

## К ВОПРОСУ СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

И. П. БЕЛОКУР, Ю. О. ГОРДОННАЯ

Нац. авиационный ун-т. 03680, Киев-58, пр-т Космонавта Комарова, 1. E-mail: ins@nau.edu.ua

Проведен сравнительный анализ требований к сертификации персонала по неразрушающему контролю по ISO 9712, ISO 17024, EN 4179, национальным требованиям к персоналу, оценивающему качество объектов по результатам контроля. Рассмотрены программы подготовки и аттестации специалистов, которые используют органы по сертификации персонала в Украине. Показано, что в этих программах не учтены задачи контроля напряженно-деформированного состояния и деградации материала металлоконструкций, которые имеют место при диагностировании опасных объектов трубопроводного транспорта, длительно находящегося в эксплуатации. Предложено в программах сертификации специалистов рассматривать методологические основы прогнозирования остаточного ресурса конструкции и оценки технического состояния экологически опасных объектов, а процессы их реализации вводить в систему управления качеством конкретного изделия в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO 9001. Библиогр. 26, рис 4.

*Ключевые слова:* техническое состояние объектов, сертификация персонала по НК, система управления качеством, остаточный ресурс

Оценка фактического технического состояния объектов трубопроводного транспорта (трубопроводов, арматуры, компрессоров, переходов и др.) особенно актуальна в условиях острой необходимости в продлении срока эксплуатации объектов, отработавших свой нормативный ресурс. Влияние коррозионно активных сред, колебание температуры, рабочих нагрузок и напряжений, термоциклические процессы, тепловые нагрузки приводят со временем к изменению свойств эксплуатируемого металла [1]. Ресурс безопасной эксплуатации металлоконструкций зависит от фактического состояния структуры и физико-механических свойств металла. В процессе длительной эксплуатации происходят деграционные изменения свойств металла, в том числе: снижение пластичности  $\sigma$ , выраженной в сближении величины предела текучести  $\sigma_T$  и предела прочности  $\sigma_B$ ; снижение трещиностойкости, что сопровождается деграцией ударной вязкости  $\delta_H$  (КСУ); деформационного старения структуры, сопровождающегося снижением характеристик пластичности, трещиностойкости и ударной вязкости [16].

Остаточный ресурс объекта контроля рассчитывается по построенной математической модели и определяется совокупностью оценок технических параметров объекта, уравнением состояния, условиями эксплуатации объекта и совокупностью предельных технических параметров [12]. Специалисты по НК определяют эти параметры и диагностируют техническое состояние конкретного объекта.

Академик В.В.Клюев обосновал структуру диагностирования технического состояния объ-

екта. Остаточный ресурс всего объекта оценивается по компоненту, находящемуся в наихудшем состоянии. Причем, оценка остаточного ресурса осуществляется после отнесения технического состояния к одному из классов: «дефект», «повреждение», «разрушение», «отказ». Деграция объекта определяется через ее признаки, кинетику и механизм развития, а диагностирование среды проводится по анализу ее свойств, создаваемых нагрузок и напряженного состояния объекта (рис. 1). При этом решается задача прогнозирования работоспособности объекта в реальном масштабе времени [16]. В этой связи очень важно проводить переход к единым международным схемам сертификации персонала, единым программам обучения и аттестации, на единые международные правила, учебники, справочники, стандарты и т.п., обеспечивая непрерывность этого процесса [24–26]. Для систем ТД и НК используют:

- единство измерений в международной системе единиц СИ;
- объективность (верность) в рамках допустимой неопределенности ТД и НК;
- признанные и действующие требования международных систем управления качеством;
- прозрачные процедуры проверки компетентности персонала.

НК обеспечивает качественную, количественную и метрологически проверяемую оценку безопасности металлоконструкций при оценке степени усталости металла и многообразия процессов его деграции [5, 8]. Такой контроль качества является действенным, когда процесс контроля

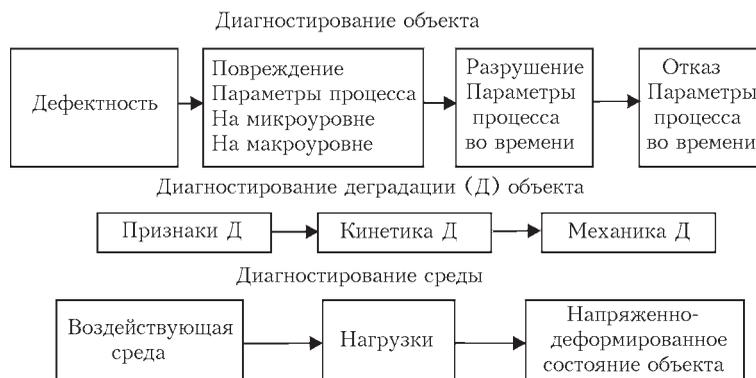


Рис. 1. Структура диагностирования технического состояния

введен в систему управления качеством (СУК) конкретной продукции (изделия, конструкции, объекта), начиная с ее разработки, изготовления, монтажа, эксплуатации, ремонта и до конца срока использования. Требования к разработке СУК изложены в международном стандарте ISO 9001. В частности, эти требования относятся и к методам НК качества [24, 26].

