

МЕТОДЫ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПОДЪЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 620.179.14

ПРОХОРОВ В.М.

начальник ЦТДиЭО ООО «Октябрьский завод нефтепромыслового оборудования»

ОНУЧИН Б.А.

зам.начальника ЦТДиЭО ООО «Октябрьский завод нефтепромыслового оборудования»

ЗАГИДУЛЛИН Р.В.

доктор технических наук, профессор УГАТУ, директор ООО «НТЦ «Спектр»

Октябрьский

oznpo_ctd@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Неразрушающий контроль, техническое диагностирование, магнитная структуроскопия, напряженно-деформированное состояние (НДС) металлоконструкций, оценка остаточного ресурса

В статье мы освещаем тему применения магнитного метода контроля металлоконструкций ГПМ, бурового установок, для оценки остаточного ресурса.

Введение

При проведении экспертного обследования элементов металлоконструкций и грузоподъемных машин (ГПМ) в Центре технического диагностирования и экспертного обследования (ЦТД и ЭО) ООО «Октябрьский завод нефтепромыслового оборудования» широко используются методы неразрушающего контроля стальных изделий и материалов, которые позволяют выявлять поверхностные и внутренние дефекты сплошности, непровары, трещины и ряд других сварочных дефектов [1].

Наряду с неоспоримыми достоинствами физическим методам и техническим средствам неразрушающего контроля присущи ряд недостатков. Это – трудоемкость и большие материальные затраты на подготовительные работы перед технической диагностикой изделия, иногда необходимо обеспечение двустороннего доступа к контролируемому участку и т.д., которые ограничивают и усложняют возможность их практического применения.

Эти недостатки не позволяют проводить 100% контроль несущих элементов ГПМ, что может сказываться на безопасности их эксплуатации.

Следует также заметить, что результаты дефектоскопии не всегда гарантируют безаварийную работу подъемного сооружения в межремонтный период (или в период между обследованиями), так как методы дефектоскопии выявляют только имеющиеся или развивающиеся макроскопические дефекты сплошности и не определяют потенциально опасные зоны металла с микроскопическими дефектами, которые в процессе эксплуатации могут развиваться до критических размеров, способных привести к разрушению стального изделия [2-4].

При многоцикловом нагружении металл стального изделия становится чувствительным к дефектам сплошности на поверхности, надрезам любых видов, участкам коррозии металла и неметаллическим включениям, которые являются

концентраторами механических напряжений и, как правило, областями с повышенным напряженно-деформированным состоянием (НДС) металла.

Опыт показывает, что при многоцикловом нагружении стального изделия металл около включений переходит в область упруго-пластической и пластической деформации, тогда как металл в бездефектных частях изделия может находиться в области упругой деформации.

К структурным неоднородностям стального изделия весьма чувствительны ряд магнитных параметров металла, которые на практике используются для косвенной оценки НДС металла и остаточных механических напряжений [4-6].

В связи с этим физическими методами и техническими средствами магнитной структуроскопии можно выявлять зоны концентрации механических напряжений металла и скопления микротрещин в стальном изделии на ранней стадии их развития. ►

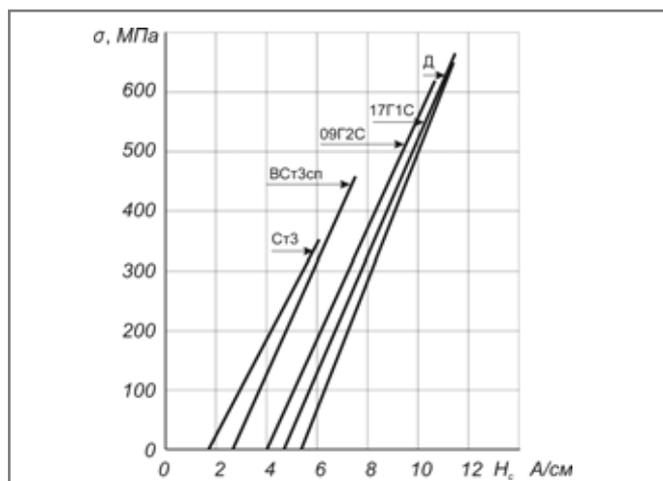


Рис.1. Зависимость коэрцитивной силы от механического напряжения металла для некоторых конструкционных сталей



