

Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты

А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек, С. А. Недосека

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

С помощью LM-метода твердости оценена деградация структурного состояния металла труб линейных участков газопроводов после их длительной эксплуатации. Показано, что метод позволяет получить результаты, которые необходимы для мониторинга эксплуатационной надежности газопроводов.

Ключевые слова: газопроводы, деградация металла, рассеяние механических свойств, твердость, остаточный ресурс, коэффициент вариации.

Магистральные трубопроводы представляют собой технические системы в виде последовательно соединенных и взаимодействующих между собой компрессорных (или насосных) станций и линейных участков, для которых характерна очень сложная система термомеханического нагружения и, как следствие, высокая степень неопределенности напряженно-деформированного состояния основного несущего элемента – трубы.

При кажущейся простоте конструктивного исполнения трубопроводных систем надежный мониторинг их несущей способности и долговечности на этапе проектирования еще не разработан. Поэтому качество технического обслуживания трубопровода в процессе эксплуатации приобретает особое значение. Контроль текущего состояния металла труб – наиболее ответственная задача плановых мероприятий.

В процессе эксплуатации труб происходит деградация металла, что связано с накоплением рассеянных повреждений различной природы, трансформирующихся в дефекты типа трещин, которые приводят к снижению уровня работоспособности трубы или к полному ее отказу по показателям функционирования. Таким образом, одна из наиболее серьезных причин отказа трубопровода – необратимые изменения структуры и физико-механических свойств материала трубы под влиянием различных температурно-силовых воздействий, коррозии, старения, химического взаимодействия с транспортируемым продуктом. Как показывает статистика, причина каждого второго отказа – деградация металла.

Скорость деградации, естественно, зависит от природы материала, его структурного состояния и условий работы, а также режима нагружения. В Белорусском государственном университете транспорта под руководством проф. Л. А. Сосновского [1] в течение 5 лет проводился анализ эксплуатационной нагруженности труб линейного участка нефтепровода “Дружба – I, II” и статистический анализ результатов примерно 400000 измерений давления. Показано, в частности, что давление в трубе изменяется циклически с коэффициентом асимметрии от 0 до 1 и является случайной величиной. В

течение всего срока эксплуатации нефтепровода реализуются более 10^5 циклов, разрушения носят типичный усталостный характер с длительным периодом стадии накопления рассеянных повреждений. Исходных трещин на наружной поверхности трубы приблизительно в шесть раз больше, чем на внутренней, после эксплуатации трубы, наоборот, в 1,5 раза меньше.

Поскольку режим нагружения газопровода является мягким, с небольшой частотой колебаний уровня давления рабочей среды, замечено, что разрушение труб происходит по квазистатическому типу, скорее, по механизму малоциклового усталости. Однако и в этом случае контроль кинетики накопления повреждений в металле труб в процессе наработки, характеризующих деградацию материала, имеет огромное практическое значение.

Существует большое количество литературных источников, где рассматриваются способы оценки степени поврежденности металла в условиях эксплуатации по результатам прямых или косвенных измерений [2–4]. К числу наиболее результативных из тех, которые можно реализовать без разрушения исследуемой конструкции, следует отнести различные варианты метода акустической эмиссии и метод твердости.

К сожалению, весьма информативные акустические методы требуют применения дорогостоящего приборного обеспечения и сложной процедуры обработки результатов измерений, а метод твердости характеризуется недостаточной информативностью и низкой точностью, поскольку корреляция между твердостью материала и его поврежденностью в большинстве случаев очень слабая и, как будет показано ниже, не всегда однозначна.

В настоящем исследовании для оценки поврежденности материала использован метод ЛМ-твердости, согласно которому в качестве информационных признаков состояния системы выбраны характеристики рассеяния показателей твердости металла труб, т.е. степени поврежденности металла ставится в соответствие не абсолютная величина твердости, а параметры рассеяния результатов ее массовых измерений, как более показательные характеристики, чем сама твердость [5]. Этот метод достаточно физически обоснован и экспериментально подтвержден при наработке в условиях кратковременного и длительного нагружения, в том числе циклического [6]. Его физическое обоснование состоит в том, что рассеяние по крайней мере механических характеристик присуще всем материалам, а степень их рассеяния зависит в основном от структурного состояния. Поэтому об изменении структурного состояния, т.е. о деградации материала в заданных условиях работы, в том числе вследствие старения под напряжением, можно судить по степени рассеяния механических свойств, в частности твердости, определение которой в любом объеме испытаний проводится без разрушения изделия и не требует сложной аппаратуры.

