

УДК 66.094.29:621.643.053(476)

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.Н. ЯНУШОНОК

(Полоцкий государственный университет);

канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлены результаты исследования технического состояния магистральных трубопроводов, эксплуатируемых свыше 40 лет. Рассмотрены вопросы повышения надежности магистральных трубопроводов, длительное время используемых в работе, за счет восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений. Проведена оценка эффективности применения разрушающего метода контроля механических свойств металла непосредственно на магистральном трубопроводе (после проведения термической обработки на заданных режимах).

Введение. Республика Беларусь обладает уникальной системой магистральных трубопроводов для транспортировки природного газа, нефти и нефтепродуктов. Общая протяженность технических коридоров, в которых проложены магистральные нефтепроводы и магистральные нефтепродуктопроводы по территории Беларуси, составляет 1231,5 км, а суммарная длина проложенных в этих коридорах трубопроводов в одноконтурном исчислении – 3613,5 км; протяженность разветвленной сети магистральных газопроводов – 7490 км, в том числе более 2500 км газопроводов большого диаметра, обеспечивающих непосредственно транзит природного газа в страны Европы. Особенностью эксплуатируемой системы транспорта углеводородов является срок ее эксплуатации, так как большинство трубопроводов было построено в 1960 – 1980-е годы. В связи с этим имеет место прогрессирующее старение эксплуатируемой системы транспорта углеводородов. Около 80 % магистральных трубопроводов, транспортирующих жидкие углеводороды, и более 25 % магистральных газопроводов выработали свой срок эксплуатации. Приблизительно 25 % магистральных газопроводов вплотную подошли к данному возрасту.

Большинство эксплуатирующихся в настоящее время на территории Республики Беларусь магистральных трубопроводов входят в период, когда возрастает интенсивность отказов и аварий, так как по мере увеличения возраста трубопроводов усиливается тенденция к снижению их надежности и, следовательно, повышению вероятности возникновения аварий [1 – 3]. Указанное обстоятельство в значительной мере обусловлено процессами старения, происходящими в металле.

Анализ материального исполнения магистральных трубопроводов, проложенных по территории Беларуси, показывает, что большинство из них изготовлено из низколегированных кремнемарганцевых сталей (чаще всего это стали 17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У, 10Г2С1, 14ГН, 14ХГС, 09Г2С, 19Г). Характерной особенностью проявления старения трубных сталей является снижение ударной вязкости металла, при этом качественные зависимости данного 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 (например, для стали 17ГС – основной стали для большинства магистральных трубопроводов – наблюдается снижение с 260 до 80...90 Дж/см² [1], что проиллюстрировано рисунком 1).

Обобщая результаты исследований по вопросу изменения структуры и свойств металла магистральных трубопроводов, можно констатировать, что при длительных сроках эксплуатации (наиболее четко и устойчиво деградационные процессы проявляются в металле после эксплуатации 30 и более лет) происходит снижение пластических, некоторое повышение прочностных свойств, а главное – значительное снижение ударной вязкости и хладостойкости. При этом указанные изменения

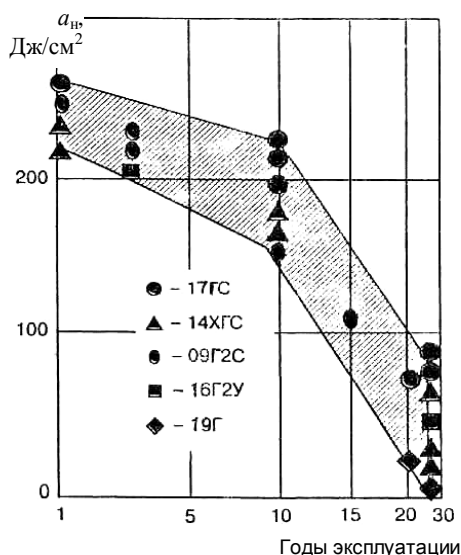


Рис. 1. Изменение ударной вязкости трубных сталей при эксплуатации газопроводов [1]

наиболее существенны для металла сварных соединений. Из-за значительного снижения уровня ударной вязкости увеличивается потенциальная возможность возникновения и роста трещин, а следовательно, возрастает вероятность аварийного разрушения.

