

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **042961**(13) **B1**

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2023.04.10**

(51) Int. Cl. **G01N 29/07 (2006.01)**

(21) Номер заявки  
**202092938**

(22) Дата подачи заявки  
**2019.12.31**

### (54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ ШВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ (ВАРИАНТЫ)

(31) **2019110165**

(32) **2019.04.05**

(33) **RU**

(43) **2022.05.16**

(86) **PCT/RU2019/001052**

(87) **WO 2020/204751 2020.10.08**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
"РОССИЙСКИЙ КОНЦЕРН  
ПО ПРОИЗВОДСТВУ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ  
ЭНЕРГИИ НА АТОМНЫХ  
СТАНЦИЯХ" (АО "КОНЦЕРН  
РОСЭНЕРГОАТОМ");  
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
"ИНКОТЕС" (ООО "ИНКОТЕС");  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПО  
ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНЫХ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ" (АО**

**"ВНИИАЭС"); ЧАСТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ПО  
ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАУЧНОГО  
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ  
ОТРАСЛИ "НАУКА И  
ИННОВАЦИИ" (ЧАСТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ "НАУКА И  
ИННОВАЦИИ") (RU)**

(72) Изобретатель:  
**Камышев Аркадий Вадимович,  
Пасманик Лев Абрамович, Ровинский  
Виктор Донатович, Гетман Александр  
Федорович, Губа Сергей Валерьевич  
(RU)**

(74) Представитель:  
**Снегов К.Г. (RU)**

(56) **RU-C2-2598980  
RU-C1-2057329  
RU-C1-2057330  
SU-A1-1756815  
US-A1-20010049587  
CN-A-101320018**

(57) На исследуемом участке трубопровода ультразвуковым эхо-методом измеряют время распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, и по результатам измерения определяют характеристики напряженного состояния сварного соединения. Путем расчетного моделирования предварительно определяют положение сечений уравнивания, в которых уравнивающие кольцевые напряжения в основном металле достигают минимальных значений, и значение коэффициента уравнивания, равного отношению максимальных остаточных растягивающих мембранных кольцевых напряжений в металле шва к значению минимальных остаточных сжимающих мембранных кольцевых напряжений в основном металле. До начала изготовления сварного соединения в сечениях уравнивания выполняют измерения начальных значений времени распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы. После изготовления сварного соединения в тех же точках измерений выполняют измерения рабочих значений времени распространения этих же типов волн. По результатам измерений для каждого сечения определяют значения мембранных продольных и кольцевых напряжений, а также изгибающих моментов, с использованием которых, и с учетом коэффициента уравнивания, определяют максимальные значения остаточных продольных и кольцевых локальных напряжений в металле шва.

**B1****042961****042961****B1**

Изобретение относится к области неразрушающего контроля конструкционных материалов, может быть использовано для определения остаточных продольных и кольцевых сварочных напряжений в сварных соединениях и применяться при оценке качества сварных соединений трубопроводов по критерию уровня остаточных напряжений и при определении исходных параметров для прочностного расчета трубопровода.

Известен способ определения напряжений в металле шва механическим методом зондирующего отверстия, основанном на принципе упругой разгрузки (Балалов В.В., Мошенский В.Г., Одинцев И.Н., Писарев В.С. "Исследование остаточных напряжений в сварных трубах на основе метода сверления отверстий и оптических интерференционных измерений". "Заводская лаборатория. Диагностика материалов", 2011, т. 77, № 5, с. 43-49). Известный способ содержит процедуру оценки двухосных поверхностных напряжений по результатам измерения деформационного отклика средствами цифровой спекл-интерферометрии. Деформационный отклик определяется по результатам сверловки несквозного отверстия на поверхности металла шва. С существенными признаками заявляемого изобретения совпадает возможность определения остаточных напряжений непосредственно в металле шва.

Недостатком известного способа является то, что для его реализации необходимо нарушать целостность контролируемого изделия, то есть он является разрушающим методом контроля.

Указанный недостаток обусловлен тем, что использование разрушающих методов недопустимо при контроле производственных сварных соединений.

Совокупность признаков, наиболее близкая к совокупности существенных признаков заявляемого изобретения, присуща известному ультразвуковому способу определения остаточных напряжений в сварных соединениях трубопроводов.

Наиболее близкое техническое решение известно из патента на изобретение (патент РФ № 2598980 на изобретение "Ультразвуковой способ определения остаточных напряжений в сварных соединениях трубопроводов"). Известный способ (прототип) содержит процедуру измерений ультразвуковым эхометодом времен распространения (задержек) продольных волн и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, по значениям которых в точках контроля рассчитываются характеристики напряженного состояния. Способ позволяет определять величину разности продольных и кольцевых остаточных напряжений в примыкающих к сварному соединению участках трубопровода как произведение коэффициента пропорциональности на значение параметра зависимости между коэффициентами Пуассона в точке измерения. С существенными признаками заявляемого изобретения совпадает возможность определения ультразвуковым методом характеристик остаточных мембранных напряжений в основном металле сварных соединений.

Однако в известном способе, принятом за прототип, характеристики напряженного состояния определяются только в примыкающей к сварному соединению зоне основного металла, а также то, что единственной определяемой характеристикой напряженного состояния является разность мембранных кольцевых и продольных напряжений.

