

УДК 621.643.03:620.179.18

Г.С. Тымчик, А.А. Подолян

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ УЧАСТКОВ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ ПЯНО-СВАРНЫХ МУФТ

Background. Getting high efficiency of enhancing pipeline of small and medium diameter using well-bond joints is complicated, because of the low modulus of elasticity compounds used to form the under-joint layer.

Objective. Development of the strength increasing technique of the high pressure pipelines parts using the well-bond joints is the aim of this study.

Methods. Strength increasing technique of a working pipeline with the help of well-bond joints was used.

Results. The strength increasing technique of the high pressure pipelines parts using the well-bond joints, which are filled with molten metal with a high modulus of elasticity, is offered. The operations of forming the under-joint layer with parameters providing achievement of maximum tension decrease level in strengthened pipe providing and equal load distribution between a side of a pipe part under repair and joint covering are considered.

Conclusions. The offered technique gives an opportunity to increase efficiency of strengthening the medium and small pipes diameter pipes.

Keywords: coupling; nondestructive control; diagnostics; repair; gas passage line; pipeline; pressure.

Введение

Задача повышения прочности участков действующего трубопровода возникает при необходимости их ремонта или перевода в более высокую категорию [1]. Классический метод ремонта, предполагающий остановку трубопровода с последующей заменой его дефектного участка, является затратным и требует временной остановки транспорта продукта. Основным методом повышения прочности участков трубопроводов, не требующим существенного изменения режимов их работы, является ремонт с помощью муфт с наполнением, получивший широкое распространение при ремонте линейной части ГТС Украины [2]. В качестве вещества для формирования подмуфтового слоя используются компаунды на эпоксидной или полиуретановой основе, имеющие невысокий модуль упругости, что не позволяет добиться высокой эффективности усиления ремонтируемой трубы при выполнении работ на трубопроводах малого и среднего диаметров.

Постановка задачи

Целью данной статьи является разработка технологии повышения прочности участков магистральных трубопроводов высокого давления при помощи сварных муфт, заполняемых расплавленным металлом, которая позволяет получить высокую эффективность усиления труб среднего и малого диаметров.

Повышение прочности участка трубопровода с помощью сварной муфты с внутренним заполнением

Усиление трубопровода муфтой заключается в перераспределении части нагрузки с трубы на стенку муфты, что приводит к снижению уровня напряжений в стенке трубы [3]. Эффективность усиления трубопровода при этом принято оценивать степенью снижения кольцевых напряжений в стенке ремонтируемой трубы $\left(\frac{\sigma_{Тр}}{\sigma_{Т0}}\right)$, где $\sigma_{Т0}$, $\sigma_{Тр}$ – кольцевые напряжения растяжения в стенке трубы без муфты и с установленной муфтой при рабочем давлении в трубопроводе P_p [4].

После установки муфты на трубопровод с внутренним давлением P_y и заполнения подмуфтового пространства самотвердеющим составом, закачанным под давлением P_{My} , кольцевые напряжения растяжения в стенке трубы уменьшаются до некоторого значения σ_{Ty} . В дальнейшем, в случае изменения давления внутри трубопровода P_p , кольцевые напряжения растяжения в стенке трубы будут принимать значения $\sigma_{Тр}$, а эффективность усиления трубопровода описывается выражением [5]

$$\frac{\sigma_{Тр}}{\sigma_{Т0}} = 1 - \frac{1}{k} - \frac{P_y - k \cdot P_{My}}{k \cdot P_p},$$

где k – коэффициент, связывающий изменение давление в подмуфтовом пространстве с изменением давления внутри трубопровода (коэффициент связи). Развернутый вывод выражения для коэффициента k , учитывающего геометрические параметры ремонтируемой трубы и муфты, а также прочностные свойства материала подмуфтового слоя, приведен в работе [5]:

$$k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \frac{E_M}{E_{ПП}} \left(\delta_{ППУ} + \frac{P_{МУ}}{4 \cdot E_T} \times \left(\frac{D_T^2}{\delta_T} + \frac{(D_T + 2 \cdot (\delta_T + \delta_{ППУ}))^2}{\delta_M} \right) \right)}{\frac{1 - \mu^2}{1 - 3\mu^2} \cdot D_T^2 + \frac{D_M^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_M}}$$

где D_T – внутренний диаметр трубопровода, $E_M \approx E_T$ – модуль упругости материала муфты и трубы, $E_{ПП}, \mu_{ПП}$ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала подмуфтового слоя, δ_T – толщина стенки трубы, δ_M – толщина стенки бандажа, $\delta_{ППУ}$ – установочная глубина подмуфтового пространства.

