



ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННОГО И УСТАЛОСТНОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ ПО МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ МЕТАЛЛА — КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ

(иллюстрации см. на 3-й стр. обложки)

Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО, В. Е. ДОЛБНЯ, Б. Е. ПОПОВ, Р. Н. СОЛОМАХА

Постановка задачи. Сразу уточним, что главным в *коэрцитиметрии* при эксплуатационном контроле металлоконструкций и узлов оборудования, включая и сварные соединения, являются не дефектоскопические задачи, а, прежде всего, уровень усталостных изменений в еще бездефектном металле. Именно такой возможности сейчас недостает современной диагностике, которая с ее все растущими затратами на дефектоскопию всех разновидностей уже не обеспечивает необходимую динамику снижения аварийности. Всем сейчас очень хотелось бы контролировать степень усталости, так как только зная этот параметр возможно осуществить переход от практики поиска дефектов к их предупреждению. Без такого знания невозможна достоверная оценка ресурса. Однако, до применения нами *коэрцитиметрии* в начале 90-х годов для решения эксплуатационного контроля усталостного состояния металла в арсенале у экспертов вообще не было эффективного параметра неразрушающего контроля для таких задач. Не говоря уже о требованиях доступности подобного параметра для измерения и понимания рядовым персоналом, включая и удобную приборную реализацию. Подобное единство методических и практических достоинств и удалось обеспечить в изложенном ниже подходе.

Физические основы. Из базовых разрушающих стендовых (статических и циклических — режим малоциклового усталости) испытаний образцов разных марок конструкционных сталей, а также из испытательных нагружений реальных объектов (например, кислородных баллонов), было установлено, что *коэрцитивная сила* возрастает на 100...300 % (в зависимости от марки металла), пока контролируемый металл меняется от состояния поставки до разрушения. Это очень высокая чувствительность к накоплению усталостных деградаций, какой нет у других параметров НК. На этой основе после обследования сотен сосудов давления и грузоподъемных кранов нами был разработан и согласован в органах технического надзора нормативный документ по техническому диагностированию (с оценкой остаточного ресурса) конструкций грузоподъемных кранов (в России — в 1997 г., в Украине — только в 2005 г.). Хотя успешность практики контроля состояния металлоконструкций по измерениям *коэрцитивной силы* в зонах концентрации напряжений специалистами экспертных центров была достигнута и без этих нормативов. Она предопределена простотой метода и очевидностью выявленных закономерностей поведения *коэрцитивной силы* в зависимости от уровня накопления усталостных изменений.

Применение нами этого подхода уже для диагностики сварных соединений (с учетом их специфики как объекта контроля) позволило получить еще более эффективные результаты, изложенные в работе [1] в начале 2004 г. Понятно, что в сварном соединении, кроме классических усталостных деградаций металла шва и в зонах термовлияния, важно было «увидеть» и остаточные сварочные напряжения, оценить эффективность их термообработки, а также «разглядеть» зарождение зон-концентраторов как предвестников будущих разрушений шва. Особенно таких, где остаточные напряжения суммируются с конструкционными, все это суммируется с эксплуатационными нагрузками и осложняется сопутствующими факторами (температурой, вибрацией, агрессивностью сред и т.д.). В таком концентраторе при эксплуатации выстраивается своеобразная повторяющаяся последовательность усугубляющих друг друга процессов: суммирующиеся упомянутые напряжения и рабочие нагрузки, сопутствующие эксплуатационные факторы → ускоренная коррозия всех типов и фазовые превращения → потеря сечения металла и потеря запасов пластичности → рост удельных нагрузок → и т. д. снова уже по тому же циклу до разрушения металла в таком концентраторе. Реально некоторые звенья такого цикла могут отсутствовать или чередоваться в ином порядке. Но конечный результат — разрушение — неизменен. Важно, что все это сопровождается надежным предвестником — непрерывным и ускоренным локальным ростом значений *коэрцитивной силы* в области концентратора. И, что не менее важно, все это происходит в дефектоскопически безупречном металле. Т. е. *коэрцитиметрия* на этой стадии — единственный и, как оказалось, эффективный параметр косвенного слежения за развитием процессов деградации бездефектного металла. Усталостные дефекты — это уже закономерный конечный итог этих процессов. Однако, специалисты экспертизы, в своей массе не подготовленные к восприятию нового подхода в контроле сварных соединений ни практически, ни нормативно, обращаются к нему пока лишь в исключительных, безвыходных ситуациях как к палочке-выручалочке, когда традиционная экспертиза не дает ясности в оценках. И к слову, ни разу в таких случаях метод не подвел авторов и заказчиков. Но систематической и растущей востребованности *коэрцитиметрии* при контроле сварных соединений после публикации работы [1] не складывалось. Основной причиной этому, причем больше психологической, оказалось отсутствие практической оперативности получения конечных результатов контроля у первой приборной версии нашего контроля, показанной в работе [1]. Для дефектоскопистов, особенно в УЗК, давно и привычно стало получать полную информацию о сварном соединении на экране дефектоскопа непосредственно в процессе контроля, а не через час или через день, как это получалось у нас в первой версии, когда на месте контроля получают только таблицу значений *коэрцитивной силы*, отснятую на шве и околошовных зонах. Преобразование этой таблицы в соответствующее состояние металла сварного соединения, отображаемое в цвете на его геометрической развертке, выполнялось уже на персональном компьютере и преимущественно в лабораторных условиях. Устранить это, встроив ПК в коэрцитиметр, технически возможно, но



вело к такому удорожанию симбиоза, которое исключало его доступность рядовому пользователю — основному потребителю новой технологии. Поэтому два года метод и оставался на уровне скорее эпизодической востребованности как последнее средство решения особо экзотических диагностических задач контроля сварных соединений.