Указанные недостатки обусловлены тем, что получаемые известным способом результаты с одной стороны не могут быть использованы для оценки качества сварных соединений и для прочностных расчетов, поскольку для этого необходимо использовать отдельные значения продольных и кольцевых напряжений, а не их разность. С другой стороны, в примыкающей к сварному соединению зоне основного металла, где выполняются измерения, остаточные напряжения существенно меньше, чем в металле шва (Антонов А.А., Летуновский А.П. Возможности оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях. "В мире неразрушающего контроля", 2018, т. 21, №1, с. 10-12), в то время как для прочностных расчетов требуется использование именно максимальных значений остаточных напряжений.

Получить значения остаточных напряжений в металле шва - максимальных значений продольных и кольцевых остаточных напряжений в сварных соединениях, известный способ не позволяет.

Это ограничение обусловлено тем, что известный способ включает процедуру тарировки, которую можно проводить только в лишенных остаточных напряжений зонах. Поскольку скорости распространения упругих волн зависят как от напряжений, так и от структурных характеристик металла, тарировку можно проводить только там, где структура металла идентична металлу в точках измерения. Так как структура металла шва отличается от структуры основного металла, то использовать результаты тарировки на основном металле для оценки напряжений в металле шва недопустимо. В то же время проведение тарировки в металле шва невозможно, поскольку, в нем нельзя выделить зону, в которой гарантированно отсутствуют остаточные сварочные мембранные напряжения. Это делает невозможным применение известного способа для измерения напряжений непосредственно в металле шва.

Кроме того, известный способ не позволяет выделять из измеряемой характеристики напряженного состояния отдельные значения продольных и кольцевых мембранных напряжений.

Задачей, на решение которой направлено заявляемое изобретение, является оценка фактического состояния сварных соединений трубопровода при монтаже, ремонте и эксплуатации по результатам неразрушающего контроля напряженного состояния.

Техническим результатом заявляемого изобретения является обеспечение возможности определения отдельно продольных и кольцевых остаточных напряжений. При этом напряжения определяются в

металле шва сварных соединений трубопроводов, где они достигают максимальных значений.

Технический результат изобретения по первому варианту обеспечивается тем, что в способе определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, заключающемся в том, что на исследуемом участке трубопровода ультразвуковым эхо-методом измеряют время распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, и по результатам измерения определяют характеристики напряженного состояния сварного соединения, согласно заявляемому решению для конкретного типа труб путем расчетного моделирования предварительно определяют положение сечений уравнивания, в которых уравнивающие кольцевые напряжения в основном металле достигают минимальных значений, и значение коэффициента уравнивания, равного отношению максимальных остаточных растягивающих мембранных кольцевых напряжений в металле шва к значению минимальных остаточных сжимающих мембранных кольцевых напряжений в основном металле, затем, до начала изготовления сварного соединения, в сечениях уравнивания выполняют измерения начальных значений времени распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, после изготовления сварного соединения в тех же точках измерений выполняют измерения рабочих значений времени распространения этих же типов волн, по результатам измерений с использованием уравнений акустоупругости для двухосного напряженного состояния:

$$\sigma_z = K_1 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_1t_{03}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{02}t_3}{t_2t_{03}} - 1 \right)$$

$$\sigma_t = K_1 \left( \frac{t_{01}t_2}{t_1t_{02}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_1t_{03}} - 1 \right)$$

где  $t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{03}$  - начальные, а  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  - рабочие значения времени распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек образующей трубы и продольной волны, соответственно,  $K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты упруго-акустической связи, для каждого сечения измерений определяют значения мембранных продольных и кольцевых напряжений, а также изгибающих моментов, с использованием которых, на основании принципа уравнивания мембранных напряжений и с учетом коэффициента уравнивания, определяют максимальные значения остаточных продольных и кольцевых локальных напряжений в металле шва.

Технический результат изобретения по второму варианту обеспечивается тем, что в способе определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, выполненных из акустически изотропного металла, заключающемся в том, что на исследуемом участке трубопровода ультразвуковым эхо-методом измеряют время распространения объемных волн, и по результатам измерения определяют характеристики напряженного состояния сварного соединения, согласно заявленному решению для конкретного типа труб путем расчетного моделирования предварительно определяют положение сечений уравнивания, в которых уравнивающие кольцевые напряжения в основном металле достигают минимальных значений, и значение коэффициента уравнивания, равного отношению максимальных растягивающих мембранных кольцевых напряжений в металле шва к значению минимальных сжимающих мембранных кольцевых напряжений в основном металле, а также измеряют значение собственной акустической анизотропии основного металла, после изготовления сварного соединения, в сечениях уравнивания выполняют измерения рабочих значений времени распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, по результатам измерений с использованием уравнения акустоупругости для разности продольных и кольцевых мембранных напряжений определяют значения указанной разности для каждой точки измерения:

$$\sigma_z - \sigma_t = D \left( 200 \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1} - a_0 \right)$$

где  $a_0$  - собственная акустическая анизотропия основного металла,  $D$  - коэффициент упруго-акустической связи, разделение продольных и кольцевых мембранных напряжений, выполняют с использованием результатов определения продольных напряжений в дополнительном сечении, далее для каждого сечения измерений определяют значения мембранных продольных и кольцевых напряжений, а также изгибающих моментов, с использованием которых, на основании принципа уравнивания мембранных напряжений и с учетом коэффициента уравнивания, определяют максимальные значения остаточных продольных и кольцевых локальных напряжений в металле шва.