В настоящее время основными мероприятиями по поддержанию прочностной надежности магистральных трубопроводов являются испытания повышенным давлением, выборочный ремонт по результатам диагностики внутритрубными инспекционными снарядами и замена существующих трубопроводов. Гидростатические испытания повышенным давлением позволяют не только выявить различные дефекты труб, но и частично восстановить прочностные свойства [4].

Каждый из перечисленных методов, несмотря на достаточно высокую эффективность, имеет также и существенные недостатки: не выявляются короткие, но глубокие коррозионные повреждения, которые могут привести к возникновению утечки; ряд дефектов, состояние которых во время испытаний было близко к разрыву, продолжают свой рост после стабилизации давления и могут проявиться при эксплуатации даже при невысоких давлениях; пластические деформации вследствие высоких напряжений в металле труб ведут к его охрупчиванию; необходимость остановки трубопровода для проведения испытаний; загрязнение окружающей среды.

Применение технологий выборочного ремонта по результатам диагностики внутритрубными инспекционными снарядами позволяет восстановить надежность участков с выявленными опасными повреждениями. Однако используемые в настоящее время внутритрубные инспекционные снаряды не позволяют обнаружить все опасные дефекты, и в первую очередь в сварных соединениях, отчеты по диагностическому обследованию содержат ошибки в части описания геометрических размеров, не все дефекты, зарегистрированные дефектоскопами, отражаются в заключительном отчете [5]. Кроме того, данный подход не позволяет выявить и восстановить участки с низким уровнем механических свойств.

Тотальная замена линейной части требует значительных капиталовложений и в связи с возможностью продолжения работы существующих магистральных трубопроводов не всегда целесообразна.

Учитывая эти обстоятельства, можно сформулировать актуальную задачу для системы магистральных трубопроводов – *разработка и внедрение новых эффективных мероприятий по повышению надежности длительно эксплуатируемых трубопроводов, 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.*

Восстановление механических и эксплуатационных свойств основного металла труб и металла сварных соединений возможно за счет проведения специальной термической обработки. В Полоцком государственном университете проведены экспериментальные исследования с целью оценки текущего технического состояния магистральных трубопроводов на примере магистральных нефтепродуктопроводов «Брянск – Дисна» и «Стальной Конь – Запад» ЧУП «Запад-Транснефтепродукт», эксплуатируемых 44 года, и определения оптимальных условий восстановления эксплуатационных свойств кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, находившихся в эксплуатации длительное время.

Оценка технического состояния проводилась на основании анализа опасности повреждений и дефектов магистральных трубопроводов, обнаруженных по результатам диагностического обследования внутритрубными инспекционными снарядами и исследования химического состава, механических свойств и микроструктуры как основного металла труб, так и их сварных соединений [6]. Анализ данных внутритрубной диагностики показал, что около 99,8 % выявленных повреждений составляют повреждения коррозионного типа. Из них более 80 % имеют малые геометрические размеры – менее 20 % от толщины стенки трубопровода – и не представляют опасности. По оставшимся дефектам и повреждениям на основании прочностных расчетов определена степень опасности.

Для проведения исследований служебных свойств, химического состава и микроструктуры из эксплуатируемых в течение 44 лет магистральных нефтепродуктопроводов были отобраны 16 темплетов как дефектных, вырезанных при проведении плановых ремонтных работ, так и бездефектных, вырезанных специально для проведения исследования. Каждая контрольная вырезка магистрального трубопровода имела кольцевой сварной стык. Испытания на статическое растяжение плоских образцов без головок сварных соединений и основного металла труб проводились согласно ГОСТ 6996 [7]. Определялся угол изгиба сварных соединений при испытании на статический изгиб согласно требованиям ГОСТ 6996 [7]. Контроль указанных механических характеристик проводился с помощью разрывной машины для статических испытаний Р-20. Для проведения испытаний на ударный изгиб вдоль оси трубопровода были вырезаны плоские образцы размером 5×20×120 мм в соответствии с ГОСТ 6996 [7]. Исследования характеристик сопротивления хрупкому разрушению основного металла и сварных соединений проводились на образцах с U-образным и V-образным надрезом при помощи маятникового копра МК-30А согласно ГОСТ 9454 [8], ГОСТ 6996 [7]. Также проводилось измерение твердости с помощью стационарного твердомера ТК-2 и исследования микроструктуры на оптическом микроскопе «Neophot-21» при увеличениях 100^x, 400^x, 1000^x. Определение химического состава осуществлялось при помощи атомно-эмиссионного фотоэлектрического многоканального спектрометра ЭМАС-200ССД, который на основании анализа эмиссионных спектров позволяет определять химический состав металла с относительной погрешностью измерения концентрации не более 5 %.

