

УДК 621.643.03:620.179.18

Г.С. Тымчик, А.А. Подолян

ТЕХНОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ПОДМУФТОВОГО ПРОСТРАНСТВА КЛЕЕСВАРНОЙ МУФТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

The method of well-bonded pipe coupling space filling control by means of ultrasonic NDT methods has been proposed. Use of ultrasonic NDT method for coupling space filling with self-hardening substance (both compound and molten metal coupling space filling) has been analyzed. Taking into consideration the high temperature of the repair structure during repair works performance when using a molten metal, which is determined by high temperature, the application of piezo-electric transducers is ineffective. Therefore, it is offered to use electromagnetic (EMA) transducer as the emitter and receiver of ultrasonic oscillations. Theoretical and experimental research results of weld bonded coupling space filling with molten metal control have confirmed the efficiency of EMA method use. The proposed control method allows to reach the maximum efficiency in the use of coupling space filling with molten metal.

Keywords: EMA, NDT, nondestructive inspection, pipeline, ultrasound, maintenance, pipe, clutch, pressure washers.

Введение

Для восстановления несущей способности магистральных трубопроводов, длительное время находящихся в эксплуатации, широкое распространение получил метод ремонта с применением муфтовой металлической конструкции. Муфту устанавливают на дефектный участок, а подмуфтовое пространство герметизируют и заполняют под давлением самотвердеющей массой. При этом напряжения в стенках трубы и муфты выравниваются между собой [1–3]. Параметры процесса заполнения подмуфтового пространства определяют качество всего муфтового ремонта и требуют точного контроля.

Постановка задачи

Целью работы является проведения анализа параметров контроля заполнения подмуфтового пространства клеесварной муфты с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля.

Теоретические исследования контроля за заполнением подмуфтового пространства

В случае заполнения подмуфтового пространства стальных муфт самотвердеющей массой на эпоксидной или полиуретановой основе [1, 2, 4], а также легкоплавким расплавленным металлом (например, свинцом, оловом или их сплавами) [5] контроль параметров процесса формирования подмуфтового слоя может осуществляться ультразвуковым методом. С учетом высокой температуры ремонтной конструкции во время выполнения работ при ис-

пользовании расплавленного металла, определяемой температурой его плавления, применение наиболее распространенных пьезоэлектрических преобразователей связано с известными трудностями (ограниченность диапазонов температуры, сложность или невозможность контроля загрязненных поверхностей) [6, 7]. Поэтому в качестве излучателя и приемника ультразвуковых колебаний в этом случае предлагается применять электромагнитный преобразователь (ЭМАП).

В настоящее время теория ЭМА-возбуждения ультразвуковой волны хорошо разработана [6], что дает возможность рассмотреть вопросы практического применения ЭМА-метода для контроля процесса формирования подмуфтового слоя.

Для решения данной задачи необходимо определить характерные отличия в сигнале, полученном при зондировании участков муфты со сплошным подмуфтовым слоем и участков, содержащих воздушные пузыри или инородные включения (например, жидкость, оставшуюся после гидравлических испытаний муфты [4]). Данная задача может быть эффективно решена при использовании эхо-метода.

Несмотря на кажущуюся простоту, проведение ЭМА-контроля подмуфтового пространства имеет ряд особенностей, которые требуют учета в настоящих исследованиях.

В простейшем случае возбужденная в верхнем слое оболочки муфты с помощью ЭМАП или ПЭП ультразвуковая волна вводится перпендикулярно границе оболочки и подмуфтового пространства (рис. 1). Если в подмуфтовом пространстве находится воздух, то граница сталь–воздух может быть приравнена

к границе с вакуумом, так как газообразные вещества имеют крайне малые акустические сопротивления по сравнению со сталью. Для воздуха $Z = 0,0004 \cdot 10^6$ Н·с/м³, поэтому на границе сталь–воздух коэффициент отражения отличается всего на $2 \cdot 10^{-5}$ [8]. Таким образом, с достаточной для практики точностью можно считать, что волна такую границу не проходит и возвращается в среду. Отраженный от границы импульс может быть зарегистрирован ЭМАП, подключенным к входу регистратора.

