

Таким образом, на основе моделирования и экспериментальных исследований показана возможность применения микроконтроллеров PIC в системах термометрирования поршня двигателя внутреннего сгорания.

#### Библиографические ссылки

1. Ключников Г. М., Сяктерев В. Н., Кондратьев В. Н. Телеметрическая система с оптическим каналом связи для

измерения параметров подвижных деталей // Двигательостроение. – 1983. – № 11. – С. 14–17.

2. Куликов В. А., Сяктерев В. Н., Корепанов Ю. В. Времяэкспоненциальные преобразователи в системах ближней телеметрии // Тезисы конф. «Ученые ИМИ – производству». – ИМИ, 1992. – С. 55–58.

3. Куликов В. А., Сяктерев В. Н. Градуировка автоматизированной системы температурных испытаний поршня двигателя внутреннего сгорания // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 1(53). – С. 92–95.

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. V. Syaktereva, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

I. S. Akchurin, Master's Degree Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Researching the Possibility of Using PIC Microcontrollers in Systems of Internal Combustion Engine Piston Temperature Measurement

*The paper describes results of simulation and experimental study of the layout of the microprocessor-based temperature measurement system of internal combustion engine piston. The possibility of using a PIC microprocessor in telemetry systems for measuring the temperature of the engine piston is presented.*

**Key words:** internal combustion engine piston, temperature measurement, microcontroller, microprocessor system.

УДК 620.179.16

**В. В. Муравьев**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**Е. Н. Балобанов**, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**Е. А. Печина**, кандидат технических наук, Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УПРУГОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ\*

*Описывается методика измерения коэффициента упругоакустической связи одноосного напряженного состояния для изделий из стали 65Г, реализуемая с помощью экспериментального лабораторного стенда.*

**Ключевые слова:** коэффициент акустоупругости, электромагнитно-акустический преобразователь, сдвиговые волны, углеродистая сталь.

**П**оиск новых закономерностей в изменении физико-механических свойств металлов и сплавов после различных внешних энергетических воздействий – важнейшая проблема в металлопроизводстве и эксплуатации металлопродукции [1–3]. С одной стороны, изменение свойств необходимо для получения сбалансированного комплекса характеристик конструктивной прочности изделий [4–6], с другой – необходимо знание их технического состояния и прогнозирование качества конструкций [7–10]. Среди комплекса характеристик важное место занимает напряженно-деформированное состояние, которое выгодно оценивать методами акустической тензометрии [11, 12].

Основным информативным параметром акустической тензометрии является скорость распростра-

нения ультразвуковых волн [13–15]. Большинство методик акустической тензометрии базируется на методах с использованием контактных пьезоэлектрических преобразователей [16–18], однако в этом случае имеются ограничения, связанные с необходимостью использования специальных контактных сред для передачи сдвиговых волн в объект контроля. Кроме напряженного состояния на скорость объемных (продольных, поперечных) и поверхностных волн влияют структурные факторы, исследованные в работах [19, 20].

Одним из подходов к решению задач акустической тензометрии для оценки напряженно-деформированного состояния металла является использование электромагнитно-акустического метода (ЭМА) возбуждения и регистрации ультразвуковых волн [21, 22].

© Муравьев В. В., Балобанов Е. Н., Печина Е. А., 2013

Получено 26.04.13

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова на 2012–2016 гг. (ПСР/М2/Н2.5/МВВ), Программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в учреждении УрО РАН в 2012–2014 гг. (регистрационный номер 12-У-2-1013).

Существенное преимущество ЭМА-преобразователей – бесконтактность, позволяющая за счет отсутствия потерь на границе «преобразователь – объект контроля» получить серию многократных отражений и, следовательно, повысить точность измерения параметра скорости акустических волн [23, 24].

Общие требования к проведению контроля методом акустоупругости представлены в ГОСТ Р 52731–2007 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений», где предписывается использование коэффициентов упругоакустической связи, позволяющих переводить значения временных задержек акустических волн в значение механических напряжений. Коэффициенты упругоакустической связи находятся экспериментально для каждой марки стали.

В ряде случаев достаточно оценить величину одной компоненты напряженного состояния в металлоизделии для принятия решения о возможности его дальнейшей эксплуатации, например, при оценке остаточных напряжений в ободьях цельнокатаных колес вагонов [25, 26] или при контроле величины механических напряжений соединений с натягом [27].

