

УДК 620.179.16

А.Л. Углов, А.А. Хлыбов, А.Д. Макаров, Р. Р. Рязанов, А.Е. Соборнов

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ  
ПРИ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что для контроля повреждений при термоусталости могут быть использованы упругие волны. Предлагается методика контроля физико-механических характеристик накопленной поврежденности акустическим методом. Приводятся данные по оценке экспериментальной погрешности. Экспериментальная проверка работоспособности предлагаемого алгоритма контроля осуществлялась в трубном образце из аустенитной стали при создании в нем термопульсаций. Предлагаемая методика контроля позволяет обеспечить контроль физико-механических характеристик материала и тем самым повысить безопасность контролируемых элементов конструкций, подвергаемых воздействию термопульсаций.

*Ключевые слова:* термоусталость, упругие волны, аустенитная сталь, поврежденность, физико-механические характеристики.

**Введение**

На работоспособность и ресурс элементов энергетического оборудования существенное влияние оказывают локальные температурные воздействия, вызываемые пульсациями температур [1, 2]. Многократно повторяющееся изменение температуры в материале трубы вызывает появление переменных напряжений, величина которых пропорциональна перепаду температуры. Переменные напряжения приводят к изменению физико-механических характеристик (ФХМ), к зарождению и развитию повреждений в материале образца. Возникает задача предотвращения разрушения и повышения безопасной эксплуатации оборудования, подвергаемого термопульсациям. Одним из направлений решения данной проблемы является своевременный неразрушающий контроль механических характеристик, накопленных повреждений на стадии до появления видимых трещин.

Известно, что скорость распространения продольных, сдвиговых и поверхностных волн, затухание, амплитудный спектр являются параметрами, чувствительными к структурным изменениям, протекающим в материале. В данной работе в качестве структурно-чувствительного параметра использовалась скорость распространения упругих волн.

В работе [3] в рамках структурно-механической модели, базирующейся на представлениях механики среды с повреждениями [4] и динамической теории упругости микронеоднородных сред [5, 6], показано, что скорость распространения упругих волн зависит от уровня накопленных повреждений в материале.

В работе использовали три типа упругих волн, распространяющихся в материале исследуемого образца:

- 1) упругие поперечные волны, распространяющиеся в радиальном направлении и поляризованные в осевом направлении;
- 2) упругие поперечные волны, распространяющиеся в радиальном направлении и поляризованные в кольцевом направлении;
- 3) упругие продольные волны, распространяющиеся в радиальном направлении.

Обозначим скорость распространения названных волн соответственно через  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ .

В соответствии с [7, 8] в качестве безразмерного акустического параметра будем использовать следующий:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (1)$$

где  $d_1 = \frac{V_3}{V_1}$ ,  $d_2 = \frac{V_2}{V_1}$ .

Нами использовался эхо-импульсный метод, в связи с чем параметры  $d_1$  и  $d_2$  определялись через задержки многократно отраженных импульсов волн соответствующих типов  $t_{1n}$ ,  $t_{2n}$ ,  $t_{3n}$ , где  $n$  – номер отраженного импульса:

$$d_1 = \frac{t_{1n}}{t_{3n}}, d_2 = \frac{t_{2n}}{t_{3n}}. \quad (2)$$

Таким образом, безразмерный параметр  $d$  выражается через измеряемые характеристики следующим образом:

$$d = \frac{1}{2} \left( \frac{t_{1n}}{t_{3n}} + \frac{t_{2n}}{t_{3n}} \right). \quad (3)$$

В практических задачах удобнее использовать вместо скорости распространения упругих волн время распространения. Пройденный путь  $x_n$  при работе с одним датчиком (в режиме излучения и приема) может быть записан в виде:

$$x_n = 2V_0 t_n, \quad (4)$$

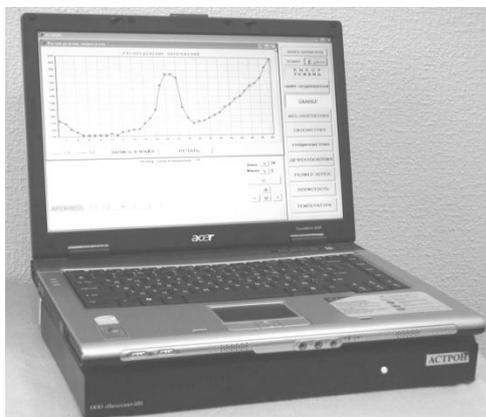
где  $t_n$  – время распространения (задержка) соответствующего импульса, с;  $V_0$  – скорость упругих волн (используемого типа упругой волны), м/с.

