

УДК 621.643.03:620.179.18

Г.С. Тымчик, А.А. Подолян

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МОНТАЖА КЛЕЕСВАРНОЙ МУФТЫ НА МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

In this paper, we propose the structure of the quality control system of installation glued-welded joint on the trunk gas pipeline under the high pressure. It contains meter information parameters, the computer of optimal values of these parameters and the analyzer evaluating the discrepancy of the measured values and gives the best offer for the existing management system to address this discrepancy. We consider the influence of parameters of the under-coupling layer material and processing parameters of the under-coupling forming layer on the efficiency of penstock pipe dimensions and coupling design strength. We show that the efficiency of amplification control line should be done given the self-hardening material shrinkage during curing, measurements of the pressure values in the pipeline and under-coupling space or from measurements of a ring of mechanical stresses in the sleeve walls and the pipe outside the coupling installation. We propose a system of interconnected expressions to calculate the optimal values of the considered system controlled parameters. Furthermore, we develop the control method to achieve maximum efficiency of amplification using the pipeline to fill the molten metal under-coupling space.

Введение

Большая часть магистральных газопроводов Украины эксплуатируется более 30 лет и нуждается в ремонте. При периодической диагностике состояния газопроводов выявляется 50–60 дефектов на 1 км длины, значительная часть которых являются недопустимыми [1]. Классический метод ремонта, предполагающий остановку трубопровода с последующей заменой его дефектного участка, требует значительных финансовых затрат и связан с вынужденным простоем трубопровода и серьезными нарушениями экологии. Основным методом, не требующим остановки транспорта газа, является ремонт с помощью муфт с наполнением (клеесварных муфт), получивший широкое распространение при ремонте линейной части ГТС Украины [2]. От правильности монтажа муфт зависят эффективность, безопасность эксплуатации, надежность и долговечность ремонтируемого магистрального трубопровода высокого давления. В связи с этим выполнение работ по монтажу клеесварных муфт на магистральном трубопроводе высокого давления требует проведения оперативного контроля параметров, определяющих эффективность усиления трубопровода.

В настоящее время практически отсутствует единый подход к организации оперативного контроля качества монтажа клеесварных муфт на действующем магистральном трубопроводе, обеспечивающего достижение муфтовой конструкцией поставленных целей по усилению трубопровода.

Постановка задачи

Целью данной статьи являются: разработка структуры системы контроля качества монтажа клеесварной муфты на магистральном газопроводе высокого давления, позволяющей добиться максимальной эффективности усиления трубопровода; оценка факторов, влияющих на эффективность усиления трубопровода; разработка способов контроля клеесварных муфт.

Организация контроля монтажа клеесварной муфты

Под контролем понимается процесс, обеспечивающий достижение контролируемой системой поставленных целей путем сравнения фактического состояния системы с желаемым [3]. Под системой понимается комбинация взаимодействующих элементов, организованных для достижения одной или нескольких поставленных целей [4]. Под системой контроля в данной статье понимается комбинация элементов и отношений между ними, участвующих в процессе контроля монтажа клеесварной муфты, путем сравнения в ходе выполнения работ текущих значений информационных параметров, характеризующих фактическое состояние трубопровода, усиленного муфтовой конструкцией, со значениями, обеспечивающими максимальную эффективность муфтового ремонта. Основными целями контроля монтажа клеесварной муфты являются: определение оптимальных значений информационных параметров, влияющих на эффективность муфтового ре-

