



ОБЗОРНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ДЕТАЛЬНАЯ ЭКСПЕРТИЗА УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛА БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ И КОНСТРУКЦИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ*.

Г.Я. БЕЗЛЮДЬКО¹, канд. техн. наук, О.П. ЗАВАЛЬНЮК², В.Б. НЕСТЕРЕНКО²,
А.Ю. МАРЧЕНКО¹, Р.Н. СОЛОМАХА¹, инженеры

(¹)ООО «Фирма «Специальные Научные Разработки», г. Харьков, (²)Херсонский государственный морской ин-т)

Экспертиза металла крупногабаритных конструкций и сооружений тем точнее, чем больше физически разнородных и информационно эффективных НК-методов и подходов в ней используются. Однако их количество и разновидности в таком экспертном наборе не должны формироваться субъективно и стихийно. Желателен некий объективный оптимизирующий «стержень» для достижения наибольшей полноты решения поставленной задачи и при этом, по возможности, с минимизацией затрат. Роль такого оптимизатора, который к тому же хорошо обобщает и гармонизирует результаты специализированных методов, органично присущ методу коэрцитивной силы. Он продуктивен и как обзорный, и локально, во взаимосвязи общего и частного. И основывается на количественной, качественной и метрологически проверяемой оценке степени усталости металла как самой общей платформе процессов деградации металла в их многообразии.

Examination of metal of large-sized structures and constructions is the more accurate, the greater the number of physically dissimilar and information-effective NDT methods and approaches are used in it. However, their number and variety in such an expert set should not be formed in a subjective and spontaneous manner. It is desirable to have some objective optimizing "core" to achieve the utmost completeness of solution of the designed task, while minimizing the costs as far as possible. The role of such an optimizer, which also successfully generalizes and harmonizes the results of specialized method, is inherent to the coercive force method. It is productive both as a survey method, and locally, in the interconnection of the general and the particular. Moreover, it is based on the quantitative, qualitative and metrologically checked degree of metal fatigue as the most general platform of the processes of metal degradation in all their diversity.

Если представить себе обобщенный образ идеального метода НК для оценки состояния такого (и не только) класса объектов, то, руководствуясь простой инженерной логикой, можем получить следующее. Метод должен быть прост в плане необходимой квалификации исполнителей, нетрудоемок в реализации, убедительно произрастать из классических представлений механики нагружения, наглядно отображать как общую картину нагружения и усталостной деградации металла всего сооружения в целом, так и любых его жизненно важных частей, с выделением зон концентрации напряжений и сопутствующих эксплуатационных воздействий, показывать общие и локальные особенности в их взаимной связи. Причем, слежение должно быть действительно, начиная с состояния поставки (монтажа) и до конца срока службы. С количественными оценочными критериями на всю конструкцию и на каждую зону концентрации, каждое проблемное сварное соединение, с определением скорости накопления деградации, т.е. с прогнозом остаточного ресурса «по состоянию». Добавим сюда пожелание хорошей чувствительности информационного параметра, его однозначность и устойчивость к мешающим факторам. Конечно же этот метод не должен быть только еще одной, пусть и эффективной, но узкоспециальной добавкой в арсенале НК-специалиста. Он должен быть преимущественно эффективен как обзорный, значим организующе-указующе. И при этом его добавление не должно удорожать экспертизу. Напротив, его простота и комплексная физическая эффективность исключают из конкретного обследования методы явно непродуктивные, а продуктивные будут использованы только там, где это диктует состоя-

ние металла. В итоге объемы диагностических работ снизятся, а их достоверность возрастет. Метод должен быть работоспособен в реальных условиях эксплуатации, т.е. в пределах здоровой логики обходиться без зачистки металла, работать по защитному красочному и другому покрытию в несколько мм, не требовать остановки оборудования, функционировать на горячих поверхностях и на любом морозе, отличаться хорошей воспроизводимостью, просто и надежно документироваться, реализовываться в ручном и стационарном вариантах мониторинга и др.

И чем дольше мы занимаемся диагностикой металлоконструкций и оборудования, а также приборостроением для этого, тем бесповоротнее убеждаемся, что такой неправдоподобный набор достоинств сегодня существует и присущ известному более 100 лет методу коэрцитивной силы (МКС). Но не в его изначальном классическом магнитометрическом и металлургическом наполнении [1, 4], а 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 и т.д. Понятно, что информационный параметр контроля, используемый в этом подходе – это коэрцитивная сила металла H_c . К примеру, ее величина, как отмечалось в [5], возрастает на 300...400 % для ферромагнитных конструкционных марок сталей широкого применения, когда металл в режиме *малоциклового усталости* и статического-квазистатического нагружения накапливает необратимую микроповрежден-

* Статья на правах рекламы



ность, начиная от исходного состояния до предразрушения [2, 3]. И эту накапливающуюся поврежденность металла сегодня невозможно отследить в массовой практической экспертизе ничем, кроме МКС. Возможные оппоненты, настаивающие на использовании в такой роли иных методов, в лучшем случае неискренни. Им, как специалистам, лучше нас всех понятна несостоятельность этих методов для отмеченных выше задач, особенно в обзорно-обобщающем аспекте. И такая полезная дискуссия продуктивна вне рамок этой статьи.

