

## КОЭРЦИТИМЕТРИЯ КАК ОСНОВНОЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УСТАЛОСТИ И КАК ПРИОРИТЕТНЫЙ МЕТОД В ДИАГНОСТИЧЕСКОМ НАБОРЕ.

Г.Я. Безлюдько, Е.И. Елкина, Р.Н. Соломаха, фирма Специальные Научные Разработки, Харьков;

Б.Е. Попов, инженерно-консультативный центр КРАН, Москва.

Под коэрцитиметрией здесь понимается неразрушающий контроль механических свойств, напряженно-деформированного состояния и степени усталости по измерениям магнитной характеристики металла – коэрцитивной силы. Все ниже приведенные достоинства в наиболее полной мере достигаются при работе с коэрцитиметрами (магнитными структуроскопами) фирмы СНР. И это не потому, что авторы представляют эту фирму, а потому, что именно эти приборы имеют ряд потребительских и технических достоинств, которых нет у других производителей. Среди них главное – это высочайшая зазороустойчивость, когда показания прибора зависят только от свойств металла и не зависят от таких мешающих факторов, как защитное покрытие (краска, пленка и т.д.) толщиной до 6 мм (!) на контролируемом металле или эквивалентные такому зазору коррозия, шероховатость, кривизна поверхности и т.п.

То, что коэрцитиметрия сегодня наиболее эффективна для оценки усталостного состояния металла, да еще и на уровне массовой экспертизы, проверяется просто. Надо взять типовой образец для испытаний на механические свойства из конструкционной стали широкого применения и растянуть его ступенчатым нагружением на стенде до разрушения, с регистрацией диаграммы напряжение-деформация и с параллельным измерением величины коэрцитивной силы металлом нашим прибором (например, КРМ-Ц-К2М) в области будущего разрушения. Получим еще одну диаграмму нагружения, напряжение-коэрцитивная сила или деформация-коэрцитивная сила. Коэрцитивная сила здесь возрастет от начального состояния (поставки) металла и до его состояния разрушения в 2÷4 раза(!) в зависимости от марки металла. При таком испытании образец находится в состоянии одноосного плосконапряженного нагружения. Это простейший вариант имитации реального усталостного процесса, имеющего место в действительности. В реальной эксплуатации металл редко подвергается такому рафинированному нагружению. Как правило, имеет место 2х÷3х-осное нагружение в сочетании с набором факторов деградации, ускоряющих зарождение, развитие и накопление микроповрежденности металла. Чаще это совокупность статического (постоянного и медленно меняющегося) нагружения и циклического (с разными частотами и амплитудами, включая и вибрации), осложненная температурным, коррозионным и погодно-климатическим факторами. К этому набору добавляются и нагружения конструкции собственным весом в сочетании с эксплуатационными технологическими и механическими воздействиями и т.д. и т.д. Исчерпывающий такой перечень будет длиннее самого доклада. Но во всем этом необъятном множестве срабатывает важное упрощающее природное свойство коэрцитивной силы, систематизирующее это сложное многообразие. Это свойство состоит в том, что величина коэрцитивной силы металла непрерывно и заметно, в разы растет от начального значения, пока металл проходит стадии от состояния поставки до его конечного состояния – разрушения. Начальное и конечное значения коэрцитивной силы у каждой марки металла – это свои характерные константы. Конечное значение при этом не зависит от того, сколько и каких эксплуатационных факторов привели металл к разрушению. Эти две величины коэрцитивной силы – в начальном состоянии (поставки) и в состоянии предразрушения – такие же значимые параметры для каждой марки стали, как, например, предел прочности и предел текучести. Они легко измеряются практически. Для наиболее употребляемых марок



конструкционных сталей нами такие данные сведены в таблицу, опубликованы в наших статьях и выложены на нашем сайте. Разница между этими двумя значениями коэрцитивной силы (начальным и конечным) тождественна эксплуатационному ресурсу металла. Приращение от начального до какого-то промежуточного текущего значения коэрцитивной силы – это отработанный ресурс, а разница между конечным и этим текущим – остаточный ресурс по реальному состоянию накопленной усталости. Причем, не по гипотетическим механическим свойствам данной стали из справочника, которые в действительности в течение эксплуатации существенно меняются в зонах концентрации нагрузжений (как самом слабом звене диагностируемой конструкции). А по истинному, подлинному на данный момент состоянию металла с учетом всех особенностей множества возможных эксплуатационных воздействий на него, отобразившихся интегрально в величине его текущего значения коэрцитивной силы и в скорости деградации металла – величине прироста коэрцитивной силы, отнесенному ко времени, за которое этот прирост произошел. По этой скорости накопления микроповрежденности довольно точно – при известном режиме нагружения – прогнозируется время перехода металла в недопустимое состояние, когда он уже не сможет безопасно выполнять свои функции в конструкции.

