

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.179.1+534.6+539.32+537.624.8

К.В. Курашкин, В.В. Мишакин

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И МАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ БЕЗ РАЗГРУЗКИ МАТЕРИАЛА

Институт проблем машиностроения Российской академии наук,  
Нижний Новгород

Описан метод, позволяющий получить распределение напряжений в материале конструкции в условиях эксплуатации. Метод основывается на совместном использовании результатов ультразвуковых и магнитных исследований: на анализе коэффициентов Пуассона и коэрцитивной силы. Приведен пример практического применения разработанного метода для определения остаточных напряжений в трубе газопровода из стали 09Г2С в полевых условиях.

*Ключевые слова:* контроль напряжений, коэффициенты Пуассона, коэрцитивная сила.

#### Введение

Определение напряженного состояния и прочности материала осуществляется в целях обеспечения надежности и безопасности машин и конструкций на всех стадиях их жизненного цикла. Высокая концентрация напряжений различного происхождения является одним из факторов, ограничивающих ресурс материала.

Для решения задач по оценке напряжений широкое распространение получили ультразвуковой и магнитный методы исследований, обладающие приемлемой точностью, высокой скоростью и простотой измерений, низкой стоимостью проведения работ, удобством использования в полевых условиях, безопасностью для обслуживающего персонала. Однако существующие методики и технические средства ультразвукового и магнитного контроля напряженного состояния требуют проведения измерений как в нагруженном, так и в свободном от напряжений материале, либо используют образцы-эталон. Разгрузка конструкции, как правило, экономически невыгодна, а, зачастую, невозможна ввиду условий работы. Использование образцов-эталонов может приводить к большим ошибкам. В связи с этим, востребованы методы контроля напряжений, позволяющие получать информацию непосредственно на конструкциях в условиях эксплуатации. Задача определения напряжений непосредственно на нагруженной конструкции тесно переплетается с проблемой определения параметров, характеризующих начальное состояние материала. Решение этой задачи хотя бы в ряде частных случаев чрезвычайно важно для ответственных дорогостоящих объектов нефтегазовой промышленности, авиационной и космической техники, ядерной энергетики, непроектные нагрузки на которых могут вызвать их разрушение, материальные потери и человеческие жертвы.

Цель настоящей работы – разработка метода оценки напряжений по результатам ультразвуковых и магнитных исследований без разгрузки конструкции.

## Теоретическая часть.

## Разработка метода оценки напряжений без разгрузки конструкции

Ультразвуковой контроль напряжений основан на акустоупругом эффекте – зависимости скорости распространения упругой волны от напряженного состояния [1, 2]. Для плоских элементов конструкций с односторонним доступом измерение длины акустического пути представляет серьезную проблему, поэтому точность измерения скорости распространения ультразвука невысока. В качестве информативных параметров акустического метода контроля напряжений в таких случаях целесообразно использовать относительные величины, измеряемые через времена распространения объемных упругих волн различного типа. Например, можно определить коэффициенты Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  материала:

$$\nu_{31} = \frac{0.5 - (V_1/V_3)^2}{1 - (V_1/V_3)^2} = \frac{0.5 - (t_3/t_1)^2}{1 - (t_3/t_1)^2}, \quad \nu_{32} = \frac{0.5 - (V_2/V_3)^2}{1 - (V_2/V_3)^2} = \frac{0.5 - (t_3/t_2)^2}{1 - (t_3/t_2)^2}, \quad (1)$$

где  $V_1, V_2$  – скорости поперечных волн, поляризованных вдоль соответствующих осей ортотропного материала;  $V_3$  – скорость продольной волны;  $t_1, t_2$  – времена распространения поперечных волн;  $t_3$  – время распространения продольной волны.

Коэффициент  $\nu_{31}$  характеризует величину деформации в направлении  $n_3$  от напряжения  $\sigma_1$ , коэффициент  $\nu_{32}$  – величину деформации в направлении  $n_3$  от напряжения  $\sigma_2$  [3]. Для изотропного материала  $\nu_{31} = \nu_{32}$ .

Из уравнений акустоупругости можно получить зависимости коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  от напряжений. Для ортотропного материала в плоском напряженном состоянии получены следующие соотношения [4,5]:

$$\nu_{31} = \nu_{031} + m_{11}\sigma_1 + m_{12}\sigma_2, \quad \nu_{32} = \nu_{032} + m_{21}\sigma_1 + m_{22}\sigma_2. \quad (2)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – главные напряжения, действующие вдоль осей  $n_1$  и  $n_2$  ортотропного материала;  $\nu_{031}, \nu_{032}$  – значения коэффициентов Пуассона в материале без напряжений;  $m_{ij}$  – коэффициенты, выражаемые через упругие модули второго и третьего порядка.