Методика измерений физико-механических характеристик акустическим методом

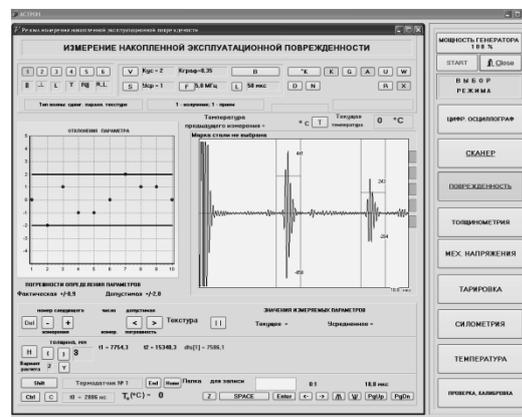
В процессе испытаний с помощью измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «АСТРОН» [7, 8] периодически измерялась задержка (время распространения упругих волн). Основные характеристики (ИВК) «АСТРОН»:

- диапазон частот резонансного возбуждения преобразователей 0.5-30 МГц;
- диапазон измеряемых задержек между отраженными импульсами до 600 мкс;
- погрешность измерения задержек отраженных импульсов  $10^{-9}$  с;
- погрешность измерения коэффициента затухания не более  $\pm 5\%$ .

«Астрон» (рис. 1) предназначен для решения широкого класса научных и инженерных задач, связанных с исследованием структурных особенностей конструкционных материалов и оценкой физико-механических параметров материала ответственных деталей и узлов с целью принятия решения о возможности их безопасной эксплуатации. В основу работы системы положен импульсный метод акустической структурометрии. Конструктивно «Астрон» выполнен в виде модуля, совмещенного с переносным компьютером типа «Notebook». Программное обеспечение является открытым, допускает наращивание по мере расширения круга решаемых задач диагностики, расширения номенклатуры исследуемых материалов.



а)



б)

Рис. 1. Измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН»:

а – общий вид; б – рабочий экран

Определение физико-механических характеристик материала деталей и узлов основано на использовании полученных в ходе обучающих экспериментов зависимостей акустических параметров от определяемых физико-механических характеристик.

*Примечание.* Под обучающими экспериментами понимают комплекс экспериментальных исследований, в ходе которых устанавливают вид функциональных или регрессионных связей акустических параметров с физико-механическими характеристиками материала объекта контроля.

Алгоритмы, используемые в «АСТРОНе», позволяют определять следующие характеристики материала:

- объемный модуль упругости  $K$ , МПа;
  - модуль Юнга  $E$ , МПа;
  - коэффициент Пуассона  $\nu$ ;
  - предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , МПа;
  - предел прочности  $\sigma_B$ , МПа;
  - накопленную поврежденность (выраженная через акустический параметр  $d$ ).
- Относительная погрешность измерения указанных величин приведена в табл. 1.

Таблица 1

Относительная погрешностей измерений ФМХ

ФМХ	$K$	$E$	$\nu$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$d$
Относительная погрешность $\delta$ , %	10	10	10	15	15	15

В качестве примера рассмотрим определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга.

Определение коэффициента Пуассона:

1. В точке контроля устанавливают датчики сдвиговых и продольных волн. Проводят измерение задержек  $t_1, t_2, t_3$  не менее 5 раз. Полученные результаты усредняют.
2. Рассчитывают коэффициент Пуассона по формуле:

$$\nu = \frac{1-2\Delta^2}{2(1-\Delta^2)}, \tag{5}$$

где  $\Delta = \frac{2t_3}{t_1+t_2}$ .

Определение модуля Юнга:

1. Определяют значение толщины материала в точке контроля  $h$ .
2. По справочным данным или экспериментально с помощью пикнометра определяют величину плотности материала  $\rho$ .
3. Проводят измерение задержек  $t_1, t_2, t_3$  не менее 5 раз.
4. Рассчитывают скорость продольной волны по формуле:

$$V_3 = \frac{2h}{t_3}. \tag{6}$$

5. Рассчитывают усредненную скорость сдвиговой волны  $V_{12}$  по формуле:

$$V_{12} = \frac{4h}{t_1 + t_2}. \tag{7}$$

6. Определяют константы Ламэ  $\mu$  и  $\lambda$  по формулам:

$$\mu = V_{12}^2 \rho, \tag{8}$$

$$\lambda = \rho (V_3^2 - 2 V_{12}^2). \tag{9}$$

7. Модуль Юнга рассчитывают по формуле:

$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}. \quad (10)$$

Определение предела текучести, предела прочности и поврежденности разрушения по задержкам поверхностных волн:

1. Измеряют задержки рэлеевских волн вдоль направления главных напряжений  $t_{R1}$ ,  $t_{R2}$ .

