

УДК 620.179.16

В. М. РОДЮШКИН, д-р техн. наук, зав. лабораторией волновой динамики и экспериментальной механики; **А. В. ИЛЯХИНСКИЙ**, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник лаборатории волновой динамики и экспериментальной механики

О РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГОЙ ВОЛНЫ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ОБРАЗЦЕ СТАЛИ МАРКИ 10ХСНД

Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Россия, 603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85. Тел.: (831) 432-03-00; эл. почта: vlkn2005@yandex.ru

Ключевые слова: упругая волна, деформации, скорость, время, измерение, образец.

Приведены результаты оценки влияния на время распространения упругой волны в деформируемом металле 10 ХСНД факторов, определяемых расстоянием, пройденным волной, и наличием упругих напряжений. Определено их раздельное влияние на результат измерения.

Введение

Своевременная диагностика и мониторинг напряженно-деформированного состояния несущих конструкций позволяет избежать аварийных ситуаций, требующих усиления несущих элементов и финансовых затрат. Согласно действующим нормативным документам (СП 16.13330.2017), элементы строительных конструкций подразделяются на три класса в зависимости от напряженно-деформированного состояния (НДС) расчетного сечения. В частности, 1-й класс – НДС, при котором напряжения по всей площади сечения элемента конструкции не превышают расчетного сопротивления стали (упругое состояние сечения). Следовательно, для мониторинга ситуации необходима достоверная оценка упругих деформаций в элементе конструкций, что определяет актуальность работы.

Для изготовления многих ответственных нагружаемых элементов конструкций используется сталь 10ХСНД. В условиях эксплуатации конструкции исключительно важно контролировать прочностные свойства металла [1], поэтому вопрос неразрушающего контроля этих свойств имеет важное практическое значение. Одним из неразрушающих оперативных методов является метод зондирования металла ультразвуковыми упругими волнами. Упругая волна, распространяясь в металле элементов конструкций, испытывает влияние возникающих там деформаций. Скорость волны или время передачи упругих колебаний от точки к точке деформированного тела происходит не мгновенно и определяется упругими, инерционными и диссипативными свойствами связей между колеблющимися точками среды. Упругие деформации определенным образом воздействуют на эти связи, следовательно, на скорость волны. Факт



влияния на скорость упругих волн, распространяющихся в металле, подверженном деформированию, известен давно [2]. Такое воздействие описывается в рамках упругоакустического эффекта – линейной зависимости скоростей упругих волн от напряжений. Коэффициенты этой зависимости строго определяются нелинейной теорией упругости твердого тела [3]. С появлением приборов, позволяющих определять скорость распространения ультразвука и ее изменение с высокой точностью, упругоакустический эффект нашел практическое применение в неразрушающем контроле [4, 5]. В [6–9] разрабатываются методы контроля металла в процессе эксплуатации или механических испытаний. В основном эти методы основаны на зондировании элемента конструкции объемными волнами по толщине и измерении времени пробега волны. При этом результаты вычисления скорости волны существенно зависят от точного знания толщины объекта. С помощью объемных волн расширения-сжатия и сдвига хорошо измеряются напряжения, вызванные растягивающими или сжимающими воздействиями, но напряжения, вызванные изгибом образца, эти волны отследить не могут. Волны показывают напряженное состояние, усредненное по толщине образца. Но если образец материала подвергался изгибу, то все его продольные волокна, находящиеся выше срединной линии поперечного сечения, будут растягиваться, а все продольные волокна, находящиеся ниже срединной линии, будут сжиматься. Объемные волны в таком случае покажут, что напряжения в образце отсутствуют, но это не так. Значит, для определения напряжений, вызванных изгибом, нужно использовать такие волны, которые покажут не среднее значение по сечению, а максимальные значения напряжений. Максимальные значения изгибных напряжений будут на поверхности образца, и такие напряжения должна позволить измерить поверхностная волна Рэлея. Таким образом эффективность использования поверхностной волны обусловлена, во-первых, тем, что возникающие деформации во многих случаях концентрируются на поверхности, а, во-вторых, тем, что при оценке деформаций толщина объекта конструкции не влияет на точность результата.

