

УДК 620.179.16

*В. Е. Прохорович, А. В. Фёдоров*

Санкт-петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики и оптики

*В. А. Быченко, И. В. Беркутов*

Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации  
космической техники,  
г. Санкт-Петербург

## ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЗВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ КОНТРОЛЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

*Представлен лазерно-ультразвуковой метод и лазерно-ультразвуковое оборудование с наклонным оптико-акустическим преобразователем. Рассмотрены экспериментальных исследований влияния факторов на измерение скорости распространения УЗВ, в частности влияние изменения температуры ОК и преобразователя. Обоснована необходимость разработки новых преобразователей и дальнейших совместных исследовательских и инженерных работ с различными заинтересованными организациями.*

*Ключевые слова: лазерно-ультразвуковой метод, напряженно-деформированное состояние.*

*V. E. Prokhorovich, A. V. Fedorov, V. A. Bychenok, I. V. Berkutov*

## ENGINEERING AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE ACCOUNT DEPENDING ON PROPAGATION OF ULTRASOUND VELOCITY TO THE TEMPERATURE DURING MONITORING OF STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURES

*We reported the laser ultrasonic method and the measuring tool of residual stresses with a sloping optical-acoustic converter. Experimental trial results demonstrate factors influencing on measurement of propagation of ultrasound velocity, in particular the influence of alteration the temperature OK and the converter. The paper substantiates the necessity of the development of new converters and further combined researching and engineering labors with variety organizations concerned.*

*Keywords: laser ultrasonic method, stress-strain state.*

Одной из важнейших технологических задач промышленности является оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) в критичных элементах изделий.

Чтобы избежать разрушения элементов конструкций, возникающие в них остаточные и действующие напряжения не должны превышать допустимых значений. В сложных, дорогостоящих или единичных конструкциях НДС определяется расчетными методами, которые идеализируют реальные условия нагружения и не позволяют отслеживать действительное состояние конструкции при длительной эксплуатации, изготовлении или доработке. Поэтому особую значимость приобретает экспериментальная оценка остаточных и действующих напряжений в критичных элементах изделий, основанная на использовании методов и средств неразрушающего контроля (НК).

В настоящее время наибольшее распространение среди методов НК НДС получили рентгеновские, магнитные и акустические методы.

Особого внимания заслуживает универсальный метод НК и диагностики критичных элементов изделий – ультразвуковой метод НК, основанный на явлении акустоупругости [1; 2] и позволяющий оценивать НДС в объеме материала. Ультразвуковой метод [3–5] характеризуется высокой точностью определения НДС и особенно эффективен при анализе полей остаточных напряжений, так как последние достигают, как правило, высоких уровней. Однако широкое применение метода акустоупругости сдерживается отсутствием методик контроля остаточных напряжений, учитывающих влияние внешних факторов.

Известно, что информативность ультразвуковых методов тем выше, чем выше точность определения скорости распространения ультразвуковых колебаний. Одним из путей в обеспечении точности измерения скорости распространения ультразвуковых волн (УЗВ) с обязательным учетом факторов (таких, как структура, физико-механические свойства, температура, химический состав и др.) является применение лазерно-ультразвукового

метода, который основан на термооптическом возбуждении ультразвуковых колебаний.

В цикле работ авторов посвященном проблеме измерения НДС используется лазерно-ультразвуковое оборудование, разработанное в Международном лазерном центре МГУ им. М. В. Ломоносова под руководством профессора А.А. Карабутова, с которым у авторов установлен прочный научный контакт.

Отметим, что использованный принцип генерирования ультразвуковых волн заданной частоты и длительности основан на термооптическом возбуждении. Лазерный импульс передается по оптоволокну через прозрачную призму на генератор преобразователя. Акустический контакт между преобразователем и ОК осуществляется посредством тонкого слоя иммерсионной жидкости. Поглощаясь в материале генератора, лазерное излучение нагревает тонкий приповерхностный слой. Последующее тепловое расширение приводит к возбуждению ультразвуковых импульсов – оптико-акустических (ОА) сигналов, временной профиль которых повторяет форму огибающей интенсивности лазерного импульса и которые вводятся под специальным углом в ОК. Данный угол для генерации головной УЗВ задается призмой.

