

УДК 66.094.29:621.643.053(476)

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ,
НАХОДЯЩИХСЯ В ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ****А.Н. ЯНУШОНОК***(Полоцкий государственный университет);**канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Республика Беларусь обладает развитой сетью магистральных трубопроводов. Срок эксплуатации большей части эксплуатируемых в Беларуси магистральных трубопроводов превышает проектный ресурс. Показана характерная особенность проявления старения трубных сталей – снижение ударной вязкости металла, определяющей сопротивление хрупкому разрушению. Приведены основные критерии надежности магистральных трубопроводов. Рассмотрены вопросы повышения надежности магистральных трубопроводов, проработавших длительное время, за счет восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений на основе использования оригинального метода неразрушающего контроля.

Введение. Республика Беларусь обладает развитой системой магистрального трубопроводного транспорта углеводородных энергоносителей. По магистральным нефтепроводам и нефтепродуктопроводам осуществляется снабжение углеводородным сырьем нефтеперерабатывающих заводов, расположенных в городах Новополоцк и Мозырь, реализовываются транзитные поставки в страны Европейского Союза и Украину. Общая протяжённость технических коридоров, в которых проложены магистральные трубопроводы, осуществляющие транспортировку нефти и нефтепродуктов, по территории Беларуси составляет 1231,5 км. В одностороннем исчислении их суммарная длина исчисляется 3613,5 км. Протяжённость разветвленной сети магистральных газопроводов составляет 7490 км, в том числе более 2500 км газопроводов большого диаметра, обеспечивающих непосредственно транзит природного газа в страны Европы. Характерной чертой эксплуатируемой системы транспорта углеводородов является ее прогрессирующее старение, так как большинство трубопроводов было построено в 60 – 80-е годы прошлого столетия. Около 80 % магистральных трубопроводов, транспортирующих жидкие углеводороды, и более 25 % магистральных газопроводов работают за пределами проектного ресурса. Еще приблизительно 25 % магистральных газопроводов вплотную подошли к данному возрасту. При этом часть магистральных трубопроводов построена в начале 60-х годов XX века, и срок их эксплуатации приближается к 50 годам. При этом обновление всей системы, в особенности линейной части магистральных трубопроводов Беларуси, требует значительных затрат и в настоящее время практически невозможно. В связи с этим встает актуальная задача обеспечения надежности линейной части магистральных трубопроводов при длительной их эксплуатации.

Задача обеспечения надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов – сложная и многофакторная. Основными факторами, определяющими сопротивление труб разрушению, являются: рабочее давление, температура, свойства перекачиваемого продукта, исходные свойства металла труб, качество проектных, строительного-монтажных и эксплуатационных работ, внешние воздействия, интенсивность деградации в результате старения. Результат воздействия комплекса данных факторов – это накопление повреждений, деградация свойств металла, коррозионные и эрозионные повреждения, что в итоге приводит конструкцию к предельному состоянию.

В качестве предельного состояния может быть принято как разрушение труб, так и недопустимые повреждения – уменьшение толщины стенки трубопровода и т.д.

Рассмотрим основные используемые критерии предельного состояния с точки зрения выбора и применения их для оценки надежности магистрального трубопровода.

В качестве основного критерия для магистральных трубопроводов традиционно используется критерий допускаемых напряжений или деформаций при статическом нагружении. В общем виде данный критерий может быть записан в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_s &\leq [\sigma]; \\ \varepsilon_s &\leq [\varepsilon],\end{aligned}\tag{1}$$

где σ_s – эффективное напряжение в стенке трубы, вычисленное по заданному критерию прочности; ε_s – эффективная деформация; $[\sigma]$ – максимально допустимое напряжение, заданное в форме, согласованной с выбранным критерием прочности; $[\varepsilon]$ – максимально допустимая деформация.

То есть условием разрушения труб является достижение напряжения или деформации критического уровня. При этом к сварным соединениям магистральных трубопроводов предъявляется требование равнопрочности с основным металлом. В действующих нормах [1] заложен метод предельных состояний, в соответствии с которым предусмотрено рассмотрение нескольких предельных состояний и введение системы дифференцированных коэффициентов запаса прочности. В качестве основного предельного состояния выбрано достижение нормальными напряжениями временного сопротивления разрыва металла трубопровода, а в качестве дополнительного условия требуется выполнение условия деформативности для нормативных кольцевых напряжений.