Для обеспечения равномерного распределения нагрузки между усиливаемой трубой и муфтой самотвердеющее вещество должно запрессовываться в подмуфтовое пространство под оптимальным давлением $P_{МУ\text{опт}}$, определяемым выражением [5]

$$P_{МУ\text{опт}} = \frac{P_Y}{k} + \Delta P,$$

где ΔP – снижение давления в результате усадки вещества подмуфтового слоя в процессе твердения.

В случае запрессовки самотвердеющего вещества в подмуфтовое пространство под давлением $P_{МУ\text{опт}}$ усиленная муфтой труба, без учета концевых эффектов, будет работать аналогично цельной трубе с большей толщиной стенки. Оптимальное давление заполнения подмуфтового пространства определяется в первую очередь давлением внутри трубопровода на момент монтажа муфты и величиной ко-

эффициента связи k . Вместе с тем величина коэффициента связи k зависит от глубины подмуфтового пространства $\delta_{ПП}$, которая в свою очередь зависит от давления запрессовки самотвердеющего вещества в подмуфтовое пространство.

Ограничения использования технологий повышения прочности участка трубопровода с помощью клеесварных муфт

Эффективность разгрузки трубы муфтой с внутренним заполнением растет с увеличением диаметра трубопровода, уменьшением глубины подмуфтового пространства, увеличением толщины стенки муфты. При увеличении модуля упругости и коэффициента Пуассона материала подмуфтового слоя наблюдается рост степени разгрузки трубы. Вместе с тем данное влияние носит нелинейный характер, что иллюстрирует график, представленный на рис. 1. Существует некоторый зависящий от геометрических параметров ремонтируемой трубы диапазон изменений модуля упругости самотвердеющего вещества, в пределах которого он имеет существенное влияние на эффективность разгрузки трубы. При достижении определенного значения, дальнейшее увеличение модуля упругости материала подмуфтового слоя не приводит к существенному увеличению степени разгрузки трубы.

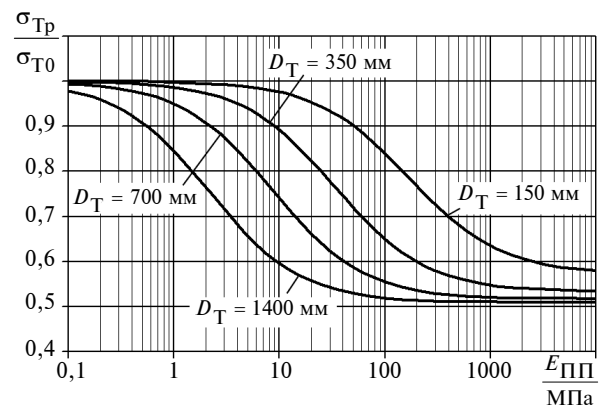


Рис. 1. Зависимость степени снижения кольцевых напряжений в стенке усиливаемой трубы от модуля упругости материала подмуфтового слоя при $P_Y = 5,5$ МПа, $\delta_T = 9$ мм, $\delta_M = 9$ мм, $\delta_{ППУ} = 3$ мм, $P_{МУ} = P_{МУ\text{опт}}$, $E_{ПП} = 55$ МПа

На практике для заполнения подмуфтового пространства клеесварных муфт широко используется самотвердеющее вещество SZLAST,

обладающее модулем упругости $E_{\text{ПП}} = 55$ МПа. Анализ зависимостей показывает, что применение SZLAST для формирования подмуфтового слоя позволяет эффективно усилить трубопроводы больших диаметров (более 700 мм), обеспечив для ранее рассмотренных условий степень снижения напряжений в ремонтируемой трубе не менее 0,6, однако для труб меньшего диаметра эффективность ремонта с использованием данного вещества резко падает. Так, при усилении трубопровода диаметром 1400 мм ремонтируемая труба разгружается до $\left(\frac{\sigma_{\text{Тр}}}{\sigma_{\text{Т0}}} = 0,53\right)$, в то время, как труба диаметром 150 мм разгружается всего до $\left(\frac{\sigma_{\text{Тр}}}{\sigma_{\text{Т0}}} = 0,9\right)$.

