

УДК 624.014:620.111.3

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТОУПРУГИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ ДЛЯ МАТЕРИАЛА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Г. С. Тымчик, М. В. Филиппова, М. А. Демченко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: amd.8@meta.ua

Рассмотрена проблема определения напряженного-деформированного состояния фасонных профилей металлических конструкций, эксплуатируемых промышленных сооружений. Предложен усовершенствованный акустический метод, основанный на эффекте акустоупругости с применением зеркально-теневого прозвучивания, который позволяет определять механические напряжения на полках фасонных профилей. Разработана методика и алгоритм определения акустоупругих коэффициентов связи для материала фасонных профилей металлических конструкций для реализации акустической диагностики. Экспериментально и аналитически установлены акустоупругие коэффициенты связи для материала фасонных профилей металлических конструкций Стали 3 С245, с использованием участка нейтральной линии профиля металлической конструкции, что позволяет проводить диагностику напряженно-деформированного состояния фасонных профилей без использования образцов металла с нулевыми механическими напряжениями.

Ключевые слова: металлические конструкции, механические напряжения, ультразвуковой контроль.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ АКУСТОПРУЖНИХ КОЕФІЦІЕНТІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ МАТЕРІАЛУ ФАСОННИХ ПРОФІЛІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова, М. О. Демченко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: amd.8@meta.ua

Розглянуто проблему визначення пружно-деформованого стану фасонних профілів металевих конструкцій промислових споруд, що експлуатуються. Запропоновано вдосконалений метод, який ґрунтується на ефекті акустопружності із застосуванням дзеркально-тіньового прозвучування, який дозволяє визначати механічні напруження на полицях фасонних профілів. Розроблено методику та алгоритм визначення акустопружності коефіцієнтів зв'язку для матеріалу фасонних профілів металевих конструкцій для реалізації акустичної діагностики. Експериментально та аналітично встановлені акустопружні коефіцієнти зв'язку для матеріалу фасонних профілів металевих конструкцій Сталі 3 С245, з використанням ділянки нейтральної лінії профілю металевої конструкції, що дозволяє проводити діагностику напружено-деформованого стану фасонних профілів без використання зразків металу з нульовими механічними напруженнями.

Ключові слова: металеві конструкції, механічні напруження, ультразвуковий контроль.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Эксплуатация металлических конструкций промышленных сооружений предполагает проведение постоянного мониторинга их технического состояния. Основным информативным показателем последних являются результаты сравнения проектных и фактических значений механических напряжений в условиях эксплуатационных нагрузок. Критические значения фактического напряжения возникают в локальных зонах элементов металлических конструкций из-за нарушения условий эксплуатации, указанных в технической документации.

Среди всех конструктивных элементов промышленных сооружений наибольшему нагружению подвергаются перекрытия, которые имеют пролет между опорными элементами. Такие конструктивные элементы металлических конструкций, выполненные из стальных фасонных профилей, работают на изгиб, где в местах наибольшего прогиба наблюдается возникновение максимальных значений механических напряжений. Для обеспечения надежности при проектировании металлических конструкций рассчитывают допустимые значения нагрузок, которые не приводят к возникновению критических напряжений в зонах их максимальной концентрации. Изменение напряженно-деформированного состояния металлических конструкций сооружения может быть вызвана рядом факторов, таких как: изменение

назначения здания; реорганизация технологического процесса с изменением оборудования технологических линий в самом здании; эксплуатация сооружения за пределами проектных режимов; природные катаклизмы; истончение под действием коррозии элементов конструкций; изменение нормативных требований, предъявляемых к постройке.

Для обеспечения целостности сооружения необходимо проводить контроль технического состояния сооружения и определять значений напряжений в местах их концентрации. Поэтому, имеет особое значение разработка оперативных методов неразрушающего контроля, которые позволят диагностировать значения показателей напряженно-деформированного состояния фасонных профилей с высокой точностью в течение всего жизненного цикла здания, без его повреждения [1, 2].

Наиболее эффективным методом в определении напряженно-деформированного состояния являются акустические методы, основанные на эффекте изменения скорости прохождения ультразвуковой волны в материале под действием напряжения [3–6]. Это позволяет устанавливать функциональную зависимость между задержкой распространения акустической волны и тензорами напряжений [7–9].

В работе [10] предложено использование зеркально-теневого метода для определения механических напряжений в полках фасонных профилей. В

частности с учетом скорости распространения ультразвуковой волны в ненапряженном участке фасонного профиля. Это позволяет проводить измерения действительных напряжений без использования образцов металла с нулевыми напряжениями.

