

онування НТМ України є автомобільний транспорт, щодо якого існують великі системні проблеми з відтворенням необхідних для моделювання вихідних даних.

Стратегічним планом розвитку ДП «ДержавтотрансНДІ-проект» на середньостроковий період 2014 — 2020 рр., затвердженим наказом Мінінфраструктури від 23.10.2014 № 539, за напрямом наукового, інформаційно-аналітичного та експертного забезпечення діяльності автомобільного транспорту передбачено створення на базі ДП «ДержавтотрансНДІпроект» системи інформаційного забезпечення галузі автомобільного транспорту задля підвищення ефективності її функціонування. Відповідно, на базі наявних потужностей, досвіду та наукового потенціалу ДП «ДержавтотрансНДІпроект» як багатопрофільного науково-дослідного інституту в сфері управління Мінінфраструктури України мають бути створені базові елементи ЦОД-НТМ.

ДП «ДержавтотрансНДІпроект» має досвід у розробленні агрегованих національних та детальних регіональних транспортних моделей, що стосуються реконструкції та прогнозування структури парку (рис. 4), обсягів перевезень, споживання моторних палив, викидів забруднювальних речовин (рис. 5, рис. 6) та стану забруднення довкілля міст (рис. 7) залежно від різних сценаріїв соціально-економічного розвитку країни та державного регулювання в наведених сферах.

На базі ДП «ДержавтотрансНДІпроект» створюються робочі групи з розвитку та підтримки функціонування ЦОД-НТМ і НТМ, збирання та обробки даних (зокрема розроблення відповідних алгоритмів), транспортної аналітики, економічного аналізу, транспортного моделювання за різними напрямками, роботи з геоінформаційними системами, візуалізації результатів моделювання тощо.

Слід ще раз наголосити, що розбудова ЦОД-НТМ та створення НТМ є складними масштабними завданнями, які потребують значних ресурсів із залученням ве-

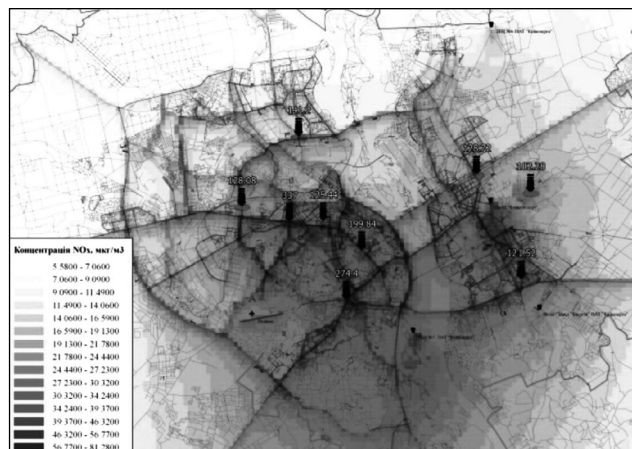


Рис. 7. Приклад математичного моделювання забруднення міста Києва (наведено фонові концентрації оксидів азоту та концентрації на окремих вулицях) (Джерело: Розроблення математичної моделі якості атмосферного повітря міста на базі європейської технології THOR-Air-PAS для оцінки ефективності розвитку дорожньої інфраструктури, організації дорожнього руху та проектів містобудування. Проміжний звіт ДП «ДержавтотрансНДІпроект» з НДР, № Державного реєстру НДР — 0115U006028, 2015р.)

ликої кількості причетних сторін та мають виражений міжвідомчий характер. Існує великий перелік органів виконавчої влади та суб'єктів, що є джерелами і споживачами даних ЦОД-НТМ, а також споживачами результатів, що повинна надати НТМ.

Зауваження та пропозиції щодо проекту Концепції НТМ України, а також пропозиції щодо співпраці у цій сфері, просимо надсилати на адресу ДП «ДержавтотрансНДІпроект»: 03113, м. Київ, пр. Перемоги, 57, або на NTM@insat.org.ua.