При проведении контроля с помощью основных методов и средств НК металлоконструкций персонал всех уровней квалификации привычно констатирует «есть дефект» или «нет дефекта» в какой-то области исследуемого объекта и, как правило, вне логической связи с его рабочей предысторией и без прослеживания влияния этой дефектности на работоспособность целостной конструкции (изделия) в данное время и в будущем понимание возможной неработоспособности условно бездефектного металла реально не присутствует в практической подготовке и аттестации даже концептуально [13].

Эффективный когда-то дефектоскопический акцент подготовки и аттестации персонала НК, главенствующий в практической диагностике и контроле металлов, сегодня, по-видимому, исчерпал свои возможности и не может обеспечивать объективную подготовку компетентного персонала и его сертификацию. В связи с этим необходима гармонизация систем подготовки и сертификации, так как они отличаются в различных производственных секторах. Озабоченность тем, что уровень подготовки и правила сертификации специалистов по НК различаются не только в разных странах, но и в разных секторах промышленности одной страны, была высказана на 18-й Всемирной конференции по НК в городе Дурбане (ЮАР) [15]. Персонал, выполняющий НК, должен показать, где и примерно когда (по усредненной скорости роста уже накопленной необратимой деградации металла) следует ожидать перехода в состояние начала усталостного разрушения. Особенно это касается общей накопленной усталости металла всего трубопровода с указанием локальных зон концентрации факторов деградации с ко-

личественным измерением в общем и в каждой из локальных зон.

Стандарты ISO 17024, EN ISO 9712, EN 4179 определяют требования к органам и процессам сертификации персонала, который выполняет НК промышленной продукции, а также устанавливают требования к органам по сертификации, к учебным и экзаменационным центрам. Общая модель комплексной оценки квалификации персонала базируется на применении процессного подхода к оценке квалификационного уровня по различным видам и методам НК. Особое место занимает подготовка и аттестация персонала, который выполняет контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) и определяет эксплуатационную деградацию материала трубопровода и арматуры. Эксплуатационная деградация заключается в изменении физико-механических свойств: металла конструкции, пластичности, адгезионной прочности, износостойкости материала, коэффициента трения, поврежденности в зависимости от условий и времени эксплуатации изделий. Для сертификации таких специалистов разрабатывают специальные программы, учитывающие специфику методов контроля НДС (НДС–СТ) и определения указанных характеристик [13].

Метод НК НДС-СТ (STRIN TESTING) введен в перечень методов ISO 9712, а также в перечень методов НК системы добровольной сертификации персонала. Этот метод является комплексным измерительно-расчетным, концепция которого состоит в анализе и сопоставлении результатов расчета НДС на основании данных о рабочих нагрузках и остаточных напряжениях и контроле физическими методами показателей НДС.

Принято выделять три группы методов контроля состояния: аналогий моделей; измерения деформаций натуральных деталей или образцов; определения изменения свойств материалов в условиях напряженного состояния и циклического динамического нагружения.

Применение какого-либо метода контроля зависит от характера механического состояния изделия или конструкции, который описывается гра-

диентом напряжений или скоростью измерения деформаций. Градиент напряжений на поверхности материала обуславливает выбор базы измерения, в которой измеренное среднее значение деформации близко к максимальному. Это особенно существенно при определении концентрации напряжений [16].

В процессе длительной эксплуатации трубопроводного оборудования при высоких температурах и давлениях в металле происходят сложные физико-химические процессы, связанные в первую очередь с распадом перлитной составляющей микроструктуры, коагуляцией и сфероидизацией карбидов, образованием микропор либо клиновидных микротрещин (рис. 2) [14, 17].

В Украине используется много объектов длительной эксплуатации, к безопасности которых предъявляются жесткие требования, которые обеспечиваются как на стадии разработки, так и в процессе эксплуатации. Среди эксплуатационных выделяются процессы оценки остаточного ресурса безопасного применения конкретных элементов трубных металлоконструкций, арматуры, сооружений, гидро- и компрессорных машин. В целом такая оценка осуществляется на основании результатов мониторинга реальной загруженности конструкции, ТД состояния материала и наличия дефектов, а также соответствующих расчетных схем оценки критических состояний в «опасных» точках конструкции. Вместе с тем, естественно, что при длительных сроках эксплуатации конструкций их механическое состояние существенно изменяется [11].