Целью данной работы является разработка методики определения акустоупругих коэффициентов для материала фасонных профилей, что позволит реализовать зеркально-теневой метод для диагностики напряженно-деформированного состояния металлических конструкций.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. При изгибе балки под действием нагрузки происходит деформирование её кристаллической структуры, в результате чего возникают напряжения. Характерными напряжениями для фасонных профилей являются одноосные напряжения, направлены вдоль профиля параллельно его нейтральной линии. Как видно из рис. 1 напряжения в сечении профиля распределяются таким образом, что максимумы достигаются на полках профиля, а на нейтральной линии напряжения отсутствуют.

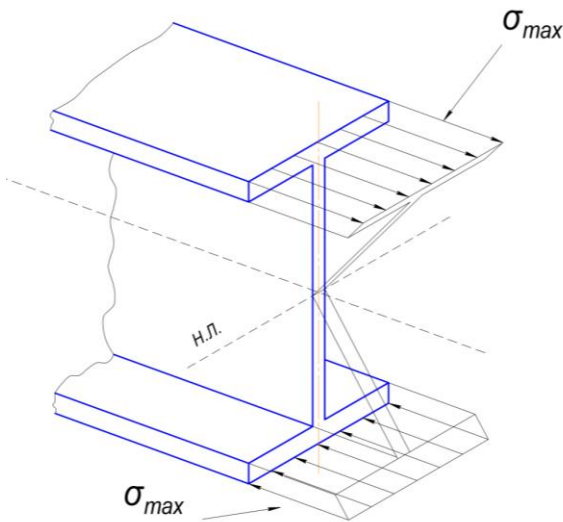


Рисунок 1 – Эпюра распределения напряжений в сечении фасонного профиля типа двутавр: σ_{max} - максимальное напряжение; Н.Л. - нейтральная линия фасонного профиля

Данная особенность изгиба балки позволила усовершенствовать акустический метод диагностики напряженно-деформированного состояния основанного на акустоупругом эффекте, применив для фасонных профилей зеркально-теневое прозвучивание, что позволяет, посредством относительного измерения скорости ультразвуковой волны в максимально напряженном элементе – полке и ненапряженном – нейтральной линии, определить величину механических напряжений.

Данный метод позволяет определять механические напряжения на полке фасонных профилей. Для расчета берется точка ввода луча излучателя 2 (рис. 2) на полке, где необходимо установить величину напряжения. Величина напряжения в этой точке определяется как

$$\sigma_1 = \frac{1}{k_K} \left(\frac{t}{s} \frac{\tau_1}{\tau_2} - 1 \right) f(x), \quad (1)$$

где k_K - акустоупругий коэффициент; t - толщина фасонного профиля полки в месте прозвучивания; s - толщина стенки фасонного профиля в месте прозвучивания; τ_1 - время прохождения ультразвуковой волны в стенке на нейтральной линии; τ_2 - время прохождения ультразвуковой волны в полке.

Необходимым является введение интегрального геометрического коэффициента $f(x)$ в случае распределения напряжения по фасонному профилю по линейному закону

$$f(x) = \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{h} \right) \left(1 - \frac{d}{l} \right), \quad (2)$$

а по параболическому –

$$f(x) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d^2}{l^2} \right) \left(3 - \frac{t}{h} \right) - 1, \quad (3)$$

где h - высота фасонного профиля; d - половина расстояние между преобразователями; l - половина длины фасонного профиля.

Интегральный геометрический коэффициент не вводится в тех случаях, когда усредненное значение напряжения по пути прозвучивания близкое к напряжению в точке ввода ультразвуковой волны

$$f(x) = 0. \quad (4)$$

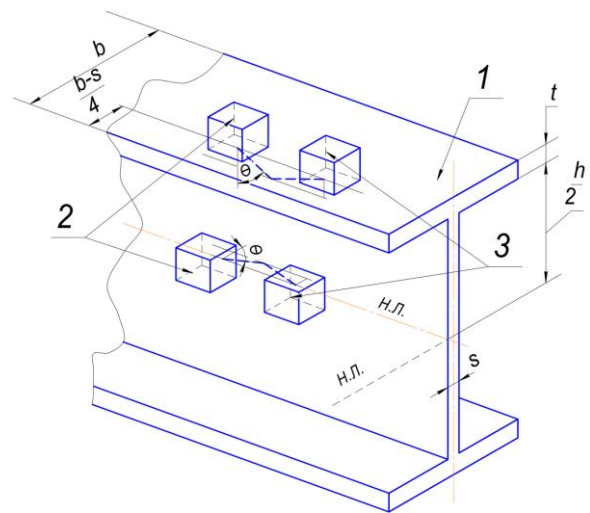


Рисунок 2 – Упрощенная схема определения акустоупругих коэффициентов связи для материала фасонного профиля с использованием зеркально-теневое метода: 1 – фасонный профиль типа двутавр; 2 - излучающие преобразователи; 3 - принимающие преобразователи

