



## ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ ЗАВОДА «СИБТЯЖМАШ»

**В. А. ГУДОШНИК** (ООО СП «ТЮФ НОРД-ДИЭКС», г. Днепропетровск), **С. А. ГУБСКИЙ** (НТУ «ХПИ», г. Харьков),  
**В. А. ПОПОВ** (ПТАН Украины, г. Харьков), **Ю. В. ЧМЫРЬ** (ОАО «НИПКТИ «Укркранэнерго», г. Харьков)

*На основании многолетних исследований и практики применения магнитной структуроскопии при техническом диагностировании рассматриваются проблемы предотвращения аварий при эксплуатации кранов-перегрузателей завода «Сибтяжмаш».*

*Problems of accident prevention in operation of loading cranes produced by "Sibtyashmash" are considered, based on many years of investigations and practical application of magnetic structuroscopy at technical diagnostics.*

В 1980–1990-х гг. на предприятиях горно-металлургического комплекса, тепловых электростанциях начали широко применяться краны-перегрузатели трубчатой конструкции производства завода «Сибтяжмаш».

Причины их востребованности следующие: во-первых, высокая производительность — до 600 т/ч, пролет 76,2 м, консоли с вылетом до 25...31 м, режим работы — А6, скорость передвижения грузовой тележки до 240 м/мин; во-вторых, передовые (на то время) системы управления приводами (системы Г-Д, либо преобразователи постоянного тока).

Однако в дальнейшем популярность сменилась скандальной известностью.

Причины серьезных аварий с обрушением консолей и гибелью людей связывались только с наличием дефектов в сварных соединениях. Лишь после аварий на Беловской ГРЭС, Криворожском центральном ГОКе, Гусиноозерской ГРЭС завод-изготовитель обратил внимание потребителей на необходимость усиления надпорных узлов на перегружателях с длиной консолей 30 и более метров независимо от срока эксплуатации, а также на всех других, отработавших срок службы 15 лет. Изменение форм собственности предприятий и смена собственников проблемы безопасной эксплуатации кранов-перегрузателей, как впрочем и другого оборудования повышенной опасности, отодвинула на второй план. Новые собственники предприятий не торопились вкладывать средства в обновление кранового парка или хотя бы в реконструкцию грузоподъемного оборудования. «Косметические ремонты» в местах появления дефектов зачастую не улучшали, а ухудшали состояние металлоконструкций кранов-перегрузателей, а экспертными организациями в большинстве

случаев не выполнялся весь комплекс работ, обеспечивающий установление причин раннего трещинообразования. Систематический мониторинг нарастания усталостных явлений в элементах металлоконструкций с прогнозированием остаточного ресурса не проводился.

В журнале «Подъемные сооружения. Специальная техника» поднимался вопрос о небезопасности дальнейшей эксплуатации кранов-перегрузателей, которые отработали нормативный срок [1], а также освещался накопленный опыт по реконструкции кранов с установкой шпренгельной системы по про-



ектам «НИПТКИ «Укркранэнерго» на Запорожской ТЭС, Криворожском Центральном ГОКе, Приднепровской ТЭС, Криворожстали.

Очередная авария с обрушением консоли произошла в мае 2006 г. на Ясиновском коксохимическом комбинате всего лишь после 14 лет эксплуатации крана (рис. 1). При этом за несколько лет до аварии металлоконструкция моста крана-перегрузателя неоднократно подвергалась сложным ремонтам. И хотя через каждые шесть месяцев проводили техническую диагностику для установления срока дальнейшей временной эксплуатации, авария произошла.

При изучении причин аварии и решении вопроса о возможности и целесообразности ремонтно-восстановительных работ металлоконструкций моста крана Донецким экспертно-техническим центром, ОАО «НИПТКИ «Укркранэнерго» и ООО «Подъемсервис» (г. Харьков) был применен комплекс методов неразрушающего контроля и исследований.