Рис.2. Магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М

1. Магнитный контроль и оценка остаточного ресурса элементов металлоконструкций подъёмных сооружений

В ЦТД и ЭО в течение нескольких лет успешно применяется магнитный метод неразрушающего контроля несущих металлоконструкций для объективной оценки их технического состояния при экспертизе промышленной безопасности ГПМ. Нормативной базой магнитного контроля являются методические указания РД ИКЦ «Кран»-007-97 [7]. НДС металла контролируемого стального изделия косвенно оценивается на основе структурочувствительного магнитного параметра – коэрцитивной силы металла H_c , которая однозначно зависит от величины механического напряжения во всей области деформации, вплоть до разрушения стального изделия, при этом зависимость весьма близка к линейной [2, 3] (рис.1).

На основе зависимости коэрцитивной силы от величины механического напряжения металла по результатам измерения коэрцитивной силы можно оценивать фактическую величину механического напряжения металла стального изделия. Зависимости, показанные на рис.1, предварительно получают в результате испытаний стандартных образцов из разных марок сталей на разрывной машине типа Р5 в соответствии с ГОСТ 1497-84 или ГОСТ 10006-80 [8].

Магнитный контроль НДС металлоконструкций грузоподъемных кранов и подъемников осуществляется с помощью магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М (рис.2), позволяющий производить измерения коэрцитивной силы большинства конструкционных сталей в диапазоне 1-20 А/см с относительной погрешностью не более 5% [9]. Магнитный структуроскоп типа КРМ-Ц-К2М можно использовать как в цеховых и лабораторных, так и в полевых условиях, для чего в нем предусмотрено автономное питание. Время одного измерения составляет около 5-8 сек.

Магнитные свойства стальных металлоконструкций при циклическом нагружении формируются в условиях сложнапряженного состояния металла под влиянием растягивающих, изгибающих нагрузок и крутящих моментов. При этом идёт непрерывный процесс накопления усталостных повреждений и микропластической деформации, приводящей к разрушению металла, с

последующей потерей несущей способности стальной конструкции [6]. Увеличение остаточных механических напряжений металла в ходе этого процесса приводит к возрастанию величины коэрцитивной силы металла.

Интенсивность роста коэрцитивной силы металла определяется режимом нагружения крана. В зависимости от класса использования крана по определению ИСО 4301 режимы нагружения разбиты на четыре группы: Q_1 – лёгкий, Q_2 – умеренный, Q_3 – тяжёлый, Q_4 – весьма тяжёлый.

В связи с этим для объективной оценки остаточного ресурса крана, обработавшего свой нормативный срок эксплуатации, прежде всего необходимо установить его фактический режим нагружения и частоту использования.

2. Способы оценки остаточного ресурса стальной конструкции по результатам магнитного контроля

В методических указаниях РД [7] рассматриваются и предлагаются три способа прогнозирования остаточного ресурса стальной металлоконструкции, крана по результатам магнитного контроля.

Способ 1. Остаточный ресурс стальной металлоконструкции крана равняется количеству рабочих смен $N_{ост}$, которые кран может обработать без разрушения:

$$P = \frac{N_{ост}}{N_{см}}$$

где:

$N_{см}$ – число циклов нагружения крана в одну смену, $N_{ост} = N_0 - N(H_c)$, N_0 – число циклов нагружения крана, соответствующая физическому пределу выносливости, $N(H_c)$ – число циклов, фактически обработанных краном.

У этого способа есть существенный недостаток – отсутствие достоверной информации о режимах эксплуатации крана, как по числу циклов нагружения, так и по амплитуде нагружения.

Этот недостаток устраняется при установке на кран ограничителей нагрузки типа ОНК-140, ОНК-160 который предназначен для защиты крана от перегрузок и опрокидывания при подъёме груза, а также для отображения информации о фактической массе поднимаемого груза и других характеристик. Встроенный в данные ограничители блок электронной памяти

обеспечивает запись и долговременное хранение информации о рабочих параметрах крана в течение всего срока службы ограничителя (около 12 лет).

Способ 2. На основе экспериментально установленных закономерностей одновременного роста деформации и коэрцитивной силы металла в процессе циклического нагружения металлоконструкции получена эмпирическая формула для расчета количества циклов нагружения [7]:

$$N = C_1 \exp(C_2 H_c), \quad (2)$$

где C_1 , C_2 – постоянные, которые определяются на основе экспериментально измеренных данных (не менее трех).