Как авторы такого нового применения давно известного метода для оценки именно усталостных аспектов состояния металла, мы шли к пониманию и констатации этого около 30 лет. Здесь остались неясности и сегодня, но, пожалуй, только на уровне представлений философии познания и фундаментальной науки на стыке механики разрушения, магнетизма и общих аспектов физики твердого тела. На прикладном уровне все проверено, методически выстроено, готово к практическому применению и успешно работает в массовой экспертизе. Производится линейка хорошо испытанных, приспособленных и метрологически упорядоченных приборов. По мере накопления опыта экспертизы новых разновидностей объектов формируются соответствующие методики или дополнения к ним. Ведется обучение персонала в учебном центре. Факторы, сдерживающие применение МКС в практической диагностике, исключительно субъективны. Отмечено, что чем больше его организующая и направляющая доля в экспертизе данного объекта, тем выше ее техническая и экономическая эффективность. Достаточно подробно прикладные аспекты механики разрушения в таком пока непривычном коэрцитиметрическом ракурсе показаны ранее в работах [5]. Не углубляясь здесь в физические основы «усталостного» применения МКС, остановимся на его заявленной общей и частной приоритетностях.

Как пример, ниже даны фрагменты нашей [6] коэрцитиметрической экспертизы регенератора установки каталитического крекинга для производства бензина на нефтеперерабатывающем предприятии. Аппарат отработал расчетный срок службы (20 лет). Необходима была оценка его состояния перед выводом на капитальный ремонт, с обоснованием его необходимости и уточнением его объемов.

Объект контроля представляет собой технологическую колонну (рис. 1) высотой около 50 м и диаметром 9...11 м (рис. 2). Оболочка сварена из листов стали 09Г2С высокотемпературного варианта, толщиной 20...30 мм. Рабочая температура наружной поверхности металла около 200 °С, температура рабочей среды 700 °С, внутреннее давление $2 \cdot 10^4$ МПа. Измерения информационного параметра – коэрцитивной силы металла – выполнялись нами вручную, двумя бригадами по два со-

трудника в течение рабочей недели в летний период при полном световом рабочем дне непосредственно на работающем оборудовании, без какой-либо специальной подготовки металла. Для получения достоверного представления о состоянии металла потребовалось выполнить измерения в около 1,2 тыс. точек.

Схематически на рис. 2 показана колонна с обозначением полистного раскроя оболочки. Понятно, что ее состояние в первую очередь определяется состоянием кольцевых сварных соединений на соответствующих уровнях конструкции колонны, обозначенных на рис. 2 номерами поясов колонны, от третьего по 12.

Коэрцитиметрия этих кольцевых соединений была частью общих измерений листов оболочки корпуса соответствующих поясов колонны, как это видно на фрагменте общей развертки листов оболочки на рис. 3.

Здесь показана часть полистной развертки корпуса для поясов № 3–6 с нанесенными на нее в цвете результатами коэрцитиметрии металла листов. На цветной оценочной шкале (рис. 3) синим цветом показано коэрцитиметрически исходное состояние (поставки) Hc_0 для стали 09Г2С, около 2,4 А/см в соответствующих единицах измерения коэрцитивной силы, а ее состояние на пределе прочности $Hc^B \approx 9$ А/см. Эти границы эксплуатационного состояния металла показаны и на графиках рис. 2, о чем речь идет ниже. При этом на рис. 3 на среднем (центральном) листе четвертого пояса, как методический пример, отмечено минимально необходимое количество точек выполнения замеров вообще на каждом листе и на листах, к нему прилегающих, чтобы получить адекватное представление о напряженном и усталостном состоянии этого листа как элемента конструкции. Обмеряя подобным образом каждый лист оболочки, получаем совокупность измерений по поверхности оболочки. Она характеризует количественно и качественно напряженное и усталостное состояние всей колонны в целом и каждого листа, и сварного соединения – в отдельности, но все это во взаимной системной связи. Эта особенность составляет главное достоинство и основное содержание МКС применительно к экспертизе крупногабаритных объектов из металла, имеющее исключительный характер. Из него уже естественно следует целый набор еще более безусловно эффективных прикладных частных, которые аксиоматически актуальны, но до сих пор относились к ряду благих пожеланий из-за отсутствия механизма их осуществления. Не будет лишним отметить очевидную истину, что интегральная оценка состояния объекта, особенно в том, что касается общего усталостного и напряженного состояния, его механическая устойчивость потенциально не «по силам» ни одному НК-методу или их совокупности (кроме



МКС, конечно) и даже никакой концепции экспертизы, если иметь в виду уровень массовой экспертизы. Хотя саяно-шусшенская и фукусимская аварии более чем наглядно свидетельствуют, что и на уникальных объектах с состоятельной комплексной технической диагностикой далеко не благополучно. В основной массе экспертиза всех уровней привычно констатирует «дефектность – не дефектность» металла какой-то области обследуемого объекта и, как правило, вне логической связи с его рабочей предисторией и без внятного прослеживания влияния этой дефектности на работоспособность целостной конструкции сейчас и в будущем. Понимание возможной неработоспособности условно бездефектного металла реально не присутствует в практической экспертизе даже концептуально. Не говоря уже ни о какой содержательной ориентированности на предупреждение разрушения металла. А о сравнительной экономической и технической эффективности вариантов решений столь актуальной задачи – отремонтировать имеющееся оборудование или покупать новое – так и речь не может идти без целостного видения механической устойчивости объекта, степени и скорости накопления усталостной микроповрежденности металла в нем. Некогда эффективный дефектоскопический акцент, главенствующий в практической диагностике металлов, сегодня, по-видимому, исчерпал свою продуктивность и не может обеспечить реальную, а не абстрактную нормативную безопасность работы оборудования в любых отраслях.

Из графиков на рис. 2 видно, какая часть оболочки сооружения осталась по состоянию металла практически в исходном состоянии, а какая заметно продвинулась в накопленной поврежденности металла. При этом графики средних поуровневых значений и максимальных практически идентичны по характеру, что является свидетельством неслучайности каждого из них и отображаемых ими физических тенденций в контролируемом коэрцитиметрическом металле.

