



Ensuring the Industrial Safety of Hazardous and Potentially Hazardous Production Facilities through the Use of an Original Complex Method for Assessing the State of Metal in Technical Diagnosis

Snarsky Andrey Stanislavovich

Dean of the Faculty of Industrial and Radiation Safety of the Institute for Advanced Studies and Retraining of Personnel in Management and Development of Personnel of BNTU, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Panteleenko Fedor Ivanovich

Head of the department "Powder metallurgy, welding and technology of materials", corresponding member, National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Annotation: The issues of ensuring industrial safety during the operation of various production facilities through the use of an effective integrated methodology for assessing the metal of critical metal (steel) structures in their technical diagnostics are considered: pressure vessels; technological and main pipelines; crane structures. The expediency of using three main non-destructive methods of control is experimentally substantiated: magnetic (by coercive force); metallographic (using the principles of field metallography and portable microscopes) and durometric (connecting the parameters of the imprint of a pyramidal indenter when determining Vickers hardness with the mechanical properties of the material).

Key words: industrial safety, hazardous production facility, potentially hazardous production facility, critical metal structure, non-destructive testing methods, mechanical properties, coercive force, microstructure.

Date of Submission: 5-4 -2022

Date of Acceptance: 7-5-2022

Обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации действующих опасных и потенциально опасных производственных объектов, с учетом прогрессирующего старения оборудования и металлоконструкций, с каждым годом становится более актуальной задачей. При этом под промышленной безопасностью подразумевается - состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от возникновения аварий и инцидентов, обеспеченное комплексом организационных и технических мероприятий [1]. К указанным мероприятиям логично относится и комплекс работ по техническому диагностированию целого ряда объектов и технических устройств: сосудов, работающих под давлением; трубопроводов, грузоподъемных кранов.

Проведенный авторами анализ причин повреждений и аварий на ряде ответственных металлоконструкций различного назначения при их длительной эксплуатации [2] показывает, что их основной причиной являлись процессы старения металла, что, выражается в деградации структуры металла и сопровождается снижением всего комплекса механических свойств и, в первую очередь, охрупчиванием и снижением ударной вязкости. Это подтверждается и рядом других исследователей [3].

В методике предлагается использовать оригинальный неразрушающий метод определения характеристик механических свойств металла и, в первую очередь, ударной вязкости (далее - дюрOMETрический метод) [2, 4], особенности которого приведены ниже.

Металлографический метод (метод полевой металлографии) за счет применения переносных микроскопов дает возможность проводить анализ структуры металла непосредственно на конструкции, в т.ч. в наиболее проблемных «слабых» местах, что позволяет выявить аномалии структуры, определить степень их допустимости и уточнить причины возникновения дефектного участка, опять же без вырезки образцов из конструкции. При этом существуют хорошие технические возможности применения указанного метода (целый ряд предприятий выпускает переносные микроскопы с увеличением до 400 раз).

Одной из главных проблем при разработке указанной методики на наш взгляд, являлся выбор метода, позволяющего максимально объективно выявлять наиболее «слабые» места конструкции. Выполненный анализ методов неразрушающего контроля позволил выбрать на наш взгляд самый оптимальный – это магнитный метод контроля (по коэрцитивной силе). Указанный метод позволяет определять фактическое напряженно-деформированное состояние металла и места с критически высоким уровнем внутренних напряжений – места потенциального разрушения, с учетом установленной устойчивой взаимосвязи замеренной коэрцитивной силы с уровнем внутренних напряжений в конструкции [5].

Как сказано выше, в качестве основного метода предлагается использовать дюрOMETрический метод [2, 4]. Его сущность состоит в том, что ударную вязкость определяют в зависимости от относительного сужения материала по формуле [7]:

$$KCU = k \cdot \frac{\psi}{1 - \psi}, \text{ МДж / м}^2$$

где KCU – ударная вязкость, МДж/м²;

ψ – относительное сужение, отн. ед.;

γ – уточняющий коэффициент, имеющий значения:

$\gamma = 0,61$ при $\psi > 0,8$; $\gamma = 0,76$ при $0,6 < \psi \leq 0,8$; $\gamma = 0,83$ при $0,4 < \psi \leq 0,6$;

$\gamma = 1,19$ при $0,2 < \psi \leq 0,4$; $\gamma = 1,66$ при $\psi \leq 0,2$.