На основе формулы (2), по измеренной величине коэрцитивной силы металла можно оценить количество отработанных циклов крана.

Для получения более объективной информации необходимо осуществлять периодический контроль за увеличением величины коэрцитивной силы H_c , занося регулярно ее значения в рабочий журнал крана. Там же можно отметить интенсивность работы крана, то есть фактическую частоту его нагружения.

В процессе первичного обследования подъемного сооружения при экспертизе промышленной безопасности с помощью магнитного структуроскопа определяются наиболее нагруженные элементы стальной конструкции, а также зоны концентрации механических напряжений в сварных соединениях. В результате обследования создается картина исходного состояния металлоконструкции подъемного сооружения.

Следующий контроль осуществляется при повторном обследовании металлоконструкции в тех же точках, согласно карте магнитного контроля. По номограммам устанавливаются фактический режим эксплуатации крана, а по максимальным значениям коэрцитивной силы $H_{смвх}$ и скорости накопления повреждений в слабом звене металлоконструкции подъемного сооружения оценивают остаточный ресурс.

Такой подход обеспечивает индивидуальный контроль за техническим состоянием крана на протяжении всего срока его службы и возможность предотвращения исчерпания запаса прочности металла.

Результаты первичного магнитного контроля после обследования заносятся в паспорт магнитного контроля крана. На рис. 3 показана примерная форма паспорта магнитного контроля, созданного после технического диагностирования мостового крана, принадлежащего ООО «Октябрьский завод нефтепромышленного оборудования».

Этот способ является самым объективным и надежным при оценке остаточного ресурса металлоконструкции по результатам магнитного контроля.

Способ 3. Остаточный ресурс металлоконструкции, крана определяется на основе номограмм, обобщающих ►

Паспорт магнитного контроля

мостового крана зав.№ 10960, рег.№ 64299

Расчётный элемент конструкции крана	Материал	Значения H_c , А/см		
		Мин.	Мак.	Ср.
Главная балка А	ВСт3пс4	5,2	6,8	5,9
Главная балка Б	ВСт3пс4	5,3	6,4	5,7
Концевая балка А	ВСт3пс5	4,3	6,2	4,8
Концевая балка Б	ВСт3пс5	4,9	6,1	5,1
Грузовая тележка	ВСт3сп5	6,8	8,2	7,4
Средние значения по всем элементам	-	5,3	6,74	5,78

Рис.3. Паспорт магнитного контроля крана

экспериментальные зависимости $N(H_c)$ и построенных в координатах: значения коэрцитивной силы H_c (А/см) – число циклов нагружения N (рис. 4).

Предварительно установив паспортный режим нагружения и фактический режим работы крана, проводят магнитный контроль металла несущих металлоконструкций и выбирают участки с максимальными значениями коэрцитивной силы $H_{c\max}$.

По номограмме восстанавливают перпендикуляр до пересечения с кривой $N(H_c)$ для соответствующего режима нагружения и получают значение количества отработанных циклов N_o . Разность между максимальным числом циклов до разрушения N_p и количеством отработанных циклов N_o для данного режима нагружения равно оставшемуся числу циклов работы крана:

$$N_{\text{ост}} = N_p - N_o \quad (3)$$

Остаточный ресурс крана в рабочих сменах определяется по формуле:

$$P = N_{\text{ост}} / N_{\text{см}} \quad (4)$$

где:

$N_{\text{см}}$ – частота нагружения крана в одну смену.

В практике проведения экспертизы промышленной безопасности ГПМ, не оборудованных регистраторами рабочих параметров, когда число циклов нагружения крана неизвестно, рекомендуется использовать номограммы магнитного контроля остаточного ресурса (рис.4).

При работе с номограммой определяется наибольшая величина коэрцитивной силы $H_{c\max}$ в наиболее нагруженном узле металлоконструкции, затем устанавливается режим нагружения (Q_1-Q_4) и по соответствующей кривой усталости металла определяется остаточный ресурс элемента конструкции крана (в %).