УДК 389:620.19.40

©Белокур І. П., академик,
©Гордонная Ю. О., магістр (НАУ)

ОЦЕНКА КОМПЕТЕНТНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Анотація. Проведено порівняльний аналіз вимог до компетентності персоналу неруйнівного контролю за ISO 9712, ISO 17024, EN 4179, національними вимогами до персоналу, який оцінює якість об'єктів за результатами контролю. Розглянуто програми підготовки та атестації фахівців, які використовуються органами з сертифікації персоналу в Україні. Показано, що в цих програмах не враховані завдання контролю напружено-деформованого стану та деградації матеріалу металокопструкцій, які мають місце в діагностуванні небезпечних об'єктів тривалої експлуатації. Запропоновано в програмах атестації фахівців розглядати методологічні основи прогнозування залишкового ресурсу конструкції та оцінки технологічного стану технічно й екологічно небезпечних об'єктів, а процеси їхньої реалізації вводити в систему управління якістю конкретного виробу відповідно до вимог стандартів ДСТУ ISO 9001: 2015.

Ключові слова: неруйнівний контроль деградації матеріалу металокопструкцій, управління якістю, атестація фахівців, сертифікація персоналу в Україні.

Аннотація. Проведен сравнительный анализ требований к компетентности персонала неразрушающего контроля по ISO 9712, ISO 17024, EN 4179, национальным требованиям к персоналу оценивающего качество объектов по результатам контро-

ля. Рассмотрены программы подготовки и аттестации специалистов, которые используются органами 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 длительной эксплуатации. Предложено в программах аттестации специалистов рассматривать методологические основы прогнозирования остаточного ресурса конструкции и оценки технологического состояния технически и экологически опасных объектов, а процессы их реализации вводить в систему управления качеством конкретного изделия в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO 9001:2015.

Ключевые слова: неразрушающий контроль деградации материала металлоконструкций, управление качеством, аттестация специалистов, сертификация персонала в Украине.

Abstract. Issue of certification of Non-destruction testing (NDT) personnel degradation of metal material. A comparative analysis of the requirements for certification of NDT personnel for ISO 9712, ISO 17024, EN 4179, national requirements for evaluating the quality of the facilities staff on the results of monitoring. Considered the programs of certification of the personnel, which are used by certification personnel in Ukraine. It is shown that these programs do not take into account the problem of monitoring the stress-strain state and material degradation of metal that are taking place in the diagnosis of dangerous objects to age. Proposed programs, certification of experts to consider the methodological basis of forecasting residual life of the design, and evaluation of the technical and technological environmentally hazardous facilities and their implementation to introduce a quality management system in a particular product, in accordance with the requirements of DSTU standards — ISO 9001:2015.

Keywords: Non-destruction testing (NDT) degradation of metal material, quality management, certification personnel in Ukraine.

Введение

Оценка фактического технического состояния металлоконструкций различного назначения в промышленности особенно актуальна в условиях острой необходимости в продлении срока эксплуатации объектов, отработавших свой нормативный ресурс. Влияние коррозионноактивных сред, колебаний 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 деградационные изменения свойств металла в том числе: снижение пластичности σ выраженной в сближении величины предела текучести σ_t и предела прочности σ_b ; снижение трещиностойкости, что сопровождается деградацией ударной вязкости $\sigma_{\text{н}}$ (KCU); деформационного старения структуры сопровождающегося снижением характеристик пластичности, трещиностойкости и ударной вязкости.

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 неразрушающему контролю (НК) определяют эти параметры и производят диагностирование технического состояния конкретного объекта.

Цель исследований определения показателей технического состояния изделия

Академик В. В. Ключев обосновал структуру диагностирования технического состояния объекта. Остаточный ресурс всего объекта оценивается по компоненту, находящемуся в наихудшем состоянии. Причем оценка остаточного ресурса осуществляется после отнесения их технического состояния к одному из классов «дефект», «повреждение», «разрушение», «отказ». Деградация (Д) объекта определяется через ее признаки, кинетику и механизм развития, а диагностирование среды производится 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 [20, 22, 23]. Для систем технической диагностики и неразрушающего контроля используют:

- ▶ единство измерений в международной системе единиц СИ;
- ▶ объективность (верность) в рамках допустимой неопределенности технической диагностики и неразрушающего контроля;
- ▶ международно признанные и действующие системы качества;
- ▶ прозрачные процедуры проверки компетентности персонала.

Неразрушающий контроль обеспечивает качественную, количественную и метрологически проверяемую оценку безопасности металлоконструкций, когда осуществляет техническую диагностику степени усталости металла и многообразия процессов его деградации [5, 8]. Причем такой контроль качества является действенным, когда процесс контроля 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 неразрушающего контроля качества [19, 24].