Национальная академия наук Украины под руководством академика Б.Е. Патона выполнила Целевую комплексную программу «Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». Разработаны методологические основы прогнозирования остаточного ресурса конструкций, создания методов, технических средств и технологий для оценки технического состояния и

продления сроков эксплуатации техногенно и экологично опасных объектов [3]. Однако в программах подготовки специалистов по НК и ТД они не отражены.

Исследования механических свойств (механического поведения) материалов в условиях циклического динамического нагружения с целью диагностирования их поврежденности и определения ресурса по указанной программе проведены под руководством академика НАН Украины В.И.Махненко. Он создал основы расчетных методов исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций [4].

По программе также выполнены НИР: Институтом материаловедения НАНУ – «Розроблення методології оцінки експлуатаційної деградації сталей за зміною механічних властивостей засобами індентування» (руководитель Г.М. Мильман, чл.-корр. НАНУ; Физико-механическим институтом им. Г.В. Карпенко НАНУ – «Розроблення методів оцінювання експлуатаційної деградації властивостей сталей магістральних трубопроводів з використанням підходів механіки руйнування і хімічного опору матеріалів» (руководитель Г. М. Никифорчин, д-р техн. наук).

Определены зависимости коэффициентов вариации (рассеивания результатов измерений) от срока эксплуатации трубных сталей в работе М.К. Петрова «Оценка степени поврежденности металла неразрушающими методами» (Тульский гос. ун-т). Показано, что изменения механических свойств сталей ДС и Х52 при длительной эксплуатации малочувствительно к эксплуатационной деградации изделий, работающих в условиях повышенного давления. Вместе с тем коэффициент вариации показателей (твердость, изнашивание, сумма событий и др.), выполненных в аналогичных условиях, лучше отображает отличия между поврежденностью металла в исходном состоянии и после эксплуатации, чем усредненные характеристики, включая механические. Эксплуатационная деградация

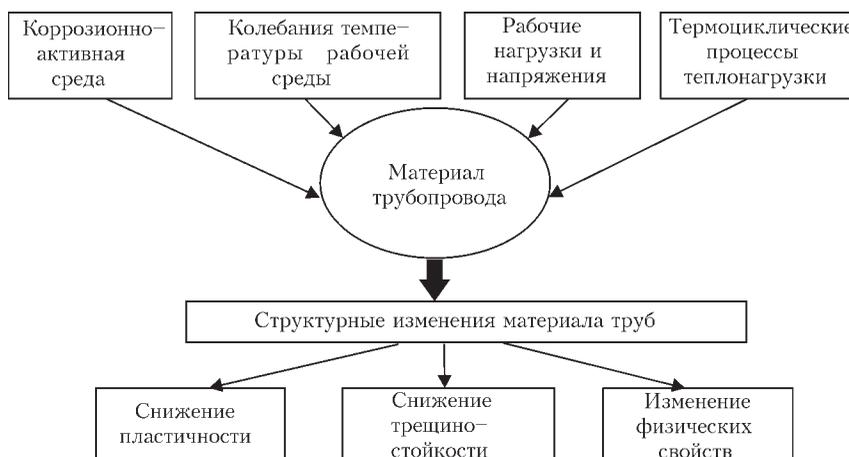


Рис. 2. Основные эксплуатационные факторы, приводящие к деградации структуры и свойств материала труб

влияет на твердость и изнашивание. Полученные результаты доказывают принципиальную возможность использования твердости, изнашивания и трещиностойкости для оценки ресурса сталей объектов повышенного давления.

Анализ кривой растяжения и твердости трубных сталей, длительно находящихся в эксплуатации, показывает, что увеличение коэффициента деформационного упрочнения эксплуатируемого металла является признаком эксплуатационной деградации [7]. При этом прочность и твердость могут как увеличиваться, так и уменьшаться. Их снижение является признаком другой стадии деградации, связанной с развитием рассеянной микрповрежденности. Это свидетельствует об особой опасности хрупкого разрушения при снижении прочности и твердости материала.

Установлено, что характеристики пластичности сталей снижаются при эксплуатации, вместе с тем возможен рост относительного удлинения, которое указывает на раскрытие множества микродефектов. В связи с этим необходимо обязательно определять относительное сужение как единую характеристику пластичности, которая одновременно отображает способность эксплуатируемого металла пластично деформироваться. Отклонение от линейности на графике растяжения отображает развитие рассеянной поврежденности, а не пластическую деформацию. В этом случае трактовка границы текучести специфическая. Характеристика пластичности может некорректно характеризовать эксплуатационную деградацию!

Трещиностойкость – один из существенных показателей деградации эксплуатируемого металла. Несмотря на низкое сопротивление хрупкому разрушению, применение методов линейной механики разрушения некорректно, поскольку эксплуатируемая сталь характеризуется низкой прочностью.

