

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И МЕХАНИКА СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ

В. А. Попов, д.т.н., академик ПТАН Украины, г. Харьков.
А. Е. Бармин, к.т.н., доцент кафедры материаловедения НТУ «ХПИ», г. Харьков.
Д. Г. Черный, начальник лаборатории технической диагностики и неразрушающего контроля ООО «ПромТехДиагностика», г. Кривой Рог

Продолжение (начало в № 12, 2019 и № 1–5, 2020)

*«Гораздо труднее увидеть проблему,
чем найти ее решение»*

Дж. Бернал

*«Проблемы остаются, меняются лишь
подходы к их решению»*

Н. Бор

В последние годы стало возможным выстроить алгоритм оценки технического состояния сварных металлоконструкций **на основе достоверного дефектоскопического контроля, определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкций на любой стадии жизненного цикла оборудования повышенной опасности, и, наконец-то, объективной оценки изменения механических свойств металла в элементах и узлах за время эксплуатации ОПО на основе механики структурного разрушения** [1]. Но для этого пришлось пережить ряд техногенных катастроф, аварий, трагедий человеческих судеб.

Объективность оценки технического состояния подъемного сооружения (ПС) и своевременное предупреждение аварийных ситуаций во многом зависят от результатов оценки напряженно - деформированного состояния (НДС) металлоконструкций на любой стадии жизненного цикла грузоподъемной машины (от изготовления до списания).

Бурное развитие компьютерных технологий дало возможность при проведении расчётно-аналитических процедур моделировать и оценивать возникающие напряжения в элементах и узлах металлоконструкций. Но аналитические методы на основе критериев линейной механики разрушения, моделирующей развитие дефектов до критических размеров, не могут учесть изменение структуры металла и соответственно механических свойств при развитии деградиционных явлений, связанных с температурными последствиями влияния сварки, эффекта возникновения температурной усталости металла при эксплуатации кранов в зоне влияния высоких температур и ряда других факторов. Поэтому проблемы оценки риска при эксплуатации ПС напрямую связаны с поиском методов эффективного контроля НДС металлоконструкций и скоростью развития деградиционных процессов.

И как всегда, лишь очередная трагедия дала толчок к широкому применению одного из перспективных методов неразрушающего контроля – **магнитного (коэрцитиметрического) метода неразрушающего контроля (МТкс)** [1] для оценки НДС в сварных металлоконструкциях.

Тогда на ОАО «Северсталь» (Россия) при падении ковша с жидким металлом массой 430 т в бушующем пламени огня заживо сгорели несколько человек. В процессе расследования причин аварии необходимо было так же решить вопрос о возможности дальнейшей эксплуатации крана, в металлоконструкциях которого началось интенсивное трещинообразование

Основной причиной аварии стал обрыв стальных канатов из-за снижения механических свойств канатов от воздействия восходящих потоков газа при каждом технологическом цикле (доставка ковша с расплавом чугуна массой 430 т к конвертору и заливка жидкого металла в печь).

При этом металлоконструкции крана также подвергались высокотемпературному воздействию раскаленных газов от жидкого металла в течение 15-20 мин. По данным

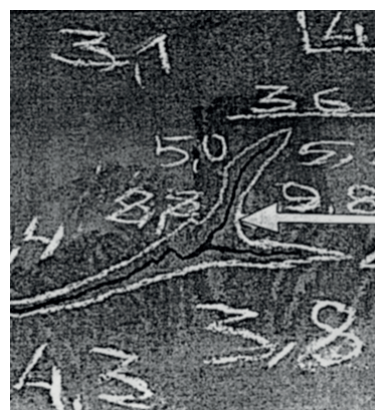


Рис. 31. Фрагмент одного из участков, с образовавшимися трещинами в стенке главной балки литейного крана после падения ковша с жидким металлом. Мелом отмечены значения коэрцитивной силы, H_c (А/см) при применении метода МТкс

пирометристов ОАО “Северсталь” отдельные части главных балок и концевая балка нагревались до 380–400°C. Теоретически сталь 09Г2С при таком повышении температуры не должна терять свои прочностные свойства. На практике владельцам кранов эти зоны приходилось ремонтировать в местах расположения усталостных трещин.

