

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОГО СОСТОЯНИЯ И РЕСУРСА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МАГНИТНЫМ (КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИМ) МЕТОДОМ

Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО

Приведены данные стендовых испытаний и результаты практической экспертизы различного оборудования в обоснование способности магнитной характеристики — коэрцитивной силы — контролировать степень развития усталостных явлений в металле. При оценке ресурса это может иметь самостоятельное значение в экспертизе бездефектного металла или дополнять данные дефектоскопии и других методов, улучшая ресурсный прогноз. На основе метода разработан государственный стандарт и серия магнитных структуроскопов, которые сертифицированы и внесены в государственный реестр.

The paper presents the data of bench testing and results of practical assessment of different equipment to substantiate the ability of the magnetic characteristic of coercive force to monitor the degree of development of fatigue phenomena in the metal. During evaluation of the fatigue life, this may be of importance separately in assessment of sound metal or may complement the data of flaw detection and other methods, improving the residual life prediction. The method was the basis to develop a state standard and a series of magnetic structure measuring units, which have been certified and entered into the state registry.

Состояние эксплуатируемого сейчас в пределах СНГ парка металлоконструкций и оборудования имеет ряд особенностей. Это и его сильная изношенность, поскольку новые мощности в эксплуатацию с 90-х годов практически не вводят, а только «добивают» наследие советских времен. Это и значительно меньший объем активно используемого оборудования, к тому же эксплуатация этого сохранившегося дееспособность и предельно изношенного парка осложнена всеобщей финансовой стесненностью. Такие особенности, конечно, накладывают определенный отпечаток на экспертизу и диагностику металла, так как становится особенно важной правильность выбора: и не отправить на слом еще работоспособное оборудование, и не проглядеть момент, когда оно уже не может работать безаварийно. И здесь оценка «по состоянию» (а не по привычному сроку службы), как наиболее объективная и точная по своей сути должна возобладать в экспертизе над иными подходами, которые уже в своих основах всегда предполагают субъективизм в процессе принятия решений, определяя тем самым соответствующую точность итоговой экспертной оценки и построенного на ней диагностического прогноза.

Но самая своеобразная черта сложившейся реальности, очевидно, состоит в том, что при существенном снижении объемов «работающего» металла имеет место не спадающая в абсолютных показателях эксплуатационная аварийность. Если точнее, то в относительных цифрах аварийность неуклонно растет. Причем, это происходит на фоне растущих затрат на диагностические и надзорные мероприятия. Такое положение невозможно расценить иначе, как неэффективность применяемого в практике технического диагностирования «традиционного» набора методов для массового эксплуатационного контроля металлопродукции. И такой вывод представляется логичным. Ведь контингент специалистов в диагностике и экспертизе с 90-х годов практически не изменился, приборы контроля за этот

период только улучшились. Значит, проблема сосредоточена именно в методах контроля, которые оказались неэффективны применительно к металлопродукции, находящейся в такой степени повсеместной усталости.

Даже поверхностный анализ набора этих методов выявляет их ориентированность на дефектоскопические критерии оценки состояния металла. Более того, хотя дефектоскопия, как известно — это только составная часть диагностики (причем далеко не всегда самая весомая), нетрудно заметить, что в понимании многих экспертов — и не только рядовых — понятия «дефектоскопия» и «диагностика» прочно отождествлены. Причины этого скорее объективно-исторические, их обсуждение — это тема отдельной статьи. Справедливости ради следует только отметить, что подобное положение имеет место и в диагностике, проводимой в странах дальнего зарубежья. Однако результаты, представленные в данной работе, позволяют нам первыми выйти из такого положения.

Общеизвестно, что кроме редких особых случаев, усталостные дефекты металла, которые современная дефектоскопия способна обнаружить, возникают, как правило, на заключительной стадии срока службы данного изделия. Предшествующие этому в течение почти всего времени «жизни» металла процессы зарождения, развития и накопления усталостных изменений, происходящие, как известно, преимущественно в зонах концентрации нагружений, до сих пор ни выявлять, ни измерять их количественно, не разрушая при этом сам объект контроля, было невозможно, так как не было инструмента для такого контроля. Макродефекты на этих стадиях в металле еще отсутствуют, а микродефекты структуры современная дефектоскопия всеми своими методами выявлять не способна, да это и не ее задача. Рентгеновский структурный анализ такую работу мог бы взять на себя, но этот метод доступен (и экономически приемлем) только в диагностике специальных объектов, но никак не в массовой экспертизе. Хотя дефектоскопия прак-



тически бессильна в оценке усталостных явлений структуры металла как чуждой для нее сфере применения, полезно будет отметить и такую особенность, что даже и в оценке дефектности металла, т. е. в основной области ее действия, методами дефектоскопии обеспечивается высокая надежность и воспроизводимость контроля только на стационарных дефектоскопических установках в условиях завода-изготовителя металлопродукции. Эксплуатационный же дефектоскопический контроль оборудования в массовой экспертизе выполняют ручными дефектоскопами. Отсюда и невысокая производительность и достоверность, а также плохая воспроизводимость, не говоря уже о возможностях документирования результатов контроля и ведения банка данных.