Условие прочности по критерию наибольших нормальных напряжений имеет вид:

$$\sigma_{ки} \leq R_1, \quad (2)$$

где R_1 – расчетное сопротивление растяжению (сжатию) материала труб.

А условие деформативности для нормальных кольцевых напряжений записывается как

$$\sigma_{ки} \leq R_2. \quad (3)$$

Здесь R_2 – условный нормативный предел текучести материала труб.

Данный подход также применяется при определении максимального статического рабочего давления на дефектных участках трубопровода после проведения диагностических обследований внутритрубными инспекционными снарядами, и используется в зарубежных нормативных документах [2]. Если учесть, что отказы и разрушения труб магистральных трубопроводов зачастую происходят в процессе пусковых испытаний и эксплуатации магистральных трубопроводов при напряжениях в металле труб, составляющих 0,5...0,6 минимального значения предела текучести σ_{02} [3, с. 112], то данный подход не может служить критерием обеспечения надежности трубопроводных конструкций. Кроме того исследователями Института проблем транспорта энергоресурсов, а также рядом других сделан вывод, что разрушение металла труб при статических нагрузках практически не чувствительно к дефектам, встречающимся на трубопроводах, а конструкционная надежность магистральных трубопроводов определяется сопротивляемостью металла труб хрупкому разрушению, которое возникает в результате усталости и деформационного старения трубной стали [4, с. 103].

Усталостный критерий предельного состояния при циклическом нагружении лимитирует количество циклов до разрушения и может быть записан в общем виде:

$$N \leq [N], \quad (4)$$

где N – число циклов или блоков квазициклического нагружения; $[N]$ – предельное число циклов по испытанию материала на усталость.

В соответствии с данным критерием возможна оценка долговечности в условиях циклического нагружения магистрального трубопровода. В то же время по данным [5] в изломах труб, разрушившихся в условиях эксплуатации от глубоких коррозионных повреждений, признаки усталости металла зачастую отсутствуют. Это говорит о том, что данный критерий также не всегда может быть использован для определения надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов.

Для оценки трещиностойкости применяют критерии линейной и нелинейной механики разрушения. В линейной механике разрушения используются силовые, энергетические и деформационные критерии. При этом наиболее часто используется силовой критерий, который может быть записан в виде:

$$K_{1c} \leq K_{1ck} \quad (5)$$

где K_{1c} – максимальный коэффициент интенсивности напряжений на фронте трещины нормального отрыва; K_{1ck} – критический коэффициент интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва в данном материале. Данные характеристики определяются при статическом или циклическом нагружении.

В нелинейной механике разрушения зачастую используют силовой подход П. Пэриса (6) и деформационный подход Махутова (7), которые оценивают количество циклов от момента зарождения трещины до момента, когда трещина станет сквозной. Данные зависимости связывают между собой скорость роста трещины $\frac{da}{dN}$ с размахом напряженно-деформированного состояния в вершине трещины за один цикл:

$$\frac{da}{dN} = C_o (\Delta K_{1o})^{n_o}; \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = C_e (\Delta K_{Ic})^{n_e}, \quad (7)$$

где C_e, n_e, C_e, n_e – параметры циклической трещиностойкости.

Существуют и другие эмпирические методы оценки надежности, учитывающие конкретные условия работы трубопровода [4; 7 – 10], однако они не учитывают полностью всё многообразие действующих факторов, и даже известные факторы оцениваются с высокой степенью погрешности.

Наиболее полной является гипотеза Л.А. Сосновского [6, с. 253], согласно которой энергетический критерий о предельном состоянии при комплексном повреждении может быть записан в следующем виде:

$$\Phi(U_{\sigma(ch)}^{eff}, U_{\tau(ch)}^{eff}, U_{T(ch)}^{eff}, \Lambda_{ij}, m_k, U_0) = 0. \quad (8)$$

Здесь $U_{\sigma(ch)}^{eff}, U_{\tau(ch)}^{eff}, U_{T(ch)}^{eff}$ – соответственно силовая, фрикционная и тепловая эффективная (затрачиваемая на повреждение) энергия; Λ_{ij} – параметры взаимодействия; m_k – некоторые характеристики свойств контактирующих материалов; U_0 – критическая величина эффективной энергии в некоторой области ограниченных размеров силовой системы (опасном объеме).