При динамическом обратном ударе на главные балки при обрыве канатов возникли новые трещины, как показано на рис. 31, длиной до 350 мм.

Для оценки уровня остаточных напряжений в главных балках и оценки скорости накопления повреждений в металле было решено применить метод МТкс [25].

ИНФОРМАЦИЯ К РАЗМЫШЛЕНИЮ.

С самого начала развития теории магнитной структуроскопии ставилась задача – установление закономерных связей между магнитными свойствами металлов и сплавов и их структурно-фазовым состоянием и механическими свойствами, на основе которых разрабатывались методы и средства неразрушающего контроля промышленных изделий [22].

В качестве одного из направлений решения этой проблемы получила распространение практика магнитной диагностики металлоконструкций ПС на основе измерения магнитной характеристики металла – **коэрцитивной силы, H_c (А/см)** [23, 24].

В основу данного метода неразрушающего контроля (МТкс) положены корреляционные зависимости между механическими свойствами металла и одним из основных физических параметров петли магнитного гистерезиса – коэрцитивной силой, H_c (А/см), как наиболее чувствительной к изменению плотности дислокаций структуры стали [24].

По мере внедрения метода МТкс для оценки НДС сварных металлоконструкций становилось понятным, что при относительной простоте и эффективности получения результатов измерений **существует ряд проблем, связанных с интерпретацией крайне низких значений H_c (ниже 2 А/см), а также при оценке деградиционных процессов в элементах конструкций с толщиной более 20 мм.** Нет смысла останавливаться в короткой статье на всех положительных и отрицательных моментах применения метода МТкс и результатах многочисленных исследований и докладах на международных конференциях, посвященных проблемам, связанным с

оценкой напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, в т. ч. с применением метода МТкс. Об этих проблемах особенно подробно изложено в монографии “На тернистом пути экспертизы промышленной безопасности” [1] в третьей части с интригующим названием – “Мифы и реальность применения магнитной структуроскопии при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций кранов мостового типа”.

В плане информационной чувствительности к изменениям в металле (по мере развития и накопления в нём усталостных явлений) магнитная характеристика (коэрцитивная сила) оказалась очень эффективной.

Прирост значений коэрцитивной силы (ΔH_c) при нагружении металла от исходного состояния поставки H_c^0 в процессе эксплуатации составляет 100 – 400 % в зависимости от марки стали. Немаловажно здесь и то, что если металл при нагружении испытал хотя бы однократное воздействие, превышающее значение $G_{0,2}$, текущее значение его H_c в этой зоне уже никогда не вернётся к исходному значению H_c^0 , а перейдёт в новое исходное состояние $H_c^{\text{факт}}$, т. к. в этой области металл переходит из области упругих (обратимых) деформаций в упруго-пластическую область диаграммы нагружения (рис. 32). Значения H_c^0 , H_c^T , H_c^B и являются такими же характерными

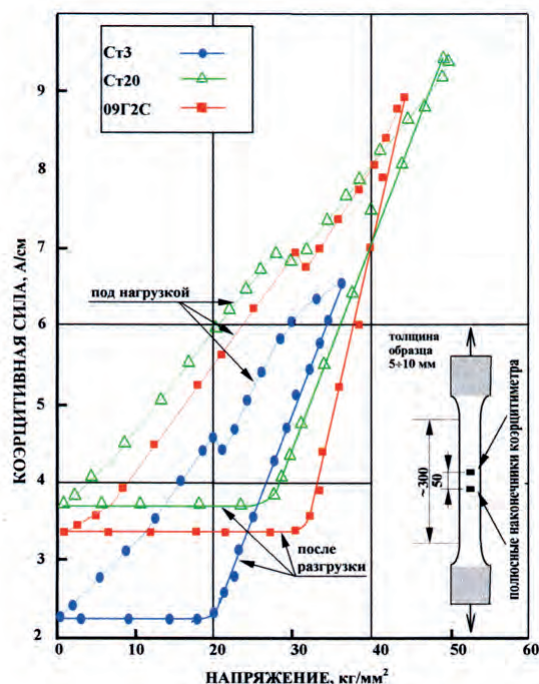


Рис. 32. Магнитный контроль плоских образцов из Ст3, Ст20, 09Г2С при испытании на растяжение с регистрацией значений H_c (А/см) непосредственно под нагрузкой и после разгрузки на каждой ступени нагружения