Для реализации данного метода необходимо установить акустоупругие коэффициенты связи для материала фасонных профилей металлических кон-

струкцій, которые в настоящее время выпускаются в Украине и используются в строительстве.

Предложенная методика определения акустоупругих коэффициентов для материала фасонных профилей металлических конструкций с использованием системы диагностики напряженно-деформированного состояния металлических конструкций [11] имеет следующую последовательность:

1. Определить сечение с максимально-допустимым значением напряжения $[\sigma]$ на расстоянии l от точки прикладывания силы P .

2. Рассчитать силу

$$P = \frac{[\sigma]_{\max} \cdot W_z}{l}, \quad (5)$$

которую необходимо приложить к балке для достижения напряжения $[\sigma]_{\max}$ в определенном сечении.

3. Выбрать место установки блока пьезоэлектрических преобразователей на нейтральной линии из расчета половины высоты профиля $h/2$ в сечениях согласно п. 1. База прозвучивания должна совпадать с осью симметрии профиля.

4. Измерить толщину стенки S фасонного профиля на нейтральной линии.

5. Выбрать место прозвучивания на полке фасонного профиля типа швеллер в сечении согласно п.1

$$(b-s)/2 \quad (6)$$

и двутавр

$$(b-s)/4. \quad (7)$$

База прозвучивания должна быть параллельной к грани полки.

6. Измерить толщину полки t фасонного профиля в месте прозвучивания п. 5.

7. Рассчитать расстояние между преобразователями

$$2d_1 = 2s \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (8)$$

$$2d_2 = 2t \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (9)$$

8. Измерить время прохождения ультразвуковой волны на нейтральной линии τ_1 .

9. Измерить время прохождения ультразвуковой волны в полке τ_2 под действием нагрузки P .

10. Рассчитать усредненное значение напряжения σ_{yc} по базе прозвучивания

$$\sigma_{yc} = \sigma_1 \cdot f(x). \quad (10)$$

11. Определить значение акустоупругого коэффициента по формуле

$$k_K = \frac{1}{\sigma_{yc}} \left(\frac{t}{s} \frac{\tau_1}{\tau_2} - 1 \right). \quad (11)$$

На рис. 3 приведена структурно-алгоритмическая последовательность реализации методики определения акустических коэффициентов связи для материала фасонных профилей с использованием зеркально-теневое метода прозвучивания.

