

УДК 620.178.15:620.168.37:620.183

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ, СТРУКТУРНЫМ И МАГНИТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

© Ф. И. Пантелеенко, А. С. Снарский¹

Статья поступила 14 октября 2011 г.

Описана методология оценки состояния различных ответственных металлических конструкций, основанная на трех методах неразрушающего контроля: магнитном (коэрцитиметрическом), дюрометрическом (методе косвенного определения механических свойств материала) и металлографическом (методе полевой металлографии). Приведены результаты применения методологии при диагностике крановых конструкций после длительной эксплуатации. Даны рекомендации по использованию указанных методов с учетом материального исполнения диагностируемых конструкций.

Ключевые слова: ответственные металлоконструкции; методология; оценка состояния; магнитный (коэрцитиметрический) метод; косвенный метод определения механических свойств; метод полевой металлографии.

Проблема надежности и безопасности ответственного оборудования и металлоконструкций с каждым годом становится все более актуальной. Это связано со старением металла и прогрессирующим износом оборудования и конструкций (средний срок их эксплуатации на разных предприятиях практически по всему постсоветскому пространству составляет более 20 – 30 лет, а на некоторых — более 40 – 50 лет). К основным видам указанных конструкций относятся: магистральные трубопроводы по транспорту газа, нефти и нефтепродуктов; оборудование и конструкции нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и пищевой промышленности (реакторы, колонны, теплообменники, емкости, резервуары, технологические трубопроводы и т.п.); различные грузоподъемные машины и механизмы (башенные, мостовые, козловые краны и автокраны и т.п.).

Работы в области диагностики и оценки состояния ответственных металлоконструкций были и остаются весьма востребованными. Так, разработан способ диагностики металлоконструкций сосудов и аппаратов давления и определения их остаточного ресурса [1]. В его основе лежит определение скорости смещения температурной зависимости, характеристик трещиностойкости металла объектов. Данный метод хорошо зарекомендовал себя и имеет широкое применение, в первую очередь, для объектов нефтехимических предприятий. Однако он предполагает применение микровырезов из диагностируемой конструкции. При работе с различными металлоконструкциями (например, грузоподъемными кранами и сосудами, работающими под давлением) используется метод определения фактического напряженно-деформированного со-

стояния металла магнитным контролем (определением коэрцитивной силы) с использованием магнитного структуроскопа [2]. Данный метод позволяет определять области с критически высоким уровнем внутренних напряжений — места потенциального разрушения под действием статических нагрузок.

В действующей нормативной документации по диагностике ответственных металлоконструкций уделяется недостаточное внимание вопросам фактического уровня механических свойств, степени деградации структуры, а также фактическому напряженно-деформированному состоянию металла.

В связи с вышесказанным предлагается следующий методологический подход к оценке состояния ответственных металлических конструкций. При диагностике практически любых металлоконструкций предлагается в качестве основных использовать следующие методы неразрушающего контроля: магнитный (коэрцитиметрический); дюрометрический (метод косвенного определения механических свойств материала) и металлографический (метод полевой металлографии). Все эти методы позволяют непосредственно на конструкции без вырезки образцов определять состояние металла в любом доступном месте диагностируемого объекта по структурным, механическим и магнитным характеристикам металла. Рассмотрим их более подробно.

Магнитный (коэрцитиметрический) метод основан на возможности определения фактического уровня напряженно-деформированного состояния металла по значению коэрцитивной силы [2]. Для ряда широко применяемых конструкционных сталей установлены максимально допустимые значения коэрцитивной силы, соответствующие пределу текучести конкретного материала. Поэтому если коэрцитивная сила, опре-

¹ Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь; e-mail: panteleyenkovfi@mail.ru

деленная на конструкции, превышает указанное значение, то эксплуатация конструкции запрещается (по уровню внутренних напряжений, превышающих предел текучести).

Диорометрический метод позволяет определять основные характеристики механических свойств по параметрам пирамидального отпечатка на поверхности материала после определения твердости по Виккерсу [3 – 5].