В излагаемом здесь магнитном коэрцитиметрическом контроле усталостного состояния металлопродукции преимущественная сфера действия метода — это зоны концентрации нагрузжений, в которых эксплуатационная усталость развивается и накапливается опережающими темпами. При этом весьма существенно, что местонахождение этих зон на любых металлоконструкциях хорошо известно, так как оно логически предопределено самой конструкцией контролируемого изделия. В этом не может быть никакой случайности, поскольку все конструкции строятся по одним и тем же законам и принципам теоретической механики и сопротивления материалов, знакомым рядовому специалисту. Кроме того, размеры зон концентрации нагрузжения велики и существенно превышают размеры единичного дефекта. В результате выявляются эти зоны надежно, без каких-либо поисковых сложностей.

И, как показали стендовые разрушающие испытания образцов, как подтвердила практика, если взять в качестве информационного параметра такую магнитную характеристику, как коэрцитивная сила металла, то ее приращение составит величину 200... 300 % (для конструкционных сталей широкого применения), пока усталостные явления развиваются от состояния поставки (новый металл) до состояния предразрушения под действием приложенных нагрузок. В неразрушающем контроле этому просто нет аналогий. Все это дополняется простотой и дешевизной как самого процесса измерений, так и прибора для их реализации (магнитного структуроскопа-коэрцитиметра), так как время единичного замера приставным датчиком прибора имеет порядок десятка секунд, при этом не нужна особая подготовка поверхности контролируемого металла, допускается ее существенная шероховатость и кривизна, нет зависимости контроля от температуры окружающей среды. Получаемая оценка состояния металла является интегральной в толщине (глубине) слоя от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в зависимости от типа используемого приставного датчика. Такая совокупность практических достоинств весьма эффективна и ей также трудно найти аналогию. И это все на неизведанном до сих пор поприще, ведь речь идет о количественном и качественном слежении за усталостными изменениями в металле в процессе

его эксплуатации, причем на уровне рядовой массовой экспертизы и без отбора образцов металла, т. е. без разрушения объекта контроля. Создана практическая возможность контроля преддефектного состояния, что позволяет там, где это необходимо и целесообразно, перейти от вероятностной по своей сути практики обнаружения дефектов к детерминистской (лишенной фактора случайности) тактике их предупреждения. Опыт мировой диагностики на уровне массового контроля, по-видимому, пока не располагает такими возможностями.

Сейчас много и везде говорят об оценке «по состоянию» как предпочтительной в экспертизе текущего состояния металлопродукции. Однако механизма реализации этого подхода при экспертизе бездефектного металла, как оказалось при попытке перехода от рассуждений к практике, до последнего времени просто не существовало. Но именно бездефектным и является металл правильно сконструированного и изготовленного изделия (имеются в виду не металлургические, а эксплуатационные дефекты) в течение большей части его срока службы. Поэтому, видимо, и сложилось представление о диагностике как о дефектоскопической дисциплине, что отсутствовали методы и приборы слежения за бездефектной деградацией металла под действием эксплуатационных факторов. Приведенные ниже результаты эту неопределенность позволяют реально устранить. Практическая их проработанность весьма высока. Имеется межгосударственный СНГ-стандарт ГОСТ 30415-96, который в совокупности с Изменением № 1 к нему регламентирует магнитный контроль механических свойств и ресурса металлопродукции как на стадии производства, так и на всех этапах эксплуатации.

Госгортехнадзором России уже с 1997 г. разрешено техническое диагностирование всех типов грузоподъемных кранов и лифтов этим методом с применением специально разработанных для этого в Харькове фирмой «Специальные Научные Разработки» магнитных структуроскопов-коэрцитиметров серии КРМ-Ц, которые сертифицированы и внесены в Госреестр России. В этом году аналогичный порядок распространен в России и на диагностику сосудов давления. При этом следует уточнить, что основная часть необходимых стендовых испытаний образцов сталей и сосудов давления (кислородных баллонов) выполнена специалистами в Харькове (ОАО «УкрНИИХиммаш» и фирмой «Специальные Научные Разработки»).