Из всего сказанного выше достаточно убедительно следует, что коэрцитивная сила сегодня является несравненно эффективным информационным параметром неразрушающего контроля усталостной микроповрежденности металла, а удачная реализация нами прибора-измерителя коэрцитивной силы делает коэрцитиметрию сегодня наиболее пригодной для реализации количественного усталостного контроля на уровне рядовой экспертизы.

Утверждение о приоритетности коэрцитиметрии в наборе диагностических методов строится на нескольких очевидных, т.е. аксиоматических положениях.

1. Усталостные дефекты – итог развития микроповрежденности металла. Поэтому объективная оценка текущего состояния металла должна формироваться из данных об усталостном состоянии и его дефектности. Современная же диагностика строится преимущественно на дефектоскопической информации, т.к. в практике массового неразрушающего контроля нет приборов и методов практической оценки усталости металла, кроме начавшейся сегодня применяться нами для этих целей коэрцитиметрии. Сегодня коэрцитиметрия позволяет методически и приборно, быстро, просто и дешево выявить и оценить качественно и количественно изменения напряженно-деформированного и усталостного состояния. Этим обеспечивается полнота исходных данных диагностики. Измерения выполняют без зачистки и контактной жидкости, прямо через защитное покрытие толщиной до 5-6 мм. Ничто, кроме усталостных изменений в металле, не заставит хороший коэрцитиметр показать недопустимые значения в данной зоне контроля.

2. В зонах концентрации напряжений и других усугубляющих воздействий накопление усталостной микроповрежденности происходит с опережением. При достижении микроповрежденности определенного (своего у каждой марки металла) уровня имеет смысл выполнять и дефектоскопию металла. До этого момента усталостных дефектов в металле просто нет. Такой прицельный и избирательный подход уменьшает объемы и стоимость диагностики, а ее достоверность улучшает.

3. Размеры зон-концентраторов существенно больше размеров неизбежно возникающих в них усталостных дефектов, местоположение таких зон не случайно, а предопределено логикой конструкции и логикой распределения приложенных нагрузок. Поэтому усталостные зоны, как большие по своим размерам и логично расположенные, выявляются коэрцитиметрией много проще, чем обнаруживаются дефектоскопией дефекты металла, распределенные всегда и везде достаточно случайным образом.

4. Численная коэрцитиметрическая оценка деградации металла превращает абстрактное до сих пор понятие усталости в проверяемую, ответственную процедуру с точными количественными критериями степени усталости и ресурса металла. Это дает возможность использовать богатейший аппарат статистических методов и оценок, что снижает субъективизм и улучшает наглядность отображения результатов. Диагностика

становится точной, упреждающей и объективно-прогнозирующей, с пополняемым банком данных усталости объекта и всех его элементов в течение срока службы. А высокая чувствительность коэрцитиметрии к повреждаемости металла позволяет надежно следить за соответствующими изменениями в нем уже с момента изготовления и монтажа конструкций и оборудования, задолго до опасного уровня развития усталостных процессов, до момента появления макродефектов.

5. Количественная оценка усталостного состояния металла позволяет формировать интегральную численную характеристику состояния всего объекта, как взвешенную сумму таких же коэрцитиметрических чисел-показателей усталости составляющих его узлов или конструктивных элементов. По этому интегральному коэффициенту хорошо видны сравнительная и абсолютная степень износа оборудования, качество его эксплуатации. На такой основе можно принимать обоснованные решения, например, об очередности, целесообразности и объемах ремонта, не вслепую, а по состоянию металла, точно в пределах его недопустимой усталостной поврежденности. Формируется наиболее эффективная эксплуатационная стратегия отрасли, предприятия, цеха, объекта, обеспечивающая максимальную отдачу оборудования при минимальных затратах, о чем до сих пор упоминается только как о гипотетически возможном в наставлениях по техническому аудиту, поскольку не было параметра контроля для реализации такого подхода.

6. Если измерения коэрцитивной силы выполнить первыми, как *обзорные*, то оперативно получаем общее представление о реальном текущем состоянии всего объекта. Здесь сразу хорошо видны зоны концентрации напряжений и степень деградации металла в них. Это дает возможность обоснованно "привлекать - не привлекать" другие методы контроля металла в зависимости от реального усталостного состояния, включая и дефектоскопию во всех ее разновидностях, но уже в точно очерченных местах и объемах.

Чтобы сделать коэрцитиметрический контроль количественно обоснованным, нормативно состоятельным и всегда сопоставимым и воспроизводимым, нами решена задача получения стандартных образцов напряженно-деформированного состояния. Они позволяют на каждой стадии "работы" металла данной марки, от поставки до разрушения, по измерениям коэрцитивной силы квалифицировать его состояние по эквивалентным удельным напряжениям и степени деградации металла по усталостному типу.