Коэффициенты  $m_{ij}$  легко могут быть определены в результате акустомеханических испытаний образцов.

Для примера на рис. 1 представлены зависимости изменений коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  от напряжения, полученные при одноосном растяжении плоского образца из стали 09Г2С.

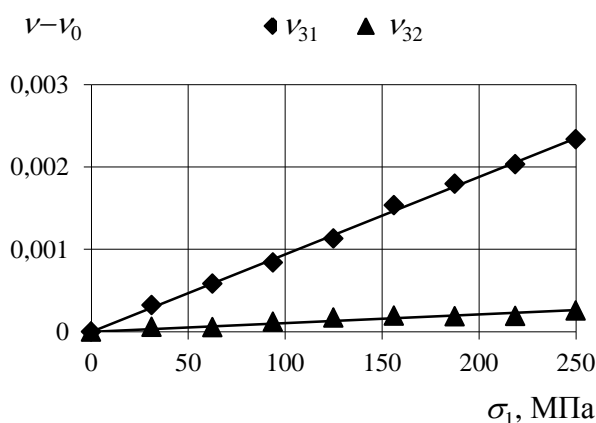


Рис. 1. Зависимости коэффициентов Пуассона от напряжения

Проведенные ультразвуковые исследования плоских образцов и элементов труб из листовых сталей 08пс, 15, 20, 09Г2С и 15Г2СФ [4,5] показали, что в отсутствии остаточных напряжений между коэффициентами Пуассона  $\nu_{031}$  и  $\nu_{032}$  существует линейная зависимость:

$$\nu_{032} = B\nu_{031} + Q, \quad (3)$$

где  $B, Q$  – коэффициенты.

Корреляционное поле коэффициентов Пуассона  $\{v_{031}; v_{032}\}$  для каждого исследованного плоского образца без напряжений близко к прямой (коэффициент корреляции более 0,9). В материале труб с остаточными напряжениями связи между коэффициентами Пуассона не прослеживается, но после разрезки труб и снятия остаточных напряжений наблюдается линейная зависимость между коэффициентами Пуассона.

Таким образом линейная зависимость между коэффициентами Пуассона  $v_{031}$  и  $v_{032}$  свидетельствует об отсутствии неоднородных напряжений. На основании полученных экспериментальных результатов предлагается использовать найденную зависимость между коэффициентами Пуассона  $v_{031}$  и  $v_{032}$  при оценке напряжений в конструкциях из листовой стали.

Из системы уравнений (2) с учетом зависимости (3) можно исключить  $v_{031}$  и  $v_{032}$ :

$$v_{32} - Bv_{31} - Q = (m_{21} - Bm_{11})\sigma_1 + (m_{22} - Bm_{12})\sigma_2 = c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2. \tag{4}$$

Для оценки напряжений может быть использован параметр  $\delta v$ :

$$\delta v = v_{32} - Bv_{31} - Q. \tag{5}$$

Определение коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  для образцов из сталей 08пс, 15, 20, 15Г2СФ, 09Г2С показало, что они фактически равны по абсолютной величине даже для материала с существенной анизотропией и отличаются знаком. С учетом значений  $c_1$  и  $c_2$  из (4) и (5) можно получить формулу для оценки разности главных напряжений:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = k_v \delta v, \tag{6}$$

где  $k_v$  – коэффициент. Значения коэффициента  $k_v$  для исследованных сталей лежат в диапазоне 200÷240 ГПа.

На рис. 2 показаны результаты ультразвуковых измерений коэффициентов Пуассона в материале сварной плиты из листовой стали 20 до и после снятия остаточных напряжений. Остаточные напряжения в нескольких точках измерялись с помощью тензорезисторов.