В настоящей работе представлено устройство лабораторного стенда и методика проведения измерений, позволяющие экспериментально определять значения коэффициентов упругоакустической связи для конструкционных сталей при одноосном напряженном состоянии. Предложенное техническое решение опробовано на образце из стали 65Г.

**Лабораторный стенд и методика расчета**

С целью определения коэффициентов упругоакустической связи был разработан экспериментальный лабораторный стенд, функциональная схема которого представлена на рис. 1.

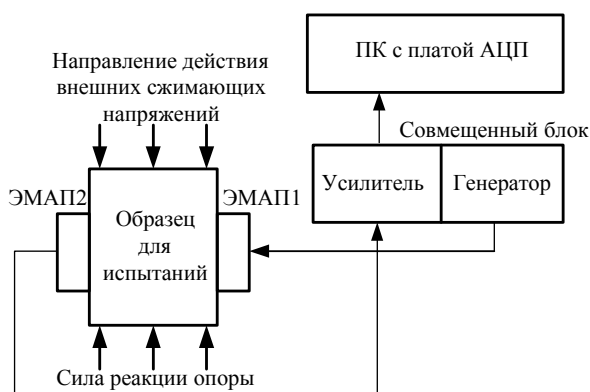


Рис. 1. Функциональная схема лабораторного стенда

Нормированное усилие обеспечивается гидравлической испытательной машиной нагружения с максимальной нагрузкой 400 тонн-сил. Измерительный блок установки состоит из двух электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП), включенных по раздельно-совмещенной схеме, генератора зондирующих импульсов, широкополосного усилителя и персонального компьютера с платой АЦП. Основные технические характеристики измерительной установки:

- напряжение генератора – 1,3 кВ;
- рабочая частота – 1,5 МГц;
- полоса пропускания усилителя – 1...10 МГц;
- отношение «сигнал/шум» усилителя – 20 дБ;
- коэффициент усиления – 72 дБ;
- плата АЦП – разрешение 8 бит, частота дискретизации 100 МГц, ширина полосы пропускания 250 МГц;
- инструментальная погрешность измерения времени распространения сигнала – 10 нс.

Испытуемый образец представляет собой параллелепипед из стали 65Г с основанием в форме квадрата с размерами  $l \times l = 48 \times 48$  мм и высотой  $h = 80$  мм. ЭМАП, расчет параметров системы намагничивания которых приведен в [28], устанавливаются на боковые параллельные грани параллелепипеда, как показано на рис. 2.

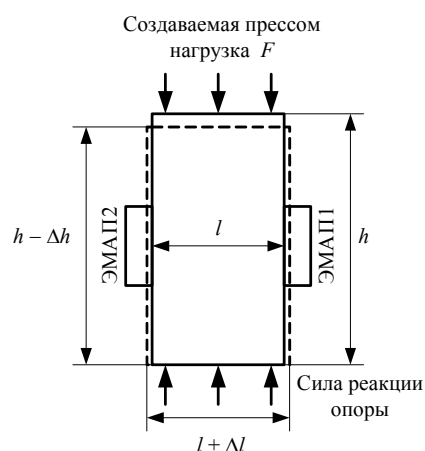


Рис. 2. Изменение размеров образца при нагружении

Стенд работает следующим образом. Нормированное усилие прикладывается вертикально к горизонтальным граням образца. С генератора подается зондирующий импульс на ЭМАП1, который возбуждает сдвиговую волну на частоте 1,5 МГц, распространяющуюся по нормали до противоположной грани, где с помощью ЭМАП2 регистрируется сигнал. Ввиду значительной энергии волна может совершать до десятка переотражений. На рис. 3 представлен вид регистрируемой серии многократных отражений.