Исследования образцов, вырезанных из ненагруженных участков обечайки трубы, показали, что химический состав и механические свойства металла соответствовали требованиям, предъявляемым к стали 10ХСНД по ГОСТ 19281–89 класса прочности 390, а в микроструктуре металла не выявлено каких-либо аномалий: неметаллических включений, полосчатости, видманштеттовой структуры (рис. 2).

Визуальный осмотр в месте разрыва обечайки трубы (рис. 3, 4) и последующие металлографические исследования образцов (рис. 5) показали, что разрушение элемента (обечайки) несущей трубы произошло из-за охрупчивания металла в околошовной зоне (в металле ЗТВ) с последующим развитием магистральной трещины в основной металл.

Сварные соединения подвергали ультразвуковому контролю и магнитопорошковой дефектоскопии, а металл элементов металлоконструкции моста — ультразвуковой толщинометрии и твердометрии, а затем магнитному (коэрцитиметрическому) контролю.

Твердость и механические свойства на отдельных участках металлоконструкций моста были ниже требований, предъявляемых к стали 10ХСНД по ГОСТ 19281–89 для класса прочности 390, особенно в зонах, подвергшихся разрушению и ремонту, что подтвердилось механическими испытаниями.

Вместе с тем образцы, вырезанные из наиболее нагруженных элементов, не могут отражать структурное и напряженное состояние металлоконструкции в целом по критериям подобия. Поэтому для оценки процессов накопления усталостных повреждений анализировали данные магнитного контроля по изменению величины коэрцитивной силы  $H_c$ .

Процесс накопления повреждений в металле может быть описан линейной зависимостью типа

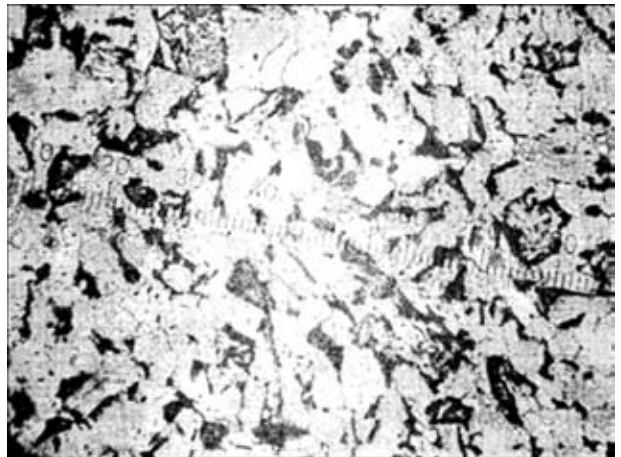


Рис. 2. Микроструктура (×500) металла образца № 5, удаленного от разрыва



Рис. 3. Общий вид разрыва несущей трубы моста



Рис. 4. Место вырезки образца № 2

$$\Delta H_c / \Delta T = C \Delta G^n,$$

где  $\Delta H_c / \Delta T$  — прирост значений коэрцитивной силы за период эксплуатации крана;  $\Delta G^n$  — внутренние напряжения;  $C, n$  — свойства стали [2].

Согласно принципу неопределенности и положениям теории подобия академика Седова средние значения не могут характеризовать накопленные повреждения и остаточный ресурс конструкции в целом. Это связано с тем, что различные расчетные элементы нагружаются по разному и



не имеют одинаковую жесткость и прочность. Более того, даже в одном элементе на различных участках накопление усталостных повреждений происходит по-разному. Поэтому контроль величины  $H_c$  по «слабому звену», т. е. максимальным значениям ( $\max H_c$ ), имеет близкую к линейной зависимость накоплений повреждений и может с вероятностью 0,95 характеризовать состояние металла в зависимости от срока эксплуатации и режима нагружения.

Исследования металла в верхней части обечайки (непосредственно возле зоны разрушения) показали максимальные значения  $H_c$  (до 12,5 А/см), а средняя скорость нарастания коэрцитивной силы  $\Delta H_c / \Delta T$  характерна для металлоконструкций кранов мостового типа при работе в тяжелом режиме эксплуатации [2], что свидетельствует о недостатках конструкции крана-перегрузателя и ненадежности узла консоли трубы в месте присоединения обечайки к ригелю.