Объединение низкой прочности и низкой трещиностойкости – феномен эксплуатационной деградации (рис. 3).

Исследование природы деформирования и разрушения металлов требует особого внимания специалистов НК при непосредственном наблю-

дении за последовательностью происходящих в металле процессов при деформации в условиях эксплуатации изделий и конструкций. В первую очередь это относится к изучению кинетики процессов деформирования и деградации металлов с изменением напряженного состояния, при которых для более полной информации возникает необходимость измерения и совместной оценки различных физических параметров.

Имеющийся арсенал современных методов и средств позволяет проследить в хронологической последовательности весь процесс, связанный с деформацией и деградацией материалов, эксплуатирующихся в сложных условиях высоких температур, агрессивных сред, длительных нагрузений. Результаты, полученные с помощью различных методик, трудно сопоставимы из-за неидентичности образцов исследуемых и используемых для настройки и калибровки средств контроля, из-за невозможности измерения отдельных характеристик и разных относительных погрешностей измерительных приборов. Существенные изменения показателей пластичности и сопротивления деформированию в зависимости от структурных факторов невозможно проследить обычными методами фиксации отдельных эпизодов изменения микроструктуры и физических свойств, полученных в отрыве от процессов деформирования и разрушения в реальных условиях эксплуатации материала (рис. 4).

В процессе длительной эксплуатации сталей показатели прочности (твердость, граница текучести, граница прочности) возрастают на 10...15 %; вязко-пластические показатели (относительное сужение, относительное удлинение) уменьшаются на 5...7 %; показатели сопротивления хрупкому разрушению (ударная вязкость, трещиностойкость) уменьшаются на 15...20 % [19]. Изменение этих показателей является следствием деградации, происходящей под влиянием коррозионно-агрессивных сред, процессов деформации и разрушения, зарождения и развития микрповреждений, деформационного старения. При этом происходят изменения в структуре ме-



Рис. 3. Механические свойства сталей, изменяющиеся в процессе длительной эксплуатации трубопровода

талла, приводящие к изменению механических характеристик: текучести, прочности, ударной вязкости, твердости и др.; тепловых свойств: удельной теплоемкости, теплового расширения, теплопроводности; электрических свойств: удельного электрического сопротивления; магнитных свойств: магнитной упругости, магнитной сопротивляемости, основной кривой намагниченности, петли гистерезиса, магнитных потерь, магнитной анизотропии; комплексных эффектов: термоэлектрических явлений, магнитострикции, эффекта Холла и др. (рис. 4). Дегградация материалов, характер и распределение напряжений эффективно определяют оптическим, магнитным, вихретоковым, электрическим, радиационным и акустическим видами контроля [18, 20].

Программы подготовки персонала по видам контроля дефектности разработаны всеми органами сертификации, а программы обучения по контролю дегградации и напряженного состояния отсутствуют. Национальным авиационным университетом разработаны рекомендации по составлению таких программ для обучения и сертификации персонала [21], а также рассмотрены методы оценки компетентности специалистов [22, 23]. Программа обучения составлена с учетом нахождения взаимосвязей между изменениями физических свойств материалов и параметров используемых физических полей.

Некоторые из рекомендаций для методов контроля, которые наиболее широко применяют на практике, приведены ниже.

1. Электросопротивление является важнейшим свойством металла с точки зрения элект-

тронной теории. Любое отклонение от полной периодичности кристаллической решетки металла вызывает рассеяние электронов проводимости и, следовательно, создает электросопротивление. Связь электросопротивления с характеристиками электронного строения металлов, подвижностью электронов и их плотностью дает возможность определить такие изменения в металле, которые недоступны другим методам.

Методы измерения электросопротивления достаточно чувствительны и позволяют оценить пластическую деформацию, ползучесть металлов и сплавов, дефекты в кристаллах и точечные дефекты в металлах, а также провести микромеханические исследования свойств материалов.

Электрический метод контроля напряженного состояния реализуется с применением проводочных тензометров. Тензорезисторы удобны для крепления на различных поверхностях, имеют малые габариты и массу. Они широко используются для измерения временных и остаточных деформаций и напряжений  $\sigma$ . В основе метода лежит свойство изменения сопротивления материалов изделия пропорционально изменению их длины. Деформация, которая возникает, приводит к изменению длины проволоки и, соответственно, к изменению электрического сопротивления  $R$ . Изменение сопротивления, вызванное деформацией изделия, характеризует взаимосвязь между законами Ома и Гука:  $\sigma = \Delta RE/RK$ , где  $E$  – модуль Юнга;  $K$  – коэффициент чувствительности тензорезистора, показывающий во сколько раз величина удельного сопротивления изменяется больше



Рис. 4. Модель влияния внешних факторов на изменение физико-механических свойств

длины. Эта зависимость характеризует напряженное состояние в требуемой точке [7].