При наличии достаточно большого количества значений твердости, полученных с помощью массовых измерений с использованием тех или иных законов распределения случайных величин, можно определить параметры этих распределений, которые в дальнейшем будут приниматься для оценки структурной неоднородности материала.

Существует большой опыт использования в механике материалов, а именно при построении статистических теорий прочности, распределения

Вейбулла [7], в котором параметр m , имеющий смысл коэффициента однородности, можно определить по формуле Гумбеля [8]. Применительно к испытаниям на твердость эта формула имеет вид

$$m = 0,4343 d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где величину d_n определяют в зависимости от числа n измерений; H_i – значение твердости по i -му измерению; $\overline{\lg H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg H_i$ – среднее значение логарифмов твердости по результатам n измерений.

Специально проведенные испытания с использованием метода твердости показали, что для допустимой точности оценки однородности материала достаточный объем испытаний составляет 20–30 измерений. Естественно, что большим значениям коэффициента m соответствует низкий уровень рассеяния характеристик твердости и, следовательно, лучшая организация структуры, низкий уровень поврежденности, меньшим значениям, наоборот – более высокий уровень поврежденности. Отметим, что уровню рассеяния определяемого свойства, в данном случае твердости, можно ставить в соответствие также другие статистические характеристики, например коэффициент вариации, показывающий, насколько велико рассеяние величин, составляющих рассматриваемый объем данных, по сравнению со средним значением твердости:

$$v = \frac{1}{\overline{H}} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \overline{H})^2 \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где \overline{H} – среднее значение твердости; H_i и n имеют тот же смысл, что и в формуле (1).

Ниже представлены результаты исследования описанным методом состояния металла труб, изготовленных из низколегированных ферритно-перлитных сталей 17Г1С, 17ГС и 13030 (чехословацкого производства), после наработки различной длительности (от 15 до 48 лет) в системе газопроводов, эксплуатируемых в Украине. Все пробы металла для испытаний были взяты только с тех действующих газопроводов, у которых сохранились резервные трубы с исходным состоянием металла.

Химический состав металла труб исследовали на сканирующем микроскопе “Camscan” с рентгеновским спектрометром System 860 SP2-50. Результаты измерений показали, что содержание кремния и марганца в указанных сталях находится в пределах их верхних значений, регламентируемых ГОСТ 5058-65 для сталей 17Г1С и 17ГС, содержание хрома и никеля – в пределах сертификационных значений на поставку. Никелевый эквивалент сталей находится в интервале значений 4,283...4,394. Основные механи-

ческие характеристики сталей: предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 490 \dots 550$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{\text{т}} = 340 \dots 355$ МПа; относительное удлинение $\delta > 22\%$; ударная вязкость $KCV = 0,34 \dots 0,40$ МДж/м².

Изменение химического состава материала труб за период их эксплуатации не превышает погрешностей, допускаемых для данной аппаратуры.

Схема вырезки образцов для испытаний показана на рис. 1. Из каждой трубы-свидетеля и трубы с наработкой изготавливали по три образца размером 10×10 мм, высота которых равна толщине стенки. Поверхности образцов, соответствующие внутренней и наружной сторонам трубы, были подготовлены для испытаний на твердость по Виккерсу на стандартном твердомере с нагрузкой 150 Н на индентор с углом при вершине 136° .

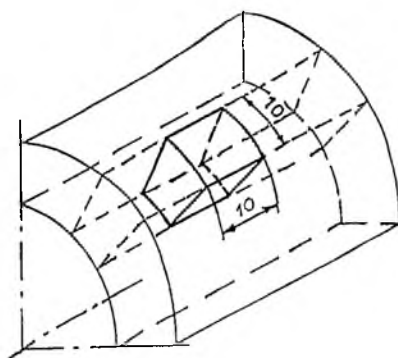


Рис. 1. Схема вырезки образцов (размеры приведены в мм).