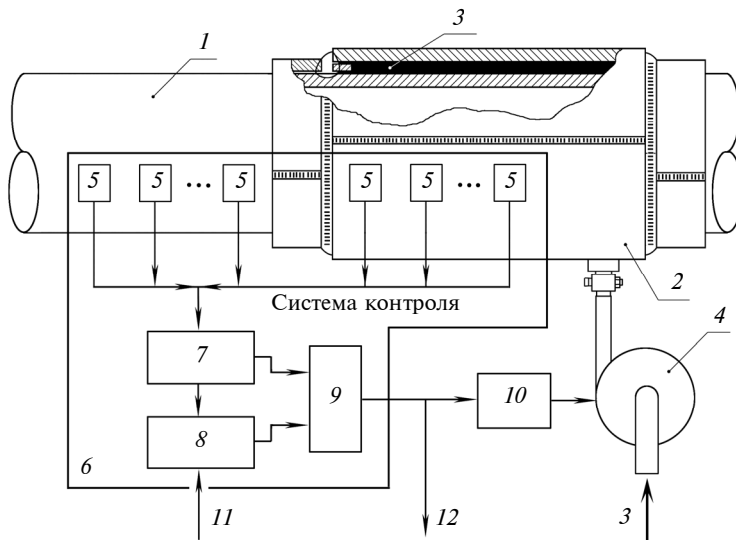


Рис. 1. Организация контроля качества монтажа муфты: 1 – трубопровод; 2 – муфта; 3 – самотвердеющее вещество; 4 – нагнетатель; 5 – датчики информационных параметров; 6 – система контроля; 7 – схема обработки данных; 8 – вычислитель оптимальных значений контролируемых параметров; 9 – анализатор; 10 – схема управления нагнетателем; 11 – данные о параметрах трубопровода и ремонтной конструкции; 12 – данные о состоянии контролируемой системы

монта; выявление отклонений текущих значений данных параметров от оптимальных значений; разработка мер по преодолению выявленных отклонений, в т.ч. разработка мер по корректировке технологических процессов монтажа муфты.

Система контроля монтажа клеесварной муфты на магистральном газопроводе должна состоять из нескольких составных частей – измерителя информационных параметров, вычислителя оптимальных значений данных параметров и анализатора, оценивающего несоответствие измеряемых значений оптимальным и дающего предложение для действий системы управления на устранение данного несоответствия (рис. 1).

Основные задачи контроля должны соответствовать задачам контролируемого объекта (принцип соответствия), при этом при проведении контроля должны рассматриваться все аспекты функционирования объекта контроля во взаимосвязи (принцип системности). Очевидно, что построение эффективной системы контроля невозможно без всестороннего рассмотрения участка трубопровода, усиленного муфтой с наполнением как объекта контроля, оценки влияния технологических параметров монтажа клеесварной муфты на эффективность усиления трубопровода, определения множест-

ва информационных параметров, подлежащих оценке и оперативному контролю.

Участок трубопровода с усиливающей муфтой как объект контроля

Для определения множества информационных параметров, подлежащих контролю, участок трубопровода, усиленный клеесварной муфтой, может быть рассмотрен в качестве трехслойной тонкой оболочки (рис. 2).

Усиление трубопровода муфтой заключается в перераспределении нагрузки с трубы на стенку муфты, что приводит к снижению уровня напряжений в стенке трубы. Эффективность усиления трубопровода при этом принято оценивать степенью снижения кольцевых напряжений в стенке ремонтируемой трубы $\left(\frac{\sigma_{тр}}{\sigma_{т0}} \right)$, где

$\sigma_{т0}$, $\sigma_{тр}$ – соответственно кольцевые напряжения растяжения в стенке трубы без муфты и с установленной муфтой при рабочем давлении в трубопроводе P_p [5]. В некоторых работах используется понятие коэффициента эффективности муфты K_3 , численно равного величине, обратной степени снижения кольцевых напряжений в стенке ремонтируемой трубы.