Заявляемое изобретение поясняется графическими материалами, где на фиг. 1 представлен график расчетного распределения напряжений, на фиг. 2 и 3 представлена схема размещения точек измерения, на фиг. 4 представлена схема расположения точек измерения в сечениях, на фиг. 5 и 6 в графической форме представлены результаты определения продольных и кольцевых напряжений в точках измерения до и после термообработки образцов, на фиг. 7 представлены результаты измерений значений акустической анизотропии до и после термообработки (усредненные по сечениям измерения).

Способ, содержащий процедуру измерений времен распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, а также определение характеристик напряженного состояния сварного соединения в основном металле, согласно изобретению дополнительно содержит следующие операции: измерения выполняют в определенных зонах основного металла, примыкающих к

металлу шва. Эти зоны соответствуют областям локализации минимальных сжимающих кольцевых мембранных остаточных напряжений, которые уравнивают максимальные растягивающие кольцевые мембранные остаточные напряжения в металле шва. Эффект уравнивания, имеющий место именно для мембранных напряжений, обеспечивает взаимно-однозначное соответствие между кольцевыми мембранными остаточными напряжениями в металле шва и в околошовной зоне. Это позволяет определить соотношение между ними - коэффициент уравнивания, который используется для определения максимальных остаточных напряжений в металле шва по результатам измерений в околошовной зоне.

Измерения выполняются в поперечных сечениях трубопровода, расположенных в указанных зонах. Положение этих сечений, а также величину коэффициента уравнивания определяют по результатам предварительных исследований или расчетов. По результатам измерений времен распространения упругих волн до и после изготовления сварного соединения методом акустоупругости, получают значения продольных и кольцевых мембранных напряжений в сечениях измерений.

Максимальные значения продольных и кольцевых локальных остаточных напряжений в металле шва определяют по полученным значениям напряжений в сечениях измерений на основании принципа уравнивания мембранных напряжений с использованием коэффициента уравнивания.

В частном случае, связанном с выполнением измерений на трубопроводах, изготовленных из акустически изотропных материалов, измерения времен распространения упругих волн до изготовления сварного соединения исключаются, что позволяет выполнять оценку остаточных напряжений не только в процессе монтажа, но и на трубопроводах, находящихся в эксплуатации. Определение значений продольных и кольцевых мембранных напряжений в сечениях измерений производится только по результатам измерений, выполняемых после изготовления сварного соединения. Особенностью данной процедуры является использование результатов измерений напряжений в дополнительном поперечном сечении, расположенном вне зоны локализации остаточных напряжений.

Способ по первому варианту осуществляют следующим образом.

В способе определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, который заключается в том, что на исследуемом участке трубопровода ультразвуковым эхо-методом измеряют время распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, и по результатам измерения определяют характеристики напряженного состояния сварного соединения, для конкретного типа труб путем расчетного моделирования предварительно определяют положение сечений уравнивания. В этих указанных сечениях уравнивающие кольцевые напряжения в основном металле достигают минимальных значений. Положение сечений определяется по результатам расчетного моделирования остаточных сварочных напряжений либо по результатам экспериментальных исследований на контрольных сварных соединениях, выполняемых после сварки до проведения термообработки. Исследования выполняются для каждого типа сварного соединения, характеризующегося диаметром, толщиной стенки трубы и технологией сварки.

Также по результатам расчетных или экспериментальных исследований определяется коэффициент уравнивания ( $k$ ), равный отношению максимальных растягивающих мембранных кольцевых напряжений в металле шва ( $\sigma_{tmax}$ ) к значению минимальных сжимающих мембранных кольцевых напряжений ( $\sigma_{tmin}$ ) в основном металле. Значение  $k$ , определяется по результатам расчетного моделирования остаточных сварочных напряжений по формуле:

$$k = \frac{\sigma_{tmax}}{\sigma_{tmin}} \quad (1)$$

Для измерений должен применяться именно метод акустоупругости, использующий эхо-метод ультразвукового контроля, как единственный неразрушающий метод, обеспечивающий измерение мембранных, а не поверхностных напряжений (ГОСТ Р 52890-2007. "Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования").

Измерения должны выполняться приборами, реализующими данный метод измерений и аттестованными как средства измерений одно- и двухосных механических напряжений.

До начала изготовления сварного соединения, в сечениях уравнивания выполняют измерения начальных значений времени распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы.

После изготовления сварного соединения в тех же точках измерений выполняют измерения рабочих значений времени распространения этих же типов волн. После чего по результатам измерений с использованием уравнений акустоупругости для двухосного напряженного состояния:

$$\sigma_z = K_1 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_1t_{03}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{02}t_3}{t_2t_{03}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\sigma_t = K_1 \left( \frac{t_{01}t_2}{t_1t_{02}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_1t_{03}} - 1 \right) \quad (3)$$

где  $t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{03}$  - начальные, а  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  - рабочие значения времен распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек образующей трубы и продольной волны, соответственно.