Следует отметить, что вопрос количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости распространения ультразвука является важным для данного метода, но не всегда очевидно разрешимым. В данной работе использовался время-пролетный метод измерений, при котором рассчитывается скорость распространения головной УЗВ в ОК:

$$c_l = \frac{L}{\Delta t - \Delta t_0},$$

где  $L$  – известная база измерений,  $\Delta t$  – измеряемая разность времен излучения лазерного импульса и прихода головной волны,  $\Delta t_0$  – задержка сигнала в излучаемом тракте.

На рис. 1 представлена типовая схема наклонного оптико-акустического преобразователя (модель ПЛУ-6Н-02) [6].

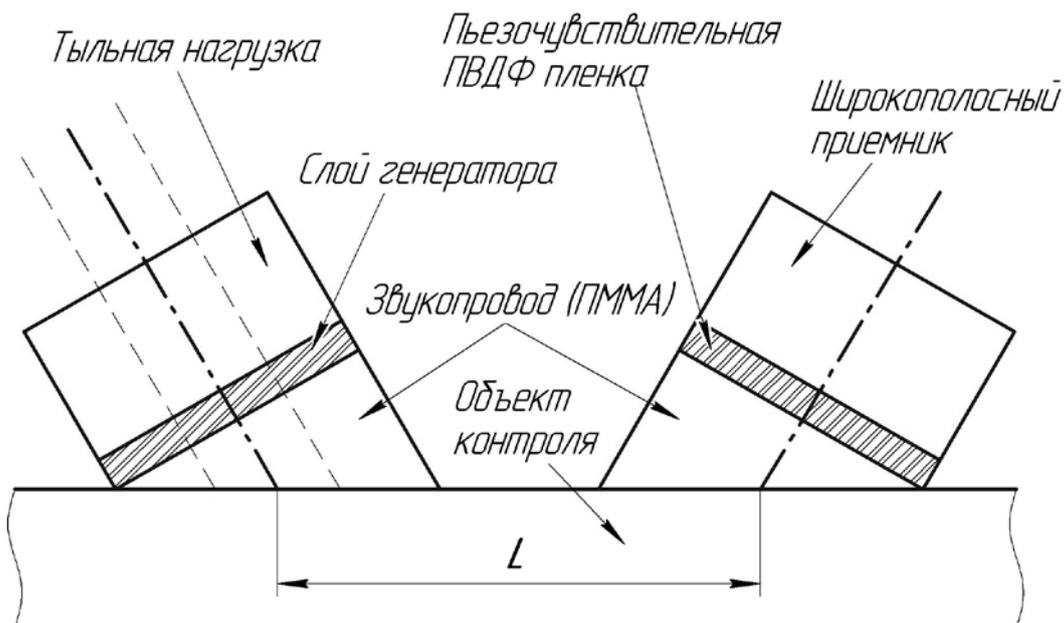


Рис. 1. Схема наклонного оптико-акустического преобразователя (модель ПЛУ-6Н-02)

Переходя к сути изложения инженерно-технологических аспектов учета зависимости скорости распространения УЗВ от температуры при контроле напряженно-деформированного состояния конструкций, отметим, что в предыдущей работе авторов отражены результаты определения НДС материалов изделий на основе применения явления акустоупругости [7]. Тогда была представлена общая картина зависимости скорости распространения УЗВ в материале от механических напряжений при испытании образца на растяжение.

Авторы настоящей статьи делают упор на изучение экспериментальной зависимости в связи с тем, что на изменение скорости распространения УЗВ может влиять сразу несколько факторов:

1. Анизотропия свойств деформированной стали, в частности, модулей упругости;
2. Неоднородное распределение примесей;
3. Неодинаковая плотность в различных участках металла;
4. Изменение структуры стали в отдельных зонах;
5. Изменение температуры материала [8] и преобразователя.

Здесь кратко приведем результаты экспериментальных исследований влияния факторов на измерение скорости распространения УЗВ, в частности влияние изменения температуры ОК и преобразователя (что приводит к изменению измеряемой скорости распространения УЗВ за счет изменения свойств самого ОК, а также базы и линии задержки преобразователя).