2. Рентгенографию применяют для определения контактной усталости. При циклическом действии нагрузок проявляется усталостный характер явлений, происходящих у поверхностных слоев металла. Процессы, происходящие в металле, усложняются вследствие локальности нагружения и значительного градиента напряжений в поверхностном слое. Эти напряжения вызывают пластические сдвиги и сопровождаются структурными изменениями в поверхностных слоях, которые резко затухают на небольшой глубине. Рентгеноструктурный анализ позволяет количественно оценивать изменения тонких структурных характеристик [6]. Для напряжений  $\sigma_\phi$ , действующих на поверхности в некотором фиксированном направлении азимутального угла в плоскости поверхности образца  $\phi$ , эта связь выражается так:  $\varepsilon_{\psi\phi} = [(1+\mu)\sigma_\phi \sin^2\psi/E] + \varepsilon_1$ , где  $\psi$  – полярный угол между нормалью к исследуемой поверхности и нормалью к отражающим поверхностям, который характеризует угол поворота образца  $\phi$  от фокусирующего положения;  $\varepsilon_{\psi\phi}$  – деформация параметров кристаллической решетки в направлении  $\psi$ ;  $\varepsilon_1$  – относительная деформация решетки при  $\psi = 0$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга. Исследуемый объект рентгенографируют при нескольких значениях  $\psi$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях: тангенциальном ( $\phi=0$ ) и осевом ( $\phi=90^\circ$ ), что позволяет определить напряженное состояние по величине третьего главного напряжения  $\sigma_3 = [(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3(1+\mu)/\mu)\mu E / (1 - \mu - 2\mu^2)]$ , где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – деформация решетки в трёх основных направлениях. Сумма главных напряжений на поверхности образца:  $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_\phi + \sigma_\phi = 90^\circ = -E\varepsilon_\psi = 0^\circ/\mu$ . В зависимости от длины волны рентгеновского излучения исследуются контактные напряжения, усредненные в слое определенной толщины ( $\approx 12, 10^{-6} \dots 25, 10^{-6} \mu$ ). Чувствительной характеристикой структурных изменений при контактной усталости является также ширина рентгеновских интерференционных полос, которая дает представление об изменениях в такой кристаллической структуре поверхностного слоя материала [7].

3. Применение оптической интерферометрии позволяет совершать бесконтактный съем информации о микроперемещениях (деформации). Для измерения истинного поля перемещений и деформаций локальных зон современных конструкций и изделий применяют методы лазерной интерферометрии [9]. Возможности практического применения методов оптической интерферометрии расширяются путем применения волоконно-оптической техники. Фаза световой волны, выходящей из волокна, изменяется за счет изменения длины, диаметра волокна и его показателя преломления, т.

е. если относительная деформация в одном и другом волокне неодинаковая, то это проявляется в виде смещения интерференционных полос, которое возможно измерить. Изменение фазы на единицу длины волокна и единицу измеряемого физического параметра  $\Delta\Phi/SL$  ( $\Delta\Phi$  – фазовый сдвиг;  $L$  – длина волокна;  $S$  – параметр, который обуславливает изменение фазы). Это величина, несущая информацию об измеряемом объекте. Датчик для измерения деформации изделия состоит из двух волокон. Они прокладываются вдоль изделия таким образом, чтобы при деформации одно волокно растягивалось, а другое сжималось. При этом деформационно-оптический эффект выражается в изменении индикатрисы, которая характеризуется вектором деформации и деформационно-оптическим тензором. В оптически изотропных материалах при их деформировании внешними усилиями возникает удвоенное лучепреломление как результат распространения плоскополяризованных волн, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны.

Исследованиями установлено, что главные оси напряжений совпадают с главными осями оптической симметрии. Изделия в виде пластины, находящейся в плоском напряженном состоянии, следует рассматривать как соединение элементарных кристаллов разной ориентации, которые имеют свойство двойного лучепреломления. Главные показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  связаны с главными напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  линейной зависимостью  $n_1 - n_2 = c(\sigma_1 - \sigma_2)$ , где  $c$  – оптическая постоянная, зависящая от материала и длины волны применяемого света. Разница в скорости волн используемого света является причиной упреждения колебаний одного из лучей при выходе из объекта контроля на величину, которая называется разницей хода лучей  $\delta = \alpha(n_1 - n_2) = c\alpha(\sigma_1 - \sigma_2)$ , где  $\alpha$  – толщина исследуемой пластины. Измеряя разности хода  $\delta$  в этих точках пластины, получают значение разницы главных напряжений в этих точках изделия.