В качестве характеристики рассеяния принимался коэффициент вариации (2), рассчитанный по результатам не менее 25 измерений. В расчет принималось среднее из трех полученных значений коэффициента вариации, за исключением тех случаев, когда одно из значений резко отличалось от двух других. Эти значения из дальнейших обсуждений исключались.

В таблице представлены результаты диагностики трубопровода, эксплуатируемого до 1996 г. Над чертой приведены значения твердости и коэффициента вариации для металла трубы в исходном состоянии, под чертой – для металла после соответствующего срока эксплуатации трубы в системе трубопровода.

Как видно, твердость металла труб в исходном состоянии для разных газопроводов отличается, причем в большей степени с наружной стороны; твердость металла одной трубы также отличается, но значительно меньше – с наружной стороны $HV = 1575$ МПа, с внутренней – $HV = 1555$ МПа, хотя средние (по всем трубопроводам) значения отличаются несущественно.

Приведенные данные по механическим свойствам металла труб в исходном состоянии свидетельствуют об их сравнительно небольшом различии, что обеспечивается прежде всего единой природой и близким химическим составом сталей по основным элементам. Это дает основание рассматривать экспериментальные данные, полученные на разных трубопроводах после эксплуатации различной длительности, как результаты исследования состояния металла трубы из низколегированной кремнемарганцевой стали в

составе некоторого виртуального газопровода на разных стадиях эксплуатации. Такой подход, как показано ниже, позволяет установить по крайней мере качественные закономерности деградации в процессе наработки металла труб из стали указанного класса.

Результаты диагностики металла труб газопроводов

№ п/п	Газопровод	Материал трубы	Размер трубы, мм	Длительность работы, годы	Твердость $\overline{HV} \cdot 10^{-2}$, МПа		Коэффициент вариации	
					н	в	н	в
					1	Новопсков–Краматорск	17Г1С	1020×8
2	Шебелинка–Славянск	17ГС	720×8	27	$\frac{14,0}{16,8}$	$\frac{14,1}{16,9}$	$\frac{1,35}{2,10}$	$\frac{2,25}{2,60}$
3	Диканька–Кременчуг	17ГС	720×8	32	$\frac{16,2}{16,0}$	$\frac{16,1}{15,8}$	$\frac{1,36}{1,75}$	$\frac{1,72}{2,14}$
4	Дашава–Киев	13030 (ČSN)	508×9,5	41	$\frac{12,6}{14,4}$	$\frac{13,1}{14,2}$	$\frac{1,61}{2,57}$	$\frac{2,46}{5,30}$
5	Дашава–Киев	13030 (ČSN)	508×9,5	48	$\frac{17,6}{14,1}$	$\frac{17,4}{15,6}$	$\frac{1,91}{3,20}$	$\frac{1,90}{5,04}$

Примечание. \overline{HV} – среднее значение твердости материала трубы по результатам не менее 25 измерений; н, в – со стороны наружной и внутренней поверхности трубы соответственно.

Следовательно, предлагаемая модель основана на предположениях об относительно одинаковых свойствах металла труб в исходном состоянии, условиях механического нагружения труб и параметрах температурно-химических воздействий. Естественно, что эти предположения для рассматриваемого виртуального газопровода в большей или меньшей степени не выполняются, чем и объясняются заметные отклонения обсуждаемых ниже экспериментальных результатов от соответствующих среднестатистических значений. Тем не менее такой подход позволяет достаточно четко проследить основные тенденции развития процесса деградации свойств металла труб.