Об официальном признании метода в Украине сказать нечего. Объемы практической экспертизы этим методом здесь невелики, она носит инициативный характер и держится на личном энтузиазме отдельных экспертов. Видимо, статистика аварийности при эксплуатации украинского парка металлопродукции не такая тревожная, как в России и остальном мире.

Конкретизируя изложенные выше рассуждения, приведем некоторые практические результаты и данные стендовых испытаний.

На рис. 1 приведены данные стендовых испытаний на растяжение образцов конструкционных сталей широкого применения — Ст3, 20, 09Г2С.

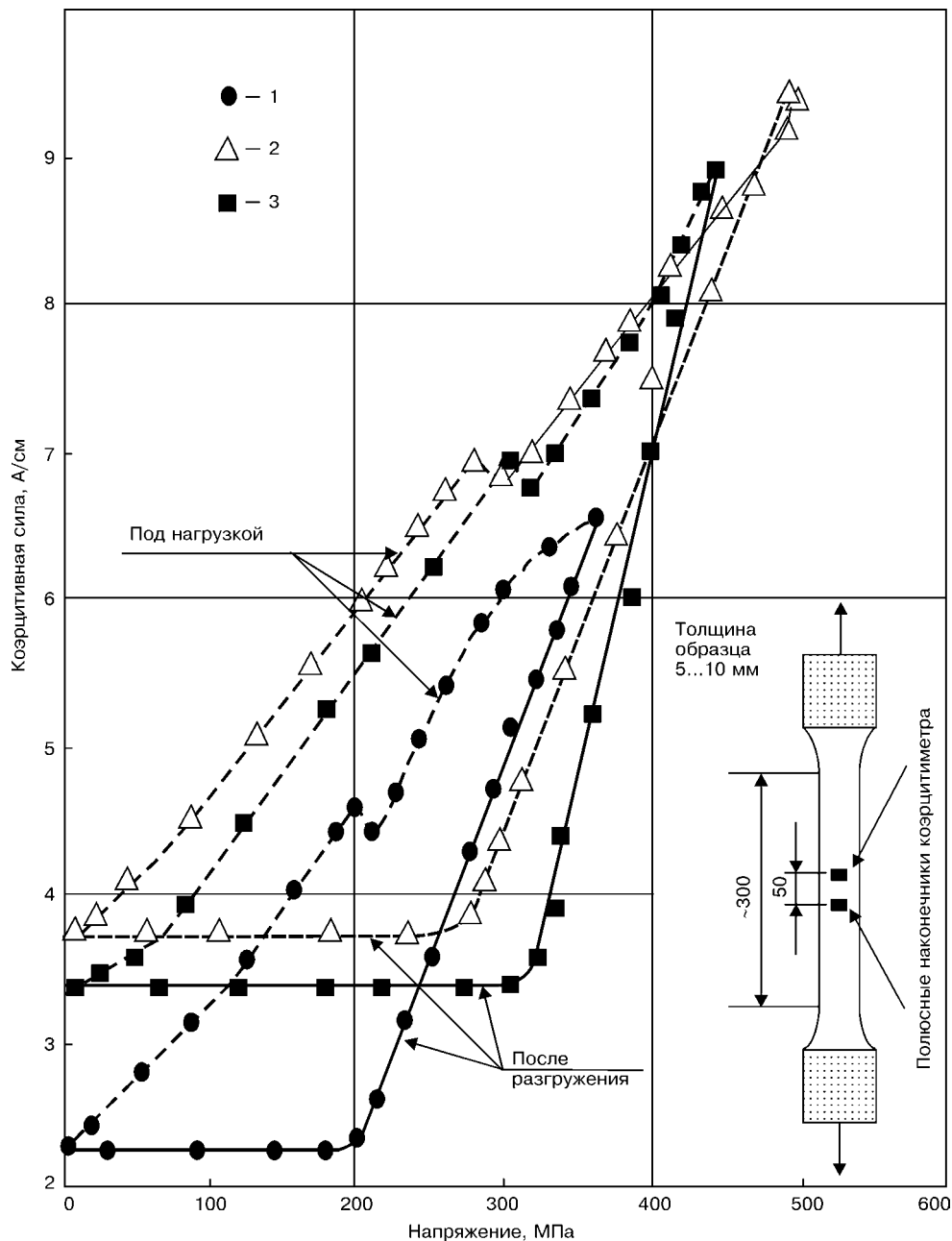


Рис. 1. Магнитный (коэрцитиметрический) контроль плоских образцов из сталей Ст3 (1), 20 (2), 09Г2С (3) при испытании на растяжение с регистрацией показаний коэрцитиметра под нагрузкой и после разгрузки на каждой ступени нагружения