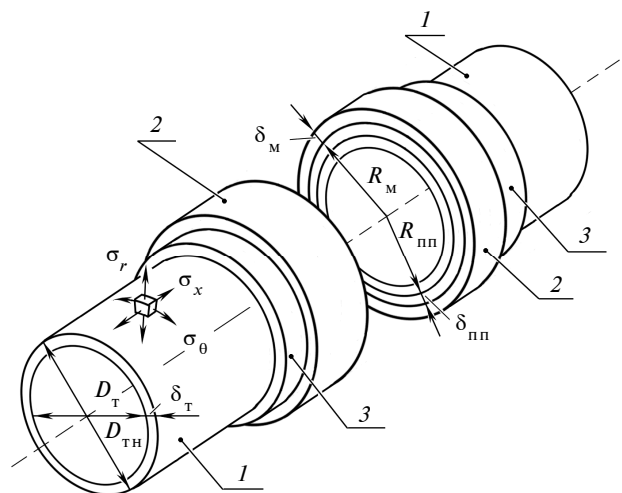


Рис. 2. Участок трубопровода с установленной муфтой: 1 – трубопровод, 2 – муфта, 3 – технологические кольца

В трубе, не усиленной муфтой, действуют кольцевые напряжения, в общем случае определяемые выражением

$$\sigma_{т0} = \frac{P_p \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T},$$

где D_T – внутренний диаметр трубы; δ_T – толщина стенки трубы.

После установки муфты на трубопровод с внутренним давлением P_y и заполнения подмуфтового пространства клеевым составом, закаченным под давлением $P_{му}$, кольцевые напряжения растяжения в стенке трубы уменьшатся до значения $P_{ту}$:

$$\sigma_{ту} = \frac{(P_y - P_{му}) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T}.$$

В дальнейшем, в случае изменения давления внутри трубопровода P_p , давление в подмуфтовом пространстве P_m будет изменяться в соответствии с выражением

$$P_m = \frac{P_p}{k} - P_{м0}, \quad (1)$$

где $P_{м0}$ – давление в подмуфтовом пространстве при нулевом значении давления внутри трубопровода; k – коэффициент, связывающий изменение давление в подмуфтовом пространстве с изменением давления внутри трубопровода (коэффициент связи).

При этом значение давления $P_{м0}$ определяется давлением в подмуфтовом пространстве $P_{му}$ и давлением внутри трубопровода во время установки муфты P_y и связано с ними простым соотношением

$$P_{м0} = \frac{P_y}{k} - P_{му}. \quad (2)$$

В этом случае, в трубе под муфтой, действуют кольцевые напряжения, определяемые выражением

$$\sigma_{тр} = \frac{(P_p - P_m) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T},$$

или, с учетом (1) и (2):

$$\sigma_{тр} = \frac{\left(P_p - \frac{P_p}{k} - P_{му} + \frac{P_y}{k} \right) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T} =$$

$$= \frac{((k-1) \cdot P_p - k \cdot P_{му} + P_y) \cdot D_T}{2 \cdot \delta_T \cdot k}.$$

Эффективность усиления трубопровода в этом случае составляет

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{тр}}{\sigma_{т0}} &= \frac{(k-1) \cdot P_p - k \cdot P_{му} + P_y}{P_p \cdot k} = \\ &= 1 - \frac{1}{k} - \frac{P_y - k \cdot P_{му}}{P_p}. \end{aligned} \quad (3)$$

При плотной установке муфты (без подмуфтового слоя) и близости толщин стенок трубы и муфты $k \approx 2$. В этом случае выражение (3) приводится к виду, полученному в [5]. При установке муфты на трубопровод с давлением P_y без создания давления в подмуфтовом пространстве ($P_{му} = 0$) выражение (3) приводится к широко известному виду [6]. Однако принятые в работах [5, 6] ограничения не позволяют использовать полученные в них выражения для оценки эффективности муфтового усиления трубопроводов произвольного диаметра при использовании для формирования подмуфтового слоя реальных материалов, обладающих определенной сжимаемостью.