В результате проведенных экспериментальных исследований выявлено, что показатели предела прочности, предела текучести, ударной вязкости, угла загиба, твердости и относительного удлинения в основном соответствуют значениям, установленным требованиями технических нормативных правовых актов (за исключением отдельных локальных участков). Кольцевые сварные соединения магистральных трубопроводов имеют более низкие механические характеристики по сравнению с основным металлом. Показатели предела прочности сварных соединений на 25 % ниже, чем у основного металла. Значения ударной вязкости имеют значительный разброс, тем не менее систематически и значительно ниже (в 1,5...2 раза) показателей основного металла [6]. В то же время низкие значения ударной вязкости металла сварных соединений в сочетании с существующими дефектами являются основной причиной возникновения аварийных ситуаций на линейной части магистральных трубопроводов Республики Беларусь [3].

Таким образом, проведенные нами исследования подтвердили необходимость разработки способа повышения надежности кольцевых сварных соединений труб за счет восстановления ударной вязкости.

На основании обзора литературных источников выявлено, что наиболее перспективным способом восстановительной термической обработки является *высокий отпуск*. Для определения оптимальных параметров (время и температура) восстановления ударной вязкости основного металла и сварных соединений магистральных трубопроводов, подвергшихся длительной эксплуатации, изготавливались образцы (размером 55×10×2 мм), которые подвергались термической обработке отдельными партиями при температуре 580, 630, 680 и 730 °С в течение 15, 30 и 60 мин, после чего образцы остывали на спокойном воздухе. Исследования характеристик сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений проводились на образцах с U-образным надрезом при помощи маятникового копра МК-30А согласно ГОСТ 9454 [8] и ГОСТ 6996 [7]. На рисунке 2 представлена зависимость изменения значений ударной вязкости сварного соединения при высоком отпуске в зависимости от температуры и времени термической обработки.

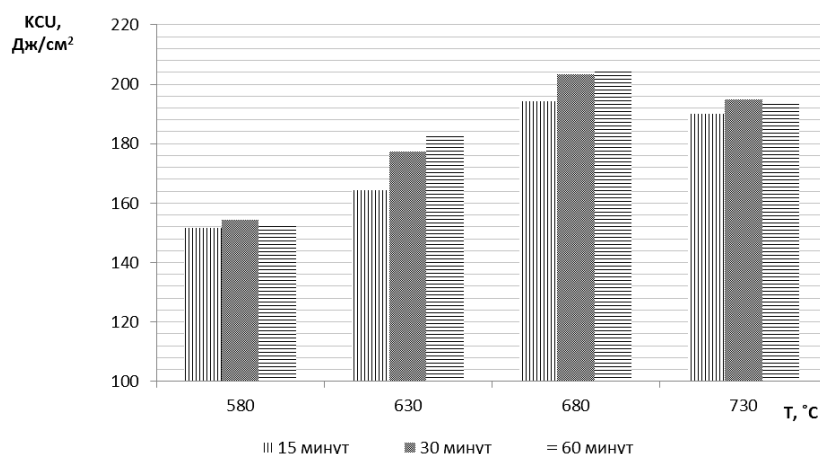


Рис. 2. Изменение значений ударной вязкости сварного соединения при высоком отпуске

Как видно из представленной диаграммы, время выдержки не значительно влияет на повышение ударной вязкости. В целом с увеличением продолжительности термической обработки наблюдается увеличение ударной вязкости сварного соединения. Наиболее существенный прирост происходит при увеличении времени выдержки с 15 до 30 мин. Дальнейшее увеличение до 60 мин при росте энергозатрат на проведение восстановительной термической обработки приводит к меньшему росту ударной вязкости, а в некоторых случаях и к незначительному снижению по сравнению с 30-минутной обработкой, которое можно объяснить неоднородностью свойств сварного соединения и, соответственно, значительным интервалом разброса вязких свойств вдоль шва. Постепенное увеличение температуры ведет к более интенсивному повышению значений ударной вязкости по сравнению с увеличением времени выдержки и достигает своего максимума при температуре 680 °С. Дальнейшее повышение температуры до 730 °С приводит к ее снижению. Таким образом, оптимальным режимом термической обработки сварных соединений магистральных трубопроводов после длительной эксплуатации является высокий отпуск с выдержкой в течение 30 мин при температуре 680 °С, при котором происходит наиболее значительное увеличение ударной вязкости.