В соответствии с данным критерием возможна оценка предельного состояния и долговечности в условиях комплексного повреждения магистрального трубопровода, определяемого следующими явлениями: механической усталостью, трением и изнашиванием, тепловыми и электрохимическими (коррозионными) процессами. В данном случае эксплуатационная надежность труб определяется диалектическим взаимодействием необратимых повреждений, обусловленных комплексом нагрузок. В то же время экспериментальная проверка данного критерия затруднена из-за отсутствия опытных данных [6, с. 267].

Несмотря на значительный прогресс в механике разрушения и теории надежности, существующие подходы позволяют дать оценку надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов лишь приближенно, в связи с отсутствием однозначно верной прикладной методики, которая бы учитывала всё многообразие факторов. При этом даже известные факторы оцениваются с высокой степенью погрешности. Это связано со значительным рассеянием свойств металла в исходном состоянии, с рассеянием изменения параметров старения и т.д., а также со сложностью использования части предлагаемых критериев в реальной инженерной практике.

Нормативным показателем обеспечения надежности магистральных трубопроводов традиционно считается ударная вязкость [1]. Данный показатель широко используется в инженерной практике, определяется по результатам испытания стандартных образцов по ГОСТ 9454 [14] с U-, V- и T-образными надрезами и используется для выявления склонности металла к сопротивлению ударным воздействиям, в первую очередь к хрупкому разрушению.

Ударная вязкость – сложная, комплексная характеристика, зависящая от совокупности прочностных и пластических свойств материала, в настоящий момент является одним из важнейших критериев обеспечения нормальной (безаварийной) работы конструкций. С развитием механики повреждений идет поиск взаимосвязи между надежностью, трещиностойкостью и значениями ударной вязкости. Так, например, в работе [15] получена зависимость между ударной вязкостью образцов с V-образным надрезом и параметрами трещиностойкости для некоторых трубных сталей.

Длительная эксплуатация магистральных трубопроводов ведет к деградации трубной стали за счет процессов накопления необратимых повреждений и изменения структурного состояния. В структурно-неоднородных областях, таких как сварные соединения, деформационное старение протекает более интенсивно, создавая при этом дополнительные условия для охрупчивания металла труб в этих локальных областях [4, с. 133].

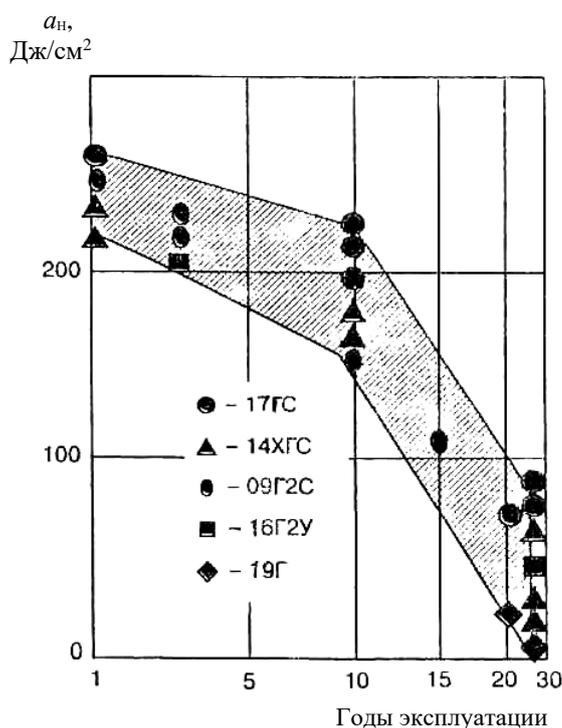
Если обобщить результаты многочисленных исследований по вопросу изменения структуры и свойств металла магистральных трубопроводов [3 – 5; 11 – 13 и др.], можно констатировать, что при длительных сроках эксплуатации (более 20 – 30 лет) происходит некоторое повышение прочностных свойств, снижение пластических свойств и коррозионной стойкости, а самое главное – смещение температуры вязко-хрупкого перехода в область положительных температур и значительное снижение ударной вязкости.

Качественные зависимости указанного снижения практически одинаковы для основных отечественных трубных сталей (стали 17ГС, 14ХГС, 09Г2С, 16Г2У, 19Г): через 30 лет эксплуатации ударная вязкость снижается в 3 – 5 раз. Так, например, для стали 17ГС – основной стали для большинства магистральных трубопроводов – наблюдается снижение с 260 до 80 – 90 Дж/см² (рисунок).