На рис. 4 показан уже подробно пример коэрцитиметрической экспертизы состояния одного из кольцевых сварных соединений колонны между 9 и 8 поясами. Это радиальный график распределения значений H_c по длине окружности этого шва. Используемое здесь обозначение СКО – это среднеквадратическое отклонение, характеризующее степень неравномерности накопления необратимых изменений металла сварного соединения. Выполнены измерения в обеих околошовных зонах как наиболее вероятных областях начала разрушения металла, обычно наступающего при значениях H_c , приближающихся к границе H_c^B , т.е. около 9 А/см. Визуально на этом шве имеется наибольшее количество былых ремонтных вставок из-за поверхностного растрескивания металла в зонах, где, свидетельствуя это, образовались и совпадают

максимумы H_c выше и ниже шва, как это показано метками A и B на рис. 4. У других кольцевых сварных соединений, имеющих и более высокие значения H_c в своих зонах термовлияния, но только с одной стороны шва, трещинообразования за 20 лет не было. Из всего этого следуют важные для службы эксплуатации выводы. В целом у всех кольцевых сварных соединений колонны металл в наиболее подверженных разрушению зонах термовлияния находится в состоянии надежной эксплуатации и не нуждается в замене, упрочнении и даже дефектоскопии. Растрескивания металла имели место в зонах, где с обеих сторон шва величина H_c одновременно имеет сегодня значения более 5 А/см. Рабочий режим эксплуатации колонны не может инициировать напряжения в этих сварных соединениях, способные вызвать растрескивания металла в зонах термовлияния. Причина этого явления – неплановые остановки – пуски технологической установки, при которых возникают кратковременные локальные механические перенапряжения температурного происхождения. В такие переходные моменты в хорошо видимых коэрцитиметрией зонах возникают пиковые механические перенапряжения, «разряжающиеся» трещинами металла. Это трещины не усталости, а напряжений. Рекомендации в этой части экспертизы состоят в минимизации остановок в работе колонны, а если они все же случаются, то надо хотя бы режим пускового разогрева (из холодного состояния) не форсировать во времени для минимизации температурных напряжений в металле. Особенно «травматичны» в этом плане остановки работы колонны в зимнее время, т.е. при отрицательных температурах окружающего ее воздуха, порядка минус 20 °С и ниже. Ударная вязкость даже новой стали



Рис. 1. Общий вид контролируемого объекта



09Г2С при таких температурах уже заметно ухудшается. А с учетом уровня накопленной (за 20 лет) поврежденности, который в зонах концентрации этих процессов достигает 40...60 % по измерениям H_c , получаем, что те температурные напряжения, которые в летнее время данный металл мог бы выдержать без последствий, в зимнее время приводят к растрескиванию оболочки корпуса колонны. Несомненно, это недостаток конструкции, который исправить на данном аппарате в рамках разумно достаточного финансирования практически невозможно. Скомпенсировать в какой-то мере возможно, понимая с помощью МКС суть проблемы. Эффективно здесь может оказаться усиление металла уже обозначившихся зон концентрации напряжений, но не традиционными ремонтными вставками, а специальными накладками с так называемыми в сварке электрозаклепками, не травмирующими собственно корпус колонны, а толь-

ко упрочняющих его именно по всей поверхности таких накладок, в четко очерченных с помощью МКС локальных зонах. Все выявленные зоны концентрации необратимых ухудшений свойств металла не связаны с нормативным режимом работы колонны. Об этом убедительно свидетельствуют и средние арифметические значения величины коэрцитивной силы каждого кольцевого сварного соединения (СА), рис. 2, и наибольшие значения $H_{c_{max}}$, выявленные в каждом соединении. Как видно из рис. 2, полученные на всей этой колонне значения $H_{c_{средн}} = СА$ и $H_{c_{max}}$ далеки от границы начала разрушения металла $H_c^B \approx 9$ А/см. Причины имевших место растрескиваний металла в течение срока службы регенератора – не эксплуатационная усталость металла, а кратковременные температурные перегрузки в отдельных зонах из-за технологических сбоев в работе. Состояние всех вертикальных сварных соединений из опы-