В работе [7] приведен развернутый вывод выражения для коэффициента связи k , учитывающего прочностные свойства материала подмуфтового слоя:

$$k = 1 + \frac{4 \cdot \delta_T \cdot \delta_{пп} \frac{E_m}{E_{пп}}}{\frac{1 - \mu^2}{1 - 3\mu^2} \cdot D_T^2} + \frac{D_m^2 \cdot \delta_T}{D_T^2 \cdot \delta_m}, \quad (4)$$

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 соответственно, δ_T – толщина стенки трубы, δ_m – толщина стенки бандажа, $\delta_{пп}$ – толщина подмуфтового слоя, которая определяется установочной глубиной подмуфтового пространства $\delta_{ппун}$ и давлением запрессовки самотвердеющего вещества в подмуфтовое пространство $P_{му}$:

$$\delta_{пп} = \delta_{ппун} +$$

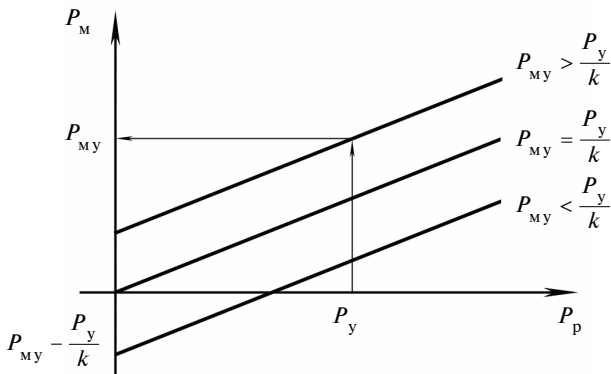


Рис. 3. Зависимость P_M от давления в трубопроводе P_p

$$+ \frac{P_{My}}{4 \cdot E_T} \cdot \left(\frac{D_T^2}{\delta_T} + \frac{(D_T + 2 \cdot \delta_T + 2 \cdot \delta_{ппун})^2}{\delta_M} \right). \quad (5)$$

Для случая, когда давление в трубопроводе во время окончательной установки муфты (окончания запрессовки в подмуфтовое пространство самотвердеющего вещества) отличается от давления монтажа оболочки муфты, выражение (5) приобретает более сложный и громоздкий вид.

Анализ выражений (3)–(5) показывает, что даже при заданных геометрических размерах и прочностных свойствах слоев муфтовой конструкции степень снижения напряжений в усиливаемой трубе зависит от давления запрессовки самотвердеющей массы в подмуфтовое пространство.

Приравняв производную $\frac{d\left(\frac{\sigma_{тр}}{\sigma_{т0}}\right)}{dP_p}$ к нулю,

легко получить выражение для давления в подмуфтовом пространстве на момент установки муфты, при котором распределение напряжений между стенками усиливаемой трубы и муфты остается постоянным при изменении давления в трубопроводе:

$$P_{My} = \frac{P_y}{k}. \quad (6)$$

Таким образом, для обеспечения равномерного распределения нагрузки между усиливаемой трубой и муфтой вещество должно запрессовываться в подмуфтовое пространство под оптимальным давлением $P_{My\text{опт}}$, определяемым выражением [7]

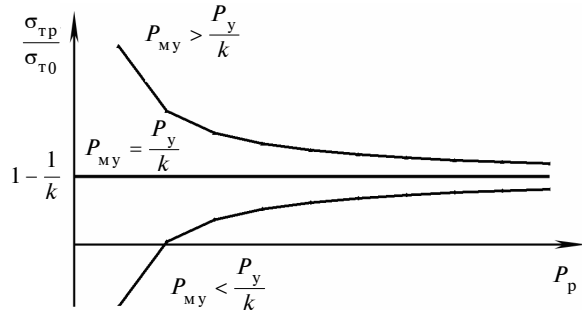


Рис. 4. Зависимость $\left(\frac{\sigma_{тр}}{\sigma_{т0}}\right)$ от давления в трубопроводе P_p

$$P_{My\text{опт}} = \frac{P_y}{k} + \Delta P. \quad (7)$$

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

В этом случае труба, усиленная муфтой без учета концевых эффектов, будет работать аналогично цельной трубе с большей толщиной стенки.