Нагружение выполнялось ступенчато, с полной разгрузкой после каждого приращения. Измерения коэрцитивной силы образца H_c проводили на каждой ступени под нагрузкой и после разгрузки. При ступенчатом нагружении и измерении коэрцитивной силы H_c после разгрузки образца, когда магнитный параметр реагирует только на остаточные внутренние напряжения и деформации, в упругой области величина H_c остается постоянной и равна исходному значению H_{c_0} (состояние поставки). При достижении внешней приложенной нагрузкой предела текучести σ_T величина H_c возрастает до значения H_c^T и далее при увеличении нагрузки растет по линейному закону до значения H_c^B , соответствующего нагрузке на пределе прочности σ_B . При непрерывном растяжении образцов

(в режиме одноосного нагружения) показания коэрцитиметра растут пропорционально приложенному напряжению вплоть до предела текучести σ_T . Резкое отличие текущих значений H_c от H_c^0 в разгруженном состоянии — надежное свидетельство появления пластической деформации контролируемого изделия. Совместная оценка состояния образцов с позиций статического нагружения и с позиции классификации режимов нагружения дает возможность трактовать показания коэрцитиметра при нагрузках $\sigma < \sigma_{0,2}$ как идентифицирующее «легкий» режим (металл работает в упругой области), при $\sigma \leq \sigma_{0,2}$ — «умеренный» режим, область упруго-пластических деформаций, при $\sigma > \sigma_{0,2}$ — «тяжелый» режим эксплуатации. При переходе от стендовых испытаний образцов к ре-