В основной массе применяемых методов и средств неразрушающего контроля металлоконструкций персонал всех уровней квалификации при проведении контроля 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 внятного прослеживания влияния этой дефектности на работоспособность целостной конструкции (изделия) сейчас и в будущем понимание возможной неработоспособности условно бездефектного металла реально не присутствует в практической подготовке и аттестации даже концептуально [13].

Некогда эффективный дефектоскопический акцент подготовки и аттестации персонала неразрушающего контроля, главенствующий в практической диагностике и кон-

троле металлов, сегодня, по-видимому, исчерпал свою эффективность 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). 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 всей конструкции с указанием локальных зон концентрации факторов деградации с количественным измерением — общим и в каждой из локальных зон.

Методы определения характеристик материала

Стандарты ISO 17024, EN ISO 9712, EN 4179 определяют требования к органам и процессам сертификации персонала, который выполняет неразрушающий контроль промышленной продукции, а также устанавливают требования к органам по сертификации, учебным и экзаменационным центрам. Общая модель комплексной оценки квалификации персонала базируется на применении процессного подхода к оценке квалификационного уровня по различным видам и методам неразрушающего контроля. Особое место занимает подготовка и аттестация персонала, который выполняет контроль напряженно-деформированного состояния и определяет эксплуатационную деградацию материала металлоконструкций. 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 напряженно-деформированного состояния (НДС-ST) и определения указанных характеристик [13].

Метод НК НДС-ST (STRIN TESTING) введен в перечень методов ISO 9712, а также введен 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 градиентом напряжений или скоростью измерения деформаций. Градиент напряжений на поверхности материала обуславливает выбор базы измерения, в которой измеренное среднее значение дефор-



Рис. 1. Структура диагностирования технического состояния

мации близко к максимальному. Это особенно существенно при определении концентрации напряжений [16].

В процессе длительной эксплуатации энергетического 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 [12, 17].

На территории Украины используется много объектов длительной эксплуатации, к безопасности которых предъявляются жесткие требования, обеспечиваемые как на стадии разработки, так и в процессе эксплуатации. Среди эксплуатационных процессов выделяются те, что связаны с оценкой остаточного ресурса безопасного применения конкретных элементов металлоконструкций, сооружений и машин. В целом такая оценка осуществляется на основании результатов мониторинга реальной загруженности конструкции, технической диагностики состояния материала и наличия дефектов, а также соответствующих расчетных схем оценки критических состояний в «горящих» точках конструкции. Вместе с тем, естественно, что при длительных сроках эксплуатации конструкций их методическое содержание 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» [1]. Разработаны методологические основы прогнозирования остаточного ресурса конструкций, создания методов, технических средств и технологий для оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации техногенно и экологически опасных объектов [3].

Определены зависимости коэффициентов вариации (рассеивания результатов измерений от срока эксплуатации трубных сталей). Показано, что изменения механических свойств сталей ДС и Х52 при длительной эксплуатации мало чувствительны к эксплуатационной деградации изделий с повышенным давлением. 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 средние характеристики, включая механические. Эксплуатационная деградация влияет на твердость и изнашивание.

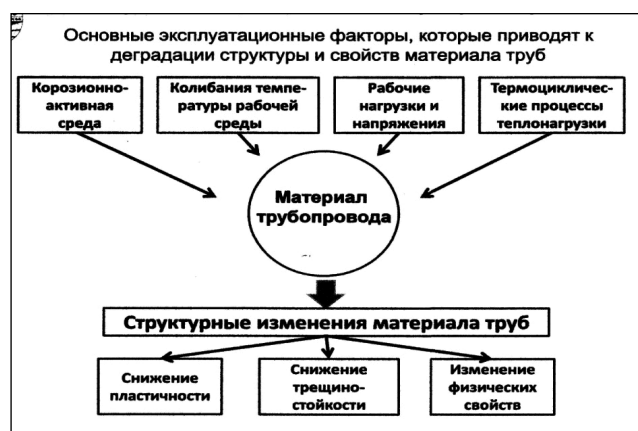


Рис. 2. Эксплуатационные факторы, которые приводят к деградации материала труб

Полученные результаты доказывают принципиальную возможность использования твердости, изнашивания и неразрушающего контроля для оценки ресурса сталей объектов при повышенном давлении.

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 есть признаком другой стадии деградации, связанной с развитием рассеянной микроповрежденности. Это свидетельствует об особой опасности хрупкого разрушения при снижении прочности и твердости материала.