Зависимости давления в подмуфтовом пространстве и степени снижения напряжений в стенке трубы от давления в трубопроводе показаны на рис. 3 и 4. То есть оптимальное давление заполнения подмуфтового пространства определяется в первую очередь давлением внутри трубопровода на момент монтажа муфты и величиной коэффициента 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.

Рассмотрение взаимосвязанных уравнений (3)–(5), (7) позволяет провести оценку эффективности усиления трубопровода с помощью муфты с внутренним заполнением.

Графики на рис. 5–10 иллюстрируют влияние геометрических параметров трубы, муфты и подмуфтового слоя на эффективность усиления трубопровода. Зависимости получены для стального трубопровода и муфты при $P_y = 5,5$ МПа, $\delta_T = 9$ мм, $\delta_M = 9$ мм, $\delta_{ппу} = 3$ мм, $P_{My} = P_{My\text{опт}}$, $D_T = 1400$ мм, $P_{My} = 2,5$ МПа, вещество – SZLAST ($E_{пп} = 55$ МПа, $\mu_{пп} = 0,48$), если другое не оговорено на графиках.

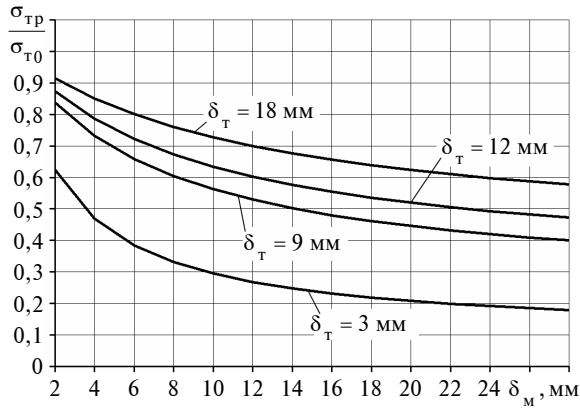


Рис. 5. Влияние толщины стенки муфты на эффективность усиления трубопровода

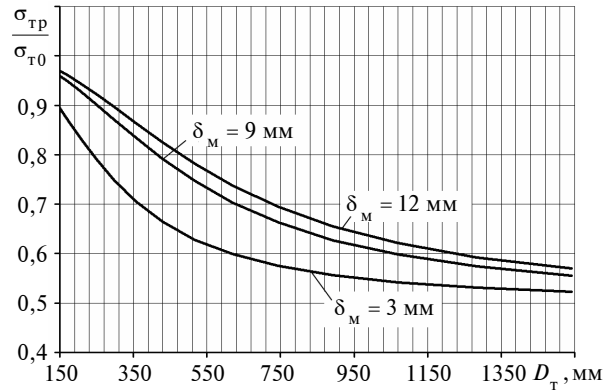


Рис. 6. Влияние диаметра трубопровода на эффективность усиления трубопровода

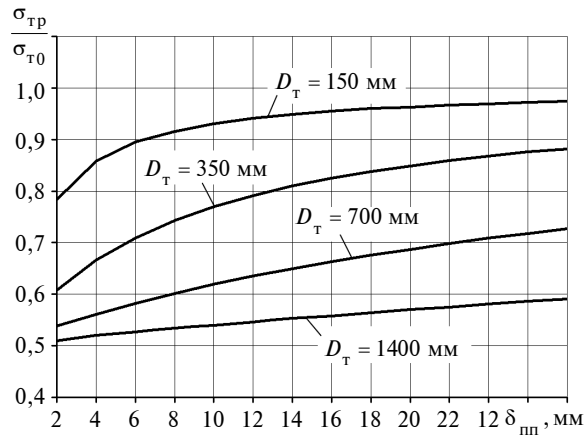


Рис. 7. Влияние глубины подмуфтового пространства на эффективность усиления трубопровода