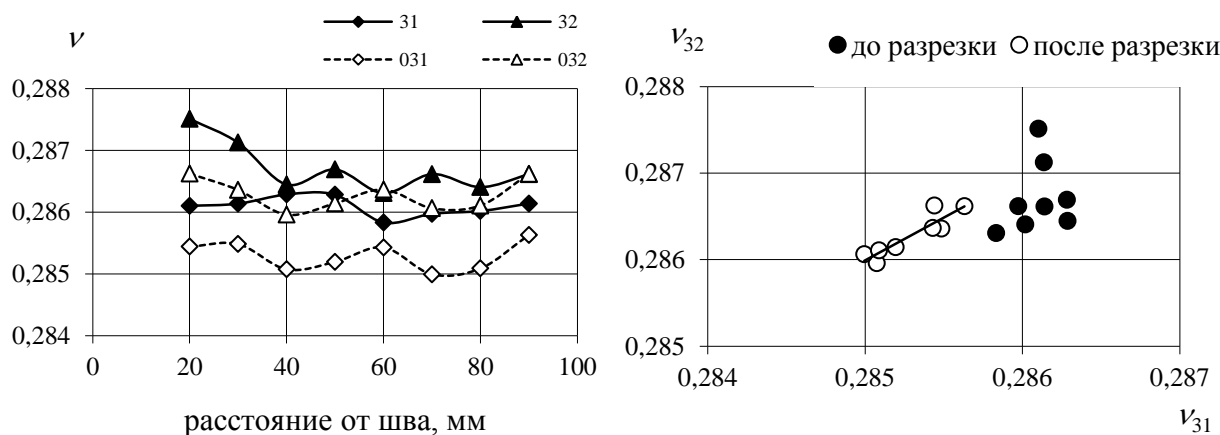


Рис. 2. Коэффициенты Пуассона в сварной плите из стали 20

Коэффициенты линейной зависимости (белые точки)  $B = 0,9898$  и  $Q = 0,0039$  были получены в результате регрессионного анализа. По формуле (5) были рассчитаны значения отклонения  $\delta v$  в каждой зоне. Затем с помощью соотношения (6) при  $k_v = 224 \pm 12$  ГПа определялась разность напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$ .

Результаты ультразвуковых и электротезометрических исследований находятся в хорошем соответствии (рис. 3). Таким образом, соотношение (6) может быть использовано для оценки напряжений в материале без разгрузки конструкции. При одностороннем доступе к плоскому элементу конструкции с помощью ультразвука можно определить разность главных напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$ , но для того чтобы получить значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в отдельности, нужны дополнительные исследования другими методами.

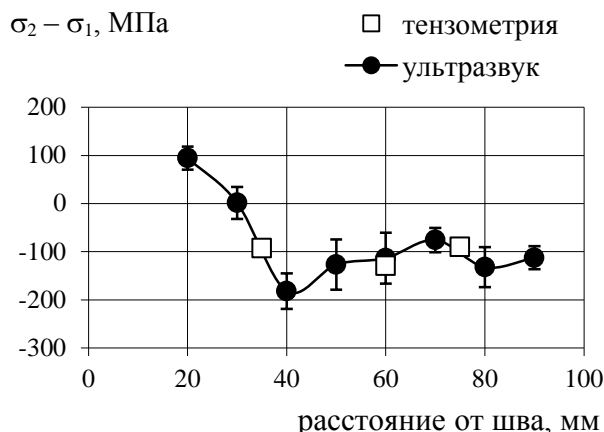


Рис. 3. Разность главных напряжений в зависимости от расстояния от сварного шва

Для определения напряженного состояния ферромагнитных материалов перспективным представляется использование магнитного индукционного метода, основанного на измерении коэрцитивной силы. Согласно теории процессов намагничивания и перемагничивания, величина коэрцитивной силы определяется факторами, задерживающими необратимое смещение границ между доменами, среди которых механические напряжения [6]. Аналитических зависимостей коэрцитивной силы от приложенных нагрузок не существует, для оценки напряжений используются эмпирические тарировочные зависимости [7, 8, 9].

Результаты проведенных магнитных исследований образцов и элементов конструкций из сталей 20, 09Г2С и 13Г1С-У позволяют предложить для описания зависимости коэрцитивной силы от напряжений следующие соотношения:

$$H_{C1}^{\sigma} = H_{C1}^0 + q_{11}\sigma_1 + q_{12}\sigma_2, \quad H_{C2}^{\sigma} = H_{C2}^0 + q_{21}\sigma_1 + q_{22}\sigma_2, \quad (7)$$

где  $H_{C1}$ ,  $H_{C2}$  – значения коэрцитивной силы при измерениях вдоль осей  $n_1$  и  $n_2$  ортотропного материала соответственно,  $q_{ij}$  – коэффициенты, значения которых зависят от вида напряженного состояния и от магнитных свойств материала. Уравнения (7) хорошо описывают наблюдаемые зависимости коэрцитивной силы от одно- и двухосных напряжений для сталей 20, 09Г2С и 13Г1С-У.

В результате регрессионного анализа экспериментальных зависимостей коэрцитивной силы от напряжений были получены коэффициенты  $q_{ij}$ .