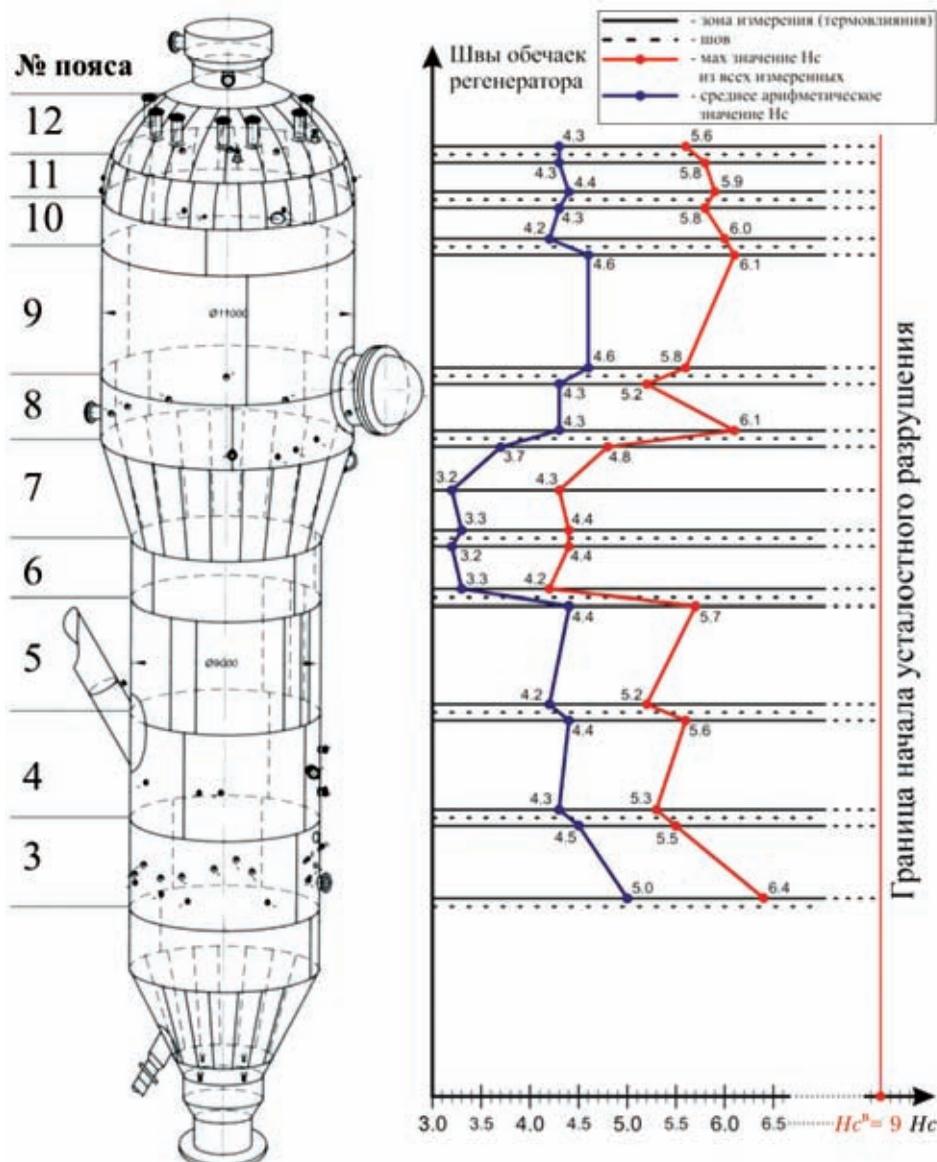


Рис. 2. Схематическое изображение колонны с графиками средних и максимальных значений коэрцитивной силы H_c^B относительно допустимого состояния для стали 09Г2С в кольцевых сварных соединениях



та эксплуатации и из результатов коэрцитиметрии полностью работоспособное. Как показано далее, самое слабое место оболочки колонны по уровню накопленных за 20 лет необратимых именно усталостных изменений в металле имеет более, чем 30 % запас по остаточному ресурсу в коэрцитиметрическом видении.

Как видно из рис. 3 и 4, подобных выводов по состоянию как сварного соединения, так и основного металла на основе любого другого традиционного метода НК или их совокупности сегодня получить невозможно. Наглядно показано, где «плохо» и насколько, а также очерчены границы таких зон. Из этого также наглядно и документируемо (!) видно, где и примерно когда (по усредненной скорости роста уже накопленной необратимой деградации металла), следует ожидать перехода в состояние начала именно усталостного разрушения металла. А если рассмотреть целостную развертку оболочки колонны, коэрцитиметрия выявила сформировавшуюся односторонне выраженную несбалансированность по одной из образующих (по высоте колонны) на всех уровнях. Эту пока неопасную, но уже тенденцию в состоянии всей колонны МКС показывает количественно и качественно, однако в рамках журнальной страницы это изобразить затруднительно.

В целом, как отмечалось, на поверхности колонны выполнено коэрцитиметрических замеров примерно в 1,2 тыс. точках. Среднее ариф-

метическое этого множества, $CA = 4,07$. Наибольшее значение Hc_{max} , выявленное на этом объекте, оказалось равным 6,4 А/см. Это самое «слабое звено» оболочки по остаточному ресурсу. Если принять во внимание, что исходное состояние (поставки) для этой стали $Hc_0 \approx 2,5$ А/см, и что к величине Hc_{max} содержащая это значение зона пришла за T лет службы, то средняя скорость накопления деградации металла колонны в сложившемся режиме ее работы и по самой плохой области составила $\Delta Hc = (Hc_{max} - Hc_0) / T = V = 0,22$ А/см/год. Зная, что для этой стали гранично допустимое значение $Hc^B = 9$ А/см и в предположении линейного характера накопления поврежденности металла в течение срока службы, получаем оценку остаточного ресурса оболочки корпуса колонны опять же по ее наиболее развитой зоне концентрации усталости металла, как $(Hc^B - Hc_{max}) / V = 12$ лет при условии сохранения сложившегося режима ее нагружения. Если выполнить упреждающий упрочняющий ремонт этой и близких к ней по накоплению усталости зон, прогноз ресурса заметно и обоснованно улучшается. Таким образом, МКС делает ремонт оборудования целевым, обоснованным осмысленным действием, а не рутинной строкой в плане мероприятий, эффективность которого непросто проверить. Т.е. МКС не только позволяет реализовать усталостное слежение всего сооружения в целом и его (им же указанных) самых проблемных областей, но делает это с количественной оценкой степени и ско-