При проведении высокого отпуска помимо повышения значений ударной вязкости ожидалось снижение значений предела прочности и твердости металла. В связи с этим проведены испытания на статическое растяжение плоских образцов сварных соединений до и после проведения восстановительной обработки в соответствии с ГОСТ 6996 [7]. Вместе с испытаниями на прочность также проводился контроль твердости и металлографические исследования. В таблице 1 представлены некоторые типичные

результаты изменения механических свойств сварных соединений после высокого отпуска по предложенному оптимальному режиму.

Таблица 1

Изменение твердости и предела прочности сварных соединений труб магистральных трубопроводов

№	Режим термообработки		σ_b , МПа		Твердость (сварной шов/ЗТВ), НВ	
	температура, °С	время выдержки, мин	до термообработки	после термообработки	до термообработки	после термообработки
1	680	15	495	450	157 / 146	153 / 144
2	680	30	467	447	168 / 177	156 / 166
3	680	60	530	521,5	175 / 173	160 / 156

Как видно из представленной таблицы, после высокого отпуска образцов сварных соединений труб магистральных трубопроводов, находящихся в эксплуатации длительное время, происходит незначительное снижение значений твердости и предела прочности. Изменение значений предела прочности при этом невелико и может не учитываться в прочностных расчетах. Таким образом, полученные результаты соответствуют ожидаемым. Эффективность термической обработки основного металла труб по предложенному оптимальному режиму немного меньше по сравнению с термической обработкой сварных соединений (прирост ударной вязкости составил 50...55 % для сварных соединений и 35...45 % для основного металла). Одна из вероятных причин – меньшие внутренние напряжения в основном металле труб по сравнению с металлом сварных соединений.

Исследования микроструктуры методом световой микроскопии с увеличениями 100^x, 400^x и 1000^x выявили отсутствие изменений размера зерна основного металла после проведения высокого отпуска. Структуры корневого и заполняющих слоев кольцевого сварного соединения в процессе сварки подвергаются рекристаллизации и имеют структуру, близкую к равноосной, которая практически не изменяется при высоком отпуске. На участке зоны термического влияния, подвергшемся в процессе сварки нормализации, значительных изменений после термической обработки в геометрии структурных составляющих не наблюдается. Особенности кристаллизации облицовочного слоя сварного шва приводят к образованию дендритной структуры наплавленного металла, обладающей относительно низкими механическими свойствами. В результате термической обработки в этой области протекают процессы дробления дендритов и образования более энергетически выгодной и обладающей более высоким комплексом механических свойств ферритно-перлитной структуры. Зоны термического влияния основного металла представляют собой узкий участок перегрева (видманштеттова структура), переходящий в участок нормализации. Феррит и цементит на участке перегрева образует длинные пластины (иглы). Данные структуры обладают низкими пластическими и вязкими свойствами, т.е. склонны к хрупкому разрушению. Под воздействием высокой температуры наблюдается исправление этой структуры (закругление игл), что приводит к возрастанию ударной вязкости. На рисунке 3 представлены типичные изменения микроструктуры в результате высокого отпуска (с температуры 680 °С после выдержки в течение 30 мин) в зоне термической обработки на примере видманштетговой структуры, образовавшейся в зоне термического влияния сварного соединения.