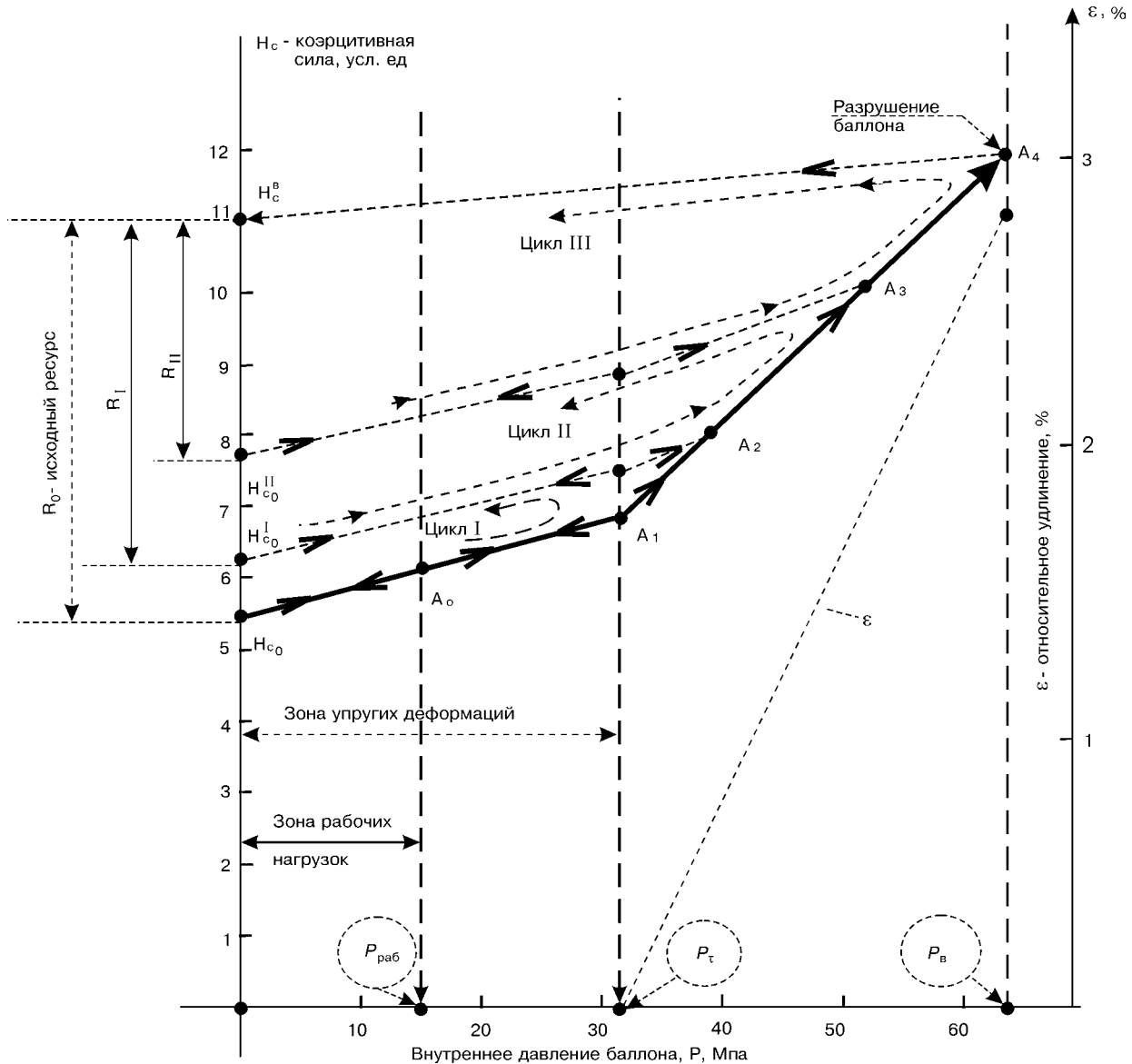


Рис. 2. Магнитный (коэрцитиметрический) контроль при разрушающих испытаниях внутренним давлением промышленных баллонов для газа из стали Дс: $P_{раб}$ — рабочее давление; P_t, P_v — давление на пределе текучести, прочности; I, II, III — циклы нагружения

альным металлоконструкциям надо провести анализ распределения значений H_c в зонах нагружения (или равномерно распределить точки контроля по площади изделия, если найти зоны концентрации затруднительно), выявить области с максимальными

значениями $H_{c_{max}}$, сравнить их с H_{c_0}, H_c^T и H_c^B . Эти значения, как нетрудно заметить, являются характерными константами для каждой марки стали. Сопоставление средних значений H_c со значениями $H_{c_{max}}$ и H_c^B позволяет сделать вывод о текущем состоянии изделия и его реальном остаточном ресурсе.

Здесь уместно добавить, что если провести циклические (режим малоциклового усталости) стендовые разрушающие испытания образцов этих же сталей, то окажется, что полученные значения H_{c_0}, H_c^T и H_c^B не отличаются от тех, что были определены статическими нагружениями. Это является своеобразным следствием закона сохранения энергии или его подтверждением методами неразрушающего контроля.

В таблице приведены характерные значения коэрцитивной силы для наиболее применяемых марок сталей. Они дают необходимую основу для экспер-

Магнитные и механические свойства листов толщиной 5...20 мм из конструкционных сталей

Марка стали	Механические свойства			Магнитные свойства, H_c , А/см			
	σ_v , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	H_{c_0}	H_c^T	H_c^B	$H_c^{уст.}$
Ст3	350	210	22	2,5	6,0	6,0	5,8
09Г2С	450	310	20	4,0	9,5	9,5	9,5
10ХСНД	540	400	19	5,0	14,5	14,5	13,5
Ст20	420	260	24	4,5	13,5	13,5	13
Дс	600...650	350...400	15	5,0...6,0	8,0...8,5	10,0...11,0	9,5...10,5
17Г1С	520	350	23	4,0	10,0	14,0	14,0