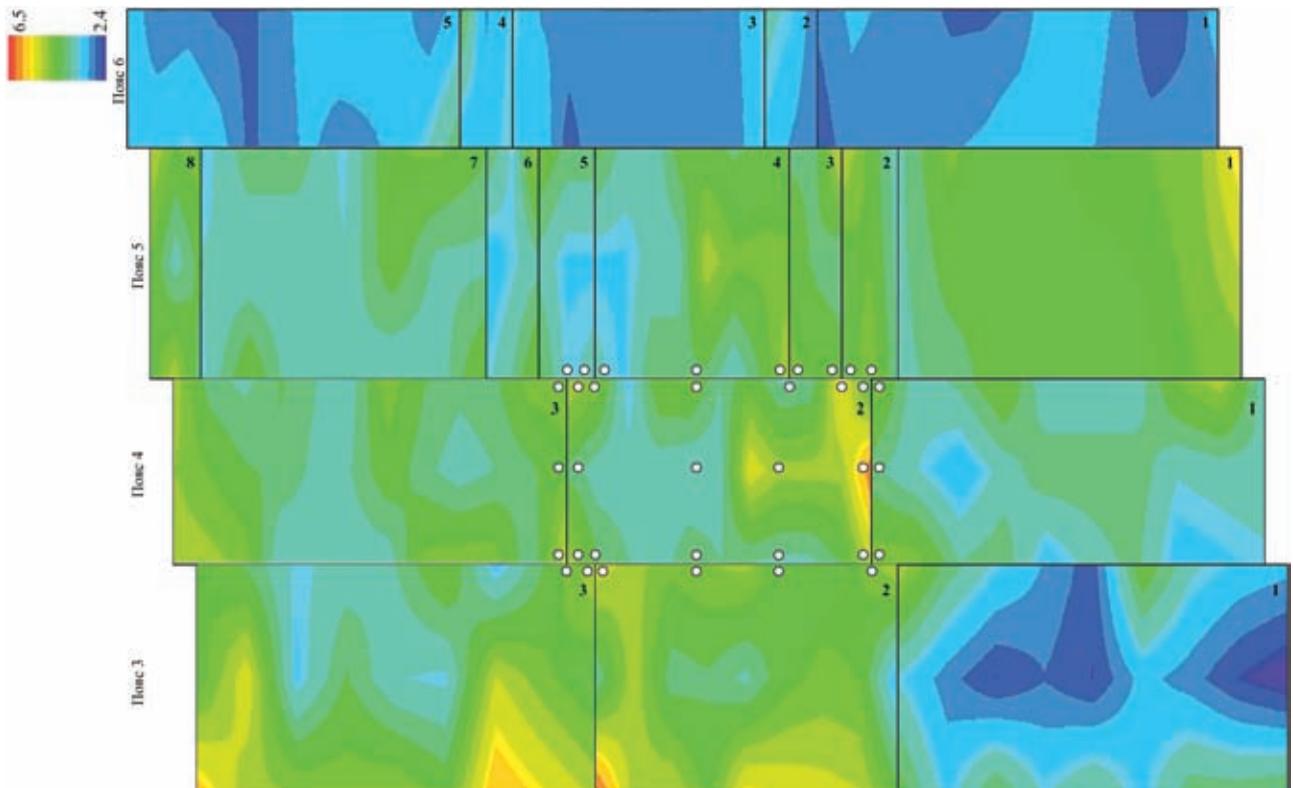


Рис. 3. Фрагмент полистной и поуровневой развертки состояния сварных соединений и основного металла оболочки колонны с типовой схемой контроля каждого листа

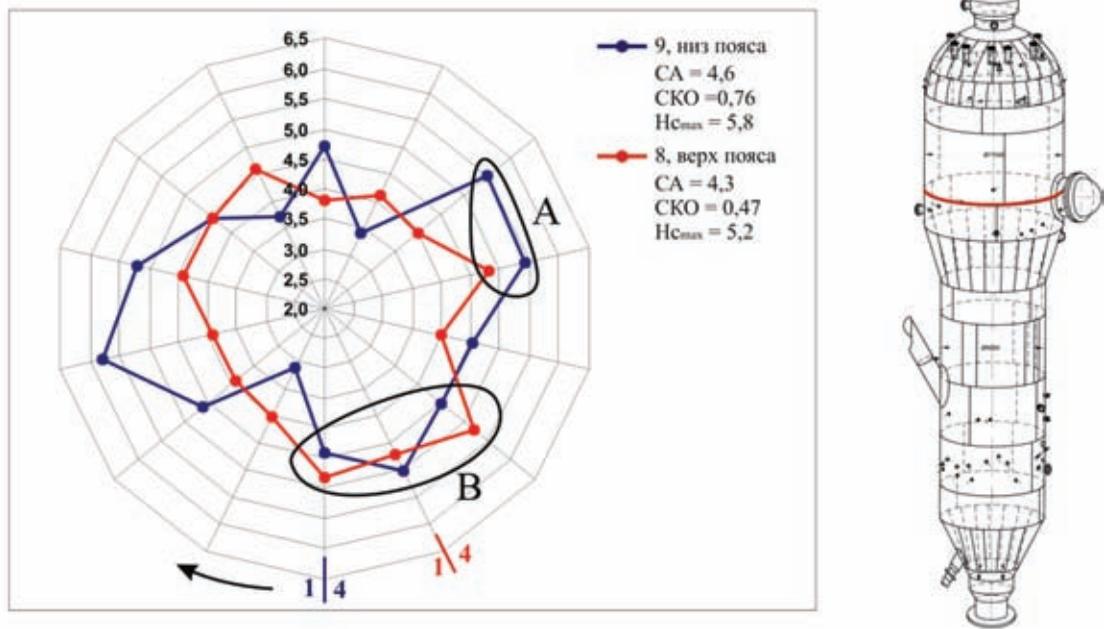


Рис. 4. Кольцевое сварное соединение поясов 8 и 9, усталостное состояние по измерениям коэрцитивной силы в околошовных зонах.