Для проведения исследований по влиянию изменения температуры на скорость распространения УЗВ в материале образцов использовалась термокамера Binder MKT-240. Температурно-динамические характеристики камеры представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

Температурно-динамические характеристики термокамеры Binder MKT-240

<b>Температурно-динамические характеристики</b>	
Диапазон температур (°С)	-70-180
Точность температуры, пространственная ( $\pm$ К)	0,1-1,0
Вариация температуры ( $\pm$ К)	0,1-0,4
Время нагрева от -70 °С до 180 °С (мин.)	50
Время охлаждения от 180 °С до -70 °С (мин.)	95
Средняя скорость нагрева согл. IЕС 60068-3-5 (К/мин.)	5,4
Средняя скорость охлаждения согл. IЕС 60068-3-5 (К/мин.)	4,2
Макс. тепловая компенсация до 25 °С (Вт)	3000

Особенность проведения эксперимента заключается в том, что образец с установленным на него преобразователем помещался в термокамеру, кабели через специальную заглушку выводились к дефектоскопу, которым измерялась скорость распространения головной УЗВ. Далее выполнялся нагрев образца с преобразователем до 35 °С и последующее ступенчатое (через 10 °С) охлаждение до 5 °С с 5 минутной выдержкой на каждой ступени и измерением скорости распространения головной УЗВ.

Экспериментальные результаты измерения скорости распространения головной УЗВ при различных температурах образца и преобразователя представлены на рисунке 2 в виде регрессионной зависимости скорости распространения головной УЗВ от температуры.

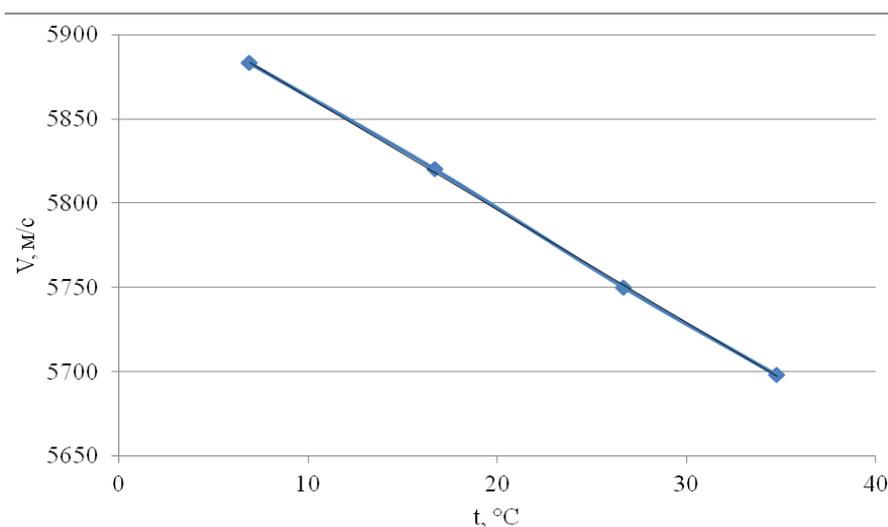


Рис. 2. Результат определения регрессионной зависимости скорости продольной головной УЗВ от температуры

Полученная регрессионная зависимость имеет вид:

$$V = -6,673t + 5929,7.$$

Коэффициент детерминации был равен 0,999, что говорит о высокой достоверности полученной зависимости.

Таким образом, результаты полученные в данных исследованиях, являясь частью решения проблем измерения параметров НДС и метрологического обеспечения, требуют дальнейших совместных исследовательских и инженерных работ с различными заинтересованными организациями.

Для корректного измерения скорости распространения различных типов УЗВ с учетом температуры требуется доработка датчика в части выбора материала призмы с минимальным тепловым расширением, что значительно снизит температурный коэффициент. При этом сохранится необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований измерения и программного учета зависимости скорости распространения ультразвука от температуры материала ОК.

### *Список литературы*

1. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. – К.: Наукова думка, 1977. – 151 с.

2. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛИАМ, 2005. – 208 с.
3. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с.
4. Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим методом / А. Ю. Ивочкин [и др.] // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, № 4. – С. 1–8.
5. Исследование двухосного напряженного состояния трубной плети прибором «АСТРОН» / Н. Е. Никитина [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2005. – № 1 (27) . – С. 33–35.
6. Contact Laser Ultrasonic Evaluation (CLUE) of Aerospace Materials and Parts.pdf [Электронный ресурс] / Alexander A. Karabutov. International Laser Center of M.V. Lomonosov. Moscow State University. URL: <http://www.ndt.net/article/ndtp2013/papers/slides3.pdf> (дата обращения: 31.10.2015).
7. Применение лазерно-ультразвукового генератора для определения напряженно-деформированного состояния специальных материалов изделий / В. А. Быченко [и др.] // Научно-технический вестник. – 2013. – Выпуск 4 (86) . – С. 107.
8. Неразрушающий контроль : справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2006. – 864 с.