Приведем расчетные уравнения:
предел прочности

$$\sigma_b = HV(0,285 + 0,057kS), \text{ МПа};$$

относительное удлинение

$$\delta_5 = Dk(9,38 + 24,43kS), \%;$$

относительное сужение

$$\psi = 16,4 + 80kS, \%;$$

ударная вязкость

$$KCU = \gamma\psi/(1 - \psi), \text{ МДж/м}^2,$$

где HV — твердость по Виккерсу; D — диагональ отпечатка, мм; S — ширина отпечатка, мм; k — коэффициент кратности, зависящий от нагрузки на пирамидальный индентор (для применяемой нагрузки 50 Н он составляет 4,472) [4]; γ — коэффициент, зависящий от уровня механических свойств материала (при относительных удлинениях $\psi > 80$, $60 < \psi \leq 80$, $40 < \psi \leq 60$, $20 < \psi \leq 40$, $\psi \leq 20$ коэффициенты γ соответственно равны 0,61; 0,76; 0,83; 1,19; 1,66) [5]. При этом в формулу оценки ударной вязкости подставляются значения относительного удлинения в условных единицах: 80 % соответствует 0,8; 60 % — 0,6 и т.п. За счет применения переносных твердомеров указанные характеристики можно определить практически в любой точке диагностируемой конструкции.

Металлографический метод обеспечивает контроль особенностей и аномалий структуры, а также возможность косвенного нахождения механических свойств непосредственно на конструкции за счет применения переносных микроскопов. Данный метод позволяет также косвенно определять механические свойства сталей по наличию и форме субзерен феррита [6]. Установлено, что при эксплуатации при циклических нагрузках ферритно-перлитных сталей (например, сталей Ст3 и Ст4) наблюдаются изменения в зер-

нах феррита: чем больше циклов или выше напряжения, тем ярче в микроструктуре видны субзерна феррита (табл. 1). Возникновение ячеистой структуры феррита уже свидетельствует о деградации металла и снижении, в первую очередь, ударной вязкости примерно на 15 – 20 %.

Работоспособность и эффективность предлагаемых методов оценивали на крановой конструкции (элементе стрелы автомобильного крана), изготовленной из стали ВСтЗсп5. Конструкция выведена из эксплуатации по причине значительного коррозионного износа из-за длительного срока эксплуатации (более 20 лет).

Коэрцитивную силу (H_a) измеряли по всей диагностируемой конструкции (стреле крана). При этом использовали серийно выпускаемый магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М (НПФ «Специальные научные разработки», г. Харьков, Украина).

Установлено наиболее слабое место конструкции (по уровню напряжений) — участок № 1 — металл с максимальным значением коэрцитивной силы, соответствующим максимальному уровню напряжений в конструкции ($H_a = 5,3$ А/см). Определен также участок № 2 конструкции с минимальным значением коэрцитивной силы ($H_a = 2,4$ А/см), соответствующим минимальному уровню напряжений.

На поверхности конструкции шлифовали и полировали участки (№ 1 и № 2), выбранные для проведения контроля, диам. 25 – 35 мм, используя переносной шлифовально-полировальный станок Akkuro 2.2 с рядом насадок.

Твердость по методу Виккерса определяли с помощью переносных твердомеров Microdur I, Microdur II (резонансно-импедансного принципа действия) и WPM (статического принципа действия). Для измерения твердости использовали алмазную пирамиду с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке на индентор 50 Н.

Параметры формы пирамидального отпечатка (ширину и диагональ) определяли в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью окуляр-микроскопа на переносном металлографическом микроскопе ТКМ при увеличении 400 (рис. 1). Структуру анализировали на этом же микроскопе, совмещенном с цифровым фотоаппаратом, при увеличении 400 (рис. 2).

Полученные экспериментальные результаты представлены ниже. Типичная микроструктура металла на участке № 1 с максимальным значением коэрци-

Таблица 1. Механические свойства стали и структура феррита [6]

Структура	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
Исходная	268	430	26	185
Ячеистая	250	450	24	157
Фрагментированная с «ножевыми» границами	298	560	18	78

тивной силы ($H_{a \max} = 5,3$ А/см), представленная на рис. 2, а, — ферритно-перлитная, при этом феррит (крупные светлые зерна) состоит из более мелких субзерен-ячеек, ножевых границ субзерен не наблюдается. Средние значения параметров формы отпечатков (по результатам 10 измерений):

$$HV_{cp} = 1426 \text{ МПа}; D_{cp} = 0,2396 \text{ мм}; S_{cp} = 0,1692 \text{ мм}.$$

Типичная микроструктура металла на участке № 2 с минимальным значением коэрцитивной силы ($H_{a \min} = 2,4$ А/см), представленная на рис. 2, б, — ферритно-перлитная, при этом в феррите (крупные светлые зерна) явных ячеистых субзерен не наблюдается. Средние значения твердости и параметров формы отпечатков (по результатам 7 измерений) следующие:

$$HV_{cp} = 1346 \text{ МПа}; D_{cp} = 0,2422 \text{ мм}; S_{cp} = 0,1735 \text{ мм}.$$

Результаты определения механических свойств металла на участках № 1 и № 2 по приведенным выше формулам представлены в табл. 2.