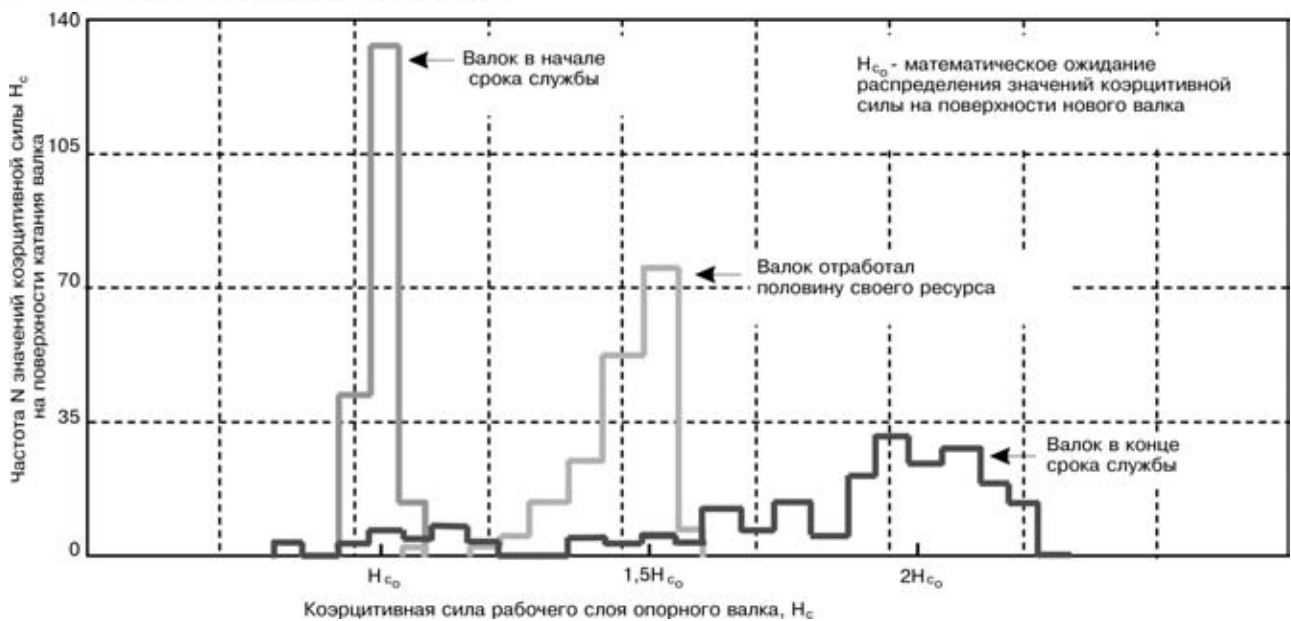


Рис. 3. Распределение значений коэрцитивной силы по поверхности катания опорного прокатного вала из стали 75ХМФ в зависимости от объема прокатанной продукции (отработанного ресурса)

тизы большинства разновидностей эксплуатируемой металлопродукции. Сталь Дс здесь представляет отраслевую маркировку разновидности металла, используемого только в производстве промышленных газовых баллонов (по ГОСТ 949 для кислорода и т.д.). На примере стендовых разрушающих испытаний таких баллонов как наиболее распространенных сосудов давления, переходим от исследования поведения коэрцитивной силы на образцах металла к реальным изделиям. На рис. 2 приведена обобщенная характеристика (точки H_{c0} , A_0 – A_4) нагружения образца металла из стали Дс, начиная от состояния поставки (H_{c0}) до состояния разрушения (A_4). Испытания баллона вместо образца дают аналогичную характеристику. Видно, что разрушить изделие можно однократным непрерывным нарастающим нагружением или многократными циклами с заданной или нарастающей амплитудой. На рис. 2 таких нарастающих циклов условно показано три. При этом показательно, что коэрцитивная сила металла оболочки является надежным свидетелем даже однократной перегрузки баллона давлением сверх предела текучести, а также наглядным мерилем степени исчерпания исходного ресурса R_0 (значения R_I и R_{II} на соответствующих циклах нагружения).

Из экспериментальных данных на рис. 1 и 2 убедительно следует, что задача поиска эффективного параметра контроля усталостного состояния решена, так как в ходе «продвижения» испытываемого металла от состояния поставки до предразрушения его коэрцитивная сила возрастает в 2...3 раза от величины H_{c0} до H_c^T . Так, время контроля одного баллона ручным коэрцитиметром на основании данных таблицы и рис. 2 в практике экспертизы составляет около трех минут.

Используя результаты, показанные на рис. 1, 2 и в таблице, проведено диагностирование в системе Госгортехнадзора России нескольких тысяч

мостовых кранов и около тысячи кислородных баллонов и лифтов. Некоторые краны наблюдаются таким образом уже около восьми лет. При этом хорошо видно, что зачастую они изнашиваются больше от собственного веса, чем от выполняемой ими работы. Из диагностики баллонов и их стендовых испытаний неопровержимо следует, что качественно изготовленного и правильно эксплуатируемого баллона нет нормативного срока службы в разумном понимании этого термина ввиду очень большого конструктивного запаса, исчерпать который при паспортных нагрузках практически невозможно.

Опыт диагностики коэрцитиметрией действующего оборудования представлен на рис. 3. Это эксплуатационный контроль опорных прокатных валков из стали 75ХМФ на листопркатном стане холодной прокатки. Такое изделие являет пример, когда эксплуатация дефектного оборудования принципиально недопустима. Трещина рабочего слоя при высоких скоростях вращения многотонного цилиндра и при высоких локальных усилиях обжатия приводит к мгновенному разрушению вала, полному или частичному. Материальные последствия аварии здесь — наглядное доказательство торжества концепции, что аварию легче и дешевле упреждать, чем ликвидировать ее последствия. И пока только коэрцитиметрия поверхности вала до и после каждой установки его в рабочую клеть (в процессе «жизни» валак претерпевает несколько таких переустановок для его периодического восстановления и ремонта) позволяет выявить зарождение концентраторов в глубине рабочего слоя, под его поверхность. Такой концентратор разряжается трещиной, которая развивается мгновенно и лавинообразно. Ее поиск методами дефектоскопии в ремонтный период — бессмысленная работа. Необходимо выявлять ее предвестника, который созревает долго, несколько загрузочных кампаний. А область локально повышенных остаточных напря-

