

7. Halbritter J., Repphun G., Vlnzelberg S., Staikov G., Lorenz W.J. / Tunneling mechanisms in electrochemical STM – distance and voltage tunneling spectroscopy // *Electrochimica Acta*, 1995, V. 40, No. 10, P. 1385-1394.
8. Реформатская И.И., Подобаев А.Н., Флорианович Г.М. и др. / Способ контроля качества стальных изделий (его варианты). // Патент на изобретение № 2149400. Бюл. №14. 20.05.2000.

Разработка метода оперативной диагностики и прогнозирования остаточного ресурса основанного на регистрации накопленной поврежденности металлом конструкции в процессе длительного нагружения

д.т.н. проф. Зорин Е.Е.
Университет машиностроения
zenacenter@mtu-net.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные принципы построения метода оперативной диагностики на базе процесса микровдавливания, позволяющего регистрировать динамику накопления рассеянной поврежденности в стенке конструкции при длительном нагружении и прогнозировать остаточный ресурс.

Ключевые слова: структура, поле напряжений второго рода, микротвердость, рассеянная поврежденность, трещиностойкость, коэффициент поврежденности, остаточный ресурс.

При любом виде переменного нагружения в материале регистрируется петля пластического гистерезиса в координатах напряжение-деформация и процесс циклической ползучести. Наличие поврежденности стимулирует процессы пластической деформации в локальных объемах металла и приводит к росту параметров замкнутой петли пластического гистерезиса, площадь которой равна энергии, рассеянной в материале, а ширина – неупругой деформации за цикл. В свою очередь, развитие локальной пластической деформации приводит к увеличению плотности повреждений (дислокаций) в единичном объеме металла. Суммарную поврежденность (P_{Σ}) условно можно разбить на два уровня – наследственную плотность поврежденности (P_n^1), обусловленную качеством металла и приобретенную плотность поврежденности (P_n^2) – как функцию наследственной поврежденности, возникшей в процессе технологии передела материала при изготовлении конструкции и дальнейших условиях эксплуатации конструкции [4, 6].

Несмотря на большие достижения в области описания развития трещин с использованием критериев механики разрушения (МР), отсутствует возможность описать весь процесс развития магистральной трещины с единых позиций. Это объясняется тем, что критерии МР применимы при достаточно больших размерах трещины (в поле напряжений первого рода), т.е. в десятки раз превышающих размеры структурных составляющих (зерен) металлов. Это потребовало для создания инженерного метода экспресс-диагностики разработать модель формирования дефектов определенной протяженности на стадии зарождения магистральной трещины.

Существующие методы расчета сложных сварных конструкций и систем позволили уже на стадии проектирования существенно повысить их надежность. Однако, прогнозирование остаточного ресурса на основании проведенных расчетов невозможно в силу целого ряда обстоятельств, одним из которых являются изменения физико-механических характеристик металла конструкции в процессе эксплуатации. Эти изменения тем более значительны, чем многофакторнее система воздействия на материал (объемность напряженно-

деформированного состояния, коррозионная активность среды, температурный режим эксплуатации и т.п.) и длительность эксплуатации. Среди множества характеристик, оценивающих состояние материала и зон сварных соединений, наиболее опасным является снижение такого параметра, как вязкость разрушения, так как от значения этого параметра напрямую зависит сопротивляемость конструкции коррозионно-механическому разрушению.

Значение вязкости разрушения оценивается с помощью различных критериев механики разрушения: ударной вязкости KCU или KCV, коэффициента интенсивности напряжений K_{σ} , работы разрушения G_c , пластического раскрытия у вершины трещины δ_c . Прямое определение указанных характеристик требует проведения специальных механических испытаний образцов, вырезанных непосредственно из реального объекта, находящегося в эксплуатации, что не всегда возможно осуществить. Более реальным представляется косвенное определение вязкости разрушения с помощью каких-либо неразрушающих методов, например, посредством измерения микротвердости [1, 2, 4, 5, 6].