Грамотное введение нового дополнительного метода – коэрцитиметрии – в диагностический набор методов экспертизы металла, как это ни парадоксально, удешевляет диагностику, т.к. снижает общие объемы контроля металла и при этом повышает надежность оборудования за счет концентрации контроля в необходимых объемах и в нужных местах-зонах повышенной усталости – в нужное время, т.е. с момента их "зрелости" для возникновения в них усталостных макродефектов. Коэрцитиметрия здесь позволяет обоснованно продлевать срок службы оборудования, исчерпавшего нормативный ресурс, если металл находится в еще работоспособном состоянии. И напротив – своевременно прекратит досрочно работу оборудования при недопустимой усталости даже бездефектного металла.

Вне всяких сомнений, коэрцитиметрия не перечеркивает и не отменяет сложившийся сегодня традиционный набор методов в диагностике. Она только устраняет исторические перекосы в акцентах, дополняет диагностику недоступной ранее информацией, чем делает диагностику более логичной, завершенной и эффективной. Сегодня это скорее формальный перечень процедур контроля вне зависимости от текущего состояния, вне зависимости от реальной информационной продуктивности этих процедур и вообще без какой-либо оценки усталости металла в действительности. По-видимому, уже было бы более, чем уместным при подготовке НК-специалистов по любым методам приучать их к тому, что металл – это не некая окаменелость, в которой их задача "найти – не найти" дефекты. А это по-своему живая и развивающаяся система со своим началом, зрелостью, завершающей стадией. На каждой из этих фаз для получения полного представления о состоянии металла будет эффективен разный набор методов и в разном объеме применения. И коэрцитиметрия здесь, при самом

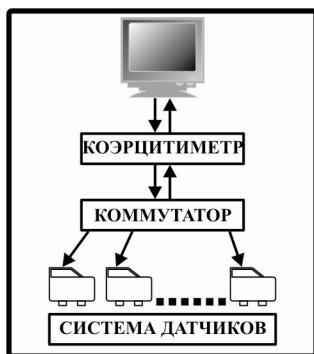
придирчивом рассмотрении, выглядит наиболее универсальным (после визуального) методом обследования, в равной степени эффективным и востребованным на всех этапах жизни металлоконструкции и оборудования.

В зависимости от особенностей объекта контроля, технической и экономической целесообразности, степени требуемой безопасности, коэрцитиметрический контроль усталостного состояния металла может выполняться 1) периодически или 2) непрерывно.

1) Периодический контроль выполняется вручную или подвижными роботами-диагностами. Такой робот способен круглосуточно и с высокой производительностью диагностировать любые труднодоступные или опасные участки поверхности контролируемого объекта, в т.ч. и без приостановки его эксплуатации. При этом ему не нужна предварительная зачистка поверхности металла, он не использует никакой контактной жидкости и, конечно же, не знает усталости в работе. При использовании наших бесконтактных ЭМА-толщиномеров, такой робот выполняет двухпараметрический контроль металла, измеряя степень усталости и напряжений совместно с остаточной толщиной (и дефектностью). Такое сочетание диагностически очень продуктивно. Практика показывает, что нет угрозы безопасности, если снижение остаточной толщины металла не сопровождается ростом коэрцитивной силы. А снижение толщины в сочетании с ростом величины коэрцитивной силы свидетельствует о приближающемся разрушении металла. В ряде случаев ручного контроля очень продуктивен не традиционный переставляемый коэрцитиметрический датчик, а передвижной катящийся. Такой датчик – определяющее условие создания коэрцитиметрического робота.



2) Непрерывный контроль усталостного и напряженного состояния конструкций и оборудования выполняется нашими многодатчиковыми стационарными системами коэрцитиметрического мониторинга. Они дают возможность управлять напряжениями, если варьировать в рамках возможного технологические процессы контролируемого оборудования, чтобы не допустить опасных уровней состояния металла. При этом также хорошо видны основные тенденции развития системной усталости объекта, более очевидны причины этого, а также совершенно очевидны упреждающие действия как для продления срока службы оборудования, так и для своевременного его ремонта.



В диагностике на основе такой концепции коэрцитиметрии становится практической реальностью переход от малопродуктивного поиска дефектов к предотвращению разрушения металла. И содержанием экспертизы промышленной безопасности станет предупреждение аварий, а не уточнение их причин, как это имеет место сегодня.

Практическое внедрение коэрцитиметрии в практику экспертизы объективно несет только пользу всем участникам диагностического процесса – заказчикам, и исполнителям, улучшая их информативность, компетентность и состоятельность, и, в конечном счете, их благополучие. Для широкого практического использования данного подхода необходим набор новых нормативных документов и коррекция уже имеющихся. Однако сложившаяся сегодня система их принятия и изменения выстроена скорее на сохранение сложившегося положения, чем его развитие. И мы надеемся на поддержку НК-общественности в этом безусловно полезном для всех нас деле.

В докладе приведены практические примеры в подтверждение всех вышесказанных выводов и утверждений. Все это подробно можно увидеть на нашем сайте [www.snr-ndt.com](http://www.snr-ndt.com).