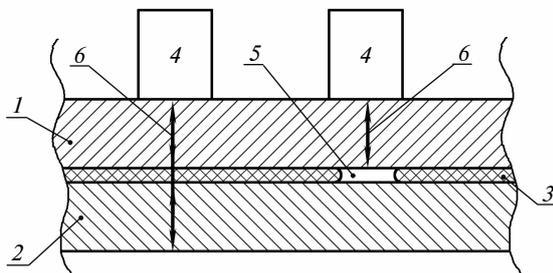


Рис. 1. Контроль формирования подмуфтового слоя ультразвуковым эхо-методом: 1 – оболочка муфты, 2 – усиливаемая труба, 3 – подмуфтовый слой, 4 – ультразвуковые датчики, 5 – воздушный пузырь, 6 – ультразвуковая волна

В случае если контролируемый участок подмуфтового пространства заполнен самотвердеющим веществом на эпоксидной или полиуретановой основе [4] или же расплавленным металлом (например, оловом или свинцом) [5], то характер распространения волны меняется, так как часть волны будет распространяться в подмуфтовый слой и из него в тело трубы.

В связи с тем, что рассматривается перпендикулярный границе ввод плоской ультразвуковой волны, то отраженная и прошедшая волны будут распространяться так же перпендикулярно этой границе.

С учетом небольшой глубины подмуфтового пространства, ограниченной высотой валика продольных и кольцевых сварных швов, которая по действующим нормативным документам не должна превосходить 3 мм, можно выделить три типичных варианта формирования подмуфтового слоя, проиллюстрированных на рис. 2.

Варианту *a* соответствует наличие воздушного пузыря в подмуфтовом пространстве или незаполненное подмуфтовое пространство в точке измерения. Вариант *b* характеризуется отсутствием адгезии вещества подмуфтового слоя к внутренней поверхности муфты, создающего препятствие для прохождения ультразвуковой

волны. Варианту *в* соответствует частично заполненное подмуфтовое пространство.

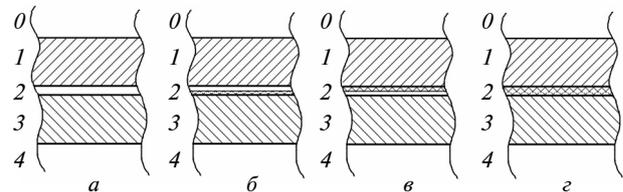


Рис. 2. Основные варианты заполнения подмуфтового пространства: 0 – воздух, 1 – оболочка муфты, 2 – усиливаемая труба, 3 – подмуфтовый слой, 4 – транспортируемый продукт; *a* – отсутствие заполнения, *b* и *в* – частичное заполнение, *г* – полностью заполненное подмуфтовое пространство

Вариант *в* характеризуется хорошим акустическим контактом между внутренней поверхностью муфты и подмуфтовым слоем и плохим между подмуфтовым слоем и усиливаемой трубой. Вариант возможен, например, при использовании заранее залуженной внутренней поверхности муфты при заполнении подмуфтового пространства расплавленным металлом и отсутствии заполнения, а также при хорошем заполнении подмуфтового слоя, но плохом акустическом контакте с трубой из-за плохо подготовленной в полевых условиях поверхности трубы, наличия слоя ржавчины или мест шпаклевки дефектов. Варианту *г* соответствует подмуфтовое пространство, полностью заполненное веществом с хорошей адгезией поверхностей муфты и трубы к веществу подмуфтового слоя, создающего качественный акустический контакт между слоями конструкции.

Таким образом, ультразвуковая волна, возбужденная ультразвуковым датчиком в слое муфты 1, должна преодолеть границу 1–3, пройти через подмуфтовый слой 3, границу 3–2 между подмуфтовым слоем 3 и трубой 2, отразиться от внутренней поверхности трубы (граница 2–4) и вернуться аналогичным путем в стенку муфты, после чего она будет зарегистрирована ультразвуковым датчиком. Очевидно, что проходя слои и границы между ними, акустическая волна (импульс) будет подвергаться известным изменениям (отражению, поглощению, рассеянию). В результате многократных разделений и отражений волны на каждой границе при наличии бесконечной входной волны возникают наложение и интерференция вторичных волн.