Модуль упругости других известных компаундов, используемых для заполнения подмуфтового пространства, обычно находится в пределах 40–100 МПа [6], что является недостаточным для ремонта труб относительно малого диаметра. Модуль упругости вещества может быть повышен введением в него специальных порошковых наполнителей. При этом модуль упругости затвердевшего компаунда с наполнителем определяется процентным содержанием наполнителя. При увеличении доли наполнителя модуль упругости компаундного слоя подмуфтового пространства растет, но при этом растут его плотность и вязкость. Это вызывает сложности при запрессовке компаунда с наполнителем в узкие зазоры подмуфтового пространства. Кроме того, за счет большого времени распределения вязкого компаунда в объемах сложной формы, какими являются торцевые уплотнители муфт, в процессе полимеризации происходит частичное снижение давления в подмуфтовом пространстве. Это приводит к ухудшению разгрузки ремонтируемой трубы. Поэтому обычно состав компаунда выбирают, исходя из компромисса между его вязкостью и модулем упругости. Компаунды, обладающие повышенным модулем упругости (выше 500 МПа), дороги и малодоступны.

Технология повышения прочности участков действующего трубопровода с помощью муфт с формированием подмуфтового слоя из расплавленного металла (паяно-сварных муфт)

Одним из путей повышения эффективности усиления труб малых и средних диаметров

является использование для формирования подмуфтового слоя расплавленного металла, имеющего относительно низкую температуру плавления, например свинца, олова или их сплавов [7]. Расчеты показывают, что использование свинца, запрессованного в подмуфтовое пространство под оптимальным давлением, позволит резко повысить эффективность усиления трубопровода, увеличив степень снижения кольцевых напряжений в ремонтируемой трубе диаметром $D_{\text{T}} = 150$ мм с $\left(\frac{\sigma_{\text{Тр}}}{\sigma_{\text{Т0}}} = 0,9\right)$ (при использовании самотвердеющей массы SZLAST, имеющей модуль упругости $E_{\text{ПП}} = 55$ МПа и коэффициент Пуассона $\mu_{\text{ПП}} = 0,48$) до $\left(\frac{\sigma_{\text{Тр}}}{\sigma_{\text{Т0}}} = 0,58\right)$ (при использовании свинца, имеющего модуль упругости $E_{\text{ПП}} = 0,18 \cdot 10^5$ МПа и коэффициент Пуассона $\mu_{\text{ПП}} = 0,42$). При этом разогрев дефектного участка трубопровода с установленной на нем муфтой может осуществляться с помощью индукторов, широко применяемых для подготовки труб при выполнении сварочных работ (рис. 2).

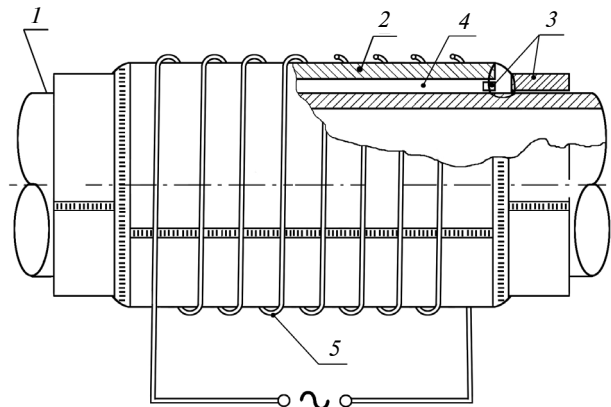


Рис. 2. Использование индуктора для прогрева муфты: 1 – трубопровод, 2 – муфта, 3 – технологические кольца, 4 – подмуфтовое пространство с расплавленным металлом, 5 – индуктор

Для достижения максимального значения степени снижения механических кольцевых напряжений в стенке усиливаемой трубы и обеспечения равномерного распределения нагрузки между ремонтируемой трубой и оболочкой муфты значение величины давления запрессовки расплавленного металла в подмуфтовое пространство должно выбираться исходя

из выражения [5]. Основной сложностью выполнения этого условия является обеспечение правильного учета ΔP и коэффициента связи k , так как в реальных условиях усадка одного и того же металла или сплава может сильно отличаться от партии и условий использования, что приведет к неоптимальному распределению нагрузки между трубой и муфтой после изменения агрегатного состояния материала подмуфтового слоя. Кроме того, для заполнения подмуфтового пространства может использоваться сплав с точно неизвестным значением модуля упругости и усадки. Такой пример может иметь место при аварийном выполнении работ и использовании сплава из случайных свинцовых и оловянных изделий.