2. Рассчитывают усредненное значение задержки импульса рэлеевской волны при  $T=20\pm 10^0\text{C}$ .

$$\bar{t}_R = \frac{t_{R1}+t_{R2}}{2}. \quad (11)$$

3. Если температура контролируемого материала  $T$  отличается от  $20^\circ\text{C}$  более чем на  $10^\circ\text{C}$ , параметр  $\bar{t}_R$  рассчитывают по формуле:

$$\bar{t}_R = \frac{(t_{R1}+t_{R2})[1-K_{TR}(T-20)]}{2}. \quad (12)$$

4. Предел текучести, предел прочности и поврежденность рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{02} = A_0^R(\sigma_{02}) + A_1^R(\sigma_{02})\bar{t}_R, \quad (13)$$

$$\sigma_B = A_0^R(\sigma_B) + A_1^R(\sigma_B)\bar{t}_R, \quad (14)$$

$$d = A_0^R(K_{1C}) + A_1^R(K_{1C})\bar{t}_R. \quad (15)$$

В уравнения (13), (14), (15) входят коэффициенты регрессии для предела текучести, предела прочности и вязкости разрушения, соответственно.

### Построение регрессионных соотношений между используемыми акустическими параметрами и физико-механическими характеристиками

Как правило, в качестве регрессионных соотношений между используемым акустическим параметром  $A$  ( $\bar{d}$  или  $\bar{t}_R$  в зависимости от конкретной ситуации) и физико-механической характеристикой используют регрессионные уравнения линейного вида:

$$M_R = A_0 + A_1 A, \quad (16)$$

где

$$A_0 = \bar{M}_F - A_1 \bar{A};$$

$$A_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{M}_F - M_{jF})(\bar{A} - A_j)}{\sum_{j=1}^N (\bar{A} - A_j)^2};$$

$$\bar{M}_F = \frac{\sum_{j=1}^N M_{jF}}{N};$$

$$\bar{A} = \frac{\sum_{j=1}^N A_j}{N},$$

где  $\bar{M}_F$  - среднее значение физико-механических характеристик образцов, испытанных при установлении регрессионной зависимости;  $N$  - число образцов, испытанных при установлении регрессионной зависимости;  $M_{jF}$ ,  $A_j$  - единичные значения фактической величины ФМХ и акустического параметра, для  $j$ -й серии образцов.

Корректировку установленной регрессионной зависимости проводят путем отбраковки единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию:

$$\frac{|M_{jR} - M_{jF}|}{S} \leq 2, \tag{17}$$

где  $S$  - среднее квадратическое отклонение, определенное по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (M_{jF} - M_{jR})^2}{N-2}}. \tag{18}$$

### Определение задержек при оценке поврежденности материала

Величины задержек определялись методом перехода сигнала через ноль, поскольку данный метод в настоящее время считается одним из наиболее точных.

На ошибку измерения существенное влияние оказывает выбор импульса  $n$ , используемого при измерениях. Величина  $n$  определяется из следующих соображений.

Из формулы (2) следует выражение для абсолютной погрешности определения параметра  $d$ :

$$\Delta d = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\bar{t}_{1n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2 \left[\left(\frac{\Delta t_{1n}}{\bar{t}_{1n}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{3n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2\right] + \left(\frac{\bar{t}_{2n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2 \left[\left(\frac{\Delta t_{2n}}{\bar{t}_{2n}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{3n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2\right]}, \tag{19}$$

где  $\Delta t_{1n}, \Delta t_{2n}, \Delta t_{3n}$  - абсолютные погрешности измерений соответствующих задержек,  $\bar{t}_{1n}, \bar{t}_{2n}, \bar{t}_{3n}$  - усредненные по всему массиву измерений значения этих задержек.

В силу незначительной анизотропии упругих свойств исследуемой стали для оценки погрешности можно полагать, что  $\bar{t}_{1n} \approx \bar{t}_{2n}$ , в связи с чем значение погрешности  $\Delta d$  можно записать в виде:

$$\Delta d \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\bar{t}_t}{\bar{t}_l} \sqrt{(\delta t_t)^2 + (\delta t_l)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_l}{V_t} \sqrt{(\delta t_t)^2 + (\delta t_l)^2}, \tag{20}$$

где  $\bar{t}_t, \bar{t}_l$  - средние значения задержек импульсов поперечных и продольных упругих волн соответственно;  $V_t, V_l$  - скорости их распространения;  $\delta t_t, \delta t_l$  - относительные погрешности определения задержек.