Металлографическими исследованиями образцов, вырезанных из верхней части обечайки трубы (на 200 и 300 мм от начала разрушения) выявлены микротрещины (рис. 6, 7), при этом значения  $H_c$  уменьшались по мере удаления от места разрыва и составляли от 9,2 до 8,4 А/см. Значительно изменялись значения  $H_c$  вокруг сварного соединения (по диаметру обечайки) — от 12,5 (в верхней части) до 6,2 А/см на средней части трубы (рис. 8).

Такое распределение  $H_c$  характерно для начала трещинообразования при достижении предельных усталостных изменений в металле, достигшем критического режима эксплуатации (область пластической деформации в соответствии с диаграммой нагружения ISO 4301 [3]).

Для исследования напряженно-деформированного состояния металлоконструкций моста крана-перегрузателя с применением магнитного (коэрцитиметрического) метода контроля были определены зоны контроля и места расположения точек контроля относительно сварных соединений несущей трубы моста и двутавровых балок (рис. 9), диафрагм и тормозных листов.

Выбор зон и точек контроля обусловлен также тем, что магнитные свойства стальных металлоконструкций при циклическом нагружении формируются в условиях сложнапряженного состояния под влиянием растягивающих, изгибающих нагрузок и крутящих моментов.

В периоды изготовления, монтажа и последующей эксплуатации кранов в несущих элементах металлоконструкций при циклическом нагружении идет процесс накопления микропластических деформаций и повреждений, приводящих к усталостному разрушению металла с потерей несущей способности конструкции. Одновременно происходят и изменения ряда магнитных параметров, однозначно связанных с количеством нару-

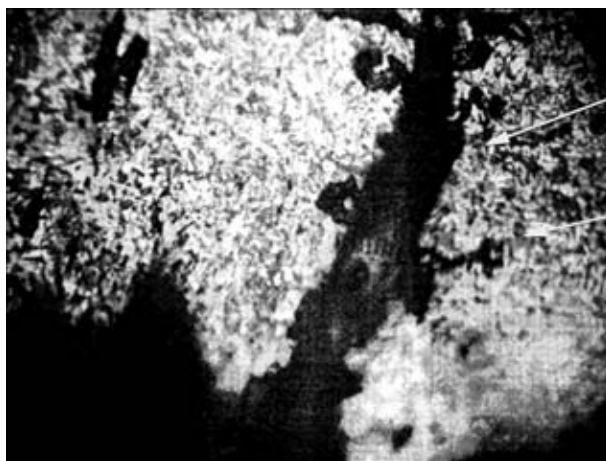


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла образца № 5 в зоне разрыва (стрелки указывают на микротрещины)

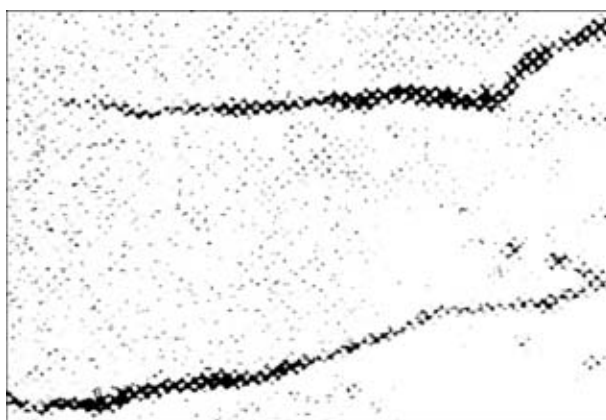


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 500$ ) образца № 2 (микротрещина на расстоянии 200 мм от зоны разрыва)