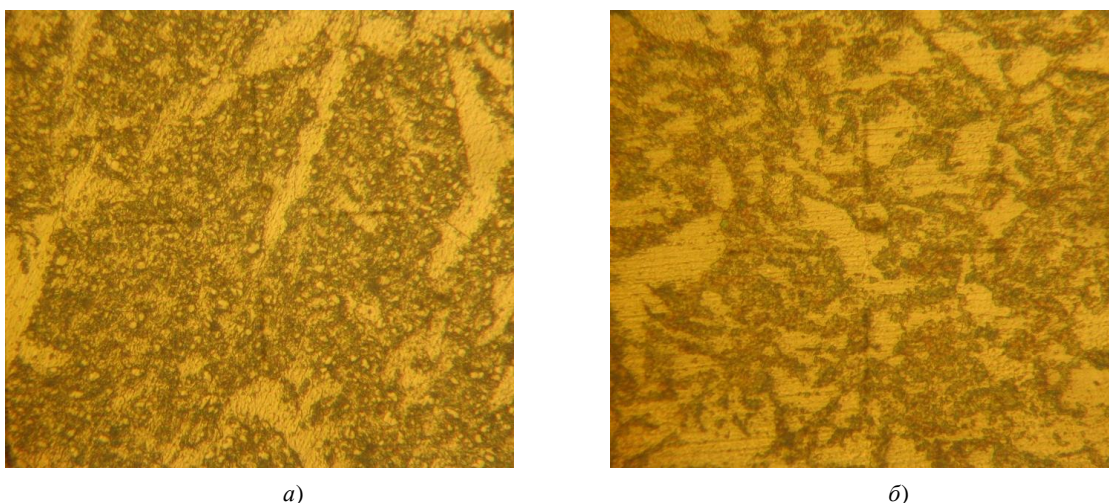


Рис. 3. Видманштеттова структура зоны термического влияния кольцевого сварного соединения, 400^x: а – до термической обработки; б – после термической обработки

Снятие напряжений в основном металле и сварных соединениях, а также структурные изменения подтверждаются изменением микротвердости. В таблице 2 представлены типичные значения микротвердости сварного соединения магистрального трубопровода, претерпевшего длительную эксплуатацию, до и после термической обработки (восстановительного высокого отпуска).

Таблица 2

Микротвердость сварного соединения магистрального трубопровода до и после восстановительного высокого отпуска (680 °С с выдержкой в течение 30 мин)

Зона сварного соединения	Нц, МПа	
	исходное состояние	после высокого отпуска
Основной металл	1600...1800	1400...1500
Облицовочный слой	2300...2400	1800...2000
Корневой и заполняющие слои	1700...1900	1500...1600
Зона термического влияния (видманштеттова структура)	1900...2000	1600...1800
Участок нормализации по зоне термического влияния	1000...1200	1000...1100

Как видно из таблицы, термическая обработка сварного соединения при 680 °С приводит к снижению значений твердости в среднем на 300 МПа. Наиболее сильно снижается твердость в зоне столбчатых кристаллов облицовочного слоя. Таким образом, изменения механических характеристик подтверждаются соответствующими изменениями в микроструктуре металла сварного соединения.

В связи с преобладанием на длительно эксплуатируемых трубопроводах повреждений коррозионного типа проведены исследования влияния восстановительного высокого отпуска (по предложенному оптимальному режиму) на изменение коррозионной стойкости металла кольцевых сварных соединений. Определение склонности к коррозии проводилось на образцах трубного материала, вырезанных из магистрального нефтепродуктопровода, эксплуатируемого в течение 44 лет. Для этого производилась разделка поперечных сварных соединений при помощи шлифовальной машинки с отрезным кругом. На каждом стыковом сварном соединении вырезались непосредственно сам сварной шов, околошовная зона (зона термического влияния) и участок основного металла трубы. Последующая механическая обработка на фрезерном станке и шлифовка наждачной бумагой с мелким зерном позволила удалить зону нагрева, образовавшуюся при резке стыкового соединения трубопровода, и получить образцы (рис. 4) единого размера с длиной по окружности трубопровода 175 мм и шириной 10 мм.



Рис. 4. Образец для испытаний на коррозионную стойкость (натуральная величина)

Толщина образца определялась толщиной стенки трубопровода, несколько уменьшенной за счет удаления слоя, подвергшегося коррозии за время эксплуатации. При этом половина вырезанных образцов подвергалась высокому отпуску при температуре 680 °С с выдержкой в течение 30 мин.