рости деградации. В свою очередь, оценка остаточного ресурса при этом является физически обоснованной, исходя из реального состояния металла и коэрцитиметрических границ допустимого состояния для каждой марки стали, когда начинается разрушение уже на макроуровне.

Таким образом, коэрцитиметрия в представленном виде (см. рис. 2) отображает общую нагруженность, степень накопленной необратимой усталостной поврежденности и механическую сбалансированность всего сооружения. При наличии глобальных тенденций к формированию и развитию неустойчивости, неуравновешенности, их хорошо видно на коэрцитиметрии развертки всей оболочки корпуса. В таком виде также четко локализуются уже периферийные зоны концентрации факторов деградации с указанием ее степени развития и границ каждой зоны. По такому варианту отображения результатов МКС (см. рис. 3) нетрудно увидеть, где общее состояние конструкции инициирует появление и развитие периферийных локальных зон концентрации. И, напротив, где ослабление локальной зоны ведет к ослаблению всего сооружения. Дополняя это вариантами отображения результатов коэрцитиметрического обследования, как на рис. 4 (а таким вариантам в каждой конкретной экспертизе при творческом отношении к делу – нет числа), имеем исключительную информацию для содержательного технического аудита объекта при выборе лучшей стратегии по текущему состоянию – менять или ремонтировать, – потому что хорошо видна общая степень изношенности металла, наиболее продвину-

тые в этом плане зоны, их границы, степень усталости металла в них.

Здесь может быть полезно обобщенное представление текущего значения величины Hc как совокупности трех компонент:

$$Hc^{\text{текущ.}} = Hc^0 + \Delta Hc^{\text{уст.}} + \Delta Hc^{\text{напряж.}} \quad (1)$$

Составляющая Hc_0 определяется химсоставом и процессом производства металла как такового. Вторая составляющая появляется и накапливается при появлении необратимых изменений по усталостному типу. Третья компонента – при наличии обратимых (упругих) напряжений любого рода. Понятно, что с ростом срока службы (и особенно в зонах концентрации напряжений) составляющая $\Delta Hc^{\text{уст.}}$, возникнув, непрерывно растет. Для режима надежной эксплуатации должно выполняться неравенство $Hc^{\text{текущ.}} < Hc^B$. Из этого выражения и из (1) очевидно, почему по мере накопления усталостных изменений в зоне концентрации напряжений металл начинает разрушаться при напряжениях в нем заметно меньших величины его справочного предела прочности σ^B . Это становится возможным как раз из-за ухудшения механических свойств при развитии деградации по усталостному типу, причем зачастую в бездефектном для дефектоскопии металла. Не отрываясь от первичности физики, математически это хорошо видно из совместного анализа этого неравенства и выражения (1): по мере необратимого роста усталостной составляющей $\Delta Hc^{\text{уст.}}$ на фоне неизменной природной составляющей Hc_0 область определения составляющей $\Delta Hc^{\text{напряж.}}$ неуклонно сокращается и как раз по верхней границе.



Все наши приведенные утверждения и предположения относительно МКС не декларативны. Их легко проверить каждому, выполнив стендовые испытания образцов на малоцикловую усталость или, еще проще, на растяжение до разрушения с параллельным измерением величины коэрцитивной силы металла. Измерения на реальном оборудовании будут еще убедительнее из-за отсутствия масштабного фактора.

Реальная картина состояния металла не всегда так благополучна, как на демонстрируемом здесь регенераторе. В одной из наших статей [5] подробно показаны результаты коэрцитиметрии воздухонагревателей доменной печи (рис. 5). Коэрцитиметрическая оценка состояния куполов этих воздухонагревателей доменной печи после взрыва одного из них четко показала очевидный недостаток конструкции как причину аварии. Области металла куполов, находящиеся в состоянии предразрушения, были выявлены и оперативно заменены. Неизбежная многолетняя остановка работы доменной печи этим предотвращена. Тот же металл, 09Г2С, но уже в стадии предразрушения в ло-

кальных зонах, никем и никак сегодня не диагностируемой. Без преувеличения, тогда наша МКС-экспертиза предотвратила неизбежное разрушение и, как следствие, многолетний простой доменной печи. Целевой ремонт аварийных зон (из-за явного недостатка конструкции) позволил бесперебойную работу печи уже в течение 7 лет, причем сверх расчетного ресурса. При этом даже очередность остановки воздухонагревателей для предупредительного ремонта их куполов была вполне определенной по коэрцитиметрическим показателям деградации их металла по усталостному типу.

На рис. 6 показаны результаты коэрцитиметрии состояния металла внутренней оболочки изотермического хранилища аммиака. Обследованы три нижних пояса (сталь 16ГС), днище (сталь 09Г2С) и так называемый уторный шов (стык днища и боковой стенки).

Состояние этого сосуда, исходя из всего вышесказанного, вполне очевидно удовлетворительное. Видны количественно и качественно зоны опережающего развития усталостной деградации как объект более скрупулезного ана-