В этом случае контроль качества монтажа может проводиться в следующей последовательности. После установки и сборки металлических частей муфты (оболочки и торцевых уплотнителей) качество сварных швов проверяют традиционными, хорошо зарекомендовавшими себя методами неразрушающего контроля. На оболочке муфты устанавливают термостойкие тензометрические датчики. Далее проводят гидравлические испытания подмуфтового пространства, совмещенные с обработкой внутренних поверхностей адгезивом (флюсом), обеспечивающим повышенную адгезию расплавленного металла к трубе и оболочке муфты. Во время гидравлических испытаний, с использованием информации от манометров, установленных в оболочке муфты, проводят построение тарировочных графиков тензометрических датчиков, $R_{ТД}(P_M)$, связывающих величину сигнала, поступающего с тензометрического датчика $R_{ТД}$, с величиной давления в подмуфтовом пространстве R_M . При использовании тензометрических датчиков с линейной характеристикой (например, тензорезисторов со схемами температурной компенсации) тарировочная зависимость может быть представлена в виде

$$R_{ТД} = K_{ТД} \cdot P_M + R_{ТД0},$$

где $R_{ТД}$ – сигнал на выходе тензометрического датчика, $K_{ТД}$ – коэффициент, связывающий изменение сигнала на выходе датчика с изменением давления в подмуфтовом пространстве, $R_{ТД0}$ – сигнал на выходе тензометрического датчика при отсутствии давления в подмуфтовом пространстве.

После прогрева трубы и муфты с помощью специальных средств, например индуктора, в подмуфтовое пространство запрессовывают расплавленный металл, контролируя процесс запрессовки по информации, поступающей с тензометрических датчиков. После этого нагнетание расплавленного металла и прогрев продолжают до выполнения условия

$$R_{МУ1} = K_{ДТ} \cdot \left(\frac{P_Y}{k_i} + \Delta P_i \right) + R_{ТД0},$$

где k_i – прогнозируемый коэффициент связи, ΔP_i – прогнозируемое снижение давления в подмуфтовом пространстве, вызванное усадкой материала подмуфтового слоя в процессе охлаждения.

После полного твердения расплавленного металла по сигналу $R_{МУ2}$, поступающему с тензометрического датчика, проводят измерение установившегося давления в подмуфтовом пространстве:

$$P_{МУ2} = \frac{R_{МУ2} - R_{ТД0}}{K_{ТД}}.$$

После этого производится изменение давления в трубопроводе со значения P_Y до произвольного значения P_{P3} , то есть на некоторую величину $\Delta P_P = P_{P3} - P_Y$. Это повлечет за собой изменение давления в подмуфтовом пространстве со значения $P_{МУ2}$ до значения P_{M3} , то есть на величину $\Delta P_M = P_{M3} - P_{МУ2}$. В свою очередь это приведет к изменению сигнала тензометрического датчика на величину $\Delta R_M = R_{M3} - R_{МУ2}$ до значения R_{M3} . После этого по информации с тензометрического датчика рассчитывают значение реального коэффициента связи:

$$k = \frac{K_{ТД} \cdot \Delta P_P}{\Delta R_M},$$

который зависит от модуля упругости металла подмуфтового слоя.

Далее определяют реальное значение снижения давления в подмуфтовом слое, ΔP , вызванное усадкой материала подмуфтового слоя в процессе охлаждения, исходя из следующих рассуждений. Расплавленный металл был запрессован в подмуфтовое пространство под давлением $P_{МУ2}$, которое после усадки материала подмуфтового слоя уменьшилось до зна-

чения $P_{МУ2}$. При этом для обеспечения равномерного распределения нагрузки между трубой и муфтой давление в подмуфтовом пространстве при нулевом давлении в трубопроводе должно так же равняться нулю. Зависимость давления в подмуфтовом пространстве от давления в трубопроводе после окончания переходных процессов формирования подмуфтового слоя описывается выражением [5], из которого может быть определено давление в подмуфтовом пространстве при нулевом давлении в трубопроводе:

$$P_{M02} = \frac{P_y}{k} - P_{МУ2}.$$

Очевидно, что для выполнения условия $P_{M02} = 0$ необходимо, чтобы давление запрессовки расплавленного металла $P_{МУ2}$ превышало давление в подмуфтовом пространстве после остывания металла на величину P_{M02} . То есть реальное значение ΔP может быть получено из условия