Из нее следует, что на участке № 1 ударная вязкость на 6,7 % и пластичность (по относительному удлинению) на 3,0 % ниже, чем на участке № 2, т.е. уровень деградации металла выше в результате действия более высоких внутренних напряжений. Наиболее чувствительным параметром к уровню деградации металла является коэрцитивная сила (разница показателей между контрольными участками составляет 220 %).

Предлагаемый метод косвенной оценки механических свойств металла по параметрам полученного пирамидального отпечатка (без нарушения сплошности конструкции) доказал свою работоспособность и эффективность.

На основании апробации предлагаемых методов на различных объектах (автомобильных и железнодо-

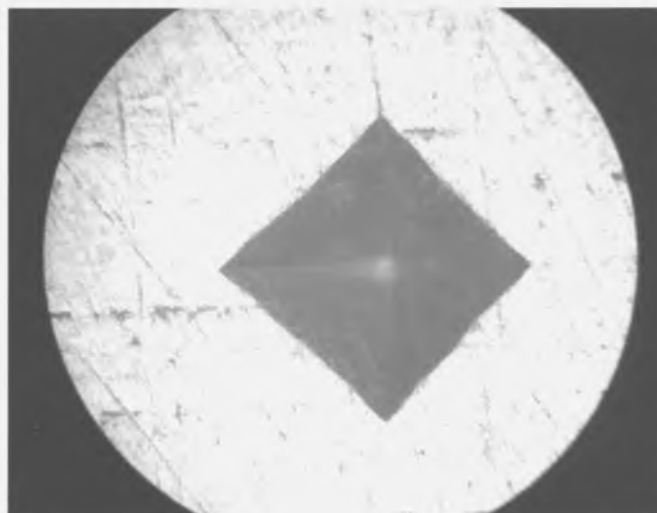


Рис. 1. Пирамидальные отпечатки на материале, полученные при измерении твердости по Виккерсу (нагрузка 50 Н) $\times 400$

рожных цистернах, элементах сосудов, сварных баллонах, крановых конструкциях) выполнена корректировка принципов оценки фактического состояния ответственных металлоконструкций с учетом их особенностей. Установлена необходимость включения в любую разрабатываемую комплексную методику диагностики нескольких этапов отбраковки конструкции. Первый этап — первичная отбраковка проводится по результатам оценки твердости металла и/или наличия недопустимых дефектов в результате внешнего осмотра и данных толщинометрии. Второй этап — основная отбраковка реализуется по данным:

оценки основных механических свойств металла, полученных в результате математической обработки эмпирических формул взаимосвязи этих свойств с параметрами отпечатка индентора [5 – 7];

определения коэрцитивной силы (она не должна превышать максимально допустимых значений, ха-

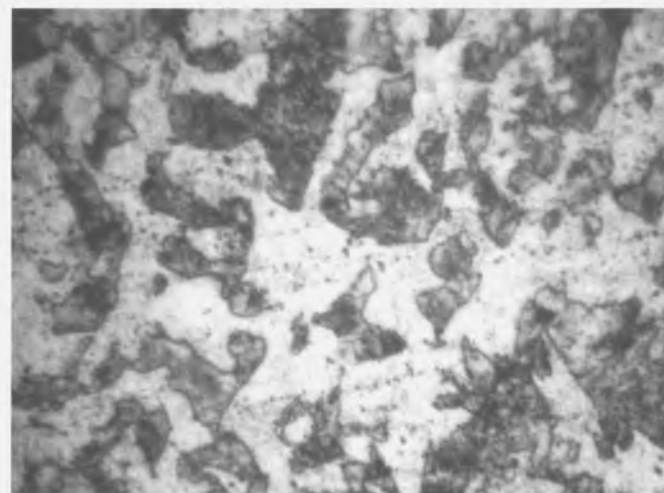
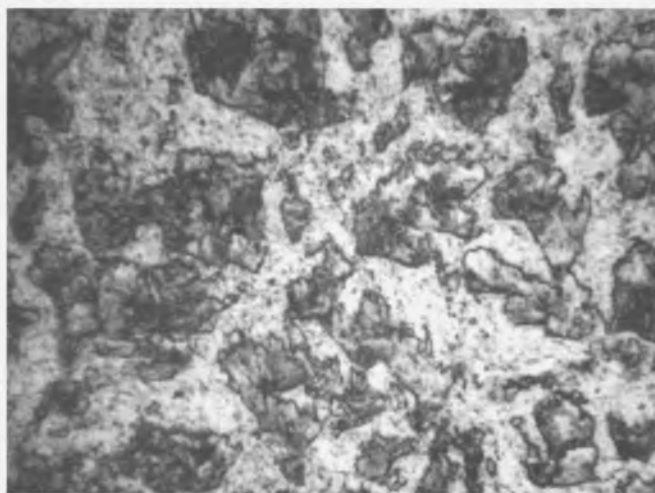