На основании выше изложенного сформулирован принцип, на котором должны базироваться разрабатываемые методы экспресс-диагностики конструкции в процессе эксплуатации:

диагностируемый объем материала конструкции должен быть достаточным, чтобы отразить воздействие на материал технологии передела и изготовления конструкции, условий эксплуатации и необходимым для формирования в нем магистральной трещины.

Под магистральной трещиной, в этом случае, подразумевается одна из существующих микротрещин, которая при заданных условиях нагружения развивается с большей скоростью, чем остальные трещины, и является причиной регистрируемого разрушения конструкции. Таким *необходимым* и *достаточным* объемом металла может быть элемент структуры, т. е. *зерно*, а инструментом, регистрирующим изменения в физико-механических характеристиках элементов структуры под воздействием технологии передела металла и условий нагружения, замер микротвердости.

Если элемент структуры представить в виде элементарного образца, жестко закрепленного по контуру, а процесс вдавливания индентора как внешнее нагружение, то результаты измерений микротвердости будут достаточно объективно отражать физико-механические характеристики, напряженно-деформированное состояние и наличие повреждений в элементе структуры. Совокупность значений микротвердости, т.е. достаточно большая выборка результатов, будет характеризовать состояние диагностируемого объема металла. Поскольку в реальных условиях эксплуатации объекта нельзя вести оптическое наблюдение за отпечатком, то в основу разработанного переносного микротвердомера был положен принцип автоматического определения значений микротвердости после проставления укола.

Следующим необходимым условием при регистрации изменений физико-механических характеристик металла конструкции в условиях производства, являлся принцип оценки напряженно-деформированного состояния всех участков структурной композиции материала. Для этого определен необходимый и достаточный массив и шаг замеров микротвердости (например, 60...80 уколов с фиксированным шагом 0,02 мм для феррито-перлитных сталей). Уровень нагрузок на индентор выбирается из диапазона 10-50 грамм, где не действует условие подобия отпечатков Кирпичева-Кика-Давиденко для сталей данного структурного класса.

При проведении последовательно через определенные промежутки времени замеров микротвердости на поверхности или в зонах технологических и конструктивных концентраторов напряжений регистрируется изменение в объеме выборки количества «упрочнявшихся» и «разупрочнившихся» элементов структуры.

Динамика изменения «упрочнявшихся» и «разупрочнившихся» зерен в выборке замеров микротвердости на поверхности диагностируемого объекта и будет являться показателем

снижения сопротивляемости металла конструкции разрушению при эксплуатации.

Механизм зарождения и развития разрушения в металле конструкции в процессе эксплуатации на структурном уровне можно схематично представить следующим образом:

а) развитие имеющихся «наследственных» микротрещин и дефектов строения до размеров, соизмеримых с протяженностью зерен, появление новых зародышей микротрещин, развитие общей «разрыхленности» структуры;

б) изменение градиентов поля напряжений 2-го рода (напряжения, уравновешенные на уровне зерен) и формирование новых зон высокой концентрации напряжений;

в) зарождение в зонах концентрации напряжений «эксплуатационных» микротрещин (поврежденности) с последующим их прорастианием, слиянием и переходом из микротрещин в макротрещины, когда протяженность разрушения охватывает блоки зерен. Эта стадия развития разрушения в металле конструкции уже не может быть корректно отражена процессом микровдавливания, так как за дальнейшее развитие макротрещины в большей степени отвечает поле напряжений 1-го рода уравновешенное в конструкции (рабочие напряжения, сварочные и т.д.).

Следовательно, характеристики процесса микровдавливания могут быть инструментарием для ранней диагностики снижения несущей способности материала, т.е. регистрировать наступление *необходимых и достаточных* условия для формирования магистральной трещины в диагностируемом объеме металла при данных условиях нагружения.