$K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты упруго-акустической связи, определяемые в соответствии со стандартной процедурой, предусмотренной ("Элементы оборудования АЭС. Методика выполнения измерений меха-

нических напряжений, возникающих в результате технологических воздействий, методом акустоупругости". Свидетельство об аттестации методики выполнения измерений № 633/1700 от 10.06.2009 г. Зарегистрирована в Федеральном реестре методик выполнения измерений под № ФР.1.28.2009.06227) (для свариваемых элементов из углеродистых и низколегированных сталей допускается не определять значения  $K_1$  и  $K_2$ , а использовать обобщенные коэффициенты упруго-акустической связи (Камышев А.В., Макаров С.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В. Обобщенные коэффициенты для измерения механических напряжений методом акустоупругости в конструкциях из углеродистых и низколегированных сталей // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 3-10)).

По результатам измерений временных задержек по формулам (2) и (3) рассчитываются значения продольных и кольцевых напряжений в точках измерения и для каждого сечения измерений определяются:

усредненные по сечению измерений кольцевые мембранные уравнивающие напряжения ( $\overline{\sigma_t}$ );  
усредненные по сечению измерений продольные мембранные напряжения ( $\overline{\sigma_z}$ );  
суммарный изгибающий момент по формуле:

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (4)$$

где  $M_{x,y}$  - составляющие момента в декартовых координатах, принятых для объекта обследования, рассчитываемые по формулам (Камышев А.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В. "Расчетно-инструментальный метод оценки напряженно-деформированного состояния с определением силовых граничных условий методом акустоупругости и его применение для анализа повреждаемости". СС № 111. "Тяжелое машиностроение", 2016, № 1-2, с. 11-18)

$$M_x = \frac{W}{\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_z(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (5)$$

$$M_y = -\frac{W}{\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_z(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (6)$$

$$W = \frac{\pi(D_{вн}+h)^2 h}{4},$$

где  $W$  - момент сопротивления тонкостенной трубы;  $h$  - толщина стенки трубы;  $D_{вн}$  - внутренний диаметр трубы;  $\theta$  - угловая координата в плоскости поперечного сечения, функция углового распределения продольных напряжений  $\sigma_z(\theta)$  определяется по результатам измерений значений продольных напряжений в точках измерения.

Если измерения выполняются в обоих сечениях, расположенных по обе стороны от шва, то для определения напряжений в металле шва используются усредненные по обоим сечениям значения  $\overline{\sigma_z}$ ,  $\overline{\sigma_t}$  и  $M$ .

Максимальные кольцевые растягивающие напряжения в наплавленном металле определяют по величине минимальных уравнивающих кольцевых мембранных напряжений в примыкающей к сварному соединению зоне основного металла. Максимальные значения кольцевых остаточных напряжений в наплавленном металле шва ( $\sigma_{t,ш}$ ) с использованием коэффициента уравнивания определяются по формуле:

$$\sigma_{t,ш} = k \overline{\sigma_t} \quad (7)$$

Максимальные продольные напряжения определяют как суперпозицию напряжений, обусловленных натягом, и изгибных напряжений, обусловленных суммарным изгибающим моментом. Максимальные значения продольных напряжений в наплавленном металле шва ( $\sigma_{z,ш}$ ) определяются по формуле:

$$\sigma_{z,ш} = \frac{M}{W} + \overline{\sigma_z} \quad (8)$$

Если по результатам исследований на образцах-представителях основного металла свариваемых элементов установлено, что он является акустически изотропным, то есть разброс значений собственной акустической анизотропии основного металла ( $a_0$ ), определяемой по формуле:

$$a_0 = 2 \frac{t_{02}-t_{01}}{t_{02}+t_{01}}, \quad (9)$$

не превышает 0,0004, то реализуется второй вариант способа определения остаточных напряжений.

Способ по второму варианту осуществляют следующим образом. На исследуемом участке трубопровода ультразвуковым эхо-методом измеряют время распространения объемных волн, и по результатам измерения определяют характеристики напряженного состояния сварного соединения. Согласно второму варианту способа определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, выполненных из акустически изотропного металла, для конкретного типа труб путем расчетного моделирования предварительно определяют:

положение сечений уравнивания, в которых уравнивающие кольцевые напряжения в основном металле достигают минимальных значений;

значение коэффициента уравнивания ( $k$ ) по формуле (1).

Также определяют значение собственной акустической анизотропии основного металла ( $a_0$ ).

Положение сечений уравнивания должно уточняться после изготовления сварного соединения

в ходе предварительных измерений, выполняемых в точках, расположенных вдоль образующих трубопровода.

После изготовления сварного соединения, в сечениях уравнивания выполняют измерения рабочих значений времени распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы. По результатам измерений с использованием уравнения акустоупругости для разности продольных и кольцевых мембранных напряжений определяют значения указанной разности для каждой точки измерения:

$$\sigma_z - \sigma_t = D \left( 2 \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1} - a_0 \right) \quad (10)$$

где  $D$  - коэффициент упруго-акустической связи для одноосного напряженного состояния, определяемый в соответствии со стандартной процедурой (для свариваемых элементов из углеродистых и низколегированных сталей допускается не определять значения  $D$ , а использовать обобщенный коэффициент упруго-акустической связи).