Для стали 09Г2С в условиях одноосного растяжения:  $q_{11} = 0,0005 \pm 0,0002$ ,  $q_{21} = 0,0051 \pm 0,0002$ . Исследованный образец обладал выраженной анизотропией коэрцитивной силы:  $H_{C1}^0 = 4,0$  А/см,  $H_{C2}^0 = 4,6$  А/см.

Для стали 20 в условиях одноосного растяжения:  $q_{11} = -0,0011 \pm 0,0001$ ,  $q_{21} = 0,0016 \pm 0,0002$ . Исследованный образец не обладал анизотропией коэрцитивной силы:  $H_{C1}^0 = 2,45$  А/см,  $H_{C2}^0 = 2,45$  А/см.

Для стали 20 в условиях плоского напряженного состояния:  $q_{11} = -0,0065 \pm 0,0001$ ,  $q_{21} = 0,0015 \pm 0,0002$ ,  $q_{12} = 0,0007 \pm 0,0002$ ,  $q_{22} = 0,0094 \pm 0,0002$ . Исследованный образец не обладал анизотропией коэрцитивной силы:  $H_{C1}^0 = 2,3$  А/см,  $H_{C2}^0 = 2,3$  А/см.

Для стали 13Г1С-У в условиях плоского напряженного состояния:  $q_{11} = -0,0002 \pm 0,0001$ ,  $q_{21} = 0,0046 \pm 0,0003$ ,  $q_{12} = 0,0025 \pm 0,0002$ ,  $q_{22} = 0,0002 \pm 0,0006$ . Исследованный элемент трубы обладал выраженной анизотропией коэрцитивной силы:  $H_{C1}^0 = 3,6$  А/см,  $H_{C2}^0 = 4,2$  А/см.

Анализ полученных результатов показал, что для трубных сталей 09Г2С и 13Г1С-У характерна анизотропия магнитных свойств: коэрцитивная сила, измеряемая в двух взаимно

перпендикулярных направлениях, отличается более чем на 15%, а  $q_{ii} \ll q_{ij}$ . Таким образом, для оценки напряжений в конструкциях из сталей 09Г2С, 13Г1С-У и подобных можно использовать следующие соотношения:

$$\sigma_1 = \frac{H_{C2}^\sigma - H_{C2}^0}{q_{21}}, \quad \sigma_2 = \frac{H_{C1}^\sigma - H_{C1}^0}{q_{12}}. \quad (8)$$

В качестве примера на рис. 4 представлены распределения величин  $H_{C1}^0$  и  $H_{C2}^0$  и распределения остаточных напряжений от кольцевого сварного шва в трубе из стали 13Г1С-У. Измерения коэрцитивной силы проводились с помощью магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М с малогабаритным датчиком в направлении перпендикулярном кольцевому шву. Для оценки напряжений по данным измерений коэрцитивной силы использовались соотношения (8). Также проведен аналитический расчет остаточных напряжений от кольцевого сварного шва по формулам теории сварочных деформаций и напряжений [10]. Результаты расчета с использованием предложенного алгоритма и аналитического расчета находятся в хорошем соответствии (рис. 4).