Применительно к этому способу, рассмотрим пример оценки остаточного ресурса стрелы крана автомобильного КС-3574 (зав. №1491, рег. №81047), изготовленного из стали 10ХСНД (рис.5). Кран принадлежит

ЗАО «Электроннефтегазстрой» и находится в эксплуатации в режиме Q_2 около 11 лет. При техническом диагностировании стрелы крана магнитный структуроанализ КРМ-Ц-К2М показал максимальное значение коэрцитивной силы металла $H_c = 6,7$ А/см. Для этого значения коэрцитивной силы по номограмме (рис.4) соответствует величина остаточного ресурса крана (в %), который равен $P = 53\%$. Остаточный ресурс крана в годах будет равен: $P \times 11$ лет = 5,83 лет.

Таким образом, в течение ближайших 6 лет можно прогнозировать безаварийную работу металлоконструкций данного крана в паспортном режиме.

В РД ИКЦ «Кран»-007-97-02 предусмотрены 3 режима эксплуатации металла, из которого изготовлена металлоконструкция.

1. Режим «надёжной» эксплуатации металлоконструкции, при котором наибольшая величина коэрцитивной силы металла $H_{c\max}$ меньше значения, соответствующего пределу текучести металла H_{ct} ($H_{c\max} < H_{ct}$), когда НДС металла соответствует области упругой деформации, и механические напряжения в металлоконструкции не превышают предела текучести.
2. Режим «контролируемой» эксплуатации металлоконструкции, при котором наибольшая величина коэрцитивной силы металла не превышает значения, соответствующего пределу текучести металла ($H_{c\max} \leq H_{ct}$), когда НДС металла отдельных элементов конструкции соответствует области упругопластической деформации, и механические напряжения в металлоконструкции достигают предела текучести.
3. Режим «критический» эксплуатации металлоконструкции, при котором наибольшая величина коэрцитивной силы металла превышает значение, соответствующего пределу текучести и не превышает значения, соответствующего пределу прочности металла ($H_{ct} < H_{c\max} \leq H_{cb}$), когда НДС металла отдельных элементов конструкции соответствует области упругопластической и пластической деформации, и механические напряжения в металлоконструкции превышают предел текучести.

Для расчета остаточного ресурса грузоподъемных машин был разработан алгоритм оценки технического состояния опасного производственного объекта при экспертизе промышленной безопасности (рис. 6).

Данный алгоритм был использован при техническом диагностировании вышерассмотренного крана КС-3574. Из рис.5 видно, что максимальные значения коэрцитивной силы металла получены на расстоянии 4 м в нижней секции стрелы ($H_c = 6,5$ А/см) и у оголовка верхней выдвижной секции ($H_c = 6,7$ А/см).

Согласно алгоритму (рис.6), выявленные области металлоконструкции с максимальными значениями коэрцитивной силы металла могут быть обусловлены остаточными механическими напряжениями, возникшими в процессе промышленного изготовления крана. Визуальный контроль показал наличие в этих местах большого количества сварных соединений. Это – места приварки кронштейна гидроцилиндра, оголовка верхней секции и т.д.

В данном случае следует провести дефектоскопический контроль этих областей металлоконструкции с целью выявления дефектов сплошности, которые могут быть источниками повышенного НДС металла.

3. Магнитный контроль бурового и нефтепромыслового оборудования

Опыт применения магнитного метода контроля технического состояния ГПМ позволил перейти к решению проблемы оценки остаточного ресурса и продления срока службы бурового и нефтепромыслового оборудования.

Предварительно проведенный магнитный контроль элементов конструкций ряда стационарных (типа БУ – 75, ЗД – 76, БУ1600/100 и др.) и передвижных буровых установок (типа АРБ – 100, МБУ – 125, БУ2000/140М и др.), а также агрегатов для ремонта нефтегазовых скважин показал эффективность и информативность этого метода контроля.