значениями для каждой марки металла, как и механические характеристики $G_{0,2}$ и G_B . Отношение прироста значений ΔH_C к рассматриваемому интервалу времени (ΔT), определяет скорость накопления повреждений в структуре металла от возникающих напряжений, которое может быть описано линейной зависимостью типа:

$$\Delta H / \Delta T = C \times \Delta G^n, \quad (22)$$

где G – внутренние напряжения; C и n – свойства стали [22].

В результате исследований [23, 24] для традиционных малоуглеродистых и низколегированных сталей (при толщине проката 5-15 мм) были обобщены базовые (усредненные) параметры контроля за состоянием металла по величине коэрцитивной силы:

H_C^O – исходное значение коэрцитивной силы;

H_C^T – соответствует уровню напряжений, равных физическому пределу текучести стали ($G_T = G_{0,2}$);

H_C^B – соответствует пределу выносливости при малоциклового усталости (МЦУ) при пульсирующем цикле нагружения.

Нормативной базой магнитного (коэрцитиметрического) контроля (МТкс) являются: Международный стандарт ИСО 4301 [27], межгосударственный стандарт ГОСТ 30415-96 (с изм. 1) и методические указания [25, 26].

Наибольшее распространение для практической работы получили переносные магнитные структуроскопы типа КРМ – Ц – К2м, довольно простые и удобные в обращении (рис. 33), тем более что для проведения измерений не требуется особой подготовки поверхности, а для одного измерения достаточно одной минуты.



Рис. 33. Внешний вид двух импульсных структуроскопов КРМ – Ц – К2м

Результаты работ исследователей и практика применения магнитной структуроскопии при оценке НДС металлоконструкций при малоциклового усталости позволили установить усредненные изме-

нения скорости роста $\Delta H / \Delta T$ (А/см·год) при различных режимах нагружения [23].

На основе многочисленных исследований и практического опыта применения метода МТкс было установлено, что весь процесс накопления повреждений и развития деградиционных процессов в металлоконструкции можно представить в виде схемы:

$$H_C^{\text{факт}} = H_C^O + \Delta H_C^{CB} + \Delta H_C^{\exists} + \Delta H_C^P + \Delta H_C^{KH}, \quad (23)$$

где $H_C^{\text{факт}}$ – значения H_C , полученные в процессе измерений (А/см);

H_C^O – характеризует первоначальное значение коэрцитивной силы в металлопрокате (в состоянии поставки);

ΔH_C^{CB} – прирост значений H_C от напряжений в процессе изготовления конструкции и производстве монтажных работ на объекте эксплуатации крана;

ΔH_C^{\exists} – прирост значений H_C в зависимости от времени и условий эксплуатации;

ΔH_C^P – прирост значений H_C от появления напряжений при проведении ремонтных работ с применением сварки;

ΔH_C^{KH} – отражает зависимость изменений значений H_C (по показаниям прибора) от влияния концентраторов напряжений в отдельных зонах металлоконструкции.

Вместе с тем, при анализе результатов магнитного контроля главных и вспомогательных балок в процессе расследования аварии крана на ОАО “Северсталь” было установлено, что их вертикальные стенки толщиной 10-12 мм в зоне термического влияния перешли в критический режим эксплуатации [27] и максимальные критические значения $H_C^{\text{факт}}$ на отдельных участках достигли 9,8 – 11,6 А/см. И достаточно было возникнуть динамической нагрузке от обратного удара при обрыве канатов, как произошло мгновенное трещинообразование. После релаксации напряжений очень низкие значения $H_C^{\text{факт}}$ (ниже 4 А/см, рис. 31) указывают на то, что механические свойства металла элементов значительно снизились в результате термоциклического влияния от потока раскаленных газов. Это подтвердили и последующие механические испытания.

Эта авария дала толчок к проведению исследований воздействия термовлияния на термоциклическую усталость, а также положило начало проведения широкомасштабного эксперимента для оценки изменения

НДС металлоконструкций кранов с применением метода МТкс.