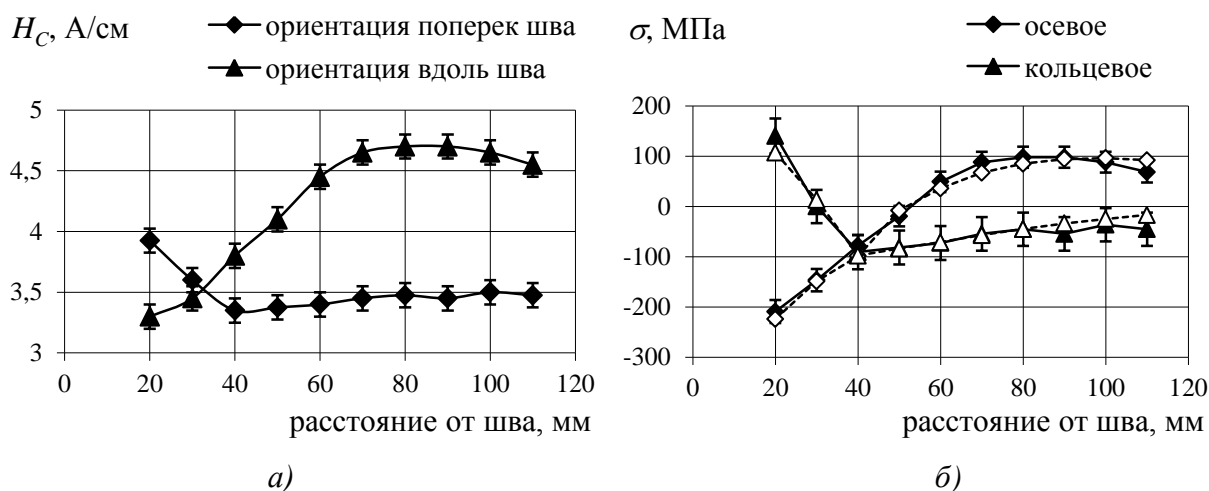


Рис. 4. Зависимость коэрцитивной силы от расстояния от шва (а),  
распределение остаточных напряжений (б):  
расчет по данным измерений коэрцитивной силы – черные точки,  
аналитический расчет – белые точки

Чтобы оценить напряжения с помощью (8), необходимо знать значения  $H_{C1}^0$  и  $H_{C2}^0$ . Для определения  $H_{C1}^0$  и  $H_{C2}^0$  требуется либо разгрузить конструкцию, либо найти участки без напряжений. Разгрузка конструкции не всегда возможна ввиду условий работы и, как правило, сопряжена с существенными экономическими потерями. В связи с этим, целесообразно применить дополнительные исследования, чтобы определить участки материала, свободные от напряжений. Эта задача решается путем ультразвуковых измерений и последующего анализа коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$ .

Таким образом, используя результаты магнитных и ультразвуковых исследований, можно получить распределение напряжений в материале без разгрузки конструкции. Алгоритм действий выглядит следующим образом. Ультразвуковым эхо-методом измеряются коэффициенты Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  на участке, где требуется получить распределение напряжений. В тех же зонах измеряются величины  $H_{C1}$  и  $H_{C2}$ . Затем анализируется корреляционное поле коэффициентов Пуассона  $\{\nu_{31}; \nu_{32}\}$ , выделяются участки, где влияние напряжений минимально ( $\sigma_1 \approx 0$ ;  $\sigma_2 \approx 0$ ). В этих зонах наблюдается линейная зависимость между коэффициентами

ентами Пуассона (3). Коэффициенты  $B$  и  $Q$  определяются в результате регрессионного анализа данных методом наименьших квадратов.

Для остальных зон по формуле (5) вычисляется отклонение  $\delta v^i$  и по формуле (6) оценивается разность напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$ . Далее определяются значения  $H_{C1}^0$  и  $H_{C2}^0$ , соответствующие ненагруженным областям материала, и с помощью (8) рассчитываются напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Затем значения разности напряжений, полученные в результате ультразвуковых и магнитных исследований, сравниваются между собой.

### Объект исследования и методика измерений

Апробация разработанного метода проводилась в полевых условиях. Объект исследований – участок трубы магистрального газопровода вблизи соединения кольцевого и продольного сварных швов. Диаметр трубы – 1420 мм, толщина стенки трубы – 16 мм, материал – сталь 09Г2С. Давление в трубе отсутствовало. Ультразвуковые и магнитные измерения проводились вблизи стыка кольцевого и продольного сварных швов согласно схеме на рис. 5. Всего исследовались 19 зон, шириной 10 мм каждая. В сварном шве исследования не проводились.



Рис. 5. Схема измерений

Ультразвуковые исследования проводились с помощью установки АИП, разработанной в ИПМ РАН. Время распространения упругих волн измерялось импульсным эхо-методом с помощью пьезоэлектрических преобразователей продольных и поперечных упругих волн V110 и V156 Panametrics. Диаметр преобразователей – 6 мм, частота – 5 МГц. Для обеспечения ввода упругих волн в материал поверхность в месте установки преобразователя шлифовалась и обезжиривалась спиртом. В качестве контактной жидкости использовалась эпоксидная смола без отвердителя. Измерения в каждой зоне повторялись 12 раз. Исследования проводились при комнатной температуре.

Для получения амплитудно-временной диаграммы серии отраженных импульсов использовался цифровой осциллограф PCS500 Velleman. Полученные данные обрабатывались в программе MathCad. Время распространения упругих волн измеряли между первым и четвертым отраженными импульсами. Погрешность измерения времени на базе 20 мкс для поперечных волн и на базе 10 мкс – для продольных волн составляла 1÷3 нс. Максимальная относительная погрешность измерения времени распространения упругих волн составляла 0,02% для поперечных волн и 0,04% – для продольных волн.