В качестве количественных критериев для сравнения гистограмм распределения значений микротвердости в выборках предложено ввести критерий k_p – коэффициент накопления поврежденности, характеризующий относительное увеличение плотности поврежденности материала в процессе эксплуатации конструкции. Принимаем этот коэффициент равным отношению

$$k_p = K_p / K_p^0, \quad (1)$$

где K_p – приведенная частотность выборки замеров микротвердости материала в процессе эксплуатации; K_p^0 – приведенная частотность выборки замеров микротвердости материала в исходном состоянии.

Приведенная частотность выборки подсчитывается по гистограмме как сумма отдельных частотностей с учетом весовых коэффициентов:

$$K_p = \sum_{i=1}^m a_i f_i, \quad (2)$$

где $f_i = n_i / N$ – частотность отдельного интервала значений микротвердости; $N = \sum_{i=1}^m n_i$ – общее число замеров; n_i – число результатов в данном интервале значений микротвердости; m – число результатов разбиения.

Весовые коэффициенты a_i подсчитываются на основе функций желательности по следующим формулам:

при нечетном m

$$a_i = 1 - (i - 1) \frac{1,8}{m - 1} \quad \text{для} \quad i \leq \frac{m + 1}{2}; \quad (3)$$

$$a_i = 1 - (m - i) \frac{1,8}{m - 1} \quad \text{для} \quad i > \frac{m + 1}{2}; \quad (4)$$

при четном m

$$a_i = 1 - (i - 1) \frac{1,8}{m - 2} \quad \text{для } i \leq \frac{m}{2}; \quad (5)$$

$$a_i = 1 - (m - i) \frac{1,8}{m - 1} \quad \text{для } i > \frac{m}{2}; \quad (6)$$

При сравнении гистограмм микротвердости следует использовать единую нумерацию интервалов. Если принять за основу нумерацию интервалов для гистограммы исходного состояния, то для видоизменившихся гистограмм могут появиться интервалы за пределами области исходной гистограммы (как справа, так и слева), т. е. с нумерацией интервалов при значениях $i = \dots - 3, -2, -1, +1, +2, +3, \dots, m, m + 1, m + 2, m + 3, \dots$.

Тогда формулы для подсчета весовых коэффициентов (3) – (6) приобретают следующий вид:

при нечетном m

$$a_i = 1 - i \frac{1,8}{m - 1} \quad \text{при } i = \dots - 3, -2, -1; \quad (7)$$

$$a_i = 1 - (i - 1) \frac{1,8}{m - 1} \quad \text{для } i \leq \frac{m + 1}{2}; \quad (8)$$

$$a_i = 1 - (m - i) \frac{1,8}{m - 1} \quad \text{для } i > \frac{m + 1}{2}; \quad (9)$$

$$a_i = 1 - (m - i) \frac{1,8}{m - 1} \quad \text{при } i = m + 1, m + 2, m + 3, \dots; \quad (10)$$

при четном m

$$a_i = 1 - i \frac{1,8}{m - 2} \quad \text{при } i = \dots - 3, -2, -1; \quad (11)$$

$$a_i = 1 - (i - 1) \frac{1,8}{m - 2} \quad \text{для } i \leq \frac{m}{2}; \quad (12)$$

$$a_i = 1 - (m - i) \frac{1,8}{m - 2} \quad \text{для } i > \frac{m}{2}; \quad (13)$$

$$a_i = 1 - (i - m) \frac{1,8}{m - 2} \quad \text{при } i = m + 1, m + 2, m + 3, \dots; \quad (14)$$

Формулы для подсчета весовых коэффициентов (7) – (14) получены на основе кусочно-линейной функции распределения их по длине интервала. На рисунке 1 показаны схема нумерации интервалов разбиения гистограммы и соответствующие эпюры весовых коэффициентов. Способ подсчета весовых коэффициентов a_i основан на использовании линейной аппроксимации их эпюры от 0,1 до 1,0.

Поскольку характер кривых, аппроксимирующих столбики гистограмм замеров микротвердости, весьма похож на вид кривых нормального распределения случайных величин, то для интегральной оценки результатов измерения микротвердости удобно установить высокие значения весовых коэффициентов для внешних крайних интервалов (с редко встречающимися результатами) и низкие значения весовых коэффициентов для внутренних средних интервалов (с часто встречающимися результатами).