Разделение продольных и кольцевых мембранных напряжений выполняют с использованием результатов определения продольных напряжений в дополнительном сечении. Для этого по результатам измерений в дополнительном сечении, расположенном вне зоны действия остаточных сварочных напряжений, определяются  $\overline{\sigma_z}$  - средние по сечению измерений значения продольных мембранных напряжений ( $\sigma_z$ ) в точках измерений. Значения  $\sigma_z$ , в свою очередь, определяются по формуле (10) при условии, что в сечении дополнительных измерений отсутствуют остаточные напряжения и, следовательно, во всех точках измерения  $\sigma_t = 0$ .

Значения мембранных кольцевых напряжений определяют в соответствии с принципом компенсации изгибных продольных напряжений в поперечном сечении, а также с учетом того, что средние значения продольных мембранных напряжений одинаковы по всей длине цилиндрического элемента. Для каждого сечения измерений определяются значения  $\overline{\sigma_t}$  - средние по сечению измерений значения кольцевых мембранных уравнивающих напряжений ( $\sigma_t$ ). Кольцевые мембранные напряжения в точках измерений, в соответствии с (10), определяются по формуле:

$$\sigma_t = \overline{\sigma_z} - D \left( 2 \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1} - a_0 \right) \quad (11)$$

Суммарный изгибающий момент  $M$  и его составляющие  $M_x$  и  $M_y$  определяются по формулам, соответственно (4, 5 и 6).

Если измерения выполняются в обоих сечениях, расположенных по обе стороны от шва, то для определения напряжений в металле шва используются усредненные по обоим сечениям значения  $\overline{\sigma_z}$ ,  $\overline{\sigma_t}$  и  $M$ .

Максимальные значения остаточных продольных и кольцевых локальных напряжений в металле шва  $\sigma_{t,ш}$  и  $\sigma_{z,ш}$  определяют по формулам (7) и (8) с использованием коэффициента уравнивания.

Изобретение поясняется следующими примерами.

Пример 1. Определение максимальных остаточных сварочных напряжений в сварном соединении составной катушки, изготовленной из трубных заготовок Ду850х70 (сталь 10ГН2МФА).

Измерения параметров акустоупругости выполнялись с использованием прибора ИН-5101А, аттестованного как средство измерения одно- и двухосных механических напряжений. Измерения выполнялись в соответствии с требованиями "Элементы оборудования АЭС. Методика выполнения измерений механических напряжений, возникающих в результате технологических воздействий, методом акустоупругости". Свидетельство об аттестации методики выполнения измерений № 633/1700 от 10.06.2009 г. Зарегистрирована в Федеральном реестре методик выполнения измерений под № ФР.1.28.2009.06227.

Положение сечений для данного типа труб и значение коэффициента уравнивания определено по результатам расчетного моделирования остаточных сварочных напряжений до проведения термообработки с применением программного комплекса "СВАРКА", разработанного на кафедре технологий сварки и диагностики Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

На фиг. 1 представлена схема определения сечений измерения (1а и 1б) по результатам расчетов кольцевых мембранных напряжений в сварном соединении методом конечных элементов.

По результатам расчета (фиг. 1) установлено, что сечения измерения 1а и 1б расположены на расстоянии  $\pm 50$  мм от центральной оси шва, а коэффициент уравнивания по формуле (1):  $k = -3,25$ .

Далее были определены точки измерения. Схема размещения точек измерения на объекте контроля в сечениях 1а и 1б приведена на фиг. 2 и 3.

Во всех точках измерения до выполнения сварки были определены начальные значения времен распространения ( $t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{03}$ ) акустических сигналов.

Рабочие значения ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ) определялись дважды: до и после выполнения термообработки. Результаты определения усредненные по сечениям измерения по формулам (2) и (3) продольных и кольцевых напряжений в точках измерения до (кривая а) и после (кривая б) термообработки приведены на фиг. 4.

Для определения напряжений использовались коэффициенты упруго-акустической связи, полученные в соответствии с требованиями "Элементы оборудования АЭС. Методика выполнения измерений механических напряжений, возникающих в результате технологических воздействий, методом акустоуп-

ругости". Свидетельство об аттестации методики выполнения измерений № 633/1700 от 10.06.2009 г. Зарегистрирована в Федеральном реестре методик выполнения измерений под № ФР.1.28.2009.06227 для стали 10ГН2МФА:

$$K_1 = -116300 \text{ МПа}; K_2 = -12000 \text{ МПа}; D = -128300 \text{ МПа}.$$

По результатам измерения напряжений определены усредненные значения кольцевых напряжений в сечениях измерения до и после термообработки ( $\overline{\sigma}_{t\text{св}}$  и  $\overline{\sigma}_{t\text{ТО}}$ , соответственно):

$$\overline{\sigma}_{t\text{св}} = -190 \text{ МПа}; \overline{\sigma}_{t\text{ТО}} = -1 \text{ МПа};$$

по формулам (4-6) значения изгибающего момента в сечении шва до и после термообработки ( $M_{\text{св}}$  и  $M_{\text{ТО}}$ , соответственно):

$$M_{\text{св}} = 0,14 \text{ МН*м}; M_{\text{ТО}} = 0,04 \text{ МН*м}.$$

Ввиду отсутствия закрепления торцов составной катушки, усредненные продольные напряжения ( $\overline{\sigma}_z$ ) принимались тождественно равными нулю, что соответствует результатам измерений, для которых усредненные продольные напряжения находятся в пределах погрешности измерений.

