразвуковой толщинометрией утонения стенки газопровода не обнаружено.

Измерение твердости трубы показало, что вне зоны огневого воздействия она составляет 120 - 142 НВ, а в зоне огневого воздействия 103 - 130 НВ.

Механические свойства, определенные методом дюрометрии [3]: предел прочности 340 МПа (нормативное 370 МПа); предел текучести 184 МПа (нормативное 245 МПа).

Предел текучести был также определен методом количественной металлографии [4] по следующей зависимости:

$$\sigma_T = (\sigma_0^2 + \sigma_{\Pi}^2)^{1/2} + (\Delta\sigma_{T.P.}^2 + \Delta\sigma_D^2)^{1/2} + K_y \cdot d^{-1/2} = 208,1 \text{ МПа},$$

где  $\sigma_0$  – напряжения трения  $\alpha$ -решетки, принято 30 МПа;  $\sigma_{\Pi}$  – напряжения за счет упрочнения стали перлитом,  $\sigma_{\Pi} = 2,4 \cdot \Pi$ , МПа, здесь  $\Pi$  – процент перлитной составляющей;  $\Delta\sigma_{T.P.}$  – напряжения за счет упрочнения твердого раствора легирующими элементами, устанавливаемые по величине их концентрации  $C_i$ , в % по массе легирующих элементов в  $\alpha$ -железе (таблица):

$$\Delta\sigma_{T.P.} = 4670 C_{C+N} + 33 C_{Mn} + 86 C_{Si} + 31 C_{Cr} + 30 C_{Ni} + 11 C_{Mo} + 60 C_{Al} + 39 C_{Cu} + 690 C_P + 3 C_V + 82 C_T, \text{ МПа};$$

$\Delta\sigma_D$  – напряжения за счет упрочнения дислокациями, оценивается по плотности дислокаций  $\rho$ ,

$$\Delta\sigma_D = 5Gb\rho^{1/2}, \text{ МПа}, \text{ (для горячекатаных и нормализованных сталей допускается принимать } \Delta\sigma_D = 30 \text{ МПа);}$$

$d$  – средний условный диаметр зерна феррита, определяемый по ГОСТ 5639-82;  $K_y = 20 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{1/2}$ .

#### Химический состав металла трубы

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,19	0,09	0,56	0,014	0,045	0,02	0,1	0,2

Количество перлитной составляющей - 23 % (рис. 9). Размер зерна соответствует 6-му баллу по ГОСТ 5639-82 и составляет 0,0391 мм.

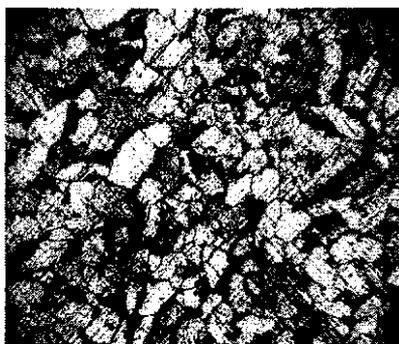


Рис. 9. Микроструктура металла газопровода (\*100)

При полевых металлографических исследованиях (см. рис. 9) в зонах с минимальной твердостью выявлено, что структура металла в зоне нагрева подверглась частичной рекристаллизации и обезуглероживанию, что и вызвало снижение прочностных свойств.

По результатам расчетов на прочность с учетом снижения механических свойств стали условие статической прочности газопровода, тем не менее, выполняется.

По результатам проведенных исследований были даны рекомендации по ремонту газопровода (приварке заплат) и он был допущен к эксплуатации на рабочих параметрах.

*Пример 4.* Диафрагма 2 ступени газовой турбины газотурбинной установки Оршанской ТЭЦ.

Диафрагма (направляющий аппарат) 2 ступени, изготовленная из кобальтового сплава FSX 414, эксплуатируется при температуре газов ~ 750 °С. Нароботка ~ 27000 часов.

Цель исследования - установление причин трещинообразования в сегментах диафрагмы и разработка рекомендаций по их ремонту и эксплуатационному контролю.

Программа исследований включала неразрушающие методы контроля: визуально-оптический, капиллярную дефектоскопию, ММП-контроль, рентгеноспектральный анализ химического состава, полевые металлографические исследования.