Рис. 2. Типичная микроструктура металла стрелы крана на участках с максимальным (а) и минимальным (б) значениями коэрцитивной силы ($\times 400$, репродукция $\times 3$)

Таблица 2. Результаты определения свойств металла крановой конструкции

Параметр	Участок		Относительная разница свойств*
	№ 1	№ 2	
Коэрцитивная сила, А/см	5,3 (max)	2,4 (min)	2,2
Уровень внутренних напряжений в металле	Максимальный	Минимальный	—
Твердость, HV	142,6	134,6	1,059
Предел прочности, МПа	467,8	443,12	1,056
Относительное удлинение, %	29,8	30,7	1,030
Относительное сужение, %	76,9	78,4	1,020
Ударная вязкость, Дж/см ²	253	270	1,067

* Получена путем деления максимального на минимальное значение одного и того же параметра.

рактически характеризующих предел текучести конкретного материала [4]);

обработки экспериментальных данных оценки состояния структуры металла: по уровню ее дефектности и степени деградации [8] (за счет полевой металлографии непосредственно на диагностируемом сосуде или его элементе).

Кроме того, необходима корректировка методики при диагностике металлоконструкций из различных материалов. Например, для некоторых технологических трубопроводов и сосудов, работающих под давлением, изготовленных из нержавеющей сталей аустенитного класса (немагнитных), например, стали 08X18H10T, 12X18H10T, применение магнитного (коэрцитивного) метода невозможно. В данном случае наиболее слабые критические участки выявляются более тщательным визуальным и измерительным контролем.

Метод полевой металлографии рекомендуется применять для металлоконструкций, изготовленных из сталей, склонных к перегреву (в первую очередь, высоколегированных сталей ферритного класса), к подкалке при сварке (высоколегированных мартенситного класса и теплоустойчивых сталей), а также из любых материалов в случае несоответствия их твердости требуемому диапазону, указанному в нормативном документе.

Предлагаемая методология и рассмотренные методы контроля были использованы при расследовании причин трещинообразования и разрушений ряда ответственных конструкций, в том числе и по заказу Госпромнадзора МЧС Республики Беларусь.

Таким образом, описана методология неразрушающего контроля и оценки фактического состояния практически любых ответственных металлоконструкций. Она основана на оценке:

механических характеристик металла (в любой точке диагностируемой конструкции, в том числе в

области сварных швов и зоне термического влияния за счет математической обработки геометрических характеристик параметров отпечатка на материале после определения твердости по Виккерсу переносными твердомерами);

фактического напряженно-деформированного состояния металла (магнитным контролем за счет определения фактических внутренних напряжений в конструкции по значениям коэрцитивной силы);

структуры металла и степени ее деградации (полевой металлографией с использованием переносного микроскопа непосредственно на конструкции без вырезки образцов).

Экспериментально доказана эффективность применения указанных методов определения степени деградации металла при диагностике крановой конструкции (элементе стрелы), изготовленной из стали ВСтЗсп5, после ее длительной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горицкий В. М. Диагностика металлов. — М.: Металлургия, 2004. — 408 с.
2. Безлюдько Г. Я., Мужижский В. Ф., Попов Б. Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / Заводская лаборатория. Диагностика металлов. 1999. Т. 65. № 9. С. 53 – 57.
3. Снарский А. С., Крыленко А. В. Определение физико-механических характеристик материала методом неразрушающего контроля / Вестник Полоцкого государственного университета. 2005. № 10. С. 133 – 137.
4. Киселев Ю. А. Зависимость между твердостью по Виккерсу и пределом прочности при разрыве / Заводская лаборатория. 1968. Т. 34. № 5. С. 596 – 597.
5. Хлопотов О. Д. Связь между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками / Проблемы прочности. 1971. № 9. С. 34 – 38.
6. Назарова Н. М. Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияния на развитие процессов разрушения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Уфа, 2000. — 24 с.