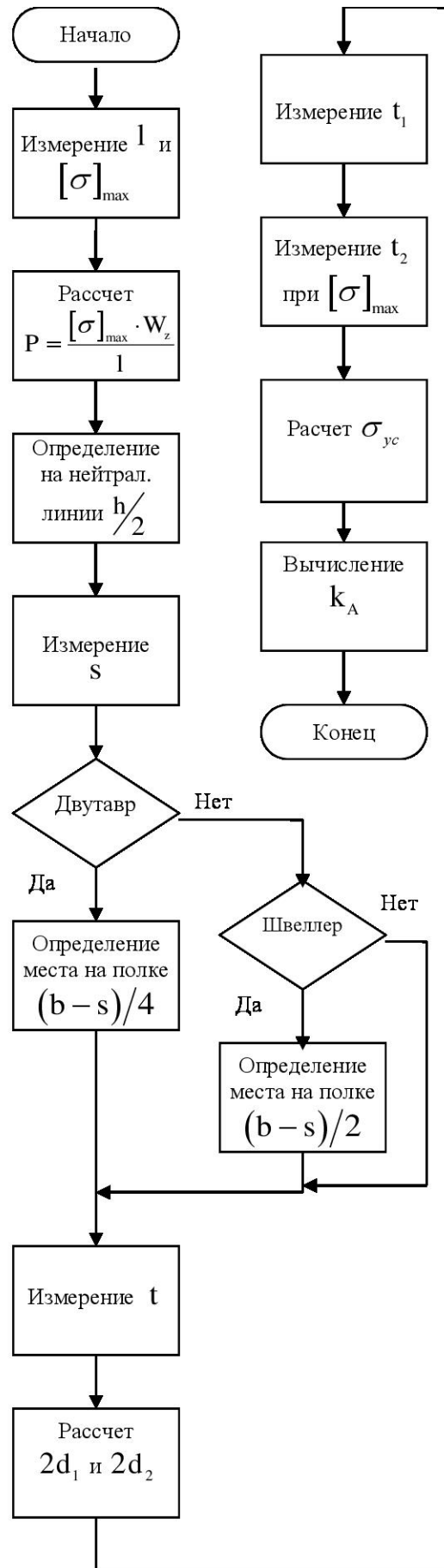


Рисунок 3 – Алгоритм определения акустоупругих коэффициентов для материала фасонных профилей металлических конструкций

Предложенная методика позволяет установить связь между напряженным состоянием металла и скорости распространения ультразвуковой волны в полках фасонных профилей.

Определение акустоупругих коэффициентов связи для фасонных профилей проводилось согласно предложенной методике в лабораторных условиях с использованием системы диагностики напряженно-деформированных состояний фасонных профилей металлических конструкций [11].

В состав системы входит: персональный компьютер, цифровой осциллограф SIGLENT SDS1202CNL + с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации в реальном времени 2 Гвиб/с, два усилителя, принимающий и излучающий пьезоэлектрические преобразователи П121-5-50-М-003, система создания нагрузки - талреп, система контроля нагрузки - крановые весы, ОК - экспериментальный образец, генератор [12], блок питания. Для возбуждения ультразвуковых волн использовано импульс напряжения длительностью 0,5 мкс с амплитудой до 300 В при частоте зондирования 5 МГц. Размер пьезоэлемента преобразователей для возбуждения поперечных волн составляет 5x5 мм.

Исследования проводились на экспериментальном образце металлической конструкции, который состоит из двутавра №12 и швеллера №12П (рис. 4). В соответствии с алгоритмом реализации предложенного метода (рис. 3) было выбрано по одному сечению для каждого профиля с максимально допустимым значением напряжения $[\sigma]_{\max}$ на расстоянии $l = 1000$ мм от проушин на концах фасонных профилей. После чего было выбрано по одному месту прозвучивания на нейтральной линии для каждого из профилей. Результат измерения толщины стенки S профилей $4,70 \pm 0,01$ мм и $4,80 \pm 0,01$ мм для двутавра и швеллера соответственно на середине высоты профиля составляет $60,00 \pm 0,02$ мм. Измерение толщины полков t в рассчитанных местах для прозвучивания, показало значение для верхней и нижней полков двутавра $7,28 \pm 0,01$ мм, $7,3 \pm 0,01$ мм и для швеллера $7,7 \pm 0,01$ мм, $7,75 \pm 0,01$ мм. Определение толщины на выбранном сечении позволило рассчитать расстояния между принимающим и излучающим преобразователями для установки их в места прозвучивания.

Следующим шагом было измерение величины временных интервалов прохождения ультразвуковой волны, для которого используется метод измерения времени между моментами пересечения нулевого уровня первого сигнала (генерируемого импульса) в соответствии с момента пересечения нулевого уровня вторым сигналом, приходит на принимающий преобразователь. Для участков прозвучивания на нейтральных линиях для фасонных профилей типа двутавр и швеллер составили $4497,20 \pm 1$ нс и $4592,90 \pm 1$ нс.

В результате прозвучивания в полках фасонных профилей установлено значение временных интервалов при максимально допустимом напряжении в выбранных сечениях двутавра и швеллера. Для полков с напряжением растяжения среднее значение

времени прохождения ультразвуковой волны составило $7480,5 \pm 1$ нс и $7002,1 \pm 1$ нс, а с напряжением сжатия $7445,50 \pm 1$ нс и $6968,10 \pm 1$ нс соответственно.



Рисунок 4 – Фотоизображения экспериментальной установки для диагностики НДС ФП МК:
1 – крановые весы промышленного образца ТОН-3;
2 – талреп грузовой вилка-вилка М22;
3 – экспериментальный образец; 4 – крепление

Фасонные профили, которые использованы в экспериментальном образце входят в группу, значение усредненного напряжения $\sigma_{ус}$ которых значительно отличается от расчетного для точки ввода ультразвуковой волны. Аналитически определено, что для фасонного профиля типа двутавр значение усредненного напряжения составляет 153,3 МПа, а для швеллера 153,7 МПа при максимально допустимом значении $[\sigma]_{\max}$ - 160 МПа.