Из формулы (20) видно, что абсолютная погрешность определения параметра  $d$  определяется относительными погрешностями определения задержек импульсов упругих волн различных типов. Таким образом, чем больше количество отраженных импульсов  $n$ , по которым рассчитываются задержки, тем точнее определяется параметр  $d$ . Однако при увеличении  $n$  уменьшается соотношение «сигнал/шум» для  $n$ -го отраженного импульса и случайная погрешность определения координаты точки пересечения сигнала с нулевым уровнем увеличивается.

Экспериментально установлено, что измерения задержек являются достоверными при отношении сигнала и шума не менее 10 дБ. Величина  $n$  выбиралась как предельное значение, превышение которого приводит к уменьшению отношения сигнала и шума до значения, меньшего 10 дБ.

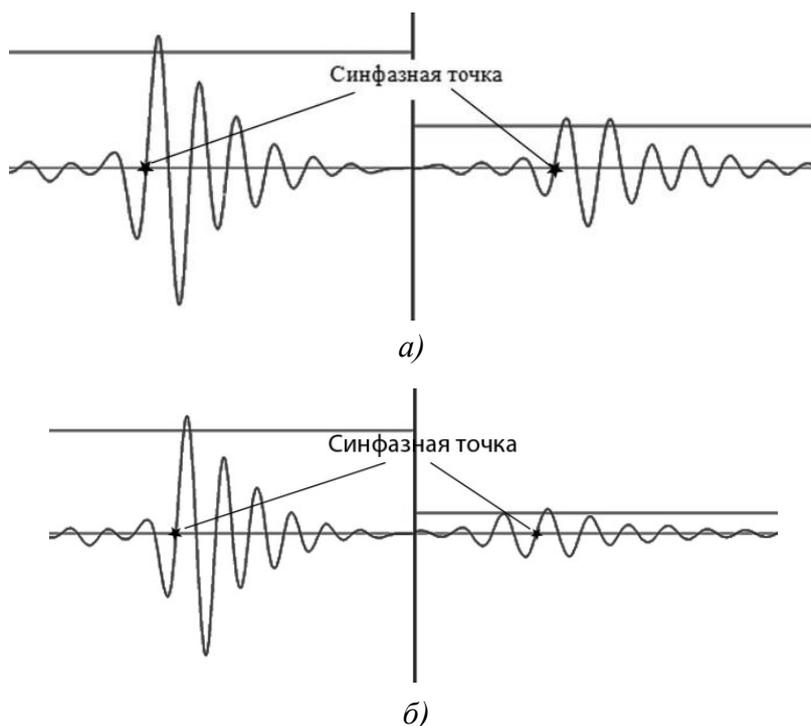
На рис. 3 приведена типичная осциллограмма импульсов с приемлемым соотношением «сигнал/шум».



Рис. 3. Осциллограмма принятых акустических импульсов с приемлемым соотношением «сигнал/шум»

Анализ полученных осциллограмм позволил определить оптимальное значение видимых на экране прибора  $n=6$ .

При распространении упругих импульсов в реальном поликристаллическом материале вследствие частотно зависимого затухания упругих волн и наличия дисперсии скорости звука происходит изменение формы огибающей импульса. Вследствие этого отсчетные точки (точки пересечения сигнала с нулевым уровнем) для 1-го и  $n$ -го отраженных импульсов могут смещаться на один и более периодов основной частоты импульса и измерение задержек импульсов может происходить по несинфазным точкам. Это приводит к значительным систематическим погрешностям определения задержек импульсов, кратных периоду несущей частоты. Сказанное иллюстрируется приведенными на рис. 4 осциллограммами.



**Рис. 4. Измерение задержки:**

*а* - по синфазным точкам; *б* - по точкам, сдвинутых на период колебаний

На рис. 4, *а*, *б* горизонтальные линии изображают пороги срабатывания, по достижении которых программное обеспечение ИВК «АСТРОН» определяет точку пересечения сигнала с нулевым уровнем, находящуюся слева от пересечения сигнала с порогом. При поиске этой точки используется сплайн-аппроксимация сигнала в области его нулевого значения.