Максимальные кольцевые растягивающие напряжения в сварном соединении, определяемые по формуле (7), до и после термообработки ( $\sigma_{t,\text{мсв}}$  и  $\sigma_{t,\text{мТО}}$ , соответственно) равны:

$$\sigma_{t,\text{мсв}} = 615 \text{ МПа и } \sigma_{t,\text{мТО}} = 5 \text{ МПа}$$

Максимальные продольные напряжения в сварном соединении, определяемые, определяемые по формуле (8), до и после термообработки ( $\sigma_{z,\text{мсв}}$  и  $\sigma_{z,\text{мТО}}$ , соответственно) равны:

$$\sigma_{z,\text{мсв}} = 3 \text{ МПа и } \sigma_{z,\text{мТО}} = 1 \text{ МПа}.$$

Пример 2. Определение максимальных остаточных сварочных напряжений в сварном соединении составной катушки, изготовленной из трубных заготовок Ду850х70 (сталь 10ГН2МФА), для которой выполнены предварительные исследования акустических характеристик металла.

По результатам исследования на образцах-представителях основного металла свариваемых элементов катушки установлено, что значения собственной акустической анизотропии находятся в пределах  $0,0001 \pm 0,0003$ , то есть основной металл катушки является акустически изотропным. В качестве начального значения собственной акустической анизотропии принято:

$$a_0 = 0,0001.$$

Для уточнения положения сечений измерений были после изготовления сварного соединения проведены дополнительные измерения акустической анизотропии в точках, расположенных вдоль образующих трубопровода (фиг. 4, где представлено расположение точек измерения (О1-4) на образующих I и II трубопровода).

По результатам измерений установлено, что минимальные значения собственной акустической анизотропии соответствуют точкам О2, расположенным на расстоянии 50 мм от линии шва, что соответствует результатам расчетного моделирования.

Таким образом, положение сечений измерений 1а и 1б и значение коэффициента уравнивания принято аналогично примеру 1. Расположение точек измерения напряжений также аналогично Примеру 1. Поскольку, ввиду отсутствия закрепления торцов составной катушки, усредненные продольные напряжения ( $\overline{\sigma}_z$ ) принимались тождественно равными нулю, измерения в сечении 2, предназначенные для определения  $\overline{\sigma}_z$  не проводились.

Рабочие значения ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ) определялись дважды: до и после выполнения термообработки. Результаты определения по формуле (9) значений акустической анизотропии (усредненные по сечениям измерения) в точках измерения до и после термообработки приведены на фиг. 5 и 6.

По результатам измерения акустической анизотропии определены: по формуле (10) усредненные значения кольцевых напряжений в сечениях измерения до и после термообработки ( $\overline{\sigma}_{t\text{св}}$  и  $\overline{\sigma}_{t\text{ТО}}$ , соответственно):

$$\overline{\sigma}_{t\text{св}} = -199 \text{ МПа}; \overline{\sigma}_{t\text{ТО}} = -6 \text{ МПа};$$

по формулам (11-12) значения изгибающего момента в сечении шва до и после термообработки ( $M_{\text{св}}$  и  $M_{\text{ТО}}$ , соответственно):

$$M_{\text{св}} = 0,11 \text{ МН*м}; M_{\text{ТО}} = 0,09 \text{ МН*м}.$$

Максимальные кольцевые растягивающие напряжения в сварном соединении, определяемые по формуле (13), до и после термообработки ( $\sigma_{t,\text{мсв}}$  и  $\sigma_{t,\text{мТО}}$ , соответственно) равны:

$$\sigma_{t,\text{мсв}} = 646 \text{ МПа и } \sigma_{t,\text{мТО}} = 20 \text{ МПа}.$$

Максимальные продольные напряжения в сварном соединении, определяемые, определяемые по формуле (8), до и после термообработки ( $\sigma_{z,\text{мсв}}$  и  $\sigma_{z,\text{мТО}}$ , соответственно) равны:

$$\sigma_{z,\text{мсв}} = 2,4 \text{ МПа и } \sigma_{z,\text{мТО}} = 1,9 \text{ МПа}.$$

# ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, заключающийся в том, что на исследуемом участке трубопровода ультразвуковым эхо-методом измеряют время распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, и по результатам измерения определяют характеристики напряженного состояния сварного соединения, отличающийся тем, что для конкретного типа труб путем расчетного моделирования предварительно определяют положение сечений уравнивания, в которых уравнивающие кольцевые напряжения в основном металле достигают минимальных значений, и значение коэффициента уравнивания, равного отношению максимальных остаточных растягивающих мембранных кольцевых напряжений в металле шва к значению минимальных остаточных сжимающих мембранных кольцевых напряжений в основном металле, затем, до начала изготовления сварного соединения, в сечениях уравнивания выполняют измерения начальных значений времени распространения продольной волны и поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, после изготовления сварного соединения в тех же точках измерений выполняют измерения рабочих значений времени распространения этих же типов волн, по результатам измерений с использованием уравнений акустоупругости для двухосного напряженного состояния для каждого сечения измерений определяют значения мембранных продольных  $\sigma_z$  и кольцевых  $\sigma_t$  напряжений:

$$\sigma_z = K_1 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_1t_{03}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{02}t_3}{t_2t_{03}} - 1 \right)$$

$$\sigma_t = K_1 \left( \frac{t_{01}t_2}{t_1t_{02}} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_1t_{03}} - 1 \right)$$

где  $t_{01}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{03}$  - начальные, а  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  - рабочие значения времен распространения для поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек образующей трубы, и продольной волны,  $K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты упруго-акустической связи,

а также для каждого сечения измерений определяют значения изгибающих моментов, с использованием которых, на основании принципа уравнивания мембранных напряжений и с учетом коэффициента уравнивания, определяют максимальные значения остаточных продольных и кольцевых локальных напряжений в металле шва.

2. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, выполненных из акустически изотропного металла, заключающийся в том, что на исследуемом участке трубопровода ультразвуковым эхо-методом измеряют время распространения объемных волн, и по результатам измерения определяют характеристики напряженного состояния сварного соединения, отличающийся тем, что для конкретного типа труб путем расчетного моделирования предварительно определяют положение сечений уравнивания, в которых уравнивающие кольцевые напряжения в основном металле достигают минимальных значений, и значение коэффициента уравнивания, равного отношению максимальных растягивающих мембранных кольцевых напряжений в металле шва к значению минимальных сжимающих мембранных кольцевых напряжений в основном металле, а также значение собственной акустической анизотропии основного металла, после изготовления сварного соединения, в сечениях уравнивания выполняют измерения рабочих значений времени распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек оси трубы, по результатам измерений с использованием уравнения акустоупругости для разности продольных  $\sigma_z$  и кольцевых  $\sigma_t$  мембранных напряжений определяют значения указанной разности для каждой точки измерения:

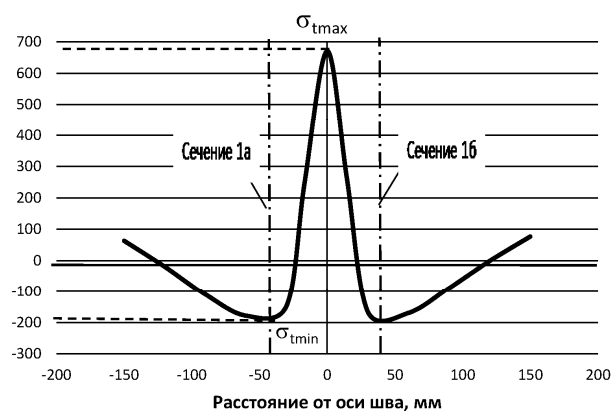
$$\sigma_z - \sigma_t = D \left( 2 \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1} - a_0 \right),$$

где  $t_1$  и  $t_2$  - рабочие значения времен распространения волн,  $a_0$  - собственная акустическая анизотропия основного металла,  $D$  - коэффициент упруго-акустической связи,

разделение продольных и кольцевых мембранных напряжений выполняют с использованием результатов определения продольных напряжений в дополнительном сечении, далее для каждого сечения измерений определяют значения мембранных продольных и кольцевых напряжений, а также изгибающих моментов, с использованием которых, на основании принципа уравнивания мембранных напряжений и с учетом коэффициента уравнивания, определяют максимальные значения остаточных продольных и кольцевых локальных напряжений в металле шва.