В случае если подмуфтовое пространство заполнено воздухом (вариант *a*), то будет иметь место полное отражение акустической волны

от границы 1–3, что характеризуется наличием затухающей последовательности импульсов на выходе ультразвукового датчика, вызванных воздействием многократного отражения волны между границами стенки муфты.

После качественного заполнения подмуфтового пространства самотвердеющим веществом или расплавленным металлом (вариант *в*) ультразвуковой импульс разделится на границе 1–3, при этом акустические давления разделенных волн будут определяться акустическими свойствами материала подмуфтового пространства. В этом случае, если акустическое давление падающей на границу 1–3 волны обозначить как p_{11} , отраженной – как p_{12} , а прошедшей – как p_{31} , то коэффициент отражения k_p границы 1–3 может быть определен как

$$k_p = \frac{p_{12}}{p_{11}},$$

а коэффициент пропускания k_τ – как

$$k_\tau = \frac{p_{31}}{p_{11}}.$$

При этом значения коэффициентов отражения k_p и пропускания k_τ границы 1–3 могут быть определены из выражений [8]

$$k_p = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1},$$

$$k_\tau = \frac{2 \cdot Z_3}{Z_3 + Z_1},$$

где

$$Z_1 = \rho_1 \cdot c_1,$$

$$Z_3 = \rho_3 \cdot c_3, \quad (1)$$

Z_1, Z_3 – акустическое сопротивление (импеданс) соответственно материалов стенки муфты и подмуфтового слоя, ρ_1, ρ_3 – плотность материалов стенки муфты и подмуфтового слоя, c_1, c_3 – скорость звука (для продольных волн) в материалах стенки муфты и подмуфтового слоя.

В большинстве случаев муфты делают из того же материала, что и усиливаемую трубу. Для магистральных газопроводов это сталь, ха-

рактеризующаяся акустическим сопротивлением $Z_1 = Z_2 = 45 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^3$. Для примера в качестве материала подмуфтового пространства может быть рассмотрено массово применяемое для муфтового ремонта самотвердеющее вещество на полиуретановой основе SZLAST (ООО НПП “КиАТОН”, Украина). Входящее в выражение (1) значение скорости звука c_3 для продольной ультразвуковой волны может быть рассчитано по параметрам, определяющим прочностные свойства материала, по формуле, предложенной в [8]:

$$c_3 = \sqrt{\frac{E_3}{\rho_3} \cdot \frac{1 - \mu_3}{(1 + \mu_3)(1 + 2 \cdot \mu_3)}}, \quad (2)$$

где E_3, μ_3 – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала подмуфтового слоя.

Коэффициент Пуассона μ_3 и модуль упругости E_3 самотвердеющего вещества SZLAST были определены экспериментально на оборудовании TIRA-test кафедры сопротивления материалов Киевского политехнического института [9], их значения составили $\mu_3 = 0,487$, $E_3 = 64,9 \text{ МПа}$. Плотность в соответствии с паспортными данными составляет $\rho_3 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$. Исходя из выражений (1), (2), в материале SZLAST скорость звука составляет: $c_3 = 2,75 \text{ км}/\text{с}$, акустическое сопротивление: $Z_3 = 4,125 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^3$.

В случае заполнения подмуфтового пространства оловом акустическое сопротивление материала подмуфтового слоя будет равно $Z_3 = 24 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^3$.

Для компаундного подмуфтового слоя, сформированного из материала SZLAST, для границы 1–3: $k_p = -0,832$, $k_\tau = 0,168$, то есть акустическое давление отраженной акустической волны составляет 83,2 % падающей, а прошедшей – 16,8 %. Для границы 3–2 (переход из подмуфтового пространства в стенку трубы) эти значения будут составлять $k_p = -0,832$, $k_\tau = 1,832$, (акустическое давление отраженной от границы 2–3 волны составляет 83,2 % на нее падающей, а прошедшей – 183,2 %). Увеличение акустического давления при прохождении границы 2–3 объясняется

значительно большим, по сравнению с полиуретаном, акустическим сопротивлением стали.