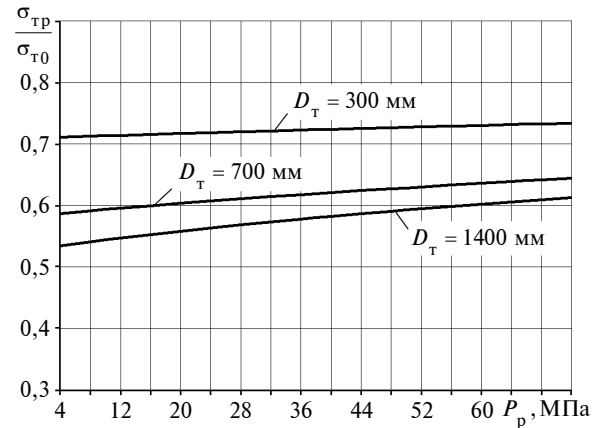


Рис. 8. Влияние давления установки муфты на эффективность усиления трубопровода

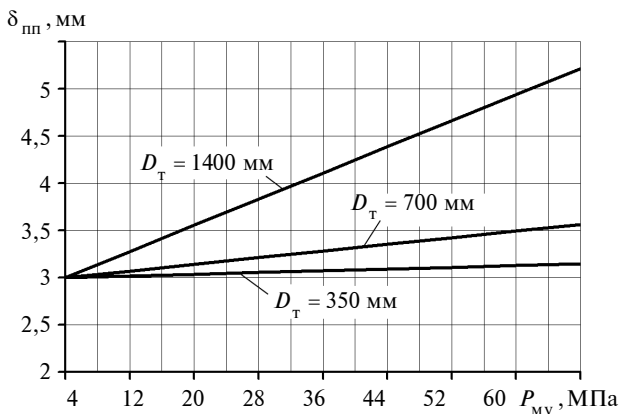


Рис. 9. Зависимость глубины подмуфтового пространства от $P_{мy}$

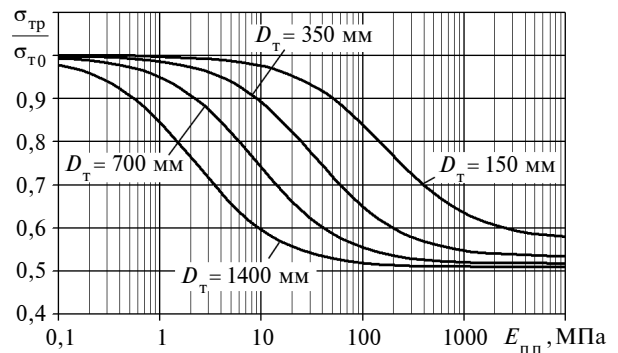


Рис. 10. Влияние модуля упругости подмуфтового слоя на эффективность усиления трубопровода

Эффективность разгрузки трубы клеесварной муфтой растет с увеличением диаметра трубопровода, уменьшением глубины подмуфтового пространства, увеличением толщины стенки муфты. Прочностные свойства мате-

риала подмуфтового слоя оказывают существенное влияние на эффективность разгрузки трубы и подлежат обязательному контролю. При увеличении модуля упругости и коэффициента Пуассона материала подмуфтового слоя

наблюдается рост степени разгрузки трубы. Вместе с тем данное влияние носит нелинейный характер. Существует некоторый зависящий от диаметра 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.

Анализ полученных зависимостей позволяет определить множество информационных параметров, подлежащих контролю в процессе монтажа муфты. Кроме того, зависимости могут быть полезны при разработке рекомендации по оптимизации конструктивных параметров ремонтных муфт.

Чаще всего параметры трубопровода известны, а параметры муфты и материала подмуфтового слоя задаются на этапе проектирования. В этом случае контроль эффективности усиления трубопровода производится, с учетом усадки самотвердеющего вещества во время твердения, по замерам значений давлений в трубопроводе и в подмуфтовом пространстве либо по замерам значений кольцевых механических напряжений в стенках муфты и трубы вне зоны установки муфты. При этом оптимальные значения контролируемых параметров рассчитываются в вычислителе системы контроля по имеющимся или измеренным данным о параметрах муфтовой конструкции.