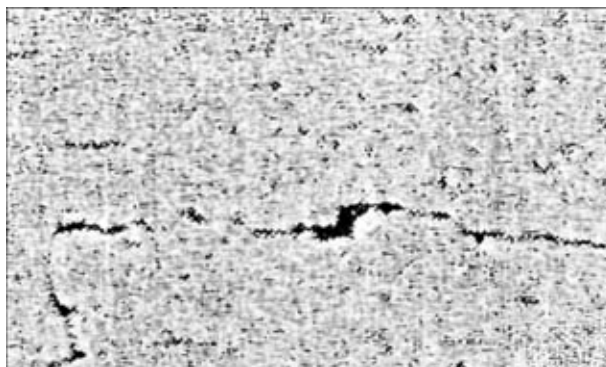


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 500$ ) образца № 4 (микротрещина на расстоянии 300 мм от зоны разрыва)

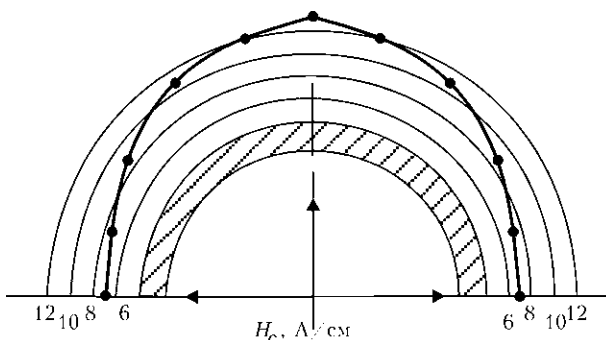


Рис. 8. Распределение  $H_c$  (А/см) по диаметру обечайки трубы в зоне разрушения

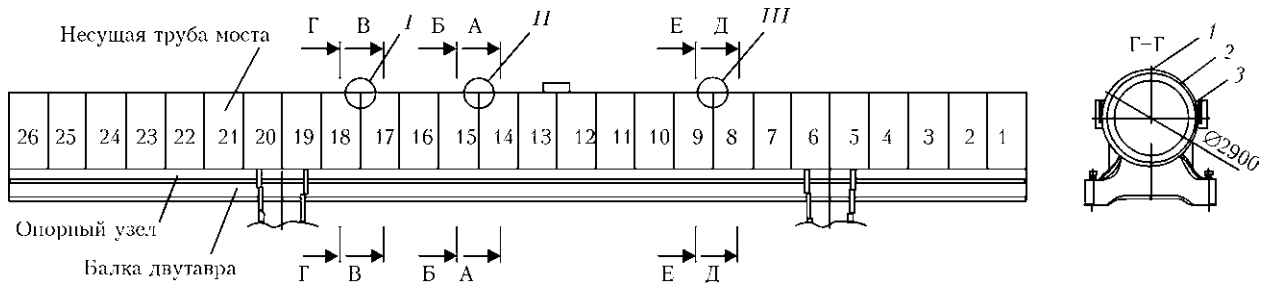


Рис. 9. Зоны контроля и места расположения точек контроля относительно сварных соединений несущей трубы моста и двутавровых балок крана-перегрузателя

шений структуры металла и являющихся своеобразным отражением силового режима работы конструкции, т. е. в процессе накопления нарушений структуры металла изменяются (возрастают) значения  $H_c$  в элементах металлоконструкции.

Исследования осуществляли с применением структуроскопов типа КРМ-ЦК-2М (рис. 10) с последующим анализом и аппроксимацией полученных значений  $H_c$  в зависимости от марок сталей и толщин элементов металлоконструкций с помощью программы METALL, написанной на языке программирования Delphi. Также проводились необходимые расчеты, в том числе методом конечных элементов [4, 5].

Из-за ограниченного объема публикации ниже приводятся лишь отдельные фрагменты распределения  $H_c$  в несущей трубе моста (рис. 11, без учета обрушившейся консоли, зоны 21-26).