Установлено, что для напряженно-деформированного состояния растяжения акустоупругий коэффициент связи составляет $k_k = -(14,82 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$ МПа⁻¹, а для сжатия $k_k = -(0,23 \pm 0,05)$ МПа⁻¹. Значения акустоупругих коэффициентов получены для сталь 3 С245 по ГОСТ 27772-88, что выпускается на данный момент в Украине и массово используется при строительстве.

ВЫВОДЫ. Предложенная методика позволяет устанавливать акустоупругие коэффициенты связи для материала фасонных профилей. Полученные акустоупругие коэффициенты связи для механических напряжений растяжения и сжатия, которые возникают на верхней и нижней полках профиля, позволяют реализовать акустическую диагностику фасонных профилей металлических конструкций эксплуатируемых сооружений при фактическом доступе только к одной из полков.

Использование современного лабораторного оборудования для измерения линейных размеров и временных интервалов, позволило с высокой точностью установить зависимость между скоростью

распространения ультразвуковых волн и напряженно-деформированного состояния металла фасонных профилей металлических конструкций с использованием зеркально-теневого метода прозвучивания.

Применение данного метода для неразрушающего контроля промышленных сооружений позволяет устанавливать степень аварийности и техническое состояние материала фасонных профилей металлических конструкций. Действительное значение механического напряжения по сравнению с конструктивно-допустимым будет свидетельствовать о текущие условия работы конструкции и о необходимости дальнейших действия по изменению условий эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Н.П. Возможности методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций // Сварка и диагностика, 2011. – Вып. 6. – С. 44–47.
2. Диагностика материалов конструкций на ранних стадиях усталостного разрушения и оценка НДС материала конструкций методами неразрушающего контроля / В.В. Мишакин, Н.В. Данилова, К.В. Курашкин, В.А. Ключников, А.В. Гончар // Вестник СГАУ, 2011. – Вып. 3(27), част. 1. – С. 299–307.
3. Скорость ультразвука, структура и напряжения при активном растяжении малоуглеродистой стали / Л.Б. Зуев, Б.С. Семухин, В.И. Данилов, А.М. Апасов // Известия вузов. Черная металлургия, 2001. – Вып. 6. – С. 28–32.
4. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress / A. Karabutov, A. Devichensky, A. Ivochkin, M. Lyamshev, I. Pelivanov, U. Rohadgi, V. Solomatin, M. Subudhi // Ultrasonics, 2008. - Vol. 48, No. 6–7. – P. 631–635.
5. Kim N., Hong M. Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound // Nondestruct. Test. Eval. Internat, 2009. - Vol. 42, No. 3. - P. 164-169.
6. Jhang K.Y., Quan H.H., Ha J.; Kim N.Y. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement // Ultrasonics, 2006. Vol. 44. – P. 1339–1342.
7. Guz A.N. Ultrasonic nondestructive methods of stress analysis in materials and structural members (review) // Int Appl Mech, 2011. - Vol.46, No. 11. – P. 3–11.
8. Никитина Н.Е., Казачек С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития, 2010. – Вып. 4(32). – С. 18–28.
9. Курашкин К.В., Мишакин В.В. Способ акустического контроля уровня остаточных напряжений в сварных соединениях // Вестник научно-технического развития, 2012. – Вып. 2(54). – С. 11–17.
10. Определение напряженного состояния элементов металлоконструкций методом акустической тензометрии / М.В. Филиппова, Г.А. Богдан, М.А. Демченко // Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія приладобудування, – Київ, 2016. – Вып. 51(1). – С. 64–68.
11. Система неруйнівного контролю балочних елементів промислових споруд / М.О. Демченко, М. В. Філіппова, В.М. Безручко // Системи обробки інформації. – Вып. 6(131). – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015 – С. 39–42.
12. Безвесільна О.М., Тимчик Г.С. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів - Житомир: Вид-во. ЖДТУ, 2012. – 811 с.