На протяжении нескольких лет Харьковский завод подъемно-транспортного оборудования при поставках в Россию комплектовал сопроводительную документацию паспортами магнитного контроля на краны специальные весьма тяжёлого и тяжёлого режимов работы.

Паспорт магнитного контроля (ПМК) являлся подтверждением гарантий завода-изготовителя качества металлоконструкций в том смысле, что первоначальное состояние сварной конструкции отвечает требованиям надёжной эксплуатации (по ISO 4301), в том числе гарантирует и отсутствие недопустимо высоких сварочных напряжений.

В процессе эксперимента и исследований было установлено, что первичные значения коэрцитивной силы H_C^O , так же, как и механические свойства, зависят от многих факторов: химического состава стали, величины зерна, наличия структурной неоднородности, состояния поставки металлопроката (горячекатаный или холоднокатаный прокат, в отожженном или нормализованном состоянии).

Согласно принципу неопределённости и положениям теории академика Седова **«средние значения коэрцитивной силы не могут однозначно характеризовать как накопление повреждений, так и остаточный ресурс конструкции в целом»**. Это связано с тем, что различные расчётные элементы нагружаются по-разному и не обладают одинаковой жёсткостью и прочностью, тем более что сварочные напряжения могут оказывать значительное влияние на раннее трещинообразование в сварных конструкциях.

На основе результатов проведения широкомасштабного эксперимента в публикации [5] **впервые** приводится пример изменения скорости развития деградационных процессов в одной из главных балок крана KM5472 $\Delta H/\Delta T$ (А/см·год), за 9 лет с начала эксплуатации. При этом необходимо отметить, что в наиболее нагруженных зонах, где первоначальные значения H_C от сварочных напряжений составляли более 6,2 А/см, H_C^{max} после 9 лет не только увеличилось до 8,9 А/см, но и последние 3 года скорость роста $\Delta H/\Delta T$ возрастала от 0,3 до 0,4 А/см·год.

Анализ первых результатов эксперимента также показал, что при достижении "критического" режима эксплуатации при $H_C^T \ll H_C^{max} \ll \Delta H_C^B$, когда отдельные элементы метал-

локонструкции работают в упруго-пластической и пластической областях диаграммы нагружения и максимальные напряжения превышают предел текучести стали, появляются усталостные трещины, а скорость роста $\Delta H/\Delta T$ резко возрастает.

Также было подтверждено, что зарождение и развитие макродефектности в элементах конструкции происходит в условиях действия нескольких механизмов, приводящим в конечном итоге к трещинообразованию и разрушению. **Установление ведущего механизма зарождения и развития макродефектности достигается не только комплексом выполнения исследований, но и риск-ориентированным подходом на основе риск-ориентированного интуитивного мышления.**

Литература

1. Попов В. А., Гудошник В. А. На тернистом пути экспертизы промышленной безопасности. — Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2016. — 544 с.
5. Попов В. А., Радченко В. С. Комплексный подход при анализе причин раннего трещинообразования // Подъемные сооружения. Специальная техника №10-12, 2018.
22. Михеев М. Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. - М.: Наука, 1993. - 126 с.
23. Котельников В. С. Практика магнитной диагностики подъемных сооружений при проведении экспертизы промышленной безопасности / В. С. Котельников, Б. Е. Попов, Е. А. Левин, В. В. Зарудный, Г. Я. Безлюдько // Подъемные сооружения. Специальная техника. - 2003. - № 6-7. - С. 20-21.
24. Попов В. А. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии // Подъемные сооружения. Специальная техника. - 2004. - № 9. - С. 20-21.
25. РД ИКЦ «Кран»-007-97/02 Магнитный контроль напряжённо-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении обследования и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности). - М., 2002. - 126 с.
26. МВ 0.00-7.01-05 Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металокопструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу. - Харків, 2005. - 126 с.
27. Международный стандарт ИСО 4301, часть 1...5.

Продолжение следует.

ОТ РЕДАКЦИИ

Более детальную информацию по циклу статей "Трещинообразование и механика структурного разрушения" можно получить у Попова Владислава Андреевича:

e-mail: v.a.popov1937@gmail.com
+380-66-298-94-89