Буровые установки, как и ГПМ, испытывает при эксплуатации основные виды ►

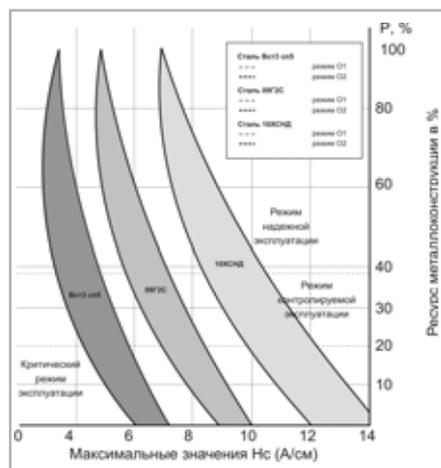


Рис.4. Номограмма для магнитного контроля остаточного ресурса металлоконструкций подъёмных сооружений

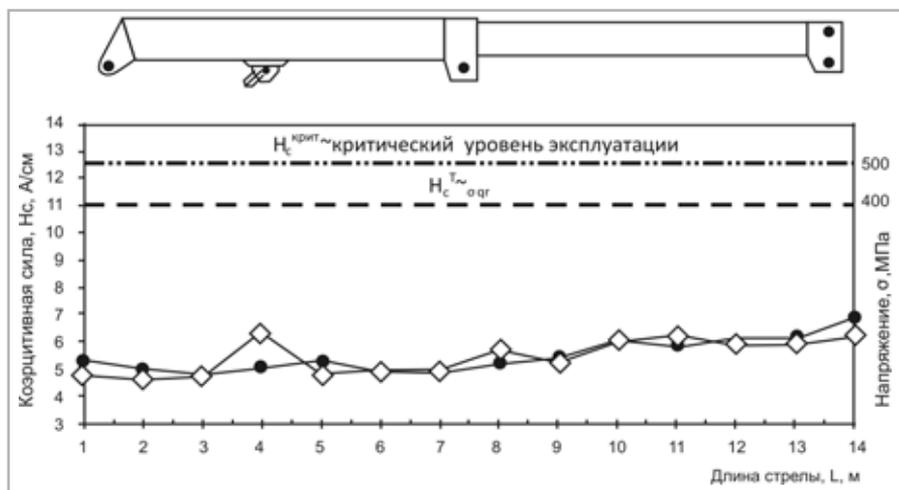


Рис.5. Магнитный контроль НДС металла стрелы крана КС-3574

механических деформаций и нагрузок: сжатие-растяжение, изгиб и кручение. С учётом конструкции и расчетных величин НДС металла элементов конструкции буровой вышки, магнитному контролю в первую очередь должны подвергаться трубные элементы вышек и мачт, основание вышки, в частности, подроторная балка [10, 11].

Для количественной оценки механических напряжений металла элементов буровых вышек и мачт агрегатов для ремонта нефтегазовых скважин, необходимо предварительное создание номограмм для магнитного контроля остаточного ресурса (см. рис.4) на основе испытаний стандартных образцов, изготовленных из соответствующих марок сталей [8].

Опыт проведения предварительного магнитного контроля буровых вышек и мачт агрегатов показал, что для обеспечения контроля отдельных элементов конструкций (например, пояса вышки, мачты), которые имеют криволинейные поверхности и переходы сложной формы, необходимо иметь полюсные наконечники преобразователя магнитного структуроскопа, соответствующие профилю контролируемой поверхности.

Другой особенностью магнитного контроля элементов конструкции буровых вышек и мачт является необходимость проведения значительного объема экспериментальных измерений, что связано с большими габаритными размерами и массивностью объектов контроля. В этом случае начинает негативно сказываться на производительности неразрушающего контроля стационарность режима и длительность измерения коэрцитивной силы металла магнитными структуроскопами типа КРМ-Ц.

Для повышения производительности магнитного контроля совместно с магнитным структуроскопом КРМ-Ц-К2М был испытан индикатор механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа (рис.7), разработанный в ООО «НТЦ «Спектр» (г. Уфа).

Индикатор механического напряжения металла ИН-02 имеет автономное электрическое питание, поэтому может применяться в полевых условиях. НДС металла контролируется путем сканирования поверхности стального изделия магнито-измерительным блоком (скорость перемещения составляет 0.1-0.3 м/с), который соединен с электронным блоком, показания цифрового индикатора которого коррелируют с величиной механических напряжений металла.

Результаты контроля НДС металла могут быть записаны в электронную память прибора, объем которого составляет более 4000 значений. Для документирования результатов контроля и дальнейшей математической обработки и интерпретации предусмотрена выгрузка данных из электронной памяти индикатора ИН-02 на внешний ЭВМ.