Новый уровень контроля. Появление в массовом пользовании так называемых КПК — карманных персональных компьютеров — позволило радикально решить указанную проблему. Здесь *коэрцитиметр* уже выполняет лишь только то, что нельзя поручить КПК — высокотехнологичному изделию, доступному по цене ввиду его массовой серийности, с привлечением ресурсов профессионального программного обеспечения всех предыдущих поколений ПК, но при массе и размерах чуть больше стандартного мобильного телефона.

В новом комплексе (*коэрцитиметр+КПК*) прибор связан с КПК стандартным беспроводным каналом. Это весьма удобно, так как зачастую измерения выполняются в сложных условиях нагромождения оборудования и переплетающихся технологических трубопроводов, как, например, в условиях АЭС. Оператор занят только процессом измерения. Сбор, сортировку, обработку данных *коэрцитиметрии* КПК ведет самостоятельно. По завершении измерений КПК сразу демонстрирует результаты на дисплее: 1) таблицу измерений; 2) гистограмму полученного набора значений; 3) геометрическую развертку сварного соединения с нанесенной на нее информацией о состоянии металла шва и околошовных зон в виде наглядной цветной карты уровней. Таблица измерений содержит наиболее полную информацию об объекте контроля, но в менее наглядном виде. Для улучшения «читаемости» снятых данных КПК преобразует исходную таблицу в две итоговых демонстрационных разновидности — гистограмму и развертку. По гистограмме, не видя объекта контроля, можно сразу оценить состояние сварного соединения. Но нельзя определить местонахождение опасных зон и степень деградации каждой из них. Эта информация отображается уже в развертке. Гистограмма демонстрируется на экране с указанием ее двух численных характеристик, весьма характерных для состояния металла сварного соединения — среднего значения измерений *коэрцитивной силы* МО и СКО — степени разброса этих значений относительно среднего. Эти два числа убедительно характеризуют качество технологий сварки и термообработки, если контроль выполнен на новом или отремонтированном шве — чем лучше технологии, тем меньше величины МО и СКО и тем быстрее они растут с ростом отработанного ресурса. Гистограмма, МО и СКО удобны для экспресс-оценки как металла сварного соединения, так и качества технологий сварки, а также для численного слежения за динамикой накопления эксплуатационной усталости металла.

Однако, гистограмма по своей статистической природе в результате усреднения исходных данных измерений теряет информацию о местонахождении зон концентрации напряжений и степени неблагоприятности каждой из них. Все это видно только на развертке сварного соединения, где в цвете картографически нанесено распределение измерений *коэрцитивной силы*, позволяющее увидеть к тому же еще и степень неоднородности шва на фоне основного металла.

Введение здесь компьютерных технологий не мешает и не довлеет над НК-специалистом, так как КПК отслеживает его работу по контролю, не вмешиваясь в нее. А когда необходимо, компьютер показывает эксперту измеренные данные, а также готовые результаты их анализа. В зонах сварного соединения, благополучных с позиций *коэрцитиметрии*, вероятность обнаружения усталостных дефектов — нулевая. Там могут быть только «спящие» дефекты (металлургические или сварочные), не влияющие на напряженно-деформированное состояние металла, а значит, не влияющие и на величину *коэрцитивной силы* металла в данной зоне. Таким образом, *коэрцитиметрия* не отрицает, а органично дополняет новой информацией все, что накоплено сегодня в традиционной диагностике.

Наблюдая систематически на основе *коэрцитиметрии* гистограмму, МО, СКО и развертку шва в течение эксплуатации, легко отслеживается зарождение и степень развития зон будущих разрушений, так как процесс становления таких зон развивается не лавинообразно, он может идти годами. Степень близости текущего состояния металла в каждой конкретной зоне к состоянию предразрушения однозначно контролируется по наибольшим значениям *коэрцитивной силы* в такой неблагоприятной области. Привлекая в таких случаях мероприятия, конструктивно разгружающие эти зоны, а также технологии регенерации свойств металла, **переходят в эксплуатацию от практики поиска дефектов к их предупреждению, упреждая и связанные с этим отказы в работе оборудования.**

Поскольку хранящиеся в КПК таблица, гистограмма с МО и СКО, карта развертки шва — это готовая формализованная полная информация о состоянии металла, то на такой основе легко и просто формируется эффективная компьютерная база данных о каждом шве на объекте контроля.

Таким образом, новый комплекс коэрцитиметр+КПК, усиливая коэрцитиметрию возможностями вычислительной техники, позволяет просто, оперативно и без значительного удорожания оценить усталостное и напряженное состояние сварного соединения. Это новый уровень диагностики, когда богатые дефектоскопические традиции, эффективные, к сожалению, лишь на последних стадиях срока службы оборудования, впервые и органично дополняются контролем степени усталости, который результативен в течение всего срока эксплуатации. Становится реальностью переход к предупреждению дефектов вместо значительно менее продуктивной тактики их поиска.

1. Безлюдько Г. Я. Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики — коэрцитивной силы металла // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 1. — С. 20–23.

**За более подробной информацией просим обращаться
по тел. (057)738-32-06, 771-65-91
e-mail: bezlyudko@yahoo.com, itl913@online.kharkov.ua**