Методика эксперимента

Движение материальных частиц деформируемого тела можно описать в переменных Лагранжа и переменных Эйлера. Переменные Лагранжа определяют законы изменения координат, перемещений, скоростей, ускорений для каждой индивидуальной частицы сплошной среды, а переменные Эйлера – законы изменения тех же исследуемых величин, но в каждой фиксированной точке пространства, через которые последовательно проходят материальные частицы сплошной среды. Описания движения в переменных Лагранжа и Эйлера в механическом отношении эквивалентны. Однако с точки зрения приборного контроля за параметрами среды есть особенности. В первом случае частицы среды движутся, и приборы, измеряющие их параметры, следуют за ними; во втором способе изучают то, что происходит в точках пространства, через которое движется среда. Параметры среды измеряют приборы, закрепленные в фиксированном положении относительно друг друга, как условно изображено на рис. 1.



Рис. 1. Слева: измерительные приборы двигаются вместе с частицами среды; справа: параметры среды измеряют приборы, закрепленные в фиксированном положении

Таким образом, измерение времени распространения упругой волны в деформируемой среде можно осуществлять двумя способами. Они схематично изображены на рис. 2.

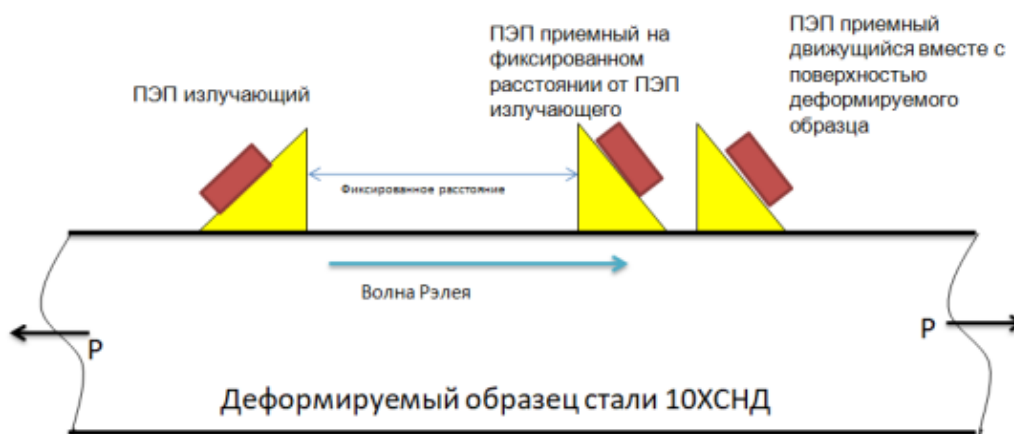


Рис. 2. Схема контроля деформаций в образце из стали 10ХСНД при испытании на растяжение нагрузкой P

В первом варианте следует установить излучатель и приемник упругих колебаний на поверхность деформируемого элемента конструкций и зафиксировать точки их установки на поверхности. В этом случае преобразователи или точки ввода и приема упругих колебаний следуют за движением поверхности металла. Во втором варианте излучатель и приемник упругих колебаний устанавливаются на поверхности деформируемого элемента конструкций. Расстояние между ними фиксировано и не изменяется при деформировании металла.

Было показано [10], что в простейшем случае одноосного растяжения (сжатия) между относительными изменениями скорости δv и времени δt имеет место соотношение



$$\delta v + \delta v \delta \tau = \frac{\Delta l}{l_0} - \delta \tau, \quad 1)$$

где $\Delta l/l_0$ – относительное удлинение образца от излучателя до приемника колебаний ε , а $\delta v = \frac{(v-v_0)}{v_0} = \frac{\Delta v}{v_0}$ и $\delta \tau = \frac{(\tau-\tau_0)}{\tau_0} = \frac{\Delta \tau}{\tau_0}$, при этом нулевые индексы относятся к недеформированному состоянию. Если величинами второго порядка малости пренебречь, то (1) упростится до

$$\delta v \approx \varepsilon - \delta \tau. \quad 2)$$

Если приборы, измеряющие время распространения волны в деформируемом образце, зафиксированы на его поверхности, то относительное изменение времени распространения ультразвука определяется относительным изменением расстояния, то есть деформацией металла. При этом предполагается, что скорость распространения ультразвука в области пластической деформации практически не меняется, а в области упругих деформаций изменение скорости не существенно. Это определяет возможность измерения деформации с достаточно высокой точностью без учета влияния изменения скорости ультразвука. В [11] приведены данные, подтверждающие эти предположения для деформаций, превышающих 0,02 %. Удлинения измерялись индикатором часового типа и сравнивались с относительным изменением времени распространения ультразвука на той же базе. Однако в диапазоне от нуля до 0,02 % чувствительности такого способа проверки достоверности измерений оказывается недостаточной.