Рис. 5. Результаты коэрцитиметрии воздухонагревателей доменной печи

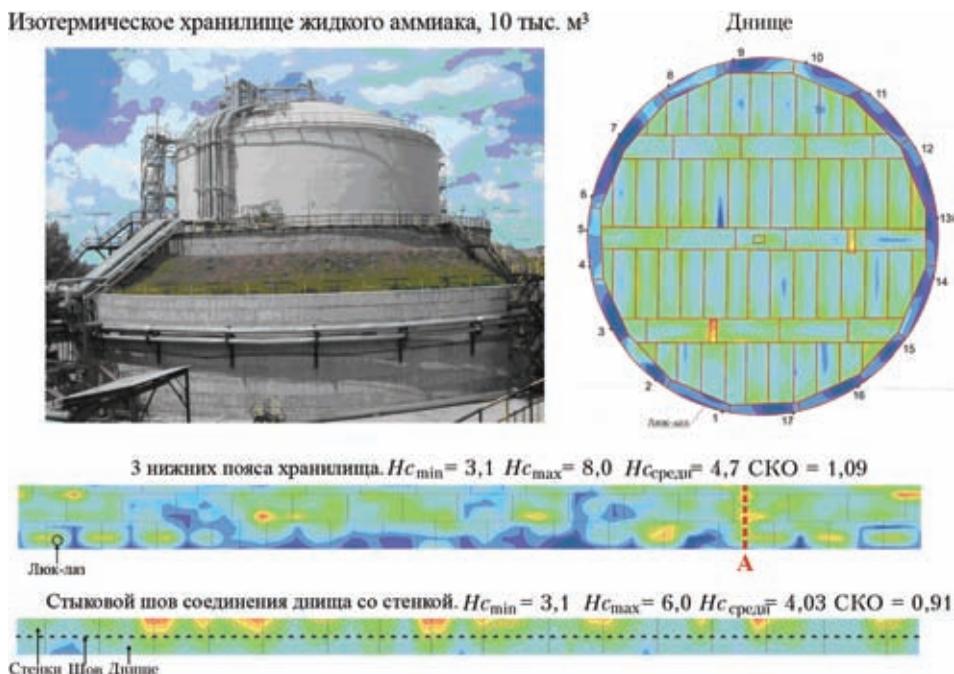


Рис. 6. Результаты коэрцитиметрии металла изотермического хранилища аммиака

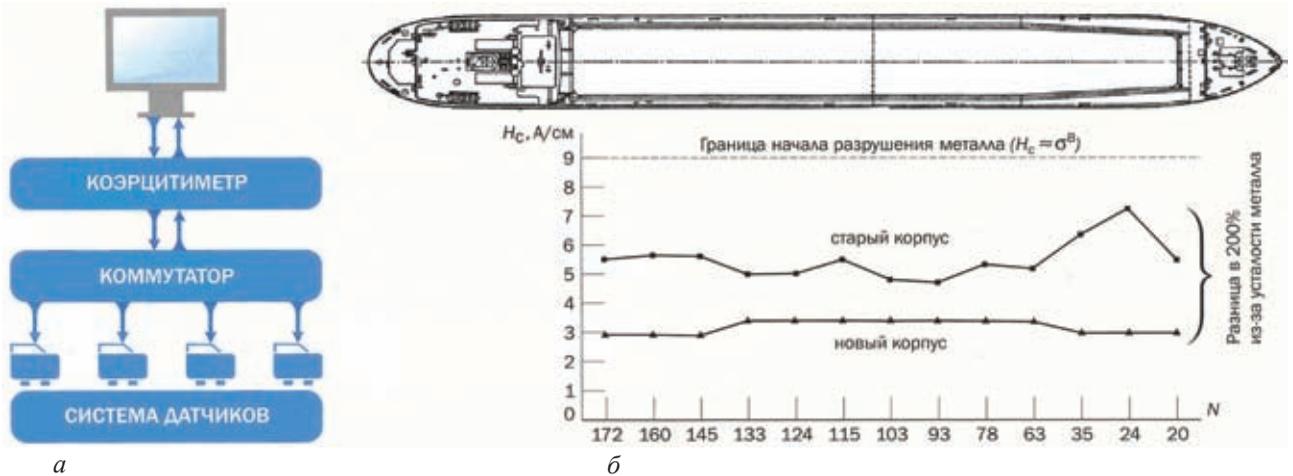


Рис. 7. Коэрцитиметрия больших объектов системами автоматического мониторинга (а) и результаты коэрцитиметрического контроля усталостного состояния корпуса в зависимости от срока службы (б)

лиза в последующих экспертизах, с реальной оценкой скорости накопления микрповрежденности. На развертке трех нижних поясов хорошо заметно начало формирования зоны нестабильности по одной из высотных образующих этого сосуда (метка А). Такую наглядную оценку степени накопленной микрповрежденности основного металла и металла сварных соединений в рамках рядовой экспертизы сегодня можно выполнить только этим методом.

Применительно к корпусам морских и речных судов, как, впрочем, и любых больших конструкций, развиваются две разновидности практического выполнения коэрцитиметрического контроля. Одна из них – для периодической общей экспертизы текущего состояния – реализуется вручную портативными приборами с приставным преобразователем-датчиком. Вторая – для непрерывного эксплуатационного мониторинга наиболее выраженных зон концентрации нагрузок – реализуется стационарными или временно размещаемыми системами коэрцитиметрического мониторинга, как это показано на рис. 7, а. Такая система, установленная на корпусе судна любого типа, сможет заметно улучшить его экономические показатели, например, за счет снижения простоев из-за плохой погоды, когда судоводитель, не перестраховываясь, выходит в рейс, имея реальную, текущую и непрерывную информацию о состоянии металла всех главенствующих точек конструкции. Безопасность плавания повы-

шается за счет слежения за реальной нагруженностью корпуса как в плохих погодных условиях, так и при выполнении грузовых и балластных операций. Это направление для подробного показа требует отдельной статьи, а на рис. 7, б показаны результаты более чем очевидные коэрцитиметрического контроля усталостного состояния корпуса в зависимости от срока службы. Вероятность излома корпуса судна любого типа заметно снижается при любых вариантах коэрцитиметрического слежения за его нагруженностью и усталостью [9].