Из-за значительного снижения уровня ударной вязкости увеличивается потенциальная возможность возникновения и роста трещин, а следовательно, возрастает вероятность аварийного разрушения.

Это свидетельствует о необходимости периодического контроля и в случаях необходимости ремонта участков длительно эксплуатируемого магистрального трубопровода с недопустимо низкими значениями ударной вязкости, особенно кольцевых сварных соединений, отказы которых служат причиной множества аварий [16]. Таким образом, четко прослеживается взаимосвязь ударной вязкости с надежностью и безопасностью эксплуатации магистральных трубопроводов и очевидность разработки мероприятий по ее повышению, что весьма актуально (как показано выше) для всей системы магистральных трубопроводов с учетом их длительной эксплуатации.

Данные обстоятельства послужили предпосылкой для разработки эффективных мер по повышению надежности кольцевых сварных соединений длительно эксплуатируемых трубопроводов (в первую очередь за счет повышения ударной вязкости металла), а также неразрушающих методов оценки фактического состояния металла, его механических свойств и структуры с целью повышения надежности функционирования и продления ресурса безопасной эксплуатации всей трубопроводной системы.



Изменение ударной вязкости трубных сталей при эксплуатации газопроводов

Источник: [12].

В результате проведенных исследований определен режим восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, эксплуатируемых в течение длительного времени, приводящий к росту значений ударной вязкости до 50 % [17].

Также в связи с преобладанием на длительно эксплуатируемых трубопроводах повреждений коррозионного типа и снижения коррозионной стойкости металла труб до 7 % [13] проведены исследования влияния восстановительной термической обработки (по предложенному режиму) на изменение коррозионной стойкости металла кольцевых сварных соединений. В результате проведенных исследований выявлено, что термическая обработка на оптимальных режимах приводит к снижению скорости коррозии металла сварного соединения до 3,3 % [17].

При применении восстановительной термической обработки возникает проблема оценки эффективности восстановительной термической обработки. Судить об эффективности выполненной восстановительной термической обработки кольцевых сварных стыков магистральных трубопроводов только по результатам замера твердости переносными твердомерами (по показателю ее снижения) не совсем правильно, так как величина твердости связана с прочностью (а точнее сказать, лишь с временным сопротивлением) и не дает информации об изменении ударной вязкости. Вырезка образцов из стыков трубопроводов после термической обработки и оценка механических свойств на образцах, изготовленных из вырезки, вызывает необходимость последующего ремонта (заварки) места вырезки, оказывает

влияние на механические и эксплуатационные свойства области ремонта и прилегающих зон, что также нецелесообразно.

В результате экспериментальных исследований установлена зависимость между параметрами пирамидального отпечатка, полученного при определении твердости по Виккерсу стационарными или переносными твердомерами, и значениями ударной вязкости сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных трубных сталей (Сталь 20, 17ГС, 10Г2С1, 14ГН, 19Г, 14ХГС). Полученная зависимость может быть использована в основе неразрушающего способа определения механических характеристик (и в первую очередь ударной вязкости) расчетным путем при диагностировании технического состояния магистральных трубопроводов и контроле эффективности проводимой восстановительной термической обработки с погрешностью результата не более 13,1 % [17].

Экономическая оценка эффективности внедрения разработанного метода восстановительной термической обработки проводилась на основании сравнения двух возможных вариантов: 1 – затрат на производство ремонтных работ сварного соединения методом вырезки катушки и 2 – затрат на восстановление свойств сварного соединения с помощью восстановительной термической обработки. В зависимости от диаметра трубопровода и способа проведения работ по восстановительной термической обработке (собственными силами или силами подрядной организации) ожидаемый экономический эффект от внедрения способа в ценах июля 2011 года может составить от 0,28 до 3,2 миллионов белорусских рублей на один восстановленный стык [18].

Таким образом, предлагаемый способ повышения эксплуатационной надежности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, отработавших длительное время, путем проведения восстановительной термической обработки показывает потенциальную технико-экономическую эффективность своего применения и может быть внедрен в практику производства ремонтных работ.