Полноценное моделирование условий протекания коррозионных процессов в магистральных трубопроводах затруднено ввиду необходимости создания высоких давлений и скоростей движения коррозионной среды для определения скорости внутренней коррозии и значительного различия свойств почвенного электролита при моделировании внешней коррозии. В связи с этим был выбран упрощенный метод испытания: полное погружение образцов в коррозионную среду (неэлектролит) в открытом сосуде при комнатной температуре без перемешивания коррозионной среды. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.905 [9] и ГОСТ 9.908 [10]. В качестве показателя коррозии использовался наиболее простой и надежный метод изменения массы, непосредственно указывающий количество металла, разрушенного коррозией. Определение потерь массы осуществлялось взвешиванием образцов на аналитических весах с точностью до 0,0001 грамма.

В результате проведенных исследований выявлено, что термическая обработка на оптимальных режимах приводит к снижению скорости коррозии металла сварного соединения до 3,3 % [11]. При этом наиболее существенное снижение наблюдалось для зоны термического влияния (3...3,3 %), менее значительное – для сварного шва (2...3 %) и наименее заметное – для основного металла трубопровода (0,4...0,9 %). Данная тенденция хорошо коррелирует с изменениями в микроструктуре сварного соединения, где также наиболее заметные изменения в результате термической обработки наблюдаются в зоне термического влияния (видманштеттова структура) и зоне столбчатых кристаллов в облицовочном слое.

Вышеизложенное позволяет рекомендовать проведение высокого отпуска с целью повышения эксплуатационных свойств (ударной вязкости и коррозионной стойкости) материала сварных соединений длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов.

При применении восстановительной термической обработки возникает также проблема разработки именно неразрушающего метода оценки эффективности восстановительной термической обработки с целью выявления возможности внедрения разрабатываемого метода в практике ремонта линейной части магистральных трубопроводов. 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, 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.

Практическое применение могут иметь методы, основанные на использовании взаимосвязи ударной вязкости со значениями свойств материала, определение которых возможно неразрушающими методами, например, при измерении твердости. Существование корреляционной взаимосвязи между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками обосновывается в работах [12; 13].

В результате исследования более пяти тысяч образцов разработан способ определения ударной вязкости стальных изделий в зависимости от относительного сужения по математической зависимости. Согласно данному методу ударную вязкость определяют по формуле, связывающей ударную вязкость и относительное сужение материала [13]. В то же время данный метод не является неразрушающим, так как величина относительного сужения определяется в результате испытаний стандартных образцов на растяжение с помощью разрывной машины. При этом требуемые размеры образцов таковы, что отбор материала из магистрального трубопровода будет невозможен без вырезки образцов и последующего ремонта.

Более совершенным является способ определения ударной вязкости неразрушающим методом [14].

Сущность способа состоит в том, что ударную вязкость определяют в зависимости от относительного сужения материала по формуле:

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

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 [15], полученного после вдавливания в материал пирамидального индентора с углом между противоположными гранями 136° при фиксированной нагрузке, по формуле [15]:

$$\psi = \frac{16,4 + 80 \cdot k \cdot S}{100}, \quad (2)$$

где ψ – относительное сужение, отн. ед.; S – ширина отпечатка, мм; k – коэффициент кратности, имеющий значения: $k = 1$ при нагрузке 1000 Н; $k = 1,414$ при нагрузке 500 Н; $k = 1,825$ при нагрузке 300 Н; $k = 2,235$ при нагрузке 200 Н; $k = 3,161$ при нагрузке 100 Н; $k = 4,472$ при нагрузке 50 Н.

Отличием данного способа 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 позволило отказаться от вырезки образцов из диагностируемой конструкции и обеспечило возможность определения ударной вязкости неразрушающим способом.

Для осуществления проверки возможности применения указанного выше способа из кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов готовились макрошлифы, на которых определяли параметры отпечатка после вдавливания пирамидального индентора. В данных исследованиях использовали твердомер WPM. Нагрузка на индентор твердомера составляла 200 Н. Правомерность определения ударной вязкости по параметрам отпечатка индентора при других нагрузках (50 Н, 100 Н, 300 Н, 500 Н, 1000 Н) обусловлена геометрическим подобием отпечатков, полученных на материале алмазной пирамидой с углом между противоположными гранями 136°. Для данного вида инденторов существует полное геометрическое подобие отпечатков и значений твердости независимо от применяемой нагрузки [16]. В связи с этим результаты, полученные при нагрузке 200 Н, можно распространить на весь приведенный ряд нагрузок (с учетом того, что широко применяемые переносные твердомеры, определяющие твердость по Виккерсу непосредственно на конструкции, работают при нагрузке 50 Н).