В газопроводах внутренняя поверхность трубы граничит с газом, поэтому границу 3–4 можно считать свободной, коэффициент отражения k_p которой равен единице.

Для подмуфтового слоя, сформированного из олова, для границы 1–3: $k_p = -0,3$, $k_\tau = 0,7$, то есть акустическое давление отраженной акустической волны составляет 30 % падающей, а прошедшей – 70 %. Для границы 3–2 (переход из подмуфтового пространства в стенку трубы) эти значения будут составлять $k_p = 0,3$, $k_\tau = 1,30$ (акустическое давление отраженной от границы 2–3 волны составляет 30 % на нее падающей, а прошедшей – 130 %).

В процессе распространения ультразвуковой волны в слоях в результате процессов рассеяния на неоднородных структурах слоев и поглощении части энергии материалом слоев происходит ее затухание. Оба вида потерь ограничивают практическое использование ультразвукового метода для контроля процесса формирования подмуфтового слоя. Трудности при контроле могут возникнуть из-за появления многочисленных отражений, которые соответствуют различному времени прихода волн.

Изменение акустического давления в ультразвуковой волне, прошедшей некоторое расстояние l в однородной среде, описывается экспоненциальным уравнением вида [9]

$$p = p_0 \cdot e^{-\alpha l},$$

где p – акустическое давление на выходе участка длиной l однородного материала, p_0 – акустическое давление в начале участка, α – коэффициент затухания.

Таким образом, акустическое давление p_0 волны, прошедшей участок 1 (муфта), на границе 1–3 снизится до величины $p_{11} = p_0 \cdot e^{-\alpha_m \cdot \delta_m}$, где α_m – коэффициент затухания материала муфты. Прошедшая через границу 1–3 волна будет создавать акустическое давление $p_{31} = D \cdot p_{11}$, которое снизится до величины $p_{32} = p_{31} \cdot e^{-\alpha_{пп} \cdot \delta_{пп}}$, где $\alpha_{пп}$ – коэффициент затухания материала подмуфтового пространства на границе 3–2.

То есть акустическое давление будет изменяться на границах сред и уменьшаться по мере распространения в материалах слоев.

Если пренебречь затуханием в слоях и ограничиться рассмотрением только главных максимумов, то можно выделить четыре основных характерных эхоимпульса, на основании анализа которых можно судить о качестве формирования подмуфтового слоя (рис. 3).

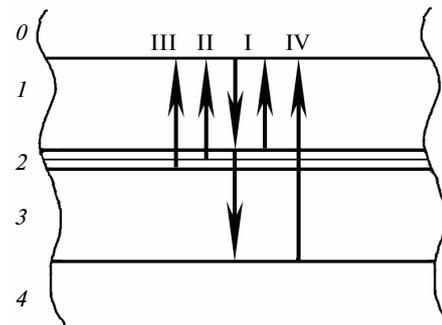


Рис. 3. Формирование характерных эхоимпульсов: 0 – воздух, 1 – оболочка муфты, 2 – усиливаемая труба, 3 – подмуфтовый слой, 4 – транспортируемый продукт

На рис. 3 обозначены: I – эхоимпульс, отраженный от границы муфта–подмуфтовый слой, II – эхоимпульс, отраженный от внутренней границы подмуфтового слоя (варианты б и в рис. 2), III – эхоимпульс, отраженный от границы подмуфтовый слой–труба, IV – эхоимпульс, отраженный от границы труба–транспортируемый продукт.

Данные расчета акустического давления, создаваемого характерными эхоимпульсами при разных вариантах формирования подмуфтового слоя, представлены в виде графических диаграмм (рис. 4).