При эксплуатации твердость металла труб в разных газопроводах, как видно из рис. 2, изменяется неоднозначно: она может как увеличиваться (газопроводы №№ 1, 2, 4 – таблица), так и снижаться (газопроводы №№ 3, 5). Причину неоднородности пока трудно объяснить физически. Однако экспериментально установленный факт сам по себе имеет большое практическое значение – он является еще одним прямым доказательством того, что твердость не всегда служит параметром, по измерению которого можно адекватно судить об изменении состояния металла, т.е. о его деградации. Данные о рассеянии характеристик твердости металла труб в исходном состоянии и после наработки различной продолжительности в оценке коэффициентом вариации приведены на рис. 3. Судя по рассеянию характеристик твердости, металл труб в исходном состоянии можно считать сравнительно однородным. Однако степень однородности металла наружных и внутренних слоев различается. Средние по всем трубам значения коэффициента вариации металла внутреннего слоя значительно выше ($\nu_{в(ср)} = 1,90$), чем

наружного ($\nu_{н(ср)} = 1,42$), что свидетельствует о его сравнительно высокой исходной поврежденности и, следовательно, более низком качестве. Именно это является, очевидно, одной из главных причин более интенсивного роста в процессе наработки коэффициента вариации $\nu_{в}$ металла внутреннего слоя по сравнению с коэффициентом вариации $\nu_{н}$ металла наружного слоя.

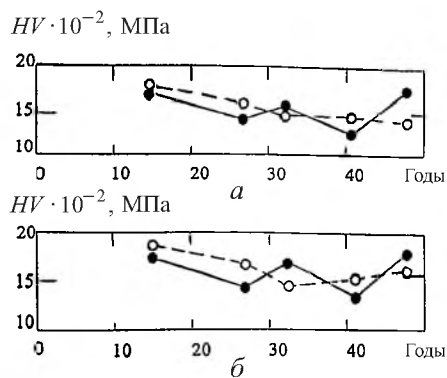


Рис. 2. Твердость металла в исходном состоянии (темные точки) и после соответствующей наработки (светлые точки). (Здесь и на рис. 3: *а* – металл наружных слоев; *б* – металлы внутренних слоев.)

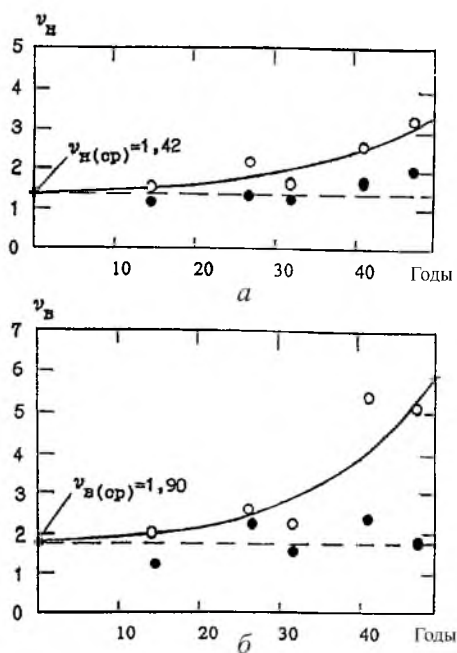


Рис. 3. Коэффициент вариации характеристик твердости металла в исходном состоянии (темные точки) и после соответствующей наработки (светлые точки). (Сплошные линии – аппроксимация опытных данных по уравнениям регрессий (3) и (3а).)

Коэффициенты вариации, определяемые по рассеянию характеристик твердости металла на различных стадиях эксплуатации рассматриваемого виртуального газопровода, хорошо аппроксимируются следующими уравнениями регрессии:

для металла наружных слоев

$$\nu_{\text{н}} = 1,42^{(0,1X^2+1)}; \quad (3)$$

для металла внутренних слоев

$$\nu_{\text{в}} = 1,9^{(0,07X^2+1)}. \quad (3a)$$

Различное увеличение коэффициентов $\nu_{\text{н}}$ и $\nu_{\text{в}}$ в процессе работы газопровода особенно заметно после 25 лет эксплуатации, когда деградация металла внутренних слоев происходит особенно интенсивно. Так, если за первые 25 лет работы коэффициенты $\nu_{\text{н}}$ и $\nu_{\text{в}}$ возросли соответственно с 1,14 до 1,63 и с 1,90 до 2,27, то за последующие 25 лет, судя по аппроксимирующим кривым, они достигнут значений 3,41 и 5,84. При этом коэффициент $\nu_{\text{в}}$ увеличивается значительно быстрее, чем коэффициент $\nu_{\text{н}}$.