Рис. 8 демонстрирует начало формирования зоны будущего разрушения приводного вала большой мощности. Это может быть отнесено к турбинам и генераторам энергоблоков, судовым гребным валам, а также соответствующим приводам мощных вентиляторов, машин шахтного подъема и т.д. Понятно, что никаким иным методом НК, кроме МКС, такую информацию получить невозможно в рамках рядовой экспертизы. «Красные» зоны на концах вала – это отпечаток технологий локального упрочнения металла.

Отметим также, что для практического подкрепления и так немалых достоинств МКС нами начат выпуск нового прибора – симбиоза, который одним датчиком одновременно с измерениями коэрцитивной силы выполняет в той же точке замеры толщины металла. Причем, опять же без зачистки, на холодном и горячем металле и без контактной жидкости, прямо через защитное покрытие. Беспрецедентно большой объем одновременной и беззатратной (попутной) толщинометрии металла еще более удешевляет диагностику и делает ее точнее не только простым дополнением толщинометрической информацией, но и за счет использования тесной естественной механической связи между величиной коэрцитивной силы и толщиной металла в зонах концентрации напряжений. Эти два параметра, каж-

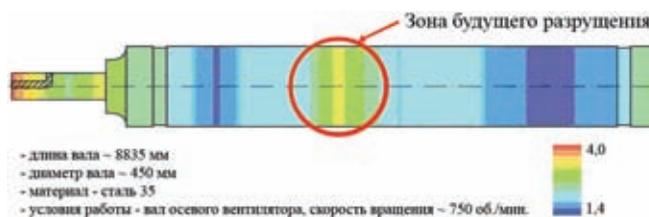


Рис. 8. Коэрцитиметрия наглядно показывает начало формирования зоны будущего разрушения мощного приводного вала, Ст35



дый по-своему, отображают процессы накопления усталости. Их первопричины, как правило, взаимно усугубляют друг друга. Их совместное оценивание делает результирующую оценку состояния металла в $\sqrt{2}$ раз точнее по ее статистическим представлениям. Или просто повышает безопасность работы контролируемого изделия еще более, чем без такого совместного использования этих двух параметров металла при оценке работоспособности оборудования в процессе срока службы.

Вне всяких сомнений, коэрцитиметрия, как и любой иной метод, не может претендовать абсолютно на лидерские позиции в НК. В первую очередь она дополняет давно сложившуюся систему методов в экспертизе металла до сих пор недоступной информацией об усталости металла с ее количественной и качественной оценкой. Однако там, где ее главенствующая функция является объективной реальностью, продуктивно это использовать. Здесь всегда можно получить значимый прогресс в достоверности, трудоемкости и экономичности комплексной экспертизы в целом. Поделиться этой информацией с экспертным сообществом и представляется нам главной задачей данной публикации.

Выводы

1. Оценка состояния металла больших конструкций методом коэрцитивной силы в процессе их изготовления, монтажа и эксплуатации открывает новые возможности в их экспертизе и диагностике, недоступные пока в реальной практике обследований, особенно для слежения за усталостью металла, его напряженно-деформированным состоянием. Особенно это касается общей накопленной усталости металла всего сооружения 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.

2. Появляется возможность выполнять ремонт не формально, а предупредительно, по состоянию металла в каждой очерченной коэрцитиметрией зоне, в ее взаимной связи с общим состоянием всего сооружения, а не как отдельно взятой независимой области.

3. Метод не требует специальной подготовки поверхности металла и остановки работы оборудования. Квалификация персонала для выполнения первичных измерений самая невысокая.

4. Метод не удорожает сложившуюся сегодня экспертизу и диагностику, так как более узкие и специальные НК-методы, используя целеуказания МКС, применяют только там и тогда, как этого требует текущее состояние металла конкретной зоны-концентратора. При этом достоверность всей экспертизы улучшается за счет количественной и качественной оценки усталости металла, до сих пор не реализуемой в практике массовой экспертизы.

1. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
2. *Захаров В.А., Боровкова М.А., Комаров В.А., Мужижский В.Ф.* Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей. — Дефектоскопия.— 1992.— №1.— С.41–46.
3. *Захаров В.А., Боровкова М.А., Бабкин С.Э.* О связи коэрцитивной силы с механическими напряжениями в конструкционных сталях / Неразрушающие физические методы и средства контроля материалов и изделий. Тез. докл. Республ. сов., 25-27 ноября 1981 г. – Ижевск, 1981.— С.62–64.
4. *Богачева Н.Д.* Применение размагничивания в технике / СПб, ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2010.— 264 с.
5. *Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Соломаха Р.Н.* Контроль усталости металла неразрушающим магнитным (коэрцитивным) методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций // В мире неразруш. контроля.— 2009.— 44, № 2.— С. 26–29.
6. *Безлюдько Г.Я., Долбня В.Е., Попов Б.Е., Соломаха Р.Н.* Оперативный контроль напряженного и усталостного состояния сварных соединений неразрушающим методом по магнитной характеристике металла – коэрцитивной силе. — Там же.— 2006.— № 1.— С. 58–59.
7. *Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Попов Б.Е.* Радикальное улучшение оценки текущего состояния кислородных баллонов применением метода коэрцитивной силы (по результатам исследований 1990–2000 гг.). — Там же.— 2011.— № 3.— С. 34–35.
8. *Завальнюк О.П., Нестеренко В.Б.* Мониторинг прочности судна как один из путей обеспечения безопасности мореплавания / Техн. диагностика и неразруш. контроль.— 2011.— № 4 —С.53–56.
9. *Безлюдько Г.Я.* Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы металла // Там же.— 2004.— № 1.— С. 20–22.

Наши контакты:

Тел./факс: (057)771-65-91, 738-32-06

mail@snr-ndt.com

www.snr-ndt.com