4. Из магнитных методов при оценке эксплуатационных изменений в металле в процессе деградации по усталостному типу (т.е. совокупности изменений свойств металла из-за напряжений, температуры, давления, коррозии, воздействия агрессивных сред, радиационного облучения) эффективен метод коэрцитивной силы (МКС). Информационный параметр контроля в этом подходе – это коэрцитивная сила  $H_c$ . Ее величина возрастает на 300...400 % для ферромагнитных конструктивных марок сталей широкого применения, когда металл в режиме малоциклового усталости и статического-квазистатического нагружения накапливает необратимую микроповрежденность, начиная от исходного состояния до предразруше-

ния [12, 17]. В МКС остаются некоторые неясности, но, пожалуй, только на уровне представлений философии познания и фундаментальной науки на стыке механики разрушения [11], магнетизма и общих аспектов физики твердого тела. На прикладном уровне все проверено, методически выстроено, готово к практическому применению и успешно работает в массовой экспертизе. Испытаны и метрологически упорядочены приборы, формируются соответствующие методики или дополнения к ним. Ведется обучение персонала в учебном центре.

Полезно обобщенное представление текущего значения величины  $H_{ct}$  как совокупности трех компонент:  $H_{ct} = H_{co} + H_{cy} + H_{cn}$ , где  $H_{co}$  – определяется химсоставом и процессом производства металла как такового;  $H_{cy}$  – появляется и накапливается при возникновении необратимых микроразрушений по усталостному типу;  $H_{cn}$  – компонента наличия обратимых (упругих) напряжений любого рода. С увеличением срока службы (в зонах концентрации напряжений) составляющая  $H_{cy}$ , возникнув, непрерывно растет. Для режима надежной эксплуатации должно выполняться неравенство  $H_{ct} < H_{cb}$ , где  $H_{cb}$  – коэрцитивная сила, которая характеризует предел прочности материала. Из этого выражения следует, что по мере накопления усталостных изменений в зоне концентрации напряжений металл начинает разрушаться при напряжениях в нем, заметно меньших величины его справочного предела прочности ( $H_{cb}$ ). Это становится возможным из-за ухудшения механических свойств при развитии деградации по усталостному типу, причем зачастую в бездефектном металле. По мере необратимого роста усталостной составляющей  $H_{cy}$  на фоне неизменной природной составляющей  $H_{co}$  – область определения  $H_{cn}$  неуклонно сокращается по верхней границе. Коэрцитиметрия дополняет сложившуюся систему методов в экспертизе металла до сих пор недоступной информацией об усталости металла с ее количественной и качественной оценкой. Особенно это касается общей накопленной усталости металла всего сооружения (конструкции) с указанием локальных зон концентрации факторов деградации, с количественным измерением в общем и в каждой из локальных зон, с оценкой скорости накопления и прогнозом остаточного ресурса в части состояния металла.

Магнитоупругий метод основан на анализе зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от напряженно-деформированного состояния материала. Под действием механических напряжений деформируется кристаллическая решетка и атомы смещаются со своих нормальных положений. При этом изменяется характер магнитного взаимодействия в кристал-

ле. На кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая, вызванная дополнительными взаимодействиями атомов в результате искривления кристаллических решеток при деформации. При механических деформациях энергия анизотропии получает прирост, являющийся линейной функцией компонента тензора деформации. Она называется магнитоупругой энергией. Термодинамическое соотношение между изменением размеров ферромагнитного тела в направлении действия внешнего намагничивающего поля  $H$  и изменениями индукции  $B$  под действием механических напряжений  $\sigma$  показывает, что с увеличением  $\sigma$  намагниченность ферромагнетика увеличивается, если он имеет положительную магнитострикцию  $\Delta e/e$ , непрерывно увеличивающуюся с напряженностью  $H$  поля. Таким образом, действие  $\sigma$  при заданной напряженности  $H$  изменяет индукцию  $B$ , а вместе с ней и магнитную проницаемость  $\mu$ .

Исходя из законов сохранения энергии, при намагничивании ферромагнитного тела до индукции  $B$  при напряженности  $H$  магнитная энергия  $\omega$  определяется соотношением  $\omega = \int_0^B Hd / (8\pi)$ .

При деформации тела на величину  $\epsilon = \Delta e/e$  для его намагничивания до индукции  $B$  необходимо поле напряженностью  $H_1$ . Получим зависимость

$$\sigma\epsilon = \int_0^B H_0 dB / (8\pi) - \int_0^B H_1 dB / (8\pi)$$

Это соотношение наблюдается в области упругих деформаций. Упругая деформация содействует росту магнитной проницаемости, а пластическая – ее уменьшению.

5. Ультразвуковой метод определения напряжений в твердых материалах основан на закономерностях распространения упругих волн. При исследовании волновых задач при нагруженных объектах контроля составляют линейризованные уравнения движения и граничные условия [6, 10].