Полученные данные позволяют сделать вывод, что ультразвуковой метод может быть использован для контроля параметров формирования подмуфтового слоя как из жидкого компаунда, так и из расплавленного металла. Вместе с тем следует отметить, что его применение для контроля процесса заполнения подмуфтового пространства компаундом связано с трудностями выделения полезного сигнала на фоне многократных отражений ультразвуковой волны от стенок оболочки муфты, являющихся в данном случае шумом. Этот вопрос требует корректного схемотехнического построения ультразвукового прибора.

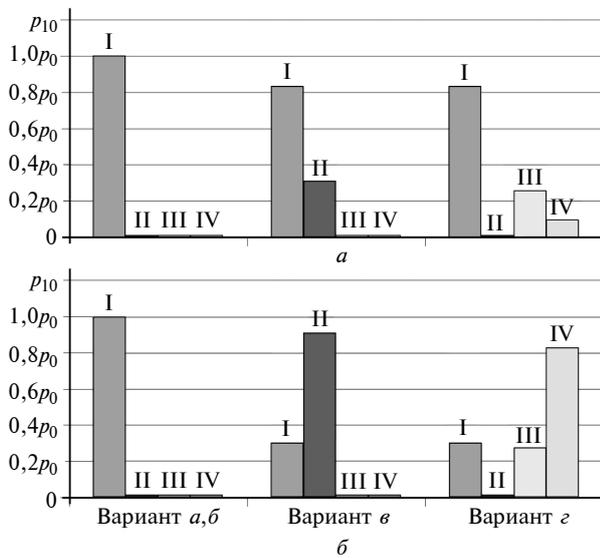


Рис. 4. Акустическое давление, создаваемое характерными эхоимпульсами: *а* – заполнение подмуфтового пространства компаундом; *б* – заполнение подмуфтового пространства оловом

Контроль качества формирования подмуфтового слоя из расплавленного металла не должен вызывать трудностей из-за простоты регистрации ярко выраженных сигналов, характеризующих состояние подмуфтового пространства. Для контроля может быть использован ультразвуковой толщиномер, построенный, например, на основе ЭМА-преобразователя, ра-

ботоспособного в условиях повышенных температур. В случае проведения измерений по эхоимпульсу, имеющему максимальную амплитуду, ЭМА-толщиномер позволит получить достоверную информацию о состоянии подмуфтового пространства. Для возбуждения ультразвуковой волны в стенке муфты, имеющей повышенную температуру, может быть использован альтернативный способ, не требующий применения внешних магнитов [10].

Экспериментальные исследования контроля заполнения подмуфтового пространства

Для экспериментальной проверки способа контроля качества заполнения подмуфтового пространства с помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля использовался ультразвуковой дефектоскоп УД-4К. В качестве объекта контроля использовались части оболочки реальной муфты и трубы, на которых смоделированы варианты заполнения подмуфтового пространства, приведенные на рис. 2.

В качестве материала для формирования подмуфтового слоя использовались композитный материал на полиуретановой основе SZLAST и олово.

Результаты экспериментальной проверки показаны на фотографиях, представленных на рис. 5 и 6.

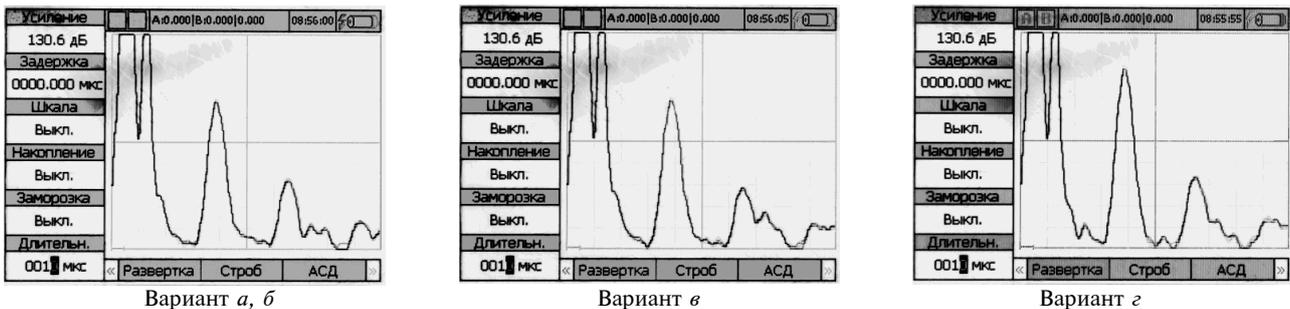


Рис. 5. Фотографии экрана дефектоскопа с эхоимпульсами при ультразвуковом зондировании муфты с подмуфтовым пространством, заполненным композитным веществом SZLAST