Измерение размеров отпечатков производилось с помощью окуляра-микрометра микротвердомера ПМТ-3. После этого изготавливали образцы для испытаний на ударную вязкость и проводили испытания по стандартной методике согласно ГОСТ 9454 [8]. Затем сравнивались значения, полученные разрушающим и неразрушающим методами. Типичные расчетные и экспериментальные значения ударной вязкости представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения ударной вязкости, определенные разрушающим и неразрушающим методами

№ образца	1	2	3	4	5	1'	2'	3'	4'	5'
КСУ, МДж/м ² (неразрушающий предлагаемый метод)	0,65	0,88	0,66	0,85	1,24	0,93	1,26	0,86	1,27	1,7
КСУ, МДж/м ² (разрушающий метод ГОСТ 9454 [8])	0,66	0,95	0,69	0,91	1,37	0,98	1,45	0,88	1,43	1,95
Погрешность, %	1,5	7,4	4,3	6,6	9,5	5,1	13,1	2,3	11,2	12,8
Образцы 1...5 – без восстановительной термической обработки; образцы 1'...5' – после проведения восстановительной термической обработки.										

Из таблицы 3 видно, что минимальная и максимальная погрешности определения ударной вязкости составляют 1,5 и 13,1 % соответственно. Учитывая высокий уровень рассеивания ее значений для сварных соединений, это является приемлемым результатом. При этом значения на всех образцах ниже соответствующих им значений, определенных разрушающим методом по ГОСТ 9454 [8]. Это позволяет говорить о некотором коэффициенте запаса ударной вязкости, и данное обстоятельство положительно влияет на надежность эксплуатации магистрального трубопровода при определении ударной вязкости металла магистральных трубопроводов по предложенному способу.

Очевидно, что внедрение любых научно-исследовательских разработок в производство возможно только в случае его экономической целесообразности.

Экономическая оценка эффективности внедрения разработанного метода восстановительной термической обработки проводилась на основании сравнения затрат на производство ремонтных работ сварного соединения методом вырезки катушки и затрат на восстановление свойств сварного соединения с помощью восстановительной термической обработки. В стоимость работ по обоим вариантам входят затраты на материалы, их транспортировку и хранение, заработная плата рабочих, затраты на эксплуатацию строительных машин и механизмов, накладные расходы и плановые накопления. Для определения затрат составлялся перечень необходимых работ и материальных ресурсов, на основании которого, используя сборники цен на материалы и сборники ресурсно-сметных норм на производство строительно-монтажных работ, определялась сметная стоимость работ. Объем затрат определялся в базисных ценах 2006 года и пересчитывался в текущие цены. 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 282 370 до 3 227 525 белорусских рублей на один восстановленный стык [17].

Таким образом, предлагаемый способ восстановления 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.

Заключение. В результате проведенного исследования *выявлены* особенности технического состояния магистральных трубопроводов, эксплуатируемых в течение 30...40 лет в условиях Республики Беларусь (на примере МНПП «Брянск – Дисна» и «Стальной Конь – Запад»). Экспериментально *установлено*, что химический состав и механические свойства металла труб и кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов после длительной эксплуатации в основном (за исключением отдельных локальных участков) соответствуют значениям, установленным требованиями технических нормативных правовых актов. Кольцевые сварные соединения магистральных трубопроводов имеют более низкие механические характеристики по сравнению с основным металлом: показатели предела прочности и предела текучести до 25 % ниже, чем у основного металла; значения ударной вязкости имеют значительный разброс, тем не менее систематически и значительно ниже (в 1,5...2 раза) показателей основного металла. При этом, несмотря на преобладание коррозионных повреждений (более 99 % от всех обнаруживаемых дефектов и повреждений), для длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов основной причиной возникновения аварий является разрушение сварного соединения.

Решена задача повышения надежности эксплуатации выработавших нормативный срок службы магистральных трубопроводов за счет восстановления механических свойств кольцевых сварных соединений восстановительной термической обработкой благодаря применению оригинального способа неразрушающего контроля (определение ударной вязкости по параметрам отпечатка пирамидального индентора). Это 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.