При этом относительное сужение материала определяют по геометрическим параметрам отпечатка (рис. 1), полученного после вдавливания в материал пирамидального индентора при фиксированной нагрузке по формуле:

$$\psi = \frac{16,4 + 80 \cdot k \cdot S}{100}$$

где: ψ — относительное сужение, отн. ед.;

S — ширина отпечатка, мм;

k — коэффициент кратности, имеющий значения:

k = 1 при нагрузке 1000Н; k = 1,414 при нагрузке 500 Н; k = 1,825 при нагрузке 300Н; k = 2,235 при нагрузке 200Н; k = 3,161 при нагрузке 100Н; k = 4,472 при нагрузке 50Н.

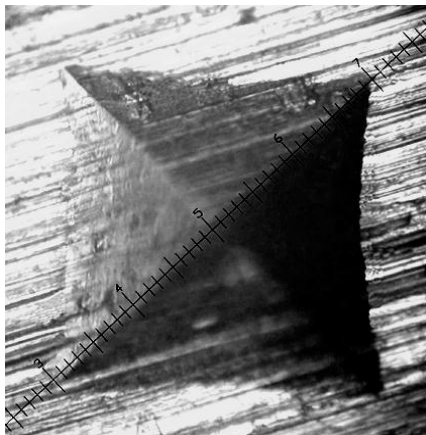


Рисунок 1 - Типичная форма отпечатка пирамидального индентора на низколегированной стали (x200)

Главной особенностью предлагаемого метода является определение относительного сужения материала не посредством испытаний образцов, вырезанных из конструкции, а по математической зависимости, связывающей параметры отпечатка пирамидального индентора с относительным сужением материала, что позволяет отказаться от вырезки образцов [2,4]. При этом предлагается использовать переносные твердомеры, определяющие твердость по Виккерсу, которые также широко выпускаются отечественными и зарубежными производителями, что позволяет проводить замеры непосредственно на конструкции.

Работоспособность и объективность данного метода была проверена путем сравнения значений, полученных вышеуказанным и классическим способом (изготовлением образцов, вырезанных из конструкции и испытаниями их по стандартной методике на маятнике копре (по ГОСТ 9454) на ряде вырезов из различных конструкций, изготовленных из низкоуглеродистых (сталь Ст3, сталь 20), низколегированных (сталь 09Г2С, 17ГС), теплоустойчивых (сталь 12ХМ, 15Х5М) и коррозионноустойчивых (сталь 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т) сталей. При этом разность в значениях ударной вязкости составляла 2,2-13,1%[2].

Были проведены исследования по анализу объективности оценки «слабых мест» в конструкции с использованием магнитного метода контроля (по коэрцитивной силе). Использовался магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М (производство ООО «Специальные научные разработки»).

Были выполнены экспериментальные работы по проверке объективности и сходимости экспериментальных данных, полученных тремя выбранными методами контроля (магнитным - по коэрцитивной силе, дюрометрическим методом и металлографическим методом) на одной и той же конструкции: стреле грузоподъемного крана С-981, материал: сталь ВСт3сп5 (срок эксплуатации - более 20 лет). В дополнение к поставленной выше основной была поставлена дополнительная задача, связанная с экспериментальным подтверждением имеющихся литературных данных о возможности косвенного определения механических свойств стали металлографическим методом: по наличию и форме субзерен феррита. Установлено, что для феррито-перлитных сталей (на примере сталей Ст3 и Ст4) при их эксплуатации при циклических нагрузках наблюдаются изменения в зернах феррита: чем больше циклов или выше напряжения, тем ярче в микроструктуре видны субзерна феррита (см. табл. 1 [6]).

Как видно из таблицы 1 связь структуры со свойствами однозначна.

Было выполнено около 30 замеров коэрцитивной силы по указанной конструкции и установлены точки с максимальным (участок №1) и минимальным значением коэрцитивной силы (участок №2) (таблица 2)

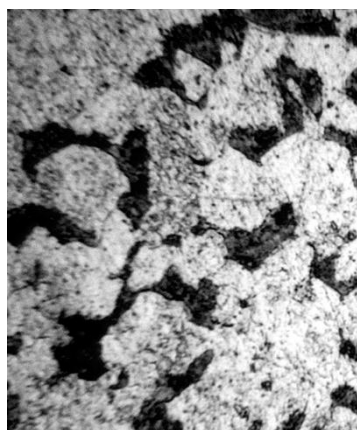
Таблица 1. Связь механических свойств стали со структурой феррита[6]