По аналогии с функциями желательности, используемыми, например, в материаловедении при оптимизации технологических параметров процессов плавки и термической обработки, авторы приняли максимальные значения весовых коэффициентов для внешних крайних интервалов исходной гистограммы распределения микротвердости, равным 1,0. Мини-

мальные значения весовых коэффициентов для внутренних средних интервалов установлены равными 0,1 (так как использование в качестве минимальных значений нулевых значений приведет к потере информации на этих интервалах).

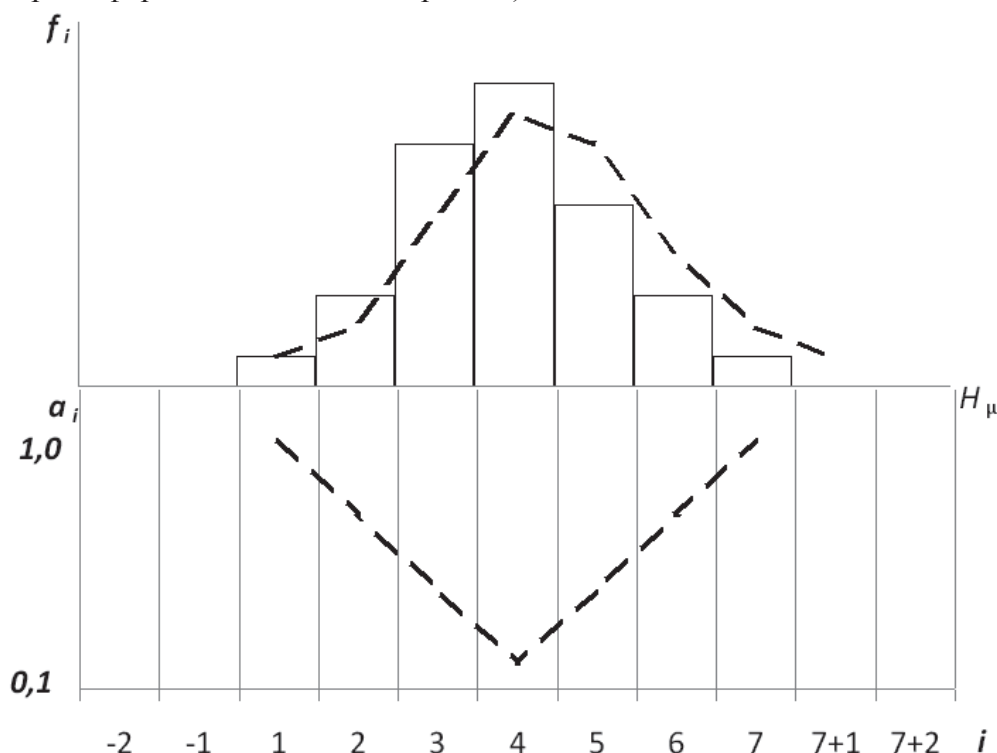


Рисунок 1. Схемы нумерации интервалов и вычисления весовых коэффициентов при $m=7$

Случай, когда число интервалов разбиения исходной гистограммы является нечетным, показан на рисунке 1. В случае четного числа интервалов разбиения присутствуют две точки с ординатами, равными 0,1. В остальном, вид эпюр весовых коэффициентов остается неизменным.

Для того чтобы сравнить между собой две гистограммы (для исходного состояния металла и после эксплуатации) необходимо вычислить приведенные частотности выборки K_p^0 и K_p по формуле (2), причем подсчет весовых коэффициентов следует вести, сохраняя нумерацию интервалов для гистограммы исходного состояния. Весовые коэффициенты интервалов измененной гистограммы (см. рис.1) в случае их выхода за пределы исходного интервала $i \in [1, m]$ становятся больше единицы. Благодаря этому данный параметр - придельная частота выборки – является довольно чувствительным к изменению вида гистограммы распределения микротвердости в процессе эксплуатации конструкции [7].