Установлено, что характеристики пластичности сталей снижаются во время эксплуатации, вместе с тем возможен рост относительного удлинения, которое отображает 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 отображается низкой прочностью.

Объединение низкой прочности и низкой трещиностойкости — феномен эксплуатационной деградации.

Исследование природы деформирования и разрушения металлов требует особого внимания специалистов неразрушающего контроля при непосредственном наблюдении за последовательностью происходящих в металле процессов 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, работающих в сложных условиях высоких температур, агрессивных сред, длительных нагружений. Результаты, полученные отдельно с помощью различных методов, весьма 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.

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 микроповреждений, деформационного старения. При этом происходят изменения в структуре металла, приводящие к изменению механических характеристик (граница текучести, граница прочности, ударная вязкость, твердость и др.), тепловых свойств (удельная теплоемкость, тепловое расширение, теплопроводность), электрические свойства (удельное электрическое сопротивление), магнитные свойства (магнитная упругость, магнитная сопротивляемость, основная кривая намагниченности, петля гистерезиса, магнитные потери, магнитная анизотропия), комплексные эффекты (термоэлектрические явления, магнитоstriction, эффект Холла и др.). Деградация 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 деградации и напряженного состояния отсутствуют. Национальным авиационным университетом разработаны рекомендации по составлению таких программ для обучения и сертификации персонала. Программа обучения составляется с учетом нахождения взаимосвязей между изменениями физических свойств материалов и параметров используемых физических полей. Некоторые из рекомендаций для методов контроля, наиболее широко применяемые на практике, приведены ниже.

Взаимосвязь физических полей с физическими свойствами материалов

1. Электросопротивление является важнейшим свойством металла с точки зрения электронной 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 проволочных тензометров. Тензорезисторы удобны для крепления на различных поверхностях, имеют малые габариты и вес. Они широко используются для измерения временных и остаточных деформаций и напряжений σ . В основе лежит изменение 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:

$$\sigma = \Delta RE / RK, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга, K — коэффициент чувствительности тензорезистора, который показывает, во сколько раз удельное сопротивление изменяется больше, нежели длина. Эта зависимость характеризует напряженное состояние в требуемой точке [7].

2. Рентгенографию применяют для определения контактной усталости. При циклическом действии нагрузок проявляется усталостный характер явлений, которые происходят в поверхностных слоях 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 σ_φ , которые действуют на поверхности в некотором фиксированном направлении азимутального угла в плоскости поверхности образца φ , эта связь выражается так:

$$\varepsilon_{\psi\varphi} = [(1 + \mu)\sigma_\varphi \sin^2 \psi / E] + \varepsilon_\nu, \quad (2)$$

где ψ — полярный угол между нормалью к исследуемой поверхности и нормалью к отражающим поверхностям, который характеризует угол поворота образца φ от фокусирующего положения; $\varepsilon_{\psi\varphi}$ — деформация параметров кристаллической решетки в направлении φ ; ε_ν — относительная деформация решетки при $\varphi = 0$; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга.

Исследуемый объект рентгенографируют при нескольких значениях в двух взаимно перпендикулярных направлениях: тангенциальному ($\varphi = 0^\circ$) и осевому ($\varphi = 90^\circ$). Это



Рис. 3. Модель влияния внешних факторов на изменение физико-механических свойств



Рис. 4. Механические свойства сталей, которые изменяются в процессе длительной эксплуатации

позволяет определить напряженное состояние по величине третьего главного напряжения

$$\sigma_3 = [(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3(1 + \mu) / \mu)\mu E / (1 - \mu - 2\mu^2)], \quad (3)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — деформация решетки в трех основных направлениях.

Сумма главных напряжений на поверхности образца: $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_\varphi + \sigma_\varphi = 90^\circ = -E\varepsilon_\varphi = 0^\circ/\mu$. В зависимости от длины волны рентгеновского излучения исследуется контактное напряжения усредненные в слое определенной толщины ($\approx 12 \cdot 10^{-6} \dots 25 \cdot 10^{-6} \mu$). Чувствительной характеристикой структурных изменений при контактной усталости является также ширина рентгеновских интерференций (B), которая дает представление об изменениях в такой кристаллической структуре поверхностного слоя материала [7].