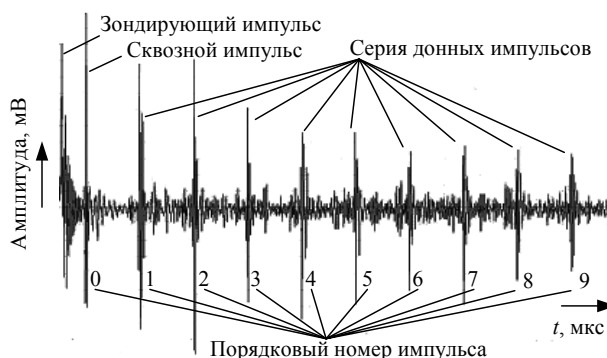


Рис. 3. Вид регистрируемой эхограммы

Контроль одноосного напряженного состояния методом акустоупругости основан на применении двух сдвиговых волн с взаимно перпендикулярной ориентацией векторов их смещения, распространяющихся по одному лучу [26]. Необходимо обеспечить совпадение вектора смещений одной из волн с направлением прикладываемых усилий. Взаимно перпендикулярная поляризация сдвиговых волн обеспечивается поворотом преобразователей вокруг своей оси на  $90^\circ$  при сохранении позиции установки на образце.

Воздействие внешних механических нагрузок на объект приводит к изменению скорости акустических волн, которые определяются временем распространения сигнала по известной базе. Различная степень изменения скорости сдвиговых волн с взаимно перпендикулярными поляризациями при приложенных механических напряжениях дает возможность построения системы уравнений:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_{01}(1 + k_1\sigma_1); \\ V_2 &= V_{02}(1 + k_2\sigma_1), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V_1$  – скорость сдвиговой волны с поляризацией в плоскости действия напряжений в объекте  $\sigma_1$ ;  $V_2$  – скорость сдвиговой волны с поляризацией, перпендикулярной к плоскости действия напряжений  $\sigma_1$ ;  $V_{01}$ ,  $V_{02}$  – начальные значения скорости волн в материале объекта;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты акустоупругой связи, характеризующие степень влияния напряжений  $\sigma_1$  на скорости сдвиговых волн.

Коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  могут быть получены из системы (1):

$$k_1 = \frac{\Delta V_1}{V_{01}} \frac{1}{\sigma_1}; \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{\Delta V_2}{V_{02}} \frac{1}{\sigma_1}, \quad (3)$$

где  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  – изменения скорости сдвиговых волн, вызванные действием напряжения  $\sigma_1$ .

Напряжение  $\sigma_1$ , возникающее в образце, можно рассчитать по формуле

$$\sigma_1 = \frac{F}{S}, \quad (4)$$

где  $F$  – нагрузка создаваемая прессом;  $S$  – площадь поперечного сечения образца.

Поскольку исследования проводятся при напряжениях ниже предела пропорциональности  $\sigma_{п.п.}$ , где выполняется закон Гука, можно записать:

$$\sigma_1 = E \frac{\Delta h}{h}, \quad (5)$$

где  $\Delta h$  – изменение высоты образца;  $h$  – высота образца;  $E = 210$  ГПа – модуль Юнга.

Прикладываемое усилие к образцу приводит к изменению базы прозвучивания при проведении измерений, что следует учитывать при анализе ре-

зультатов. Изменение протяженности пути сдвиговых волн можно найти с помощью коэффициента Пуассона  $\mu$ :

$$\Delta l = \mu \Delta h = \mu \frac{F}{ES} h, \quad (6)$$

где коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

Расчет изменения скорости вследствие увеличения пути ультразвукового сигнала при сжатии образца проводится по формуле

$$\Delta V = \frac{(2n+1)(l+\Delta l)}{t} - V_0, \quad (7)$$

где  $n = 1, 2, \dots$  – номер донного отражения;  $l$  – база прозвучивания;  $\Delta l$  – изменение базы прозвучивания;  $t$  – время регистрации.

Экспериментально найденные значения коэффициентов акустоупругой связи  $k_1$  и  $k_2$  позволяют рассчитать коэффициент упругоакустической связи для одноосного напряженного состояния по формуле

$$D = \frac{1}{k_1 - k_2}. \quad (8)$$

### Результаты измерений

Предварительно, до приложения внешних напряжений к образцу, были найдены начальные значения скоростей сдвиговых волн  $V_{01}$ ,  $V_{02}$ . Далее образец нагружался до 1120 кН с шагом 140 кН. Конечная нагрузка в 1120 кН соответствует 480 МПа для образца заданных размеров. При пределе пропорциональности для стали 65Г, равном 750 МПа, возникающие деформации являются упругими, следовательно, обратимыми при снятии нагрузки. Расчет коэффициента упругоакустической связи производился по последним двум донным отражениям, поскольку эффект изменения скорости распространения волн на дальних отражениях наиболее выражен. В результате эксперимента получены зависимости от нагрузки изменения скорости сдвиговых волн с взаимно перпендикулярной поляризацией (рис. 4).