В качестве иллюстрации способа обработки гистограмм распределения микротвердости рассмотрим пример, показанный на рисунке 2. Результаты вычислений по формулам (7) – (14) представлены в табличной форме. В дальнейшем использовалась компьютерная обработка с помощью электронных таблиц по программе «Excel 2000».

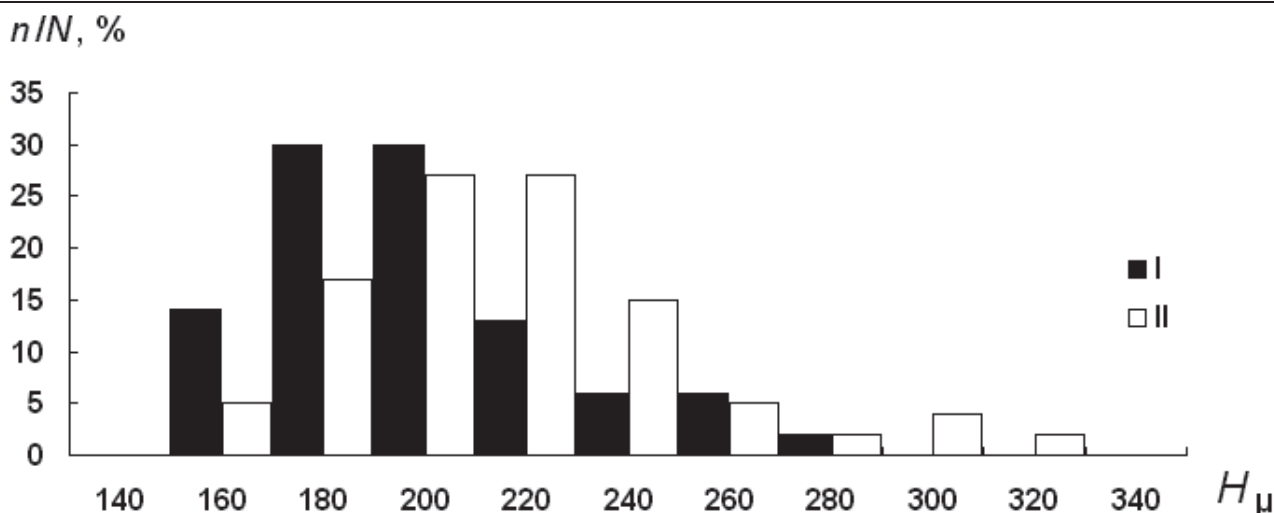


Рисунок 2. Изменение наполненности выборки значений микротвердости на поверхности диагностируемого участка образца из стали 20 после циклического нагружения ($N = 2 \cdot 10^5$ цикл; $\sigma_{\max} = 0,9\sigma_{0,2}$; $R = 0,5$): I — исходное состояние; II — текущее состояние

Пример обработки гистограмм микротвердости и оценки степени поврежденности металла под действием эксплуатационных факторов

Интервалы разбиения и подсчет весовых коэффициентов ($m = 9$)

H_{μ}	140 – – 160	160 – – 180	180 – – 200	200 – – 220	220 – – 240	240 – – 260	260 – – 280	280 – – 300	300 – – 320	320 – – 340
i	– 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a_i	1,225	1,000	0,775	0,550	0,325	0,100	0,325	0,550	0,775	1,000

Гистограмма исходного состояния ($K_p^0 = 48,7\%$)

$f_i, \%$	–	5	16	26	26	15	5	2	3	2
$f_i, a_i, \%$	–	5,000	12,40	14,30	8,450	1,500	1,625	1,100	2,325	2,000

Гистограмма текущего состояния ($K_p = 80,2\%$, $k_p = 1,647$)

$f_i, \%$.	15	29	29	13	6	6	2	–	–	–
$f_i, a_i, \%$	18,38	29,00	22,48	7,150	1,950	0,600	0,650	–	–	–

Как видно из полученного результата, коэффициент k_p , оценивающий степень деградации металла в процессе эксплуатации, оказывается больше единицы. Эта тенденция сохраняется во всех случаях, так как за базу принята нумерация интервалов гистограммы исходного состояния, где значения весовых коэффициентов не превышают единицы. Перераспределение же значений микротвердости под действием эксплуатационных факторов приводит к тому, что появляются новые интервалы значений микротвердости на участках, где значения весовых коэффициентов больше единицы. Поэтому приведенная частотность выборки замеров микротвердости металла в процессе эксплуатации K_p постоянно возрастает.