Как видно из рис. 11, наибольшие значения  $H_c$  имеют место в зонах 3-4, 7-8, 17-18, т. е. в тех элементах обечайки трубы, которые примыкают к металлоконструкции ригелей опор моста перегружателя, а также в средней части моста (зона 12), где проводилось усиление несущей трубы моста с применением сварочных работ. Средняя скорость нарастания усталостных явлений составляла 0,22...0,25 А/см, что характерно для металлоконструкций мостовых кранов при работе в весьма тяжелом режиме эксплуатации.

В этих зонах металл элементов обечайки находится в области упругопластических деформаций, а напряжения, возникающие при этом, достигали предела текучести  $\sigma_{0,2}$ .

Аналогичные исследования по оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций мостов кранов-перегрузателей с применением магнитного (коэрцитиметрического) метода контроля проводили на ряде других предприятий, в том числе в течение нескольких лет на Запорожской ТЭС (г. Энергодар), где на кране была установлена шпренгельная система для усиления надопорных узлов (рис. 12) по проекту ОАО «НИПТКИ «Укркранэнерго».

Результаты замеров коэрцитивной силы  $H_c$ , А/см, в аварийно-опасных зонах (при входе трубчатой обечайки в ригель) показали, что нап-



Рис. 10. Сравнительные замеры  $H_c$  на образцах различными структуроскопами

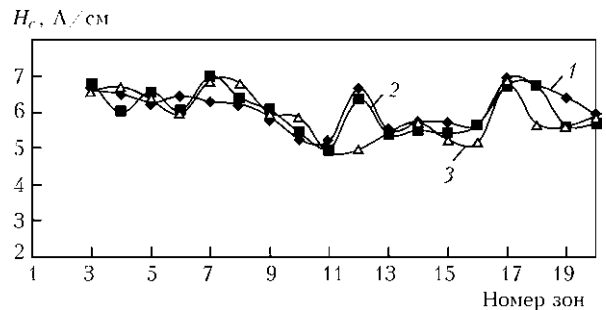


Рис. 11. Изменения значений  $H_c$  в элементах несущей трубы моста крана-перегрузателя Ясиновского КХК (кривые 1-3 — соответствуют точкам контроля 1-3 на рис. 2)



Рис. 12. Общий вид шпренгельной системы усиления на одной из опор крана-перегрузателя

ряжения в этих зонах остаются стабильными на протяжении последних пяти лет (рис. 13). Значения  $H_c$  ниже, чем в приведенных выше исследованиях металлоконструкций моста крана на Ясиновском КХК (рис. 11), хотя кран отработал два

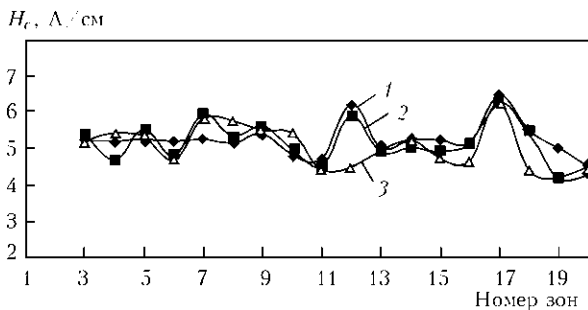


Рис. 13. Изменения значений  $H_c$  в элементах несущей трубы моста крана-перегрузателя Запорожской ТЭС (кривые 1–3 соответствуют точкам контроля 1–3 на рис. 2)

нормативных срока эксплуатации в весьма тяжелом режиме работы.

Вместе с тем замеры  $H_c$  на раскосах шпренгельной системы показали, что напряжения в раскосах распределяются неравномерно. Раскосы северной консоли работают в области упругих деформаций, что соответствует режиму надежной эксплуатации. В более сложном напряженно-деформированном состоянии находятся раскосы 1–3 южной консоли, где значения  $H_c$  достигают 5,5...6,8 А/см. При этом значения  $H_c$  в верхнем и нижнем узлах раскосов распределяются неравномерно, как по длине, так и по диаметру, т. е. раскосы подвергаются не только растягивающим напряжениям, но и крутящим моментам при нагрузках, связанных с неудовлетворительным состоянием системы контроля перекуса при движении крана.