Экспериментально *установлен оптимальный режим* восстановительной термической обработки кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов, эксплуатируемых длительное время, по критерию прироста ударной вязкости, характеризующей уровень надежности сварного соединения магистрального трубопровода. Высокий отпуск при 680 °С с выдержкой в течение 30 мин, приводит к росту значений ударной вязкости до 50 % и незначительному снижению предела текучести и предела прочности, которое может не учитываться при проведении прочностных расчетов. Предложенная восстановительная термическая обработка на оптимальных режимах повышает также коррозионную стойкость основного металла, сварного шва и зоны термического влияния сварных соединений магистральных трубопроводов. При этом наиболее существенное снижение скорости коррозии наблюдается для зоны термического влияния (3...3,3 %), менее значительное – для сварного шва (2...3 %) и минимальное – для основного металла трубопровода (0,4...0,9 %).

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 при диагностировании технического состояния магистральных трубопроводов и контроле эффективности проводимой восстановительной термической обработки с погрешностью результата не более 13,1 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванцов, О.М. Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России / О.М. Иванцов // Трубопроводный транспорт. – 1997. – № 10. – С. 26 – 31.
2. Технические и ландшафтные характеристики магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов Беларуси / В.К. Липский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 140 – 142.
3. 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.
4. Бордовский, А.М. Метод частичного восстановления прочностной надежности труб нефтепровода / А.М. Бордовский // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тез. докл. IV междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 20 – 24 окт. 2003 г.; УО «ПГУ»; редкол.: В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2003. – С. 18 – 19.
5. Прохоренко, А.А. Оценка достоверности отчетов и некоторые особенности выявления отдельных видов дефектов внутритрубными дефектоскопами / А.А. Прохоренко // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тез. докл. VII междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 22 – 25 ноябр. 2011 г.; УО «ПГУ»; редкол.: В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2011. – С. 151 – 152.

6. Оценка фактического состояния металла магистральных трубопроводов / А.Н. Янушонок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 128 – 132.
7. Сварные соединения. Методы определения механических свойств: ГОСТ 6996. – Введ. 01.01.67. – М.: Изд-во стандартов, 1966. – 45 с.
8. 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.
9. Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования: ГОСТ 9.905-1982. – Введ. 01.07.83. – М.: Изд-во стандартов, 1982 – 5 с.
10. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости: ГОСТ 9.908. – Введ. 01.01.87. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 17 с.
11. Янушонок, А.Н. Изменение коррозионной стойкости участков сварных соединений магистральных трубопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию, под влиянием высокотемпературного отпуска // А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 6. – С. 95 – 102.
12. Хлопотов, О.Д. О возможности существования взаимосвязей механических характеристик / О.Д. Хлопотов // Заводская лаборатория. – 1973. – № 6, Т. 39. – С. 740 – 741.
13. Хлопотов, О.Д. Связь между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками / О.Д. Хлопотов // Проблемы прочности. – 1971. – № 9. – С. 34 – 38.
14. Способ определения ударной вязкости стальных изделий: заявка № а20050386 на получение патента Респ. Беларусь / А.С. Снарский, Ф.И. Пантелеенко, А.В. Крыленко; заявитель УО «Полоцкий гос. ун-т»; заявл. 14.04.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 6 (53). – С. 24.
15. Киселев, Ю.А. Исследование связи между характеристиками пластичности и формой отпечатка по Виккерсу / Ю.А. Киселев // Заводская лаборатория. – 1969. – Т. 35, № 8. – С. 974 – 976.
16. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
17. 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. Сер. Д. Экономические и юридические науки. – 2012. – № 6. – С. 47 – 52.

Поступила 15.05.2012

METHOD OF INCREASING THE RELIABILITY OF CIRCULAR WELDED JOINTS OF PIPELINES, IN LONG-TERM USE, ON THE BASIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

A. YANUSHONOK, D. SNARSKIY

The paper presents some results of the study of the technical state of pipelines operated over 40 years. The problems of improving the reliability of pipelines, which have worked for a long time, by reducing the thermal processing of circular welded joints are observed. Evaluation of the effectiveness of non-destructive testing method of the mechanical properties of the metal directly to the main pipeline (after thermal processing on the specified modes) is made.