3. Применение оптической интерферометрии позволяет совершать бесконтактный съем информации о микродвижениях (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, то есть если относительная деформация в одном и другом волокне не одинаковая, то

это выявляется в виде смещения интерференционных полос, которое возможно измерить. Изменение фазы на единицу длины волокна и единицу измеряемого физического параметра $\Delta\Phi/SL$, — фазовый сдвиг, L — длина волокна, S — параметр, который обуславливает изменение фазы. Это величина, которая несет информацию об измеряемом объекте. Датчик для измерения деформации изделия состоит из двух волокон, каждое из которых прокладывается вдоль изделия таким образом, чтобы при деформации одно волокно растягивалось, а другое — сжималось. При этом деформационно-оптический эффект выражается в изменение 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, которая находится в плоском напряженном состоянии, следует рассматривать как соединение с разной ориентацией элементарных кристаллов, имеющих свойство двойного лучепреломления. Главные показатели преломления n_1 и n_2 связаны с главными напряжениями σ_1 и σ_2 линейной зависимости:

$$n_1 - n_2 = c(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (4)$$

где c — оптическая постоянная, которая зависит от материала и длины волн 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

$$\delta = \alpha(n_1 - n_2) = c\alpha(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (5)$$

где α — толщина исследуемой пластины.

Измеряя разности хода δ 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, то есть совокупности изменений свойств металла из-за напряжений, температуры, давления, коррозии, воздействия агрессивных сред, радиационного облучения набором достоинств присущи методу 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 микрповрежденность, начиная от исходного состояния до предразрушения [12, 16]. В применении МКС остаются некоторые неясности, но, скорее, 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 компонентов:

$$H_{CT} = H_{CO} + H_{CY} + H_{CHP}, \quad (6)$$

где H_{CH} — определяется химсоставом и процессом производства металла как такового, H_{CY} — появляется и накапливается при возникновении необратимых по усталостному типу, H_{CO} — компонент наличия обратимых (упругих) напряжений любого рода.

С ростом срока службы (в зонах концентрации напряжений) составляющая H_{CY} , возникнув, непрерывно растет. Для режима надежной эксплуатации должно выполняться неравенство $H_{CT} < H_{CB}$. 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 при H_{CB} . Это становится возможным из-за ухудшения механических свойств при развитии деградации по усталостному типу, причем зачастую в бездефектном для дефектоскопии металле. По мере необратимого роста усталостной составляющей H_{CY} на фоне неизменной природной составляющей H_{CO} область определения H_{CH} неуклонно сокращается по верхней границе. Коэрцитиметрия дополняет сложившуюся систему методов в экспертизе металла до сих пор недостаточной информацией об усталости металла с количественной и качественной оценкой. Особенно это касается общей накопленной усталости металла всего сооружения (конструкции) с указанием локальных зон концентрации факторов деградации, с количественным измерением общим 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 кристалле. На кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая, которая вызвана дополнительными взаимодействиями атомов в результате искривления кристаллических решеток при деформации. При механических деформациях энергия анизотропии получает прирост, который является 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 σ показывает, что с увеличением σ намагниченность ферромагнетика увеличивается, если он имеет положительную магнитострикцию $\Delta e/e$, которая непрерывно увеличивается с полем H . Таким образом, действие при заданной напряженности H изменяет индукцию B , а вместе с ней и магнитную проницаемость μ .

Исходя из законов сохранения энергии при намагничивании ферромагнитного тела до индукции B при напряженности H , магнитную энергию ω определяют

соотношением: $\omega = \int_0^B Hd / (8\pi)$. При деформации тела на величину $\varepsilon = \Delta e / e$ для намагничивания до индукции B требуется поле с напряженностью H_B , в результате получим зависимость в $\sigma\varepsilon = \int_0^B H_0 dB / (8\pi) - \int_0^B H_1 dB / (8\pi)$, учитывая при этом, что $\mu = 4\pi\chi$ можно записать через магнитную восприимчивость $\Delta \chi / \chi = 4\sigma\varepsilon_0 x_0$. Эта пропорциональность 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 линеаризованные уравнения движения и граничные условия [6, 10].

Если в упругом изотропном нагруженном теле с начальными деформациями распространяется плоская гармоническая волна, то скорость распространения волн в направлении оси c_1 характеризуется тремя уравнениями. Одно из них определяет скорость волны расширения c_{ix} , а два других — скорости волн сдвига c_{ix2} и c_{ix3} . Их определяют из выражений [10]:

$$\rho c^2 \lambda_{x_1} = \lambda_1^4 a_{11} + \sigma_{11} \lambda_1^2; \rho c^2 \lambda_{x_2} = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \mu_{12} + \sigma_{12} \lambda_1^2; \rho c^2 \lambda_{x_3} = \lambda_1^2 \lambda_3^2 \mu_{13} + \sigma_{11} \lambda_1^2, \quad (7, 8, 9)$$

где ρ — идеальная плотность материала, c — скорость преломления, λ — длина пути по соответствующей координате; σ — компоненты тензора начальных напряжений; μ и a — параметры, характеризующие упругий потенциал.