Значения коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  рассчитывались через времена распространения упругих волн по формулам (1). Абсолютная погрешность определения коэффициентов Пуассона не превышала  $3 \cdot 10^{-4}$ , относительная погрешность не превышала 0,1%. Погрешности рассчитывались по следующей формуле:

$$\Delta v_{3i} = \frac{t_i^2 t_3^2}{(t_i^2 - t_3^2)^2} \sqrt{\varepsilon_{t_1}^2 + \varepsilon_{t_2}^2}, \tag{9}$$

где  $i = 1, 2$  – индекс;  $\varepsilon_i$  – относительная погрешность измерения времени распространения упругих волн.

Измерения коэрцитивной силы проводились с помощью магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М. В приборе реализован компенсационный метод измерения. Фиксируемое значение тока размагничивания пропорционально коэрцитивной силе контролируемого участка изделия. Значение тока подается на вход АЦП, цифровая индикация производится в А/см. Погрешность прибора при комнатной температуре составляет  $(0,025/H_C + 0,03)$  А/см. При проведении исследований использовался малогабаритный приставной датчик. Расстояние между полюсами – 10 мм. Определялись показания коэрцитиметра в четырех направлениях:  $H_C^{0^\circ}$ ,  $H_C^{90^\circ}$ ,  $H_C^{180^\circ}$  и  $H_C^{270^\circ}$ , где верхний индекс обозначает угол, под которым ориентировался датчик по отношению к выбранному внешнему направлению. Абсолютная погрешность измерения коэрцитивной силы не превышала 0,1 А/см.

В качестве информативных параметров вычислялись средние значения показаний прибора вдоль и поперек заданного внешнего направления:

$$H_{C1} = \frac{1}{2}(H_C^{0^\circ} + H_C^{180^\circ}), \quad H_{C2} = \frac{1}{2}(H_C^{90^\circ} + H_C^{270^\circ}). \tag{10}$$

Погрешности оценивались по следующим формулам:

$$\Delta H_{C1} = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta H_C^{0^\circ})^2 + (\Delta H_C^{180^\circ})^2}, \quad \Delta H_{C2} = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta H_C^{90^\circ})^2 + (\Delta H_C^{270^\circ})^2}. \tag{11}$$

### Экспериментальная часть.

#### Апробация метода оценки напряжений без разгрузки конструкции

В результате ультразвуковых исследований были получены распределения коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$  вдоль оси трубы (рис. 6, а). На рис. 6, б представлено корреляционное поле  $\{\nu_{31}; \nu_{32}\}$ . Значения коэффициентов Пуассона определяются особенностями структуры материала и влиянием остаточных напряжений. На рис. 6 белые точки соответствуют зонам, в которых отсутствуют напряжения.

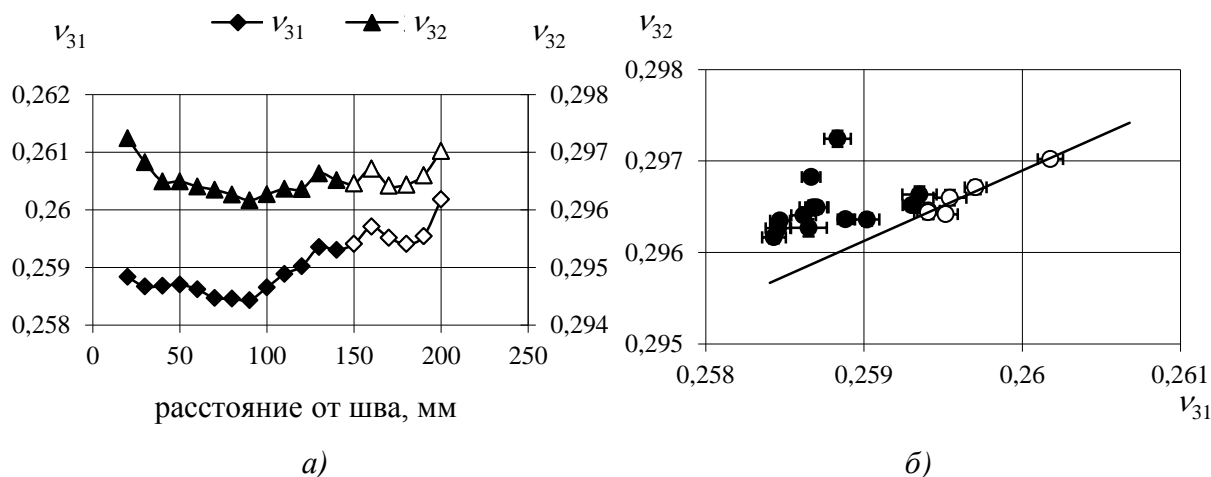


Рис. 6. Коэффициенты Пуассона в трубе из стали 09Г2С

В результате регрессионного анализа были получены коэффициенты линейной зависимости, показанной на рис. 6, б:  $B = 0.7701$ ,  $Q = 0.0967$ . Далее для каждой зоны по формуле (5) рассчитывался параметр  $\delta v$ . Значение разности главных напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$  в каждой зоне оценили по формуле (6) при  $k_v = 210 \pm 14$  ГПа. Погрешности вычислили, используя следующее соотношение:

$$\Delta(\sigma_2 - \sigma_1) = \sqrt{(k_v \Delta \delta v)^2 + (\delta v \Delta k_v)^2}, \quad (12)$$

где  $\Delta \delta v$ ;  $\Delta k_v$  – погрешности определения параметра  $\delta v$  и коэффициента  $k_v$ .

Наибольшая абсолютная погрешность составила 34 МПа при значении разности напряжений 262 МПа. Измеренные с помощью ультразвука напряжения являются средними по толщине материала.

Для получения распределения напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  были проведены измерения коэрцитивной силы. Распределения средних показаний коэрцитиметра при ориентации датчика вдоль и поперек оси трубы представлены на рис. 7, а.

Так как по данным ультразвуковых исследований, на расстоянии 150–200 мм от сварного шва остаточные напряжения отсутствуют, в этих зонах были определены значения  $H_{C1}^0 = 3,3 \pm 0,1$  и  $H_{C2}^0 = 3,8 \pm 0,1$ . Далее по формулам (8) при  $q_{21} = 0,0051 \pm 0,0002$ ,  $q_{12} = 0,0027 \pm 0,0003$  были рассчитаны напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Полученные распределения напряжений представлены на рис. 7, б.

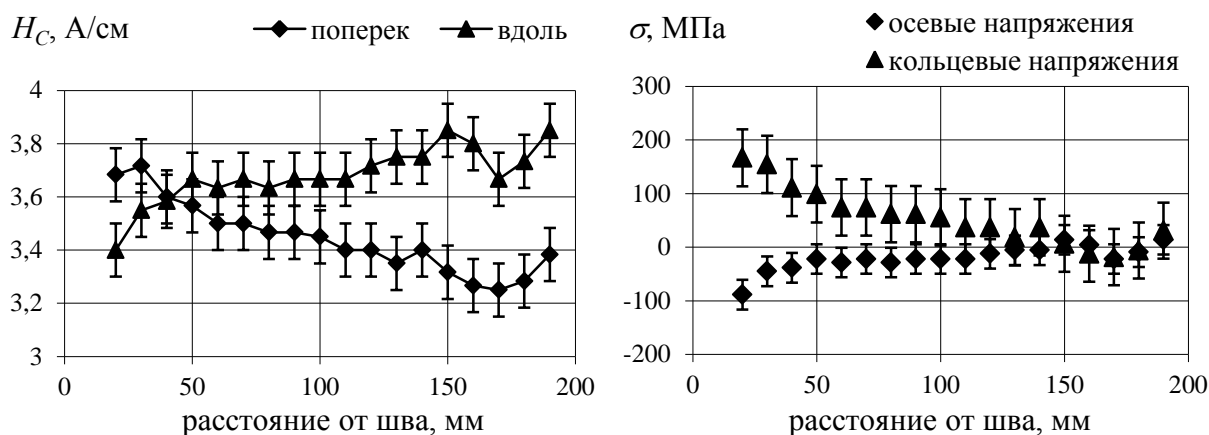


Рис. 7. Распределение коэрцитивной силы (а), распределение остаточных напряжений (б)

Погрешность определения напряжений по данным измерений коэрцитивной силы оценили, используя следующее соотношение:

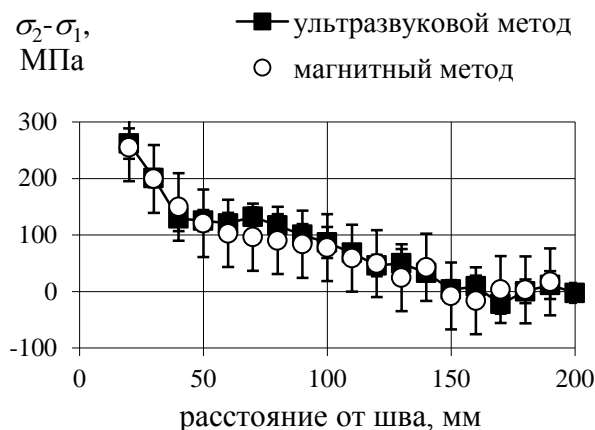
$$\Delta \sigma_i = \sqrt{\left(\frac{\Delta H_{Cj}}{q_{ji}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{Cj}^0}{q_{ji}}\right)^2 + \left(\frac{H_{Cj} - H_{Cj}^0}{q_{ji}^2} \Delta q_{ji}\right)^2}, \quad (13)$$

где  $\Delta H_C$  – погрешность измерения коэрцитивной силы;  $\Delta q$  – погрешность определения коэффициента  $q$ .