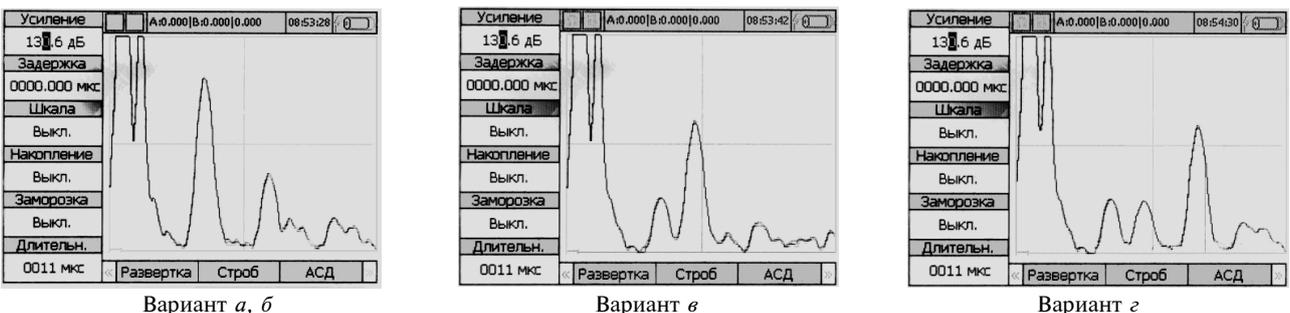


Рис. 6. Фотографии экрана дефектоскопа с эхоимпульсами при ультразвуковом зондировании муфты с подмуфтовым пространством, заполненным расплавленным оловом

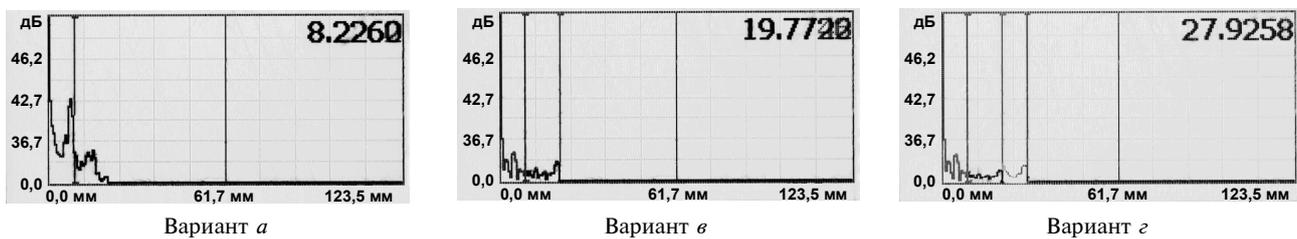


Рис. 7. Фотографії екрана дефектоскопа в режимі “толщиномер” при заповненні подмуфтового простору оловом: варіант *a* – відсутність заповнення подмуфтового простору, варіант *b* – олово наплавлено на внутрішню поверхню муфти, контакт з усилюваною трубою відсутній, варіант *c* – олово заповнило подмуфтове простору, хороший акустичний контакт з трубою і муфтою

Полученные данные позволяют сделать вывод, что использование ультразвукового дефектоскопа УД-4К не дает возможности осуществить достоверный контроль качества заполнения подмуфтового пространства компаундным веществом на полиуретановой основе SZLAST из-за сложности выделения эхосигналов, несущих полезную информацию от паразитных сигналов, возникающих при многократном отражении ультразвуковой волны от поверхности стенок муфты. В то же время анализ эхосигналов дает достоверную информацию о состоянии подмуфтового слоя из олова.