По результатам визуального контроля и цветной дефектоскопии в сегменте диафрагмы выявлены трещины на направляющей лопатке и бандже сегмента (рис. 10). Анализ морфологии трещин показывает, что характер их распространения интеркристаллический, трещины имеют различную ширину раскрытия и множественные ответвления. Трещины могут развиваться как изнутри, так и снаружи диафрагмы.

Рентгеноспектральным анализом установлен материал диафрагмы - кобальтовый сплав FSX 414 (США).



Рис. 10. Цветная дефектоскопия трещин диафрагмы

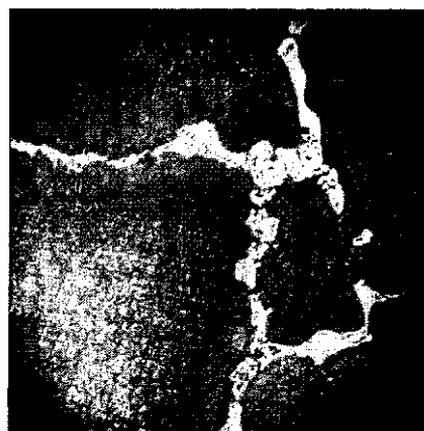
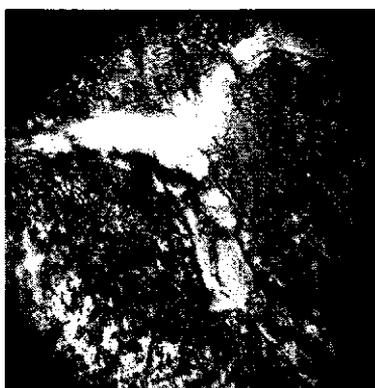


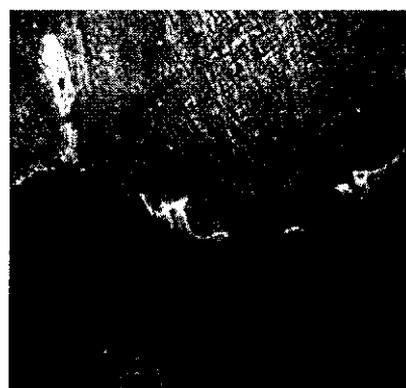
Рис. 11. Выделения вторичных фаз по границам зерен (\*250)



(x250)



(\*250)



(x375)

Рис. 12. Морфология трещин в диафрагме 2-й ступени

Металлографическими исследованиями установлено, что в результате длительного термического воздействия структура сплава претерпела большие деградационные изменения. Наблюдается выпадение и коагуляция вторичных фаз из однородного у-твердого раствора с последующим выделением хрупких карбидных фаз по границам зерен (рис. 11). Трещины развиваются исключительно по карбидной фазе (рис. 12), причем

различная ширина раскрытия трещин обусловлена различной шириной карбидной фазы. По результатам металлографических исследований сделан вывод: материал диафрагмы исчерпал ресурс жаропрочности и жаростойкости, диафрагма не пригодна к ремонту с применением сварки.

Предусмотренный эксплуатационной документацией (визуальный, цветная дефектоскопия) контроль состояния диафрагмы второй ступени не обеспечивает ранней диагностики трещинообразования. Для выбора оптимальных методов контроля диафрагмы был опробован ММП-контроль.

Прибор абсолютно не реагирует на развитие, хорошо выявляемые визуально и цветной дефектоскопией трещины, так как они уже не являются концентраторами напряжений. Показания прибора, фиксирующего собственные магнитные поля рассеяния дефектов и структурных составляющих материала диафрагмы, близки к нулю, что естественно для неферромагнитного материала. Однако при сканировании по бандажу сегментов диафрагмы были отмечены участки с высоким уровнем напряженности магнитного поля в несколько раз превосходящим фон (рис. 13).