Скорость роста  $\Delta H_c / \Delta T$  в элементах раскосов шпренгельной системы южной консоли составляет от 0,2 до 0,67 А/см в год, т. е. за 5 лет эксплуатации крана после установки шпренгельной системы отдельные участки раскосов достигали области упругопластической деформации.

Фрагмент распределения значений  $H_c$  по диаметру одного из раскосов приведен на рис. 14.

Из приведенных выше фрагментов материалов исследований можно сделать вывод, что при комплексном научном подходе к диагностированию кранов-перегрузателей аварий можно было бы избежать. Более того, совершенно непонятно игнорирование рекомендаций завода-изготовителя о необходимости усиления надпорных узлов как собственниками кранов, так и экспертными организациями, более того инспекторами Госгорпромнадзора Украины, допускающими дальнейшую эксплуатацию аварийноопасного грузоподъемного оборудования.

В случае аварии на Ясиновском КХК количество обследований не переросло в качество и достоверность прогнозирования предельного состояния металлоконструкции крана. Информация об убытках

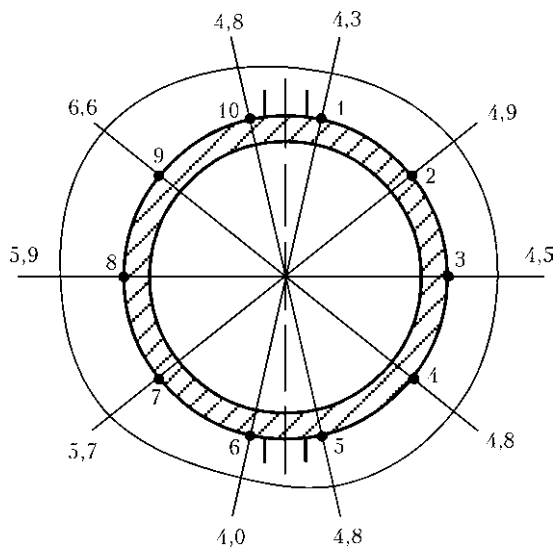


Рис. 14. Результаты замеров  $H_c$  (А/см) по сечению 7 раскоса № 3 шпренгельной системы южной консоли

от аварии (десятки миллионов гривен) возможно научит других собственников считать свои деньги.

### Вывод

Анализ материалов исследований и практика применения современных методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций кранов-перегрузателей [2, 6] диктуют необходимость научного подхода к разработке нормативной базы для экспертных организаций, создание специальных методик по технической диагностике специальных кранов, таких как краны-перегрузатели, а также при экспертизе промышленной безопасности грузоподъемного оборудования, работающего во взрывоопасной и пожароопасной средах, для избежания не только аварий, связанных с человеческими жертвами, но и для предотвращения техногенных катастроф.

1. Чиковани А. Е. Экспертное обследование и ремонт мостовых перегружателей. Медлить опасно // Подъемные сооружения и специальная техника. — 2004. — № 2.
2. Котельников В. С. и др. Практика магнитной диагностики подъемных сооружений при проведении экспертизы промышленной безопасности // Там же. — 2003. — № 6.
3. Международный стандарт ISO 4301. — Ч. 1–5.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — М.: Мир, 1972. — 314 с.
5. Метод аналізу вимірювань коерцитивної сили під час діагностики металоконструкцій кранів з різними товщинами елементів / О. В. Григоров, С. О. Губський, В. А. Попов, Н. Ф. Хорло // Метрологія та прилади. — 2009. — № 5. — С. 51–55.
6. Иванов В. Н., Кобзев В. А., Суций О. В. и др. Применение метода акустической эмиссии при диагностировании металлоконструкций // Подъемные сооружения и специальная техника. — 2002. — № 8. — С. 19–24.

Поступила в редакцию  
03.03.2011