METHOD FOR DETERMINING THE ACOUSTOELASTICITY FACTORS RELATED TO THE MATERIAL PROFILE SHAPES OF METAL STRUCTURES

G. Tymchik, M. Filippova, M. Demchenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
prosp. Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine. E-mail: amd.8@meta.ua

Purpose. Developing a methodology for determining acoustoelasticity coupling coefficients for the material shaped sections of metal structures, which will allow to carry out an acoustic diagnosis of stress-strain state of shapes. **Methodology.** The method is based on the experimental determination of acoustoelasticity coefficients between the transit time of the ultrasonic wave in the flange and the wall of the shaped profile and its size and value of the mechanical stress in the flange shaped profile. **Results.** An improved acoustic method based on acoustoelasticity effect with the use of mirror-shadow sounding was proposed. The technique and algorithm for determining acoustoelasticity coupling coefficients for the material shaped sections of metal structures for the implementation of acoustic diagnostics were developed. Acoustoelasticity coupling coefficients for the material shaped metal structures profiles Steel 3 C245, which use a neutral area of the profile of the metal structure have been experimentally and analytically established. **Originality.** The technique, which allows to determine acoustoelasticity coupling coefficients for the material shaped sections of metal structures, in order to realize the acoustic diagnosis of stress-strain states with the use of mirror-shadow method was proposed. **Practical value.** We obtained acoustoelasticity coupling coefficients for tensile and compression stress occurring at the upper and lower profile shelves, allow to implement the acoustic diagnostics shaped sections of metal structures operated facilities, in the actual access to only one of the shelves. The proposed method makes it possible to diagnose the stress-strain state of shapes without the use of metal samples with zero mechanical stresses. This method allows to set the level of emergency in facilities and the technical condition of the material shaped sections of metal structures of industrial buildings. The actual value of the mechanical stress in comparison with structurally-valid will indicate flowing design conditions of work and the need for further action to change operating conditions. References 11, figures 4.

Key words : steelwork, mechanical stresses, ultrasonic testing.

REFERENCES

1. Aleshin, N.P. (2011), "Features non-destructive testing methods in the evaluation of the stress-strain state of loaded steel structures", *Svarka i diagnostika*, no. 6, pp. 44–47.
2. Mishakin, V. V., Danilova, N.V., Kurashkin, K.V., Klyushnikov, V.A., Gonchar, A.V. (2011), "Diagnosis of materials of construction in the early stages of fatigue damage and estimate the VAT construction material NDT methods", *Vestnik SGAU*, iss. 27, no. 3, pp. 299–307.
3. Zuev, L. B., Semuhin, B.S., Danilov, V.I., Apasov, A.M. (2001), "Ultrasound speed, structure and stress in active tension mild steel", *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, no. 6, pp. 28–32
4. Karabutov, A. Devichensky, A., Ivochkin, A., Lyamshev, M., Pelivanov, I., Rohadgi, U., Solomatina, V., Subudhi, M. (2008), "Laser ultrasonic diagnostics of residual stress", *Ultrasonics*, iss. 48, no. 6, pp.631–635.
5. Kim, N., Hong, M. (2009), "Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound", *Nondestruct. Test. Eval. Internat*, iss. 42, no. 3, pp. 164–169.
6. Jhang, K.Y., Quan, H.H., Ha, J., Kim, N. Y. (2006), "Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement", *Ultrasonics*, no. 44, pp. 1339–1342.
7. Guz, A.N (2011), "Ultrasonic nondestructive methods of stress analysis in materials and structural members (review)", *Int Appl Mech*, iss. 46, no. 11, pp. 3–11.
8. Nikitina, N. E., Kazachek, S.V. (2010), "Benefits acoustoelasticity method for the nondestructive testing of mechanical stresses in machine parts", *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*, iss. 32, no. 4, pp. 18–28.
9. Kurashkin, K.V., Mishakin, V.V. (2012), "A method of controlling the acoustic level of residual stresses in welded joints of pipes", *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*, iss. 54, no. 2, pp. 11–17.
10. Filippova, M. V. Bohdan, G. A., Demchenko, M. A. (2016), "The determination of the stress condition in elements of steel structures with the method of acoustic tensometry", *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series Instrument Making*, no. 51, pp. 53–60.
11. Demchenko, M.O., Filippova, M.V., Bezruchko, V.M. (2015), "Nondestructive test system for beam elements of industrial structures", *Information processing systems, National University named after Ivan Air Force Kozhedub*, iss. 131, no. 6, pp.39–42.
12. Bezvesilna, O.M., Tymchik, H.S. (2012), *Tekhnolohichni vymiriuvannia ta prylady. Peretvoriuiuchi prystroi pryladiv*, [Technological measurements and devices. Transforming devices equipment], Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine.

Стаття надійшла 01.11.2016.