Упругий потенциал ϕ^0 в общем для анизотропного тела является функцией компонент тензора деформаций $\phi^0 = \phi(\varepsilon_{23}^0)$, а для изотропного тела ϕ^0 — функция инвариантов тензора деформации $\phi^0 = \phi(A_i^0)$ при $i = 1, 2, 3$, где A_i — алгебраические инварианты тензора начальных деформаций $A_1^0 = \varepsilon_{in}^0$, $A_2^0 = \varepsilon_{in}^0 \cdot \varepsilon_{in}^0$, $A_3^0 = \varepsilon_{in}^0 \cdot \varepsilon_{np}^0 \cdot \varepsilon_{ip}^0$. Для определения напряжений необходимо знать изменение скоростей сдвиговых волн c_{ix2} и c_{ix3} при поляризации вдоль главных напряжений, а также значения скорости сдвиговой волны в ненагруженном теле и механические свойства

исследуемого объекта. При определении одноосных напряжений достаточно знать поляризации каждой волны вдоль и поперек напряжений, а также механические свойства материала.

Выводы

Рассмотренные зависимости раскрывают направления по обучению и аттестации персонала на основании анализа опубликованных результатов исследований, полученных специалистами при контроле напряженно-деформированного состояния и деградации материала различных металлоконструкций.

К специалистам, занимающимся оценкой НДС, предъявляются повышенные требования, поэтому они должны обладать не только навыками 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.

Программы сертификации специалистов разрабатывают с раскрытием физических основ методов неразрушающего контроля, а также с изучением вопросов технической диагностики остаточного ресурса и безопасности [5]:

- ▶ прочность несущих элементов металлоконструкций;
- ▶ критерии ресурса, определение параметров ресурса;
- ▶ работоспособность и живучесть металлоконструкций, запасы прочности;
- ▶ роль расчетов и экспериментов при определении запасов прочности и ресурса;
- ▶ стадии разрушения при общем ресурсе;
- ▶ расчеты штатной и аварийной ситуации;
- ▶ ориентация технического регулирования;
- ▶ факторы, которые учитывают при расчете остаточного и циклического ресурса;
- ▶ накопленные повреждения;
- ▶ критерии трещиностойкости и живучести;
- ▶ скорость роста трещин;
- ▶ информативные методы определения остаточного ресурса и безопасности;
- ▶ штатная и аварийная диагностика состояния технических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Збірник наукових статей, які підготовлені за результатами виконання робіт цільової комплексної програми НАН України під науковим керівництвом академіка Б. Е. Патона. — К.: ІЄЗ ім. Е. О. Патона НАН України, 2006. — 589 с.
2. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. Учебное пособие под общ. ред. В. В. Клюева. — М.: Издательский дом «Спектр» 2011. — 187 с.
3. Махненко В. І. Розробка методологічних основ оцінки технічного стану та обслуговування безпечного строку експлуатації конструктивних елементів об'єктів підвищеної безпеки на території України. К. — 120 с.
4. Махненко В. І. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций — К.: Наукова думка, 1976. — 320 с.
5. Белокур И. П., Коваленко В. А. Дефектоскопия материалов и изделий. — К.: Техника, 1989. — 196 с.
6. Бобренко В. М., Вангели А. Н., Куценко А. Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. — Кишинев (Молдавия): Штица, 1981. — 252 с.
7. Білокур І. П. Елементи дефектології при вивченні неруйнівного контролю. — К.: Вища школа, 1987. — 196 с.
8. Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль. — К.: Высшая школа, 1989. — 205 с.
9. Методы контроля и исследования легких сплавов: Справочник / Л. М. Вассермен, В. А. Данилишин, О. С. Коробов и др. — М.: Металлургия, 1985. — 510 с. — К.: Наукова думка, 1981. — 276 с.

10. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г. Механика связанных полей в элементах конструкций. Акустоэлектромагнитопругость. — К.: Наукова думка, 1988. — 286 с.
11. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідк. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — К.: Наукова думка, 1988.
12. Неруйнівний контроль і технічна діагностика. Т. 5/ Під ред. З. Т. Назарчука. — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка, 2001. — 1134 с.
13. Ключев С. В., Коновалов Н. Н., Копытов С. Г., Соловьева М. О. Аттестация персонала в области неразрушающего контроля. Муравская Н. П. Метрология в неразрушающем контроле: Учеб. пособие под общ. ред. В. В. Ключева. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 200 с.
14. Смирнов А. Н., Абабков Н. В., Козлов Э. В., Муравьев В. В. «Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики длительно работающего металла поврежденного барабана котла высокого давления. Контроль. Диагностика» №7, 2012.
15. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. / Под ред. В. В. Ключева. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.
16. Безлюдько Г. Я., Завальнюк О. П., Нестеренко В. Б. и др. Обзорная оценка состояния и детальная экспертиза усталости металла больших размеров объектов и конструкций неразрушающим коэрцитиметрическим методом. — К.: Техническая диагностика и неразрушающий контроль №3, 2012 — С. 57-65.
17. Мындюк В. Д., Доценко Е. Р., Карпаш М. О. Особенности деградации структур материалов металлоконструкций длительной эксплуатации и оценки возможности ее диагностики в нефтегазовом комплексе. Научный вестник ИФНТУНГ. — 2011, №2(28). — С. 91- 97.
18. Доценко Е. Р. Дослідження методу визначення напруження плинності конструкційних сталей за значенням їх питомого опору /Е. Р. Доценко, М. О. Карпаш, О. М. Карпаш //Методи та прилади контролю якості. — 2010, №24.- С. 105...111.
19. Карпаш О. М., Карпаш М. О., Тасанович Н. Л., Доценко Е. Р. Информационное и методическое обеспечение работ по определению механических свойств стальных конструкций неразрушающими методами контроля. / Prjceedings XXVII International Conference NDT days 2012. DEFECTOSKOPIA 12. 11-15 June 2012. Sozopol-Bolgaria. — 269....272.
20. Методи та прилади контролю якості. — 2010. — №24.
21. Білокур І. П. Сертифікація персоналу. Навч. посібник— К.: НАУ, 2014. — 364 с.
22. Білокур І. П. Основи сертифікації персоналу з неруйнівного контролю. Навч. посібник — К.: НАУ, 2016 — 356 с.
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. EN ISO 9712 — 2012. Неруйнівний контроль — Аттестация і сертифікація персоналу з неруйнівного контролю.



Михайлу Семеновичу Стороженку — 80!

Професор Стороженко Михайло Семенович — відомий вчений-дорожник, висококваліфікований педагог вищої школи, який дав путівку в професійне життя сотням інженерів та магістрів, автор майже 300 наукових та науково-методичних робіт, навчальних посібників, багатьох оригінальних технічних рішень, захищених авторськими сві-

доцтвами та патентами, 20 лютого 2017 року відсвяткував 80-й день народження.

Виробничий та життєвий досвід сприяв формуванню Михайла Семеновича як відомого вченого-практика, який спрямовує наукові дослідження на розв'язання складних виробничих завдань. Схильність до глибокого наукового аналізу, вміння визначити перспективні напрямки розвитку науки, обумовили його наукові інтереси — регулювання вод-

но-теплого режиму земляного полотна, вдосконалення технології ремонту доріг на основі фізико-хімічної механіки, розробка методів та приладів для оцінки транспортно-експлуатаційного стану доріг, дослідження безпеки дорожнього руху тощо. За його безпосередньої участі розроблено понад 20 нормативних документів для дорожньої галузі.

Сорок років його життя та науково-педагогічна робота нерозривно пов'язані з Харківським національним автомобільно-дорожнім університетом (ХАДІ), з кафедрою будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О. К. Біруля. Тут він закінчив аспірантуру, захистив дисертацію, пройшов шлях становлення видатного науковця. У 2002 році ВАК України присвоїв М. С. Стороженку вчене звання професора. Він нагороджений знаком «Почесний дорожник України», грамотами Укравтодору та обласної державної адміністрації.

Учні вдячні своєму Вчителю, вимогливому, але справедливому педагогу, шанованому колегами та й узагалі всіма, хто його знає.

Редколегія журналу приєднується до численних привітань і бажає Михайлу Семеновичу міцного здоров'я, життєдайної енергії та постійного руху до нових звершень.