Для иллюстрации характера изменения коэффициентов $\nu_{\text{в}}$ и $\nu_{\text{н}}$ на рис. 4 приведена кривая, характеризующая рост соотношения $\nu_{\text{в}}/\nu_{\text{н}}$ за весь период эксплуатации газопровода с прогнозом до 60 лет. Видно, что если поврежденность металла внутреннего слоя в исходном состоянии превышала поврежденность металла наружного слоя приблизительно на одну треть, то к 60 годам эксплуатации это превышение составит почти 100%.

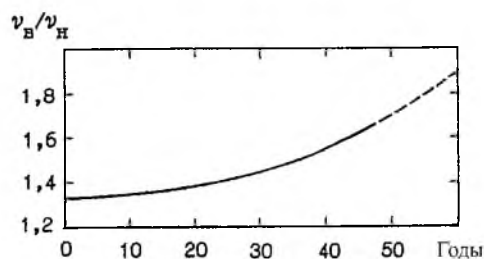


Рис. 4. Экспериментальное (сплошная линия) и прогнозируемое (штриховая линия) изменение соотношения между коэффициентами вариаций характеристик твердости металла внутренних и наружных слоев в процессе наработки.

Поврежденность металла наружных и внутренних слоев в оценке коэффициентами вариации за 60 лет эксплуатации увеличится в 3,5 и более чем в 5 раз соответственно, а абсолютные значения коэффициентов вариации достигнут $\nu_{\text{н}} = 5,02$ и $\nu_{\text{в}} = 9,58$.

Таким образом, полученные данные показывают, что по характеристикам твердости металла нельзя судить о его текущем состоянии и, следовательно, прогнозировать свойства металла трубы в процессе эксплуатации. Более представительными являются характеристики рассеяния свойств металла, в частности коэффициент вариации или коэффициент гомогенности по Вейбуллу. Применительно к диагностике металла трубопроводов без их разрушения наиболее приемлемыми будут характеристики рассеяния твердости.

Деградация свойств металла значительно интенсивнее происходит с внутренней стороны трубы. Поэтому необходимо разработать способы получения достоверной информации о состоянии металла труб именно в этой области.

В настоящее время большая часть линейных участков газопровода “Дашава–Киев” находится в эксплуатации около 55 лет. Как следует из приведенных данных, за это время поврежденность металла труб многократно увеличивалась. Это обстоятельство, а также повышение по мере наработки скорости роста поврежденности свидетельствуют о необходимости проведения срочных работ по тщательному диагностированию наиболее опасных линейных участков указанного газопровода и принятию эффективных мер по обеспечению его гарантированной надежности.

Резюме

За допомогою ЛМ-методу твердості оцінено деградацію структурного стану металу труб лінійних участків газопроводів після їх тривалої експлуатації. Показано, що метод дозволяє отримати результати, які необхідні для моніторингу експлуатаційної надійності газопроводів.

1. *Сосновский Л. А., Воробьев В. В.* Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 44 – 53.
2. *Дрозд М. С.* Определение механических свойств металла без разрушения. – М.: Металлургия, 1965. – 171 с.
3. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Изд-во методической литературы и наглядных пособий, 1996. – 140 с.
4. *Махутов Н. А., Зацаринный В. В., Базарас Ж. Л. и др.* Статистические закономерности малоциклового разрушения. – М.: Наука, 1989. – 253 с.
5. *Патент 52107А, МКИ7, G 01 N 3/00, G 01 N 3/40.* Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “ЛМ-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 16. 12. 02. Бюл. № 12.
6. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л.* Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
7. *Weibull W.* A statistical distribution function of wide applicability // J. Appl. Mech. – 1951. – **18**. – No. 3. – P. 293 – 297.
8. *Gumbel E. J.* Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. – Washington: National Bureau of Standards, 1954. – 472 p.

Поступила 11. 09. 2002