Перед проведением, например, ремонта трубопровода после длительной эксплуатации с использованием дуговых сварочных процессов, на его поверхности, после удаления слоя металла толщиной не менее 0,5 мм и последующей ручной шлифовки, в зоне конструктивно-

технологических (например, зона сплавления стыкового сварного соединения) или эксплуатационных концентраторов напряжений крепится на поверхности измерительная головка переносного диагностического комплекса и в автоматическом режиме проводится замер микротвердости с заданным шагом и усилием на индентор. Массив выборки, при полном обороте подвижного индентора с закрепленной на конце с эксцентриситетом алмазной пирамидкой, может составлять 87 значений с шагом 0,02 мм.

Результаты замера передаются на компьютер, где обрабатываются и сравниваются с имеющейся на данный материал базой данных. На дисплее появляются две гистограммы базовая и полученная после проведенных замеров, а также значение коэффициента поврежденности. Вся операция с максимальным числом замеров занимает 23 минуты. Если значение коэффициента поврежденности лежит в красной зоне, то сопротивляемость металла объекта разрушению в диагностируемой зоне снизилась столь значительно, что он не сможет обеспечить конструктивную прочность на заданном межремонтном периоде и экономически целесообразно заменить частично или полностью данный элемент конструкции. Если значение коэффициента поврежденности в пограничной или зеленой областях, то экономически целесообразно проводить ремонтные работы по восстановлению стенки трубопровода или защитных покрытий с целью продления ресурса конструкции.

Литература

1. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов. Часть 3. Диагностика и прогнозирование ресурса.// М.: Недра, 2003.- 315с.
2. Зорин Е.Е. Оценка поврежденности трубных сталей //Деформация и разрушение материалов.-2005.-№7.-С.37-41.
3. Зорин Е.Е., Зорин Н.Е. Оперативная диагностика состояния металла сварных конструкций (в процессе длительной эксплуатации)// Нефть, газ и бизнес.- №7-8.-2009.-С.67-73.
4. Зорин Е.Е. Регистрация динамики накопления рассеянной поврежденности в двухфазных сталях методом на базе процесса микровдавливания //Техническая диагностика и неразрушающий контроль - Киев, ИЭС.- 2001.- №2.- С.32-35
5. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И. Оценка степени деградации металла газопроводов //Газовая промышленность - №4.-2003.-С.57-60.
6. Зорин Е.Е. Оценка поврежденности трубных сталей //Деформация и разрушение материалов.-2005.-№7.-С.37-41.
7. Зорин Е.Е., Маляревская Е.К., Зорин Н.Е. Способ определения поврежденности объекта //Патент на изобретение № 2315971 от 27.01.2008г.

Особенности коррозионно-механического разрушения газонефтепроводов

д.т.н. проф. Зорин Е.Е., асп. Волченко Д.И., к.т.н. с.н.с. Зорин Н.Е.

Университет машиностроения

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

zenacenter@mtu-net.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы кинетики развития стресс-коррозионных дефектов на начальных этапах разрушения. Описана стресс-коррозионная поврежденность трубопроводов, находящихся в схожих условиях воздействия внешней среды, с различными конструктивными параметрами и режимами эксплуатации. Определены две стадии развития стресс-коррозионных дефектов с точки зрения преимущественного влияния различных групп факторов. Показано, что в поверхностном слое металла стенки газопровода, находящегося под давлением, не превышающим проектное, существуют условия для реализации разрушения по механизму коррозионного растрескивания под напряжением.