Тип структур	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

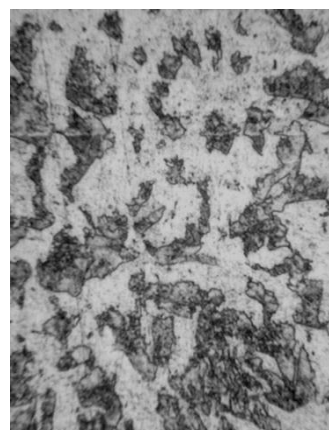
Предполагалось, что степень деградации металла на участке №1 будет выше, чем на участке №2, также предположительно считалось, что будет ниже ударная вязкость и пластичность.

Определение твердости по методу Виккерса проводили непосредственно на конструкции с помощью переносных твердомеров Microdur I, Microdur II (резонансно-импедансного принципа действия) и WPM (статического принципа действия) (P=50Н). Параметры формы пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) измеряли с использованием окуляр-микрометра на переносном металлографическом микроскопе ТКМ при увеличении x400.

Полученные экспериментальные результаты сведены в таблицу 2.



а)



б)

Рисунок 2 - Типичная микроструктура металла (x400)

а) на участке №1 (с максимальным значением коэрцитивной силы)

б) на участке №2 (с минимальным значением коэрцитивной силы)

Таблица 2. Данные по анализу металла крановой конструкции

Параметр	Участок №1	Участок №2	Разница*, %
Коэрцитивная сила, А/см	5,3(max)	2,4(min)	220
Уровень внутренних напряжений в металле	максимальный	минимальный	-
Твердость, HV	142,6	134,6	5,9
Относительное сужение, %	76,9	78,4	2,0
Ударная вязкость, Дж/см ²	253	270	6,7
Ударная вязкость, качественный показатель по	Субзерна феррита,	Выявляемые субзерна феррита	15-20

наличию и виду субзерен феррита	«ножевых» границ не выявлено (рис. 2а)	отсутствуют (рис. 2б)	
---------------------------------	--	-----------------------	--

Примечание: * - Разница между параметрами по участкам №1 и №2

Проанализировав полученные экспериментальные данные (таблица 2), можно сделать следующие выводы:

- рассматриваемые косвенные методы (магнитный, дюрOMETрический и металлографический) показывают хорошую корреляцию друг с другом;
- установлен более высокий уровень деградации металла на участке №1, т.к. он находился под большим напряжением при эксплуатации, чем участок №2 (характерно снижение ударной вязкости на 6,7% и пластичности (по относительному сужению) на 2%);
- наиболее чувствительным параметром к уровню деградации металла является коэрцитивная сила (разница между контрольными участками составляет 220%).

ВЫВОДЫ

1. Разработана эффективная методика неразрушающего контроля ответственных металлоконструкций различного назначения, позволяющая максимально объективно оценить фактическое их состояние неразрушающими методами контроля, что повысит безопасность и надежность их дальнейшей эксплуатации при использовании для технического диагностирования опасных и потенциально опасных производственных объектов, а также эксплуатируемых на них технических устройств.
2. Полученные методологические подходы были использованы при выполнении ряда работ по расследованию причин трещинообразования и разрушений на ряде ответственных конструкций (автомобильных и железнодорожных цистернах, сварных баллонах различной конструкции, магистральных трубопроводах, крановых конструкциях), в том числе и по заказу Госпромнадзора МЧС Республики Беларусь и доказали свою эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Беларусь о промышленной безопасности от 5 января 2016 года №354-З (в редакции Закона Республики Беларусь от 10.12.2020 №66-З).
2. Пантелеенко Ф.И., Снарский А.С. Методология оценки состояния материала ответственных металлоконструкций: монография. Минск: БНТУ, 2010, 196 с.
3. Иванцов О.М. Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России// Трубопроводный транспорт. 1997, №10, С.26-31.
4. Пантелеенко Ф.И., Снарский А.С. Оценка эффективности восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов определением ударной вязкости металла неразрушающим косвенным способом / Нефтегазовое дело. 2011, т.9, №1, С.35-39.
5. Контроль усталости металла неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций /Г. Я. Безлюдько, Е. И. Елкина, Р. Н. Соломаха// Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2009, №1, С. 49-50 .
6. Назарова Н.М. Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияния на развитие процессов разрушения: автореф. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2000. 24 с.