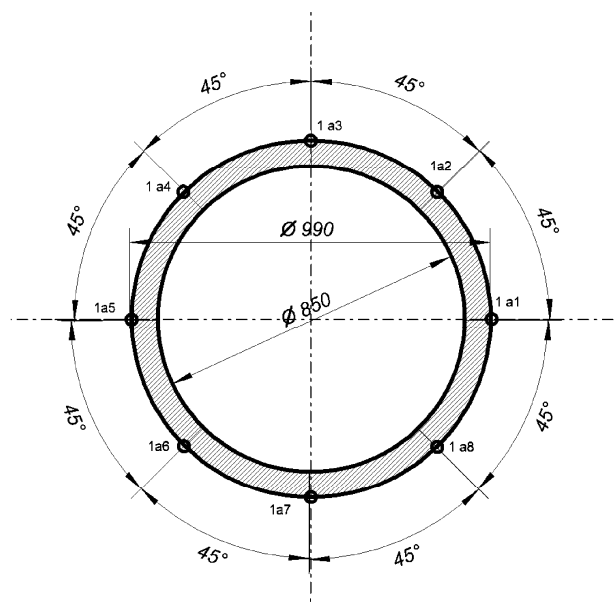
$\sigma_t$  МПа

Расчетное определение сечений измерения

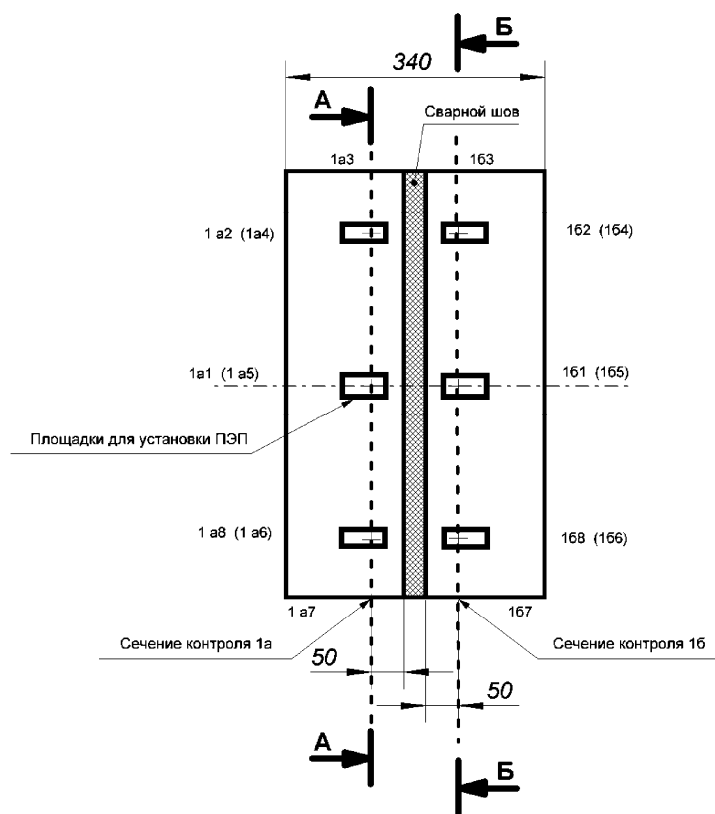


— расчетное распределение напряжений

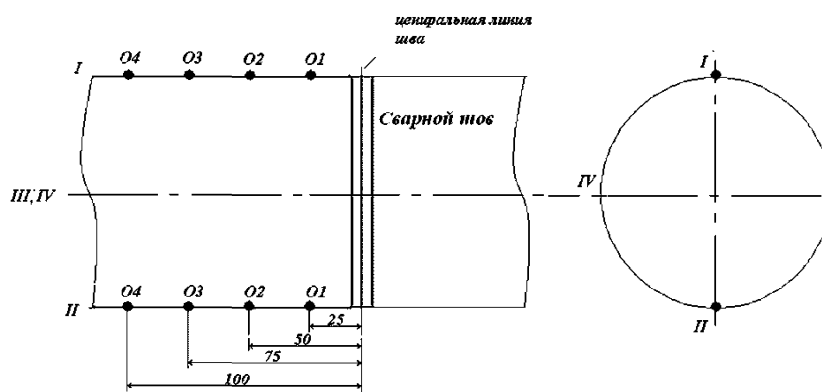
Фиг. 1



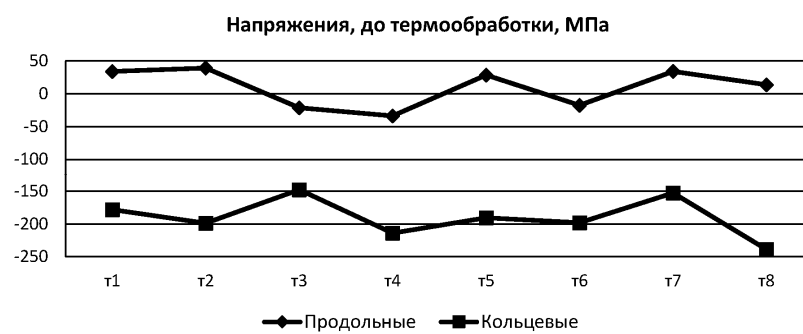
Фиг. 2



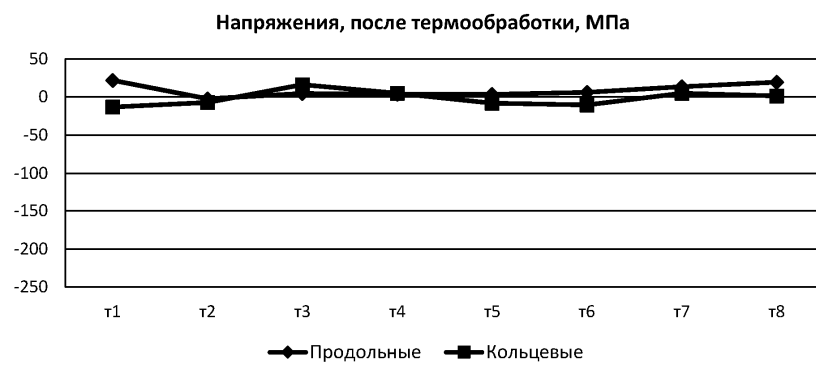
Фиг. 3



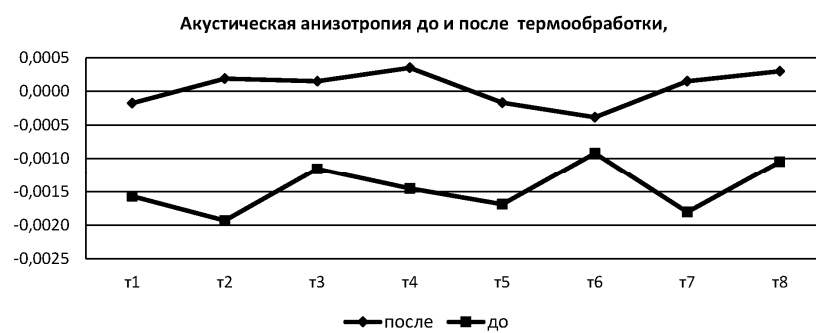
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