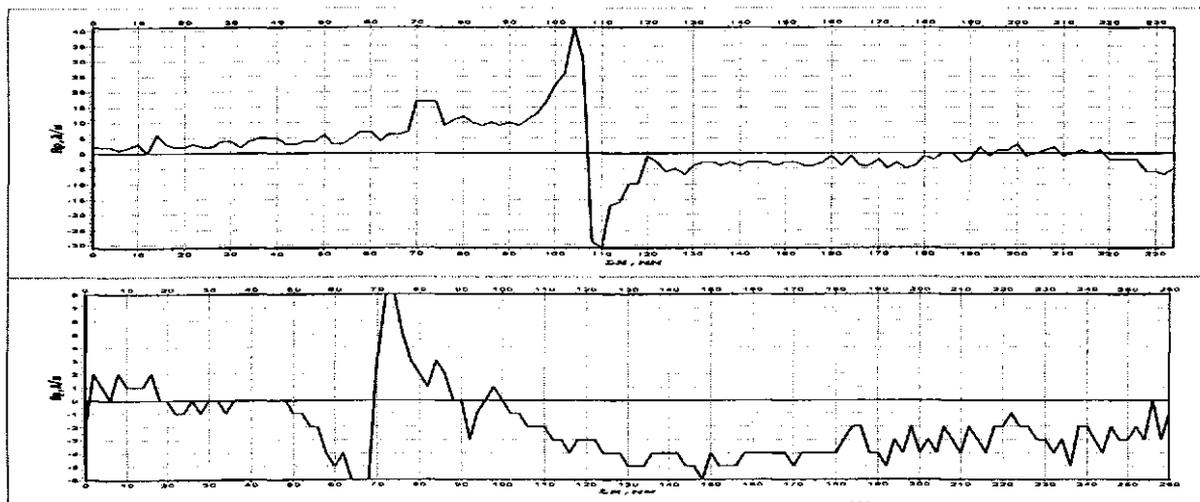
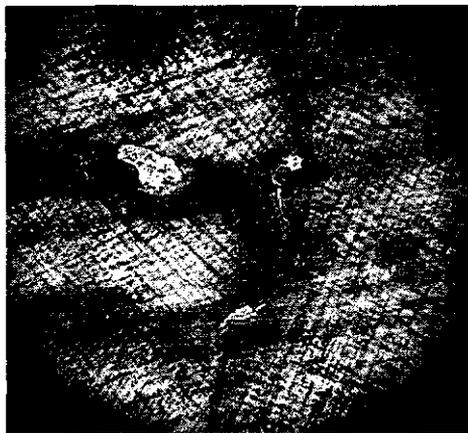


Рис. 13. Магнитограммы распределения нормальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния ( $H_n$ , А/м) по бандажу сегментов диафрагмы 2 ступени

Теоретические основы ММП-контроля [1, 2] позволяют предположить, что пики напряженности магнитного поля соответствуют зонам концентрации напряжений от зарождающихся дефектов. На сегментах диафрагмы были приготовлены микрошлифы на участках, имеющих пики напряженности магнитного поля. При металлографическом исследовании на отмеченных участках бандажа обоих сегментов были выявлены зарождающиеся микротрещины (рис. 14).



(\*250)



(\*250)

Рис. 14. Микротрещины на бандажах сегментов диафрагмы

В данном случае метод магнитной памяти металла показал свою эффективность при выявлении микротрещин в неферромагнитном кобальтовом сплаве, которые невозможно выявить никакими другими методами неразрушающего контроля.

Таким образом, предложена методика неразрушающего экспресс-диагностирования объектов повышенной опасности. Она включает выявление с помощью метода магнитной памяти металла зон (участков) с повышенными напряжениями и последующие оценки изменения химического состава рентгеноспектральным анализом, степени деградации структуры с помощью прямой полевой металлографии и изменения механических свойств косвенными методами (дюрометрии и количественной металлографии).

Такая методика диагностирования позволяет неразрушающими методами давать оценку ресурса дальнейшей безопасной эксплуатации важных объектов, избегая значительных материальных затрат на остановки, обследование и последующий ремонт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубов А.А. Метод магнитной памяти (ММП) - новое направление в технической диагностике оборудования и конструкций // Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла: Материалы первой междунар. науч.-техн. конф., Москва, 24 - 26 февраля 1999 г. - М. - С. 1 - 4
2. Горицкий В.М., Гречишкин В.И. Исследование структурной повреждаемости стальных образцов с использованием метода магнитной памяти металла // Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла: Материалы первой междунар. науч.-техн. конф., Москва, 24 - 26 февраля 1999 г. - М. - С. 44 - 47.
3. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. - М.: Машиностроение, 1979. - 192 с.
4. Горицкий В.М. Диагностика металлов. - М.: Металлургиздат, 2004. - 408 с.