Для осевых напряжений погрешность составила 28 МПа, для кольцевых – 53 МПа. Предел текучести стали 09Г2С – 343 МПа.



На рис. 8 для сравнения приведены зависимости разности напряжений  $\sigma_2 - \sigma_1$  от расстояния от сварного шва, полученные в результате ультразвуковых и магнитных исследований. Наблюдается хорошее совпадение кривых, полученных обоими методами.



**Рис. 8. Распределения разности остаточных напряжений в трубе из стали 09Г2С, полученные в результате ультразвуковых и магнитных исследований**

### Выводы

Разработан метод определения неоднородных напряжений без разгрузки конструкции, основанный на совместном использовании результатов ультразвуковых и магнитных исследований: на анализе коэффициентов Пуассона и коэрцитивной силы материала. Разработанный метод пригоден для оценки остаточных напряжений в элементах конструкций, выполненных из магнитных листовых сталей 09Г2С, 13Г1С-У и других, обладающих выраженной анизотропией коэрцитивной силы и неоднородностью распределения упругих свойств.

Для осуществления измерений не требуется разгрузки материала, то есть предложенный метод позволяет проводить контроль напряженного состояния в условиях эксплуатации конструкции. Разработанный метод удовлетворяет общим требованиям контроля напряженного состояния объектов промышленности и транспорта, регламентированных ГОСТ Р 52330-2005 [11]. Проведена апробация разработанного метода определения напряжений в полевых условиях на трубе газопровода из стали 09Г2С.

### Библиографический список

1. **Chatellier J.-Y., Touratier M.** A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 83. №1. P. 109–117.
2. **Allen D.R., Sayers C.M.** The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique // Ultrasonics. 1984. V. 22. P. 179–188.
3. **Теребушко О.И.** Основы теории упругости и пластичности / О.И. Теребушко. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 320 с.
4. **Курашкин, К.В.** Метод ультразвукового контроля остаточных напряжений на основе измерений коэффициентов Пуассона / К.В. Курашкин, В.В. Мишакин // Контроль. Диагностика. 2013. №6. С. 14–18.
5. **Курашкин, К.В.** Оценка остаточных напряжений в сварных соединениях с помощью ультразвука / К.В. Курашкин, В.В. Мишакин // Заводская лаборатория. 2013. №4. С. 54–58.
6. **Бида, Г.В.** Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук // Дефектоскопия. 2000. №10. С. 3–28.
7. **Горкунов, Э.С.** Влияние магнитоупругого эффекта на гистерезисные свойства среднеуглеродистой стали при одноосном нагружении / Э.С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. 2010. №9. С. 17–25.

8. Бердник, М.М. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей / М.М. Бердник, Ю.В. Александров, Р.В. Агинец // Наука в нефтяной и газовой промышленности. 2010. № 3. С. 2–6.
9. Агинец, Р.В. Оценка напряженного состояния стальных трубопроводов по анизотропии магнитных свойств металла / Р.В. Агинец, А.С. Теплинский, Ю.А. Кузьбожев // Контроль. Диагностика. 2004. №8. С. 22–24.
10. Винокуров, В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
11. ГОСТ Р 52330-2005. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования. – Введ. 2005–19–04. – М.: Стандартиформ, 2005. – 7 с.

*Дата поступления  
в редакцию 13.09.2013*

**K.V. Kurashkin, V.V. Mishakin**

## **USE OF RESULTS OF ULTRASONIC AND MAGNETIC INVESTIGATIONS FOR EVALUATION OF STRESSES WITHOUT UNLOADING THE MATERIAL**

Institute problems of mechanical engineering  
the Russian academy of science

The article describes the method, which allows to obtain the distribution of stresses in the material of construction under service conditions. The method is based on the combined use of ultrasonic and magnetic investigations: on the analysis of Poisson's ratios and coercive force.

An example of the practical application of the developed method for the evaluation of residual stresses in the pipe from steel 09G2C in the field is presented.

*Key words:* determining of stresses, Poisson's ratios, coercive force.