Для дальнейшей экспериментальной проверки возможности контроля качества формирования подмуфтового слоя расплавленным металлом с помощью ЭМА-метода к ультразвуковому дефектоскопу УД-4К был подключен экспериментальный ЭМА-датчик, а дефектоскоп был переведен в режим “толщиномер”. Результаты измерений толщин проиллюстрированы на рис. 7.

Полученные экспериментальные результаты подтвердили предварительные теоретические выводы о возможности использования ЭМА метода для контроля качества заполнения подмуфтового пространства оловом, что позволяет говорить о возможности применения этого метода для контроля заполнения подмуфтового пространства клеесварных муфт, заполняемых любым из металлов.

Выводы

Проведенный анализ возможности использования ультразвукового метода неразру-

Список литературы

1. Тымчик Г.С., Подольн А.А. Система контроля качества монтажа клеесварной муфты на магистральном газо-

шающего контроля качества заполнения подмуфтового пространства самотвердеющим веществом показал теоретическую возможность контроля заполнения подмуфтового пространства клеесварных муфт как с компаундным за-полнением подмуфтового пространства, так и с за-полнением расплавленным металлом.

Полученные экспериментальные данные не позволяют осуществить ультразвуковым методом достоверный контроль качества заполнения подмуфтового пространства компаундным веществом на полиуретановой основе из-за сложности выделения эхосигналов, несущих полезную информацию от паразитных сигналов, возникающих при отражении ультразвуковой волны от поверхностей стенок муфты. В то же время анализ эхосигналов дает достоверную информацию о состоянии подмуфтового слоя в клеесварных муфтах, заполняемых расплавленным металлом.

Результаты экспериментальных исследований контроля заполнения подмуфтового пространства клеесварных муфт расплавленным металлом с помощью ЭМА-метода подтвердили эффективность использования ЭМА-метода для контроля формирования подмуфтового пространства.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении разработки методик контроля качества установки многосекционных муфт, разработки методик контроля муфтового ремонта подводных участков трубопроводов.

1. провед. высокого давления газопроводов // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 6. – С. 138–144.

2. *Тимчик Г.С., Подолян А.А., Пудрий С.В.* Экспериментальные исследования эффективности усиления участка трубопровода высокого давления муфтой с внутренним наполнением // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2013. – Вып. 4. – С. 35–39.
3. *Спосіб ремонту діючого трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім заповненням:* Пат. 98440 України: МПК (2006) F16L 55/175 / І.В. Ориняк, Г.С. Тимчик, О.О. Подолян та ін. – № 201202474: Заявлено 01.03.2012: Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 18.
4. *Магістральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок:* ВБН В.3.1-00013741-07:2007. – К.: НАК “Нафтогаз України”, 2007. – 110 с.
5. *Спосіб посилення трубопроводу за допомогою муфт з внутрішнім заповненням з контролем якості робіт (варіанти):* Пат. 98601 України: МПК (2006) F16L 55/175 / О.О. Подолян, С.В. Пудрий, О.І. Томашук та ін. – № 201203887: Заявлено 30.03.2012: Опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.
6. *Неразрушаючий контроль і діагностика:* Справочник / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др; под ред. В. В. Ключева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
7. *Николаева Е.В., Макаров В.В.* ФОПИ: Измерительные преобразователи. Принципы измерения физических величин: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 96 с.
8. *Крауткремер Й., Крауткремер Г.* Ультразвуковой контроль материалов: Справочник / Пер. с нем. – М.: Metallurgia, 1991. – 752 с.
9. *Проведення натурних випробувань ефективності клеєзварних муфт на трубопроводі:* Звіт про НДР / ІЕЗ ім. Е.О.Патона; керівник роботи В.С. Бут; автори В.С. Бут, С.В. Пудрий, О.О. Подолян та ін. – Держ. реєстр. № 0112 U003232. – К., 2012. – 48 с.
10. *Способ формирования акустической волны:* Пат. 2339030 РФ: МПК (2006) G01N 29/04 / А.А. Подолян. – Заявлено 22.02.2007: Опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
23 жовтня 2013 року