В заключение проведенного исследования можно сделать **следующие выводы:**

- критерием, определяющим надежность длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов, является ударная вязкость металла кольцевых сварных соединений в связи с высокой долей их отказов вследствие развития хрупкого разрушения и недостаточной трещиностойкости металла кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов;

- решена задача повышения надежности эксплуатации магистральных трубопроводов, выработавших нормативный срок службы, за счет восстановления механических свойств кольцевых сварных соединений (в первую очередь ударной вязкости) восстановительной термической обработкой на основании применения оригинального способа неразрушающего контроля (определение ударной вязкости по параметрам отпечатка пирамидального индентора). Решение данной задачи позволяет снизить вероятность возникновения хрупкого разрушения, отказаться от преждевременной замены выработавших свой ресурс по критерию ударной вязкости кольцевых сварных соединений и тем самым сэкономить за счет продления срока эксплуатации денежные средства в размере до 3,2 млн. рублей на один восстановленный стык.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85. – Введ. 01.01.86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 50 с.
2. ANSI/ASME B31G-2009 / Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines / Battelle Memorial Inst. // ASME, New York.
3. Харионовский, В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов / В.В. Харионовский. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. – 467 с.
4. Дефектность труб нефтепроводов и методы их ремонта / А.Г. Гумеров [и др.], под ред. А.Г. Гумерова. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998. – 252 с.
5. Черняев, К.В. Научно-технические проблемы обеспечения высокой надежности трубопроводного транспорта нефти на современном этапе / К.В. Черняев // Трубопроводный транспорт нефти. – 1997. – № 9. – С. 40 – 42.
6. Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения: моногр. / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
7. Шарнина, Г.С. Определение остаточного ресурса нефтепроводов с дефектами на основе анализа режима нагружения и принципа линейного накопления дефектов / Г.С. Шарнина, В.А. Буренин, С.К. Рафиков // Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ: сб. науч. тр.; ред. кол.: А.Г. Гумеров [и др.]. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2002. – С. 210 – 217.
8. Сосновский, Л.А. Живучесть линейной части нефтепровода / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, А.М. Бордовский. – Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 2004. – 112 с.

9. Воробьев, В.В. Особенности эксплуатационной надежности и повреждения линейных участков нефтепровода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / В.В. Воробьев; БелГУТ. – Гомель, 2002. – 20 с.
10. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений: ОСТ 153-39.4-010-2002. – М., 2002. – 58 с.
11. Современные испытания на ударный изгиб и их роль в оценке трещиностойкости магистральных трубопроводов / П.П. Пётух [и др.]. // Вести Нац. акад. наук Беларуси. – 2003. – № 2. – С. 38 – 42.
12. Иванцов, О.М. Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России / О.М. Иванцов // Трубопроводный транспорт. – 1997. – № 10. – С. 26 – 31.
13. Гумерова, Л.Р. Совершенствование методов снижения аварийности длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Л.Р. Гумерова; ГУП «ИПТЭР». – Уфа, 2012. – 27 с.
14. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454. – Введ. 01.01.79. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 15 с.
15. Айнабеков, А.И. Исследование зависимости между трещиностойкостью и ударной вязкостью конструкционных трубных сталей / А.И. Айнабеков, У.С. Сулейменов, А.А. Джумабаев // Хабаршысы Вестник. – 2009. – № 3(58). – С. 140 – 143.
16. Липский, В.К. Методика восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов, основанная на неразрушающей оценке фактического уровня механических свойств металла / В.К. Липский, А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2006. – № 12. – С. 93 – 96.
17. Янушонок, А.Н. Способ повышения надежности кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов при длительной эксплуатации / А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 95 – 103.
18. Янушонок, А.Н. Оценка экономической эффективности восстановительной термической обработки сварных кольцевых соединений магистральных трубопроводов, проработавших длительное время / А.Н. Янушонок, В.Н. Стахейко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Д. Экономические и юридические науки. – 2012. – № 6. – С. 95 – 102.

Поступила 05.12.2013

ENSURING THE RELIABILITY OF MAIN PIPELINES WHICH ARE IN LONG-TERM OPERATION

A. YANUSHONOK, A. SNARSKIY

Republic of Belarus has a developed network of main pipelines. Lifetime of the most operated main pipelines in Belarus exceeds design resource. A characteristic feature of the effects of aging is the reduction of pipe steels toughness metal defining resistance to brittle fracture. The article presents the basic criteria of reliability of main pipelines. The problems of improving the reliability of main pipelines, which have worked for a long time, by the reduction of heat treatment of circular welded joints on the basis of non-destructive inspection method are investigated.