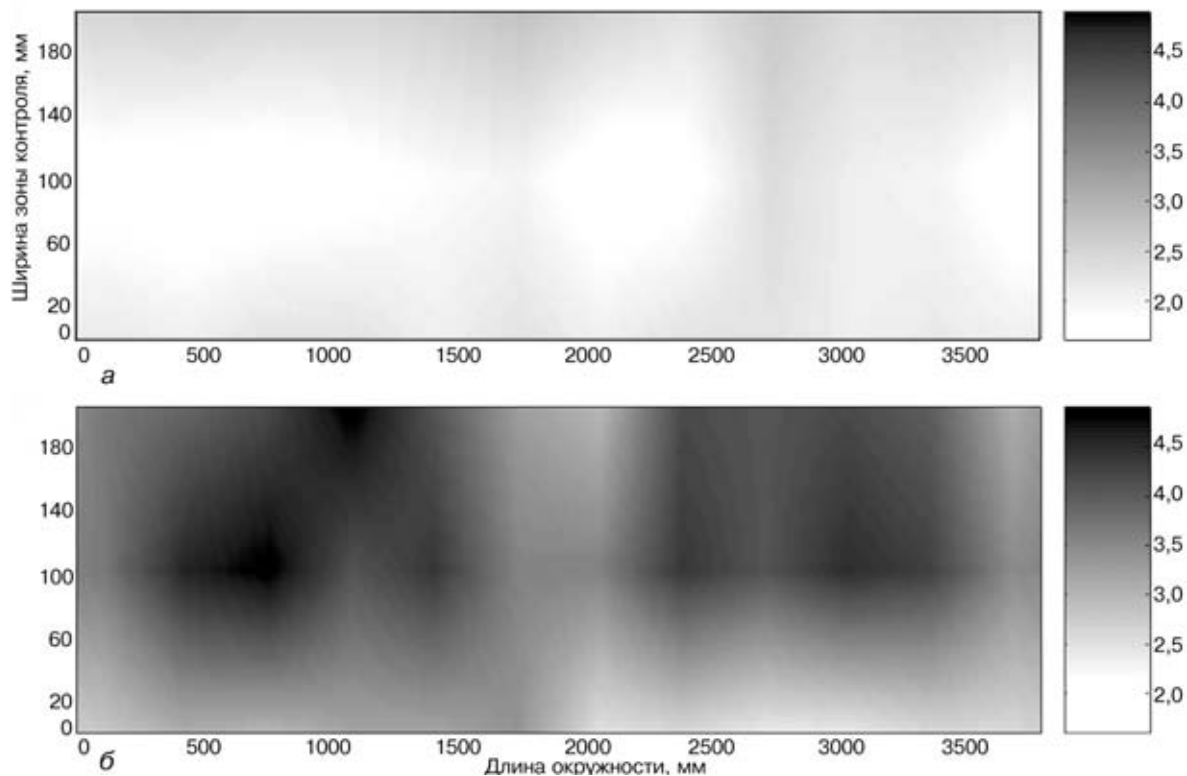


Рис. 4. Магнитный (коэрцитиметрический) контроль сварных швов паропровода: а — шов находится в режиме надежной эксплуатации; б — шов в критическом режиме

жений, в которой будущий дефект созревает, велика по своим размерам и легко обнаруживается ручным коэрцитиметрическим контролем поверхности катания. Время контроля одного валка диаметром около 1,5 м и длиной порядка 3 м занимает 40 мин. Обобщенная диаграмма такого контроля получена из выборки порядка 100 валков и показана на рис. 3. Из нее видно, что средняя величина H_c поверхности катания растет (для стали 75ХМФ) в процессе всей жизни валка примерно вдвое. Зная граничные значения H_c , легко прогнозировать ресурс конкретного валка в процессе его работы. Анализируя распределение значений H_c по поверхности катания для нового изделия, наблюдая, как это распределение меняется в процессе работы, можно уверенно оценить качество нового валка, качество его ремонта, правильность его эксплуатации прокатчиками. Все это сейчас позволяет осуществить только коэрцитиметрия. До сих пор обезличка ответственности в этих моментах эксплуатации приводит к тому, что среднестатистическим валком в странах СНГ производится почти вдвое меньше металла, чем аналогичным в промышленности развитых стран.