В области упругих деформаций следует оценить влияние на результат измерения времени распространения упругой волны величины относительных изменений скорости δv . Для того чтобы выяснить, насколько велико это влияние, следует исключить движение прибора, измеряющего время распространения волны в деформируемом образце, то есть закрепить его в фиксированном положении. Следовательно, изменение расстояния между приборами не происходит и $\Delta l/l_0 = 0$. Тогда, учитывая, что относительное изменение скорости под действием напряжений незначительно, относительное изменение времени $\delta \tau$ согласно (2) будет определяться только изменением скорости δv , или акустоупругостью. Эффект акустоупругости существенно зависит как от применяемого типа упругих волн, так и от самого материала [7].

В работе определено влияние эффекта акустоупругости при измерении времени распространения волн Релея в стали 10ХСНД при малых деформациях.

Результаты эксперимента

Химический состав металла образца, отобранного для эксперимента, определен на спектрометре МСА II V5 и соответствовал заявленной марке стали 10ХСНД. Кривая деформирования образца размером $7 \times 20 \times 140$ представлена на рис. 3.

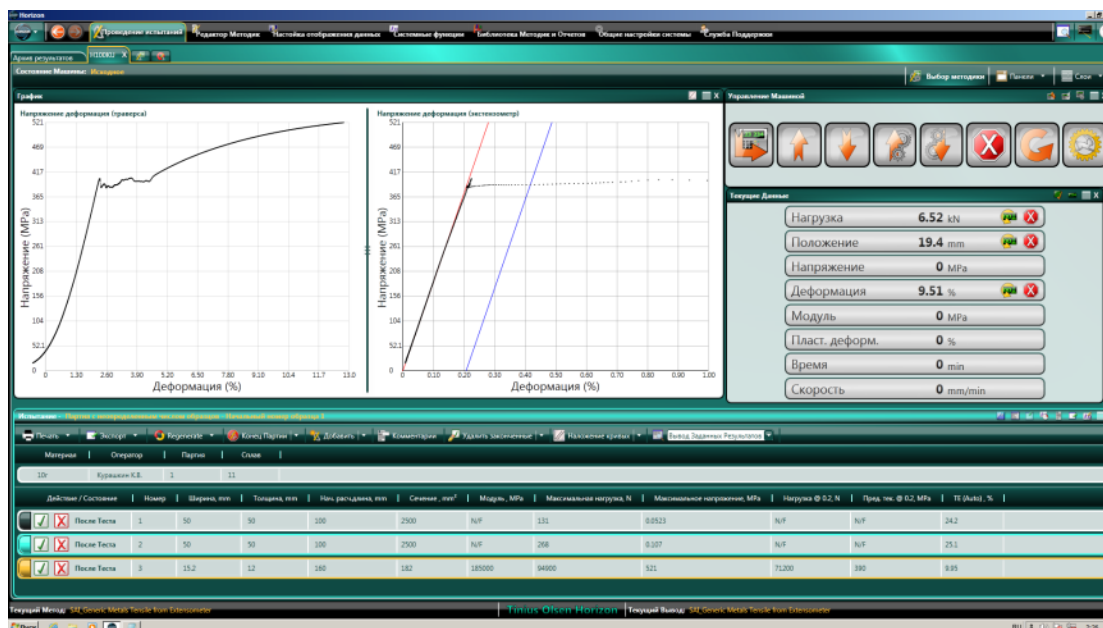


Рис. 3. Зависимость напряжения-деформации в образце стали 10 XСНД

Растяжение образца проводилось на универсальной испытательной машине фирмы “*Tinius Olsen Ltd*” модель Н100КУ. Упругие волны в металле образца при деформировании создавались пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП) на частоте колебаний 5 МГц. Излучающий и приемный ПЭП устанавливались в одном блоке и фиксировались на определенном расстоянии друг от друга. Акустическое зондирование, возбуждение излучающего ПЭП осуществлялось с помощью дефектоскопа А1214, прием сигнала осциллографом RigoMS05354, имеющего частоту дискретизации 8 Гвыб/с.