Если в упругом изотропном нагруженном теле с начальными деформациями распространяются плоская гармоническая волна, то скорость распространения волн в направлении оси  $c_1$  характеризуется тремя уравнениями. Одно определяет скорость распространения волны  $C_{lx}$ , а два других – скорости волн сдвига  $C_{lx2}$  и  $C_{lx3}$ . Их определяют из выражений [10]:  $\rho c^2 l x_1 = \lambda_1^4 a_{11} + \sigma_{11} \lambda_1^2$ ;  $\rho c^2 l x_3 = \lambda_1^2 \lambda_3^2 \mu_{13} + \sigma_{11} \lambda_1^2$ ; где  $\rho$  – идеальная плотность материала;  $c$  – скорость преломления;  $\lambda$  – длина пути по соответствующей координате;  $\sigma$  – компоненты тензора начальных напряжений;  $\mu$ ,

$a$  – параметры, характеризующие упругий потенциал  $\phi^0$ .

Упругий потенциал  $\phi^0$  в общем для анизотропного тела является функцией компонент тензора деформаций  $\phi^0 = \phi(\epsilon_{23}^0)$ , а для изотропного тела  $\phi^0$  – функция инвариантов тензора деформации  $\phi^0 = \phi(A_i^0)$  при  $i = 1, 2, 3$ , где  $A_i$  – алгебраические инварианты тензора начальных деформаций  $A_1^0 = \epsilon_{in}^0$ ;  $A_2^0 = \epsilon_{ln}^0 \epsilon_{ni}^0$ ;  $A_3^0 = \epsilon_{in}^0 \epsilon_{np}^0 \epsilon_l^0$  [10]. Для определения напряжений необходимо знать изменение скоростей сдвиговых волн  $C_{\text{тх}2}$  и  $C_{\text{тх}3}$  при поляризации вдоль каждой из главных напряжений, а также значения скорости сдвиговой волны в ненагруженном теле и механические свойства исследуемого объекта. При определении одноосных напряжений достаточно знать поляризацию каждой волны вдоль и поперек напряжений, а также механические свойства материала.

### Выводы

Рассмотренные рекомендации раскрывают направления по обучению и аттестации персонала на основании анализа опубликованных результатов исследований, полученных специалистами при контроле НДС и деградации материала различных металлоконструкций трубопроводного транспорта.

К специалистам, занимающимся диагностикой остаточного ресурса, предъявляются повышенные требования, поэтому они должны иметь не только навыки работы со средствами контроля, но и знаниями в области сопротивления материалов, прочности, деградации свойств и механики разрушения материалов, хорошо ориентироваться в нормативной и методической документации, знать особенности объектов контроля; уметь проводить расчет напряженного состояния и контроль физическими методами параметров НДС. Однако нормы оценки качества металлоконструкций, которые отражены в СНИП и национальных стандартах негармонизованы с требованиями международных стандартов серии ISO 9000. Гармонизация норм оценки качества длительно эксплуатируемых конструкций трубопроводного транспорта, техногенно и экологично опасных объектов достигается созданием систем управления качеством конкретного изделия, которые разработаны в соответствии с требованиями ДСТУ ISO 9001.

В системе управления качеством отображают действующие нормы на оценку качества изделия от его создания до захоронения. Должны быть указаны методы контроля, а также программы подготовки и аттестации персонала с оценкой его компетентности диагностировать деградацию материала объекта контроля.

Программы сертификации специалистов по диагностике объектов трубопроводного транспорта

разрабатывают с раскрытием физических основ методов НК, а также с обязательным изучением следующих вопросов:

- прочности несущих элементов металлоконструкций;
- критериев ресурса, определение параметров ресурса;
- работоспособности и живучести металлоконструкций, запасов прочности;
- роли расчетов и экспериментов при определении запасов прочности и ресурса;
- стадий разрушения при общем ресурсе;
- расчетов штатной и аварийной ситуации;
- ориентации технического регулирования;
- факторов, которые необходимо учитывать при расчете остаточного и циклического ресурса;
- накопленные повреждения;
- критериев трещиностойкости и живучести;
- скорости роста трещин;
- информативных методов определения остаточного ресурса и безопасности;
- штатной и аварийной диагностики состояния технических систем.

1. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Зб. наук. ст. // Під наук. керівн. Б.Є. Патона. – Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 2006. – 589 с.*
2. *Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: Уч. пос. // Под ред. В.В. Клюева. – М.: Спектр, 2011. – 187 с.*
3. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А. Трещины стресс-коррозии в зоне сварного соединения № 11 парогенераторов ПГВ-1000М / Пробл. ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 2–10.*
4. *Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Київ: Наук. думка, 1976. – 320 с.*
5. *Белокур И. П., Коваленко В. А. Дефектоскопия материалов и изделий. – Киев: Техника, 1989. – 196 с.*
6. *Бобренко В. М., Вангели А. Н., Куценко А. Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. – Кишнев: Штица, 1981. – 252 с.*
7. *Білокур І. П. Елементи дефектології при вивченні неруйнівного контролю. – Київ: Вища шк., 1987. – 196 с.*
8. *Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль. – Киев: Вища шк., 1989. – 205 с.*
9. *Методы контроля и исследования легких сплавов: Справ. / Л. М. Вассермен, В. А. Данилишин, О. С. Коробов и др. – М.: Металлургия, 1985. – 510 с.*
10. *Гузь А. Н., Махорт Ф. Г. Механика связанных полей в элементах конструкций. Акустоэлектромагнитоупругость. – Киев: Наук. думка, 1988. – 286 с.*
11. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. / Під ред В.В.Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988. – 120 с.*
12. *Неруйнівний контроль і технічна діагностика: Т. 5 / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенко, 2001. – 1134 с.*
13. *Аттестация персонала в области неразрушающего контроля / С. В. Клюев, Н. Н. Коновалов, С. Г. Копытов, М. О. Соловьева // Метрология в неразрушающем контроле: Учеб. пособие под ред. В. В. Клюева. – М.: Спектр, 2011. – 200 с.*
14. *Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высоко-*

- го давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов, В. В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 7.
15. *Троицкий В. А.* Основные тенденции развития неразрушающего контроля металлоконструкций по результатам 18-й Всемирной конференции по НК. – Киев: Информ. бюлетьень №3(55). – С. 7–13.
  16. *Махутов Н. А., Гаденин М. М.* Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности / Под ред. В.В.Клюева. – М.:Спектр, 2011. – 187 с.
  17. *Обзорная* оценка состояния и детальная экспертиза усталости металла больших размеров объектов и конструкций неразрушающим коэрцитиметрическим методом / Г. Я. Безлюдько, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль – 2012. – № 3. – С. 57–65.
  18. *Мындюк В. Д., Доценко Е. Р., Карпаш М. О.* Особенности деградации структуры материалов металлоконструкций длительной эксплуатации и оценка возможности ее диагностики в нефтегазовом комплексе / Научн. вест. ИФНТУНГ. – 2011 – №2(28). – С. 91–97.
  19. *Доценко Е. Р., Карпаш М. О., Карпаш О. М.* Дослідження методу визначення напруження плинності конструкційних сталей за значенням їх питомого опору // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 24. – 105–111.
  20. *Информационное* и методическое обеспечение работ по определению механических свойств стальных конструкций неразрушающими методами контроля / О. М. Карпаш, М. О. Карпаш, Н. Л. Татсанович, Е. Р. Доценко // Prjceedings XXVII Intern. conf. NDT days 2012-DEFECTOSKOPIA 12 11–15 June 2012. Sozopol-Bolgaria. – S. 269–272.
  21. *Блокур І. П.* Сертифікація персоналу. – Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 220 с.
  22. *Мухаровський М., Хімичева Г.* Моделювання комплексної оцінки компетентності персоналу // Там само. – 2005. – № 3. – С. 21–25.
  23. *Мухаровський М., Хімичева Г., Глухова О.* Моделювання процесів органу сертифікації персоналу // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2006. – № 6. – С. 53–61.
  24. *ISO/IEC 17024–2003.* Оцінювання відповідності. Загальні вимоги до органів з сертифікації персоналу.
  25. *Фарлі М.* Посібник з атестації та сертифікації персоналу з неруйнівного контролю, – 2012. – 15 с.
  26. *EN ISO 9712.* Неруйнівний контроль – Атестація і сертифікація персоналу з неруйнівного контролю.

Comparative analysis of requirements to NDT personnel certification to ISO 9712, ISO 17024, EN 4179, and national requirements to personnel assessing object quality by testing results, was performed. Programs of personnel training and certification are considered, which are used by personnel certification bodies in Ukraine. It is shown that these programs do not take into account the tasks of monitoring the stress-strain state and degradation of metal structure material, which are encountered at diagnostics of unsafe objects of pipeline transportation in long-term service. It is proposed to consider in personnel certification programs the methodological fundamentals of prediction of residual life of structures and evaluation of technical condition of environmentally hazardous facilities; and introducing the processes of their realization into the quality management system for a specific item, in keeping with the requirements of DSTU ISO 9001 standard. 20 References.

*Key words:* technical state of facilities, NDT personnel certification, quality management system

Поступила в редакцію  
04.04.2013

## ПОДПИСКА — 2014

### на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
160 грн.	320 грн.	900 руб.	1800 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

Подписка на электронную версию журнала  
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»  
на сайтах: [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com), [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru).

#### Контакты:

Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

Подписано к печати 31.10.2013. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 4 цв. вклейки.  
Печать ООО «Фирма «Эссе».  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.