При обследовании валков понадобилось проанализировать распределение значений коэрцитивной силы на больших площадях контроля, что дало возможность получить эффективный способ представления результатов обследования, который благодаря наглядности очень ускорил решение задачи коэрцитиметрического контроля состояния сварных швов трубопроводов. Здесь эффективность конечного результата, наверное, наполовину обеспечивается удачным выбором параметра контроля, а

остальное — способом отображения данных. На рис. 4, а показан пример обследования сварных швов на паропроводах, где труба с толщиной стенки 70 мм и диаметром около 800 мм работает при давлении 15 МПа. Представлены два наиболее характерных примера швов, показывающие возможности метода особенно наглядно. Срок службы обоих швов порядка 15 лет. При обследовании выполнены измерения H_c на самих кольцевых швах вручную с определенным шагом по длине окружности каждого шва (ширина шва — около 100 мм). Такие же измерения выполнены в зонах термовлияния по обе стороны от каждого шва. Полученная таблица значений затем обработана специальной ЭВМ-программой. Результат представлен в виде геометрической развертки шва и околошовной зоны, на которой интенсивностью закрашки черным цветом показана степень продвижения металла шва и околошовной зоны от исходного состояния до предразрушения, т. е. от значения H_{c_0} для стали, из которой изготовлена труба и сварен шов, до значения H_c^b . На рис. 4, а показан шов, у которого это продвижение практически отсутствует благодаря тому, что он был правильно сварен, а отрезок трубопровода, на котором этот шов выполнен, был верно сконструирован и смонтирован. Коэрцитиметрия не отметила особых изменений состояния металла в течение этих лет эксплуатации, что свидетельствует также о существенном конструктивном запасе прочности, так как нагрузки внутренним рабочим давлением практически не изменили свойства металла трубы, шва и околошовной зоны. Более того, на основании магнитных характеристик

можно судить о шве и о трубе как об одном целом. Иная ситуация показана на рис. 4, б. Здесь в течение срока службы уже произошла авария в результате появления сквозной трещины, развившейся из корневой зоны шва на поверхность. Причем, это имело место вскоре после регламентной дефектоскопии. Зона ремонта шва через несколько лет, как видно, снова находится в состоянии предразрушения с точки зрения коэрцитиметрии. Рядом с ней созревает еще один концентратор такой же степени опасности. На основании рис. 4, кроме количественного и качественного отображения состояния шва можно предположить причину разного состояния этих двух швов, работающих в одинаковых условиях, изготовленных из одного металла, сваренных одним специалистом и на одинаковом оборудовании. Эта причина — конструктивные особенности участков трубопровода, в которых эти швы «работают». Один из них оказался в зоне конструктивного концентратора напряжений. Часть шва попала под воздействие нагрузок, превышающих предел текучести его металла. Скорость усталостной деградации в двух его зонах, хорошо выделенных коэрцитиметрией на рис. 4, б, существенно больше, чем в остальном шве. Это приводит

к ускоренному исчерпанию в этих зонах исходного запаса пластичности и, как результат, к опережающему образованию усталостных трещин. Понятно, что дефектоскопия здесь только констатирует факт отсутствия или наличия дефекта шва.

В заключение как логический итог вполне правомерен вывод, что неразрушающий магнитный (коэрцитиметрический) контроль металлопродукции на всех стадиях ее эксплуатации позволяет количественно и качественно оценить степень развития и накопления усталостных явлений в металле, и, тем самым, повысить точность диагностического прогноза остаточного ресурса. Это новая возможность для рядового эксперта и для массового контроля. Метод хорошо проработан нормативно, успешно и широко испытан практикой и экспертизой на многих типах конструкций и оборудования. Магнитные структуроскопы серии КРМ-Ц для его реализации просты в работе и доступны по цене широкому пользователю.

Данная работа представляет результаты, полученные группой специалистов Украины и России. Контакт. тел.: (0572) 64-36-13, e-mail: bezlyudko@yahoo.com

НПФ «Специальные Научные Разработки», г. Харьков

Поступила в редакцию 14.04.2003

SKF Condition Monitoring

Портативные Приборы SKF MicroVibe™



MicroVibe™ — новейший портативный вибрационно-измерительный прибор SKF, позволяющий проводить современный анализ состояния роторных машин. Благодаря своим измерительным качествам, низкой стоимости, компактности, маленькой массе, MicroVibe™ является первым вибрационно-измерительным прибором, который совместим с Palm PC (карманным компьютером). Прибор оснащен всеми необходимыми функциями, включая выбираемую пользователем систему единиц измерения (Английская, Метрическая); набор инструментов измерения: Общие Уровни Вибрации, Временная Волна, Спектры БПФ. В прибор также заложены критерии сравнения получаемых данных с допустимыми уровнями вибрации согласно стандартам ISO.



SKF Reliability Systems Представительство SKF Eurotrade AB в Украине
Украина 01033, г. Киев, ул. Гайдара, 22.
тел. +38(044) 2302889, 2302890; факс +38(044) 2302140
E-mail: SKF.ukraine@skf.com; www.skfcm.com; www.reliability.com