При использовании для заполнения подмуфтового пространства расплавленного металла [8], на процесс усадки которого оказывают влияние множество факторов, подлежащих слабому учету, а прямой контроль давления в подмуфтовом пространстве затруднен, процесс контроля монтажа муфты может проводиться в несколько этапов. После установки на трубопроводе внешней оболочки на муфте устанавливаются высокотемпературные тензодатчики, тарировка которых производится на этапе гидравлических испытаний подмуфтового пространства с использованием показаний манометров. Далее контроль эффективности разгрузки трубы проводится по результатам тензометрических замеров. Подмуфтовое пространство заполняется расплавленным металлом с созданием механического кольцевого напряжения в стенке муфты, соответствующего давлению, определяемому выражением (6). По-

сле остывания конструкции, определяющегося по прекращению изменения значения измеряемого параметра, рассчитывается значение снижения давления в подмуфтовом пространстве, вызванного усадкой используемого материала ΔP . На следующем этапе подмуфтовый слой расплавляется с помощью внешнего источника энергии, например индуктора, и давление в подмуфтовом пространстве повышается до значения, определяемого выражением (7) [8].

Использование рассмотренной системы контроля качества монтажа клеесварной муфты на магистральном газопроводе высокого давления позволит добиться максимальной эффективности разгрузки трубопровода по выбранному критерию.

Выводы

Предложена структура системы контроля качества монтажа клеесварной муфты на магистральном газопроводе высокого давления, содержащая измеритель информационных параметров, вычислитель оптимальных значений данных параметров и анализатор, оценивающий несоответствие измеряемых значений оптимальным и дающий предложение для действий системы управления на устранение данного несоответствия. Рассмотрено влияние на эффективность усиления трубопровода геометрических параметров трубы и муфтовой конструкции, прочностных параметров материала подмуфтового слоя и технологических параметров формирования подмуфтового слоя. Показано, что контроль эффективности усиления трубопровода должен производиться с учетом усадки самотвердеющего вещества во время твердения, по замерам значений давлений в трубопроводе и в подмуфтовом пространстве либо по замерам значений кольцевых механических напряжений в стенках муфты и трубы вне зоны установки муфты. Предложены выражения для расчета в вычислителе рассмотренной системы оптимальных значений контролируемых параметров. Предложен способ контроля, позволяющий добиться максимальной эффективности усиления трубопровода при использовании для заполнения подмуфтового пространства расплавленного металла.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении разработки методик контроля муфтового ремонта подводных участков трубопроводов, а также в направлении совершенствования системы контроля муфт, заполняемых расплавленным металлом.

1. *Ремонт* магістральних трубопроводів під тиском / М.В. Беккер, В.С. Бут, Р.М. Говдяк и др. – К.: Кий, 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. *Мельник М.В., Пантелеєв А.С., Звездин А.П.* Ревизия и контроль / Под ред. проф. М.В. Мельник. – М.: КНОРУС, 2007. – 640 с.
4. *Системная* инженерия. Процессы жизненного цикла систем: ГОСТ Р ИСО МЭК 15288–2005. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2006. – 54 с.
5. *Тымчик Г.С., Подолян А.А.* Контроль качества работ при муфтовом ремонте магистральных трубопроводов // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. – 2010. – Вип. 39 – С. 64–70.
6. *Технологічна* інструкція з ремонту магістральних газопроводів під тиском з застосуванням дугового зварювання. – К.: ДК “Укртрансгаз”, 2000. – 96 с.
7. *Спосіб* ремонту діючого трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім заповненням: Патент України 98440, МПК (2006) F16L 55/175 / І.В. Ориняк, О.П. Подолян, С.В. Пудрий и др.; Заявлено 01.03.2012: Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 18.
8. *Спосіб* муфтового ремонту трубопроводу: Патент України 98614, МПК (2006) F16L 55/175 / О.О. Подолян, О.П. Подолян, С.В. Пудрий, О.І. Томашук; Заявлено 01.03.2012: Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 18.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
28 листопада 2012 року