На рис.8 показано распределение показаний индикатора механических напряжений ИН-02 вдоль поверхности стального равнополочного уголка с приварками, коррелирующего с НДС металла. В местах приварок, сделанных электродуговой сваркой, выявлены области с повышенным НДС металла.

Данные на рис.8 полностью согласуются с показаниями магнитного структуроскопа КРМ-Ц, при этом было установлено, что магнитоупругая чувствительность индикатора ИН-02 существенно

превышает чувствительность магнитного структуроскопа.

При магнитном контроле буровых вышек и мачт агрегатов для повышения производительности контроля можно рекомендовать комплексное применение индикатора механических напряжений металла ИН-02 и магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М, которое заключается в следующем:

- с помощью индикатора ИН-02 осуществляется экспресс-контроль элементов конструкции буровых вышек и мачт и выявляются области с повышенным НДС металла;
- с помощью структуроскопа КРМ-Ц-К2М измеряется коэрцитивная сила в выявленных областях с повышенным НДС металла и по номограммам оценивается величина механического напряжения металла.

Следует заметить, что при калибровке индикатора механических напряжений металла ИН-02 на стандартных образцах, по его показаниям можно также оценивать величину механического напряжения металла.

Заключение

Практика экспертизы промышленной безопасности показывает, что диагностирование технического состояния и оценка реального остаточного ресурса производственных объектов (в том числе, опасных) невозможно без привлечения физических методов и технических средств неразрушающего контроля изделий и материалов. Оптимальное комплексирование методов дефектоскопии и структуроскопии позволяет реально повысить достоверность контроля изделий и конструкций. ►

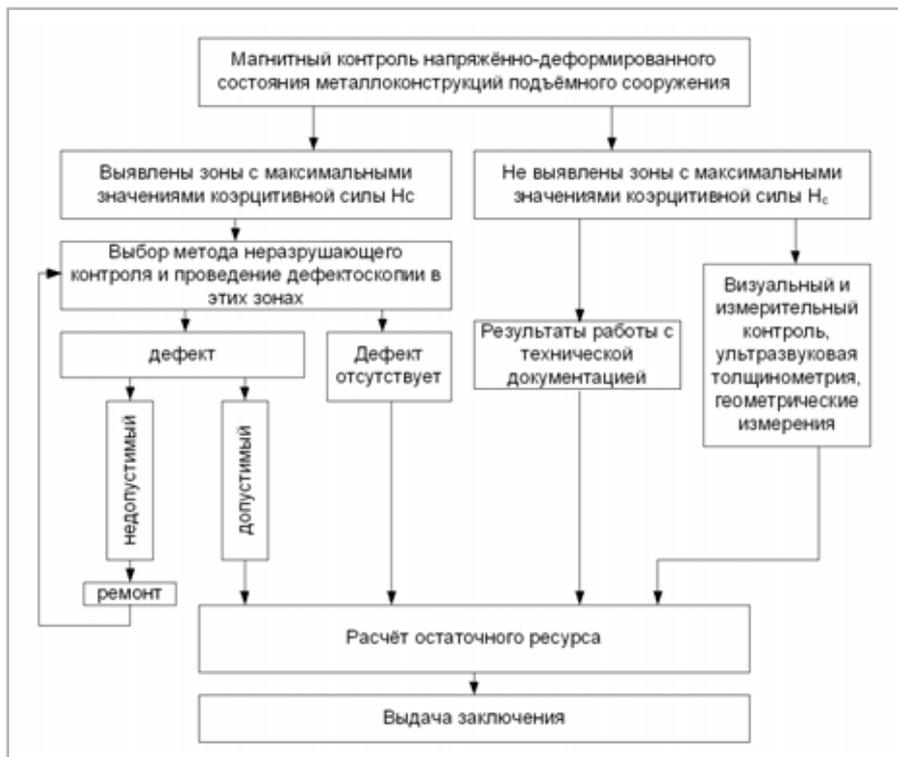


Рис. 6. Алгоритм оценки технического состояния объекта повышенной опасности при экспертизе промышленной безопасности



Рис.7. Индикатор механического напряжения металла ИН-02

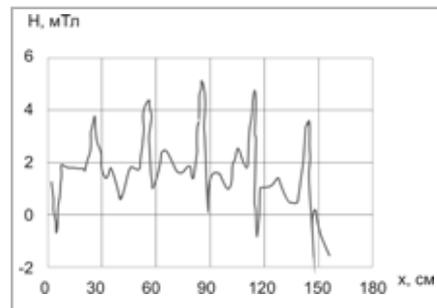


Рис.8. Сигнал индикатора ИН-02 вдоль металлического равнополочного уголка с приварками

Применение такого подхода при технической диагностике элементов конструкций ГПМ и нефтепромыслового оборудования позволяет снизить трудоемкость и существенно повысить надежность оценки остаточного ресурса.