$$\Delta P = P_{МУ1} - P_{МУ2} + P_{M02}.$$

После определения реальных значений k и ΔP муфту, трубу и слой подмуфтового пространства снова нагревают, в результате чего металл в подмуфтовом слое плавится. После этого в подмуфтовое пространство дополнительно нагнетают расплавленный металл, создавая давление, которое контролируют по сигналу с тензометрического датчика:

$$R_{МУ} = K_{ДТ} \cdot \left(\frac{P_y}{k} + \Delta P \right) + R_{ТД0}.$$

Для реализации способа, давление в трубопроводе может быть изменено не сразу после окончания работ, а значительно позже, во время планового изменения режимов транспорта продукта. В отличие от муфт с компаундным наполнением, муфты, заполняемые расплавленным металлом, дают возможность корректировать распределение напряжений в трубе и муфте в процессе эксплуатации.

Предлагаемый способ поясняется графиком, представленным на рис. 3.

С учетом того что подмуфтовое пространство заполняют жидким расплавленным металлом, контроль его распределения по всему объему может быть осуществлен акустическим методом. При этом с учетом высокой температу-

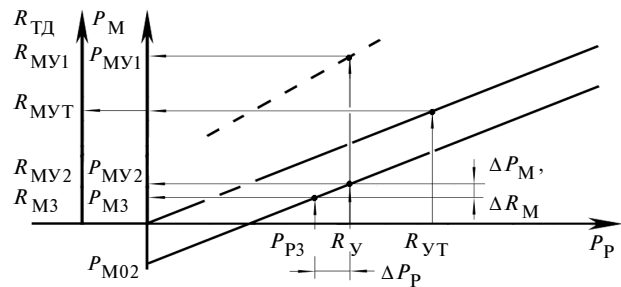


Рис. 3. График, поясняющий способ ремонта трубопровода с помощью паяно-сварной муфты

ры муфты, ограничивающей использование традиционных пьезоэлектрических датчиков возбуждения акустической волны, предпочтительным является использование ЭМА-метода [8].

Относительно большая усадка свинца во время застывания (до 4 %) может быть эффективно снижена введением дополнительных добавок.

Вопросы снижения усадки свинца рассмотрены в специализированной литературе, посвященной изготовлению пуль для огнестрельного оружия, и в объеме применения для заполнения подмуфтового пространства могут считаться изученными.

Выводы

Предложена технология повышения прочности участков действующего трубопровода с помощью паяно-сварных муфт. Использование для формирования подмуфтового слоя расплавленного металла, обладающего высоким модулем упругости, позволяет повысить эффективность усиления труб малых и средних диаметров. Рассмотрены основные операции формирования подмуфтового слоя с параметрами, обеспечивающими достижение максимального значения степени снижения напряжений в усиливаемой трубе при обеспечении равномерного распределения нагрузки между стенкой ремонтируемого участка трубопровода и оболочкой муфты.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении совершенствования технологий ремонта действующих магистральных трубопроводов с помощью паяно-сварных муфт, а также в направлении совершенствования муфтовых конструкций и методов контроля качества их монтажа на трубе.

Список літератури

1. *Ремонт магістральних трубопроводів під тиском* / М.В. Беккер, В.С. Бут, Р.М. Говдяк и др. – К.: Київ, 2008. – 240 с.
2. *Магістральні газопроводи, ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації*: ГБН В.3.1-00013741-12:2011. – К.: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2011. – 152 с.
3. *Тымчик Г.С., Подолян А.А.* Система контролю качества монтажа клеесварной муфты на магистральном газопроводе высокого давления газопроводов // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2012. – № 6. – С. 138–144.
4. *Технологічна інструкція з ремонту магістральних газопроводів під тиском з застосуванням дугового зварювання*. – К.: ДК "Укртрансгаз", 2000. – 96 с.
5. *Спосіб ремонту діючого трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім заповненням*: Пат. 98440 України, МПК (2006) F16L 55/175 / І.В. Ориняк, О.О. Подолян, С.В. Пудрий та ін. – Заявлено 01.03.2012; Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 18.
6. *Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн.* / Под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 1. – 448 с.; Кн. 2. – 584 с.
7. *Спосіб муфтового ремонту трубопроводу*: Пат. 98601 України, МПК (2006) F16L 55/175 / О.О. Подолян, С.В. Пудрий, О.І. Томашук та ін. – Заявлено 30.03.2012; Опубл. 25.05.2012, Бюл. № 18.
8. *Тымчик Г.С., Подолян А.А.* Технология ультразвукового контроля заполнения подмуфтового пространства клеесварной муфты трубопроводов // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2014. – № 2. – С. 103–109.