Характер изменения скоростей показал, что для волны с поляризацией, совпадающей с направлением действия напряжений, эффект акустоупругости на порядок выше, чем для волны с поляризацией, перпендикулярной направлению действия напряжений. В связи с этим изменение скорости  $V_2$  и коэффициент  $k_2$  рассчитывались по двум крайним точкам при нагружении от 0 до 1120 кН.

Так, среднее расчетное значение  $k_1$  составило  $7,43 \cdot 10^{-12}$  Па<sup>-1</sup>, а для коэффициента  $k_2$  значение равно  $5,48 \cdot 10^{-13}$  Па<sup>-1</sup>. Следовательно, коэффициент

акустоупругости  $D = \frac{1}{k_1 - k_2} \approx 145$  ГПа.

### Выводы

- Разработанная методика измерений, реализуемая лабораторным стендом, позволяет экспериментально определять коэффициенты упругоакустической связи для одноосного напряженного состояния.

- Чувствительность к напряжениям скорости сдвиговой волны с поляризацией вдоль прилагаемых усилий на порядок выше чувствительности скорости с перпендикулярной поляризацией, и, соответственно, коэффициент  $k_1$  на порядок превышает значение  $k_2$ .
- Использование многократных отражений позволило зарегистрировать изменения скорости сдвиговых волн порядка 0,03 % от первоначального значения.
- Экспериментально определенный коэффициент акустоупругости для стали 65 Г составил 145 ГПа.

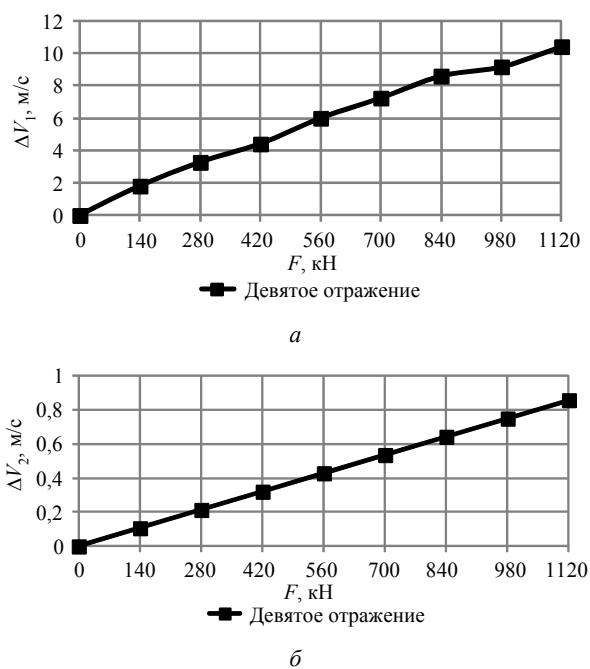


Рис. 4. Изменения скоростей сдвиговых волн  $V_1$ , поляризованных вдоль нагрузки (а), и  $V_2$ , поляризованных поперек нагрузки (б), на девятом отражении