В области упругости (до площадки текучести) при напряжении 350 МПа деформация составила $\varepsilon_{\text{упр}} \approx 0,002$. Относительное изменение времени, определяемое деформацией металла и оцениваемое первым способом (описание движения по Лагранжу) будет равно 0,002. Измеренное в эксперименте по второму способу (описание движения по Эйлеру) относительное изменение времени прихода импульса при напряжении 350 МПа составило 0,0004. Таким образом, влияние эффекта акустоупругости при измерении времени распространения волн Релея в стали 10XСНД при малых деформациях приводит к поправке не менее чем на 20 % от получаемого результата.

Вывод

При приборном измерении механических напряжений путем контроля за приращением времени распространения ультразвуковых колебаний при малых деформациях следует учитывать эффект акустоупругости, приводящий к изменению скорости не менее чем на 20 % от получаемого результата.

Выполнено в рамках госзадания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поверхностные волны Рэля в оценке состояния металлических конструкций / В. И. Ерофеев, А. В. Иляхинский, Е. А. Никитина [и др.]. – Текст : непосредственный //



Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23, № 11. – С. 20–25. – DOI 10.14489/td.2020.11.P.020-025.

2. Brillouin, Léon. Les tensions de radiation ; leur interpretation en mécanique classique et en relativité // Journal de Physique et le Radium. – 1925. – № 6 (11). – P. 337–353. – doi: 10.1051 /jphysrad:01925006011033700. – ISSN 0368-3842.

3. Мурнаган, Ф. Д. Конечные деформации упругого твердого тела / Ф. Д. Мурнагин. – Текст : непосредственный // Американский математический журнал. – 1937. – № 59 (2). – P. 235–260. – doi:10.2307/2371405. – ISSN 0002-9327. – JSTOR 2371405.

4. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуца, В. К. Лебедев. – Киев : Наукова думка, 1974. – 106 с. – Текст : непосредственный.

5. Никитина, Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения / Н. Е. Никитина. – Нижний Новгород : ТАЛАН, 2005. – 208 с. – ISBN 5-93496-041-5. Текст : непосредственный.

6. Бобренко, В. М. Акустическая тензометрия как приложение к УД4-Т НУ-01 / В. М. Бобренко, А. А. Покладов, В. Е. Рыльский. – Текст : непосредственный // В мире неразрушающего контроля. – 2006. – № 3 (33). – С. 49–52.

7. Углов, А. Л. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А. Л. Углов, В. И. Ерофеев, А. Н. Смирнов. – Москва : Наука, 2009. – 280 с. – ISBN 978-5-02-035764-8. – Текст : непосредственный.

8. Обобщенные коэффициенты для измерения механических напряжений методом акустоупругости в конструкциях из углеродистых и низколегированных сталей / А. В. Камышев, С. В. Макаров, Л. А. Пасманик. – Текст : непосредственный // Дефектоскопия. – 2017. – № 1. – С. 3–11.

9. Курашкин, К. В. О способе ультразвукового контроля механических напряжений / К. В. Курашкин. – Текст : непосредственный // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – № 84 (7). – С. 62–66. – <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-7-62-66>.

10. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 томах. Том 4 : в 3 книгах. Книга 1. Акустическая тензометрия / В. А. Анисимов, Б. И. Каторгин, А. Н. Куценко [и др.] ; книга 2. Магнитопорошковый метод контроля / Г. С. Шелихов ; книга 3. Капиллярный контроль / М. В. Филинов. – Москва : Машиностроение, 2004. – 736 с. : ил. – ISBN 5-217-03225-1. – Текст : непосредственный.

11. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 томах / под общей редакцией В. В. Клюева. Том 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – Москва : Машиностроение, 2004. – 864 с. : ил. – ISBN 5-217-03224-3. – Текст : непосредственный.

RODYUSHKIN Vladimir Mitrofanovich, doctor of technical sciences, head of the laboratory of wave dynamics and experimental mechanics, ILYAKHINSKIY Aleksandr Vladimirovich, candidate of technical sciences, senior researcher of the laboratory of wave dynamics and experimental mechanics

ON THE RESULT OF MEASURING THE PROPAGATION TIME OF AN ELASTIC WAVE IN A DEFORMABLE STEEL SAMPLE OF GRADE 10XCND

Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of “Federal Research Center A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences”
85, Belinsky St., Nizhny Novgorod, Russia. Tel.: +7 (831) 432-03-00;
e-mail: vlkn2005@yandex.ru

Key words: elastic wave, deformation, velocity, time, measurement, sample.