References

1. M.V. Bekker *et al.*, *Repair of Gas-Main Pipelines under Pressure*. Kyiv, Ukraine: Kyi, 2008, 240 p. (in Ukrainian).
2. *Gas-Main Pipelines, Arc Welding Repair in Operating Conditions*, GBN V.3.1-00013741-12:2011, Ministry of Energetics and Coal Industry of Ukraine, Kyiv, 2011 (in Ukrainian).
3. G.S. Tymchik and A.A. Podolian, "The quality control system installation glued-welded joint on the trunk gas pipeline under the high pressure", *Naukovi Visti NTUU "KPI"*, no. 6, pp. 138–144, 2012 (in Russian).
4. *Technological Instruction for Gas-Main Pipelines under Pressure with the Use of Arc Welding*, DK "Ukrtransgas", Kyiv, Ukraine, 2000, 96 p. (in Ukrainian).
5. I.V. Oryniak *et al.*, "Method for repair of operating pipeline by means of couplings with inner filling", UA Patent 98440, May 10, 2012 (in Ukrainian).
6. *Composites Handbook*, Dzh. Liubin, Ed. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1988, book 1, 448 p., book 2, 584 p. (in Russian).
7. A.A. Podolian *et al.*, "Method for reinforcement of a pipeline by means of couplings with inner filling with control of quality of works (variants)", UA Patent 98601, May 25, 2012 (in Ukrainian).
8. G.S. Tymchik and A.A. Podolian, "Technology of ultrasonic control of the well-bonded pipe coupling space filling", *Naukovi Visti NTUU "KPI"*, no. 2, pp. 103–109, 2014 (in Russian).

Г.С. Тимчик, О.О. Подолян

ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ДІЛЯНОК ДІЮЧОГО МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАЯНО-ЗВАРНИХ МУФТ

Проблематика. Складність досягнення високої ефективності посилення трубопроводів малого і середнього діаметра за допомогою клеєзварних муфт через низький модуль пружності компаундів, що застосовуються для формування підмуфтового шару.

Мета дослідження. Розробка технології підвищення міцності ділянок магістральних трубопроводів високого тиску за допомогою зварних муфт.

Методика реалізації. Технологія підвищення міцності ділянок діючого трубопроводу за допомогою паяно-зварних муфт.

Результати дослідження. Запропоновано методику підвищення міцності ділянок трубопроводів за допомогою муфт, що заповнюються розплавленим металом, який має високий модуль пружності. Запропоновано операції формування підмуфтового шару з параметрами, що забезпечують досягнення максимального значення ступеня зниження напружень в посилюваній трубі при забезпеченні рівномірного розподілу навантаження між стінкою ремонтваної ділянки трубопроводу та оболонкою муфти.

Висновки. Запропонована методика дає можливість підвищити ефективність посилення труб малих і середніх діаметрів.

Ключові слова: муфта; неруйнівний контроль; діагностика; ремонт; газопровід; трубопровід; тиск.

Г.С. Тымчик, А.А. Подолян

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ УЧАСТКОВ ДЕЙСТВУЮЩЕГО МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ ПАЯНО-СВАРНЫХ МУФТ

Проблематика. Сложность достижения высокой эффективности усиления трубопроводов малого и среднего диаметра с помощью клеесварных муфт из-за низкого модуля упругости применяемых для формирования подмуфтового слоя компаундов.

Цель исследования. Разработка технологии повышения прочности участков магистральных трубопроводов высокого давления при помощи сварных муфт.

Методика реализации. Повышение прочности участков действующего трубопровода с помощью паяно-сварных муфт.

Результаты исследования. Предложена методика повышения прочности участков трубопроводов с помощью муфт, заполняемых расплавленным металлом, обладающим высоким модулем упругости. Предложены операции формирования под-муфтового слоя с параметрами, обеспечивающими достижение максимального значения степени снижения напряжений в усиливаемой трубе при обеспечении равномерного распределения нагрузки между стенкой ремонтируемого участка трубопровода и оболочкой муфты.

Выводы. Предложенная методика позволяет повысить эффективность усиления труб малых и средних диаметров.

Ключевые слова: муфта; неразрушающий; контроль; диагностика; ремонт; газопровод; трубопровод, давление.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
28 січня 2015 року