#### Библиографические ссылки

1. Муравьев В. В., Ноева М. Р., Шарко А. В. Исследование процесса распада пересыщенного твердого раствора в алюминиевом сплаве Д16 // Физика металлов и металлосведение. – 1978. – Т. 46. – № 4. – С. 746–749.
2. Серегин Г. В., Смирнова С. А., Муравьев В. В. Структура «микродуплекс» в промышленных стареющих сплавах // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 6. – С. 40.
3. Кодолов В. П., Муравьев В. В. Приготовление образцов алюминиевых сплавов для электронно-микроскопических исследований // Заводская лаборатория. – 1978. – Т. 44. – № 12. – С. 1504.
4. Серегин Г. В., Муравьев В. В. Структурные состояния и механические свойства дисперсионно-твердеющего коррозионноустойчивого сплава 36НХТЮ // Известия высших учебных заведений. – 1987. – № 12. – С. 77–80. (Черная металлургия).
5. Серегин Г. В., Муравьев В. В. Влияние наклепа на механические свойства пружинного сплава 36НХТЮ // Черметинформация. – № 4016 от 29.05.87. – 9 с. – ВИНТИ «Депонированные научные работы». – 1987. – № 9. – С. 180.
6. Влияние закалки в новых средах на свойства и структуру алюминиевых сплавов / Г. П. Конюхов, А. С. Бедарев, В. В. Муравьев [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1980. – № 10. – С. 26–30.
7. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Васильев А. Г. Влияние структурно-механического состояния стали 12Х1МФ на параметры сигналов акустической эмиссии при высокотемпературном деформировании // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 2. – С. 112–115.
8. Серегин Г. В., Евсеев В. В., Муравьев В. В. О связи сил трения с пределом выносливости легких сплавов // Проблемы прочности. – 1984. – № 3. – С. 69–73.
9. Серегин Г. В., Муравьев В. В. Ускоренный метод оценки предела выносливости транспортных металлов // Контроль. Диагностика. – № 11. – 2001. – С. 11–13.
10. Комаров К. Л., Муравьев В. В., Новиков А. В. Прогноз качества изделий из сплава АЛ9 // Литейное производство. – 1987. – № 10. – С. 8.
11. Жаропрочность и поля внутренних напряжений в теплоустойчивых сталях / А. Н. Смирнов, В. В. Муравьев, С. В. Фольмер [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 2. – С. 45–51.
12. Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высокого давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов, В. В. Муравьев [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 7. – С. 13–17.
13. Акустический контроль качества термообработки сплава Д1 / В. В. Муравьев, М. Р. Ноева, А. В. Салаев [и др.] // Дефектоскопия. – 1980. – № 8. – С. 48–53.
14. Муравьев В. В., Шарко А. В., Ботаки А. А. Акустический контроль режимов термообработки алюминийсодержащего сплава В95 // Дефектоскопия. – 1980. – № 1. – С. 91–93.
15. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Фольмер С. В. Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 1. – С. 22–32.
16. Муравьев В. В., Муравьев М. В., Бехер С. А. Применение новой методики обработки сигналов АЭ для повышения точности локализации дефектов // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С. 15.
17. Пат. РФ RU № 2217741 С2. Многоканальная акустико-эмиссионная система диагностики конструкций / Л. Н. Степанова, А. Н. Серьезнов, В. М. Круглов, В. В. Муравьев. – Бюлл. № 33. 27.11.2003. М., ФИПС. – 18 с.
18. Муравьев В. В., Степанова Л. Н., Кареев А. Е. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63–68.
19. Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей / Л. Б. Зуев, В. Я. Целлермаер, В. Е. Громов, В. В. Муравьев // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67. – № 9. – С. 123–125.
20. Зуев Л. Б., Муравьев В. В., Данилова Ю. С. О признаке усталостного разрушения сталей: Письма в «Журнал технической физики» // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 25. – № 9. – С. 31–34.
21. Муравьев В. В., Коробейникова О. В., Платунов А. В. Влияние напряженно-деформированного и структурного состояния в проволоках на основные закономерности распространения стержневой волны Похгаммера // Известия высших учебных заведений. – 2009. – Вып. 6. – С. 44–48. (Черная металлургия).

22. Исследование акустоупругих характеристик стержневой волны в термически обработанных стальных проволоках электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 3–15.

23. *Муравьев В. В., Муравьева О. В., Кокорина Е. Н.* Контроль качества термической обработки прутков из стали 60С2А электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. – 2013. – № 1. – С. 20–32.

24. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина [и др.] // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 2–9.

25. *Буденков Г. А., Муравьев В. В., Коробейникова О. В.* Исследование напряженно-деформированного состояния

ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6. – № 3. – С. 111–117.

26. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С. 16–28.

27. Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес / В. В. Муравьев, С. Ю. Петров, А. В. Платунов [и др.] // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 42–45.

28. *Муравьев В. В., Стрижак В. А., Балобанов Е. Н.* К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 197–205.

---

*V. V. Muravyov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*E. N. Balobanov*, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*E. A. Pechina*, PhD in Engineering, Physical-Technical Institute, Ural Branch of RAS, Izhevsk

#### **Determination of Elastic Acoustic Coupling Coefficients of Ferromagnetic Metals**

*The article describes the method of measuring the elastic acoustic coupling coefficient in case of a uniaxial stress state for 65G steel products, implemented at the laboratory test stand.*

**Key words:** acoustoelasticity, elastic acoustic coupling coefficient, electromagnetic acoustic transducer, shear waves, carbon steel.