Из рисунков видно, что при одних и тех же относительных значениях порогов срабатывания во втором случае измерение проведено по несинфазным точкам, что приводит к систематической ошибке, равной периоду несущей.

Для типичных ультразвуковых частот порядка 5 МГц систематическая ошибка определения задержки в этом случае составит порядка 200 нс. Задержка 3-го импульса относительно 1-го в нашем случае составляет: для поперечных волн порядка 10 мкс, для продольных – порядка 5 мкс. Таким образом, величины соответствующих относительных погрешностей составляют соответственно 2 и 4 %.

### Методика экспериментальных исследований

Эксперименты проводились на образце из трубы [6, 8]. Материал трубы – аустенитная сталь 12X18Н10Т. В трех локальных зонах образца создавался перепад температур на поверхности образца с температурой 300°С путем подачи дистиллированной воды температурой 20°С капельным способом с частотой 1 и 0,5 Гц. В качестве образца была выбрана труба

Ø 63×6 мм из стали марки 12X18H10T (ГОСТ 9941-81). На рис. 5 представлен образец. На рис. 6 представлена осциллограмма, полученная при сканировании трубчатого образца с помощью продольных волн. Как видим из рисунка, для данного случая испытаний возможно использование 3 импульса.



Рис. 5. Образец - труба Ø 63×6 мм из стали марки 12X18H10T

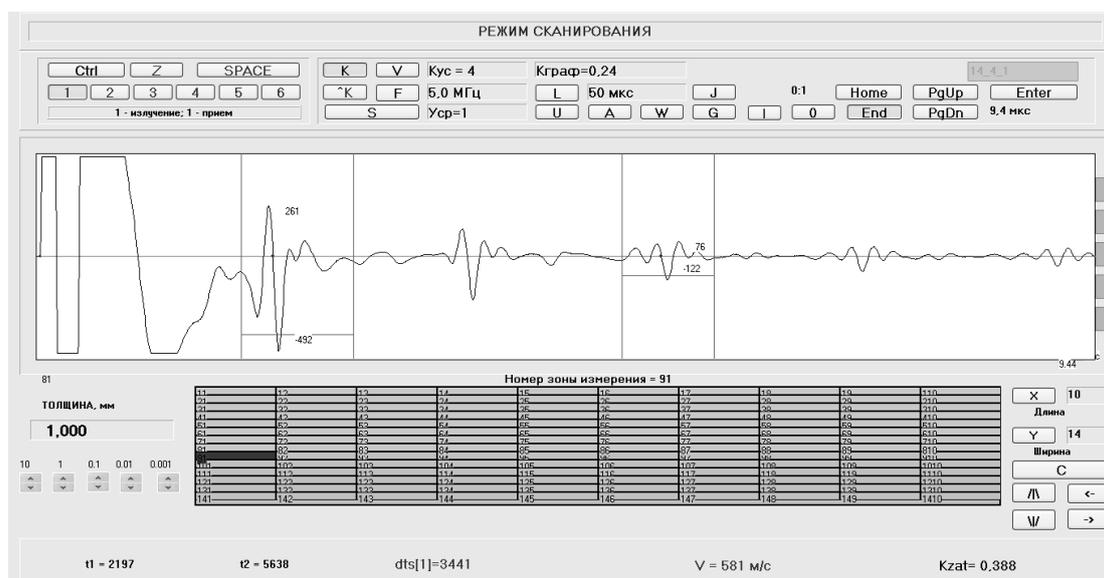


Рис. 6. Осциллограмма при сканировании продольными волнами трубчатого образца

### Выводы

1. Полученные результаты свидетельствуют о чувствительности спектрально-акустических характеристик к накоплению повреждений в процессе термоциклирования.
2. Метрологические характеристики ИВК «АСТРОН» обеспечивают измерение безразмерного акустического параметра с точностью  $6,5 \times 10^{-4}$ .
3. Диапазон изменения безразмерного акустического параметра в процессе термоциклирования составляет порядка  $3,5 \times 10^{-2}$ . Чувствительность нормированного параметра  $d_n$ , приведенного к диапазону изменения поврежденности, составляет порядка 0,02.
4. Расчетная погрешность определения поврежденности порядка 0,04 – 0,06.
5. Таким образом измерение акустического параметра  $d$  позволяет решать задачи механики среды с повреждениями, причиной которых являются пульсации температуры.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).*

**Библиографический список**

1. **Судаков, А.В.** Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. **Судаков, А.В.** Ресурс энергооборудования при пульсациях температур // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – № 9. – С. 10