The article presents the results of evaluating the effect of factors determined by the distance traveled by an elastic wave and elastic stresses on the time of the wave propagation in deformable metal 10 HSND. Their separate influence on the measurement result is determined.

REFERENCES

1. Erofeev V. I., Ilyakhinskiy A. V., Nikitina E. A., et al. Poverkhnostnye volny Releya v otsenke sostoyaniya metallicheskih konstruksiy // Kontrol'. Diagnostika [Testing. Diagnostics]. 2020. Vol. 23. № 11. P. 20-25. DOI 10.14489/td.2020.11.P. 020-025.
2. Brillouin, Léon. Les tensions de radiation ; leur interpretation en mécanique classique et en relativité. Journal de Physique et du Radium. 1925. № 6 (11). P. 337–353. doi: 10.1051/jphysrad:01925006011033700. ISSN 0368-3842.
3. Murnagin F. D. Konechnye deformatsii uprugogo tvyordogo tela [Final deformations of elastic solid]. Amerikanskiy matematicheskiy zhurnal [American Mathematical Monthly]. 1937. № 59 (2). P. 235–260. doi:10.2307/2371405. ISSN 0002-9327. JSTOR 2371405.
4. Guz A. N., Makhort F. G., Guscha O. I., Lebedev V. K. Osnovy ultrazvukovogo nerazrushayushchego metoda opredeleniya napryazheniy v tvyordykh telakh [Fundamentals of ultrasonic non-destructive method for determination of stresses in solids]. Kiev: Naukova dumka, 1974, 106 p.
5. Nikitina N. E. Akoustoprugost. Opyt prakticheskogo primeneniya [Acoustoelasticity. Practical experience]. Nizhny Novgorod: TALAM, 2005, 208 p. – ISBN 5-93496-041-5.
6. Bobrenko V. M., Pokladov A. A., Rylskiy V. E. Akusticheskaya tenzometriya kak prilozhenie k UD4-T HU-01 [Acoustic tensometry as an appendix to UD4-T HU-01] // V mire nerazrushayushchego kontrolya [In the world of non-destructive testing]. – 2006. – № 3(33). – P. 49–52.
7. Uglov A. L., Erofeev V. I., Smirnov A. N. Akusticheskiy kontrol oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii [Acoustic monitoring of equipment during manufacture and operation]. – Moscow : Nauka, 2009. – 280 p. – ISBN 978-5-02-035764-8.
8. Kamyshev A. V., Makarov S. V., Pasmanik L. A. Obobshchyonnye koeffitsienty dlya izmereniya mekhanicheskikh napryazheniy metodom akoustoprugosti v konstruksiyakh iz uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley [Generalized coefficients for acoustoelastic stress measurement in carbon and low alloy steel structures] // Defektoskopiya [Defectoscopy]. – 2017. – № 1. – P. 3–11.
9. Kurashkin K. B. O sposobe ultrazvukovogo kontrolya mekhanicheskikh napryazheniy [On the method of ultrasonic monitoring of mechanical stresses]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. 2018. № 84 (7). P. 62–66. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-7-62-66>.
10. Nerazrushayushchiy kontrol [Non-destructive testing] : Spravochnik: V 7 t. T 4 : V 3 kn. Kn.1. Anisimov V. A., Katargin B. I., Kutsenko A. N., et al. Akusticheskaya tenzometriya [Acoustic tensometry]. Kn. 2. Shelikhov G. S. Magnitoporoshkovy metod kontrolya [Magnetic particle control method]. Kn. 3. Filinov M. V. Kapillyarny kontrol [Capillary control]. Moscow : Mashinostroenie, 2004. – 736 p.:il. – ISBN 5-217-03225-1.
11. Nerazrushayushchiy kontrol [Non-destructive testing] : Spravochnik: V 7 t. Pod obsch. red. V. V. Klyueva. Vol. 3: Ultrazvukovoy kontrol I. N. Ermolov, Yu. V. Lange. – Moscow : Mashinostroenie, 2004. – 864 p.: il. – ISBN 5-217-03224-3.

© В. М. Родюшкин, А. В. Иляхинский, 2023

Получено: 15.05.2023 г.