Проведение в ЦТД и ЭО экспертизы промышленной безопасности 12 кранов, с применением магнитного метода контроля НДС металла, позволило оценить их фактическое техническое состояние, что было отражено в паспортах магнитного контроля. По результатам диагностики четыре крана были отбракованы, так как в элементах конструкций были выявлены зоны с повышенным НДС металла, где он перешел в область упруго-пластической деформации и где, по результатам дополнительного дефектоскопического контроля, были выявлены скопления трещин в сварных соединениях металлоконструкций.

Для дальнейшей эксплуатации указанных кранов был рекомендован ремонт ослабленных элементов конструкций с применением электрической сварки. Вывод этих кранов из дальнейшей эксплуатации позволяет предотвратить возможные экономические потери (часто, весьма значительные) из-за внезапной поломки или аварии крана, и исключить, возможно, человеческие жертвы.

Следует заметить, что несмотря на схожесть большинства элементов металлоконструкций ГПМ и буровых установок, агрегатов для ремонта нефтегазовых скважин, применить магнитный метод контроля для оценки остаточного ресурса

последних нет возможности, что связано с отсутствием в настоящее время соответствующей нормативной базы.

Дальнейшее повышение надежности результатов технической диагностики и безопасности эксплуатации контролируемых промышленных объектов требует применения инновационных технических решений и соответствующих методических разработок в этой области. ■

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник (Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др.) Под ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
2. Попов Б.Е., Левин Е.А., Котельников В.С. и др. Магнитный контроль напряженно-деформированного ресурса сосудов, работающих под давлением. – Безопасность труда в промышленности, 2001, №3, с. 25-30.
3. Попов Б.Е., Мужичкий В.Ф., Безлюдько Г.Я., Левин Е.А. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений. – Диагностика, 1998, №3, с. 40-44.
4. Ройтман В.И., Коновалов О.С., Головки А.С. и др. Магнитный контроль механических свойств материала труб феррозондовыми коэрцитиметрами. – Дефектоскопия, 1982, №11, с. 39-45.
5. Загидулин Р.В., М.Х. Султанов, Прохоров В.М., Ямалиев Ф.З. К повышению точности оценки напряженно-

деформированного состояния стальных изделий. – 4 Международная научная конференция «Прочность и разрушение материалов и конструкций», г. Оренбург, 15-17 февраля 2005 г.

6. Неразрушающий контроль: Справочник: Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
7. МУ РД ИКЦ «Кран» 007-97. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании. Согласовано Госгортехнадзором России 27.11.97 №12-7/1113.
8. ГОСТ 10006-80. Трубы металлические. Методы испытания на растяжение.
9. Безлюдько Г.Я., Мужичкий В.Ф., Ремезов В.Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении коэрцитивной силы. – Контроль. Диагностика, 2003, №6(60), с.6 – 14.
10. МУ 03-008-06. Методические указания по экспертизе промышленной безопасности буровых установок с целью продления срока безопасной эксплуатации. Согласовано Федеральной службой по технологическому надзору письмом от 27.09.2004 г. № 11-18/4062.
11. РНД «Методические указания по проведению обследования буровых установок с истекшим расчетным сроком службы». ОАО «ВЗБТ». Согласовано письмом Госгортехнадзора России 30.05.1997 г.

 ОАО "СУРГУТНЕФТЕГАЗ"
окружной выставочный центр

* ЮГОРСКИЕ КОНТРАКТЫ *

Информационный партнер:



22-24 СЕНТЯБРЯ

XV СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

НЕФТЬ И ГАЗ

СУРГУТ ЦЕНТР НЕФТЬ И ГАЗ 2010



(3462) 52-00-40, 32-34-53, 32-04-32,
e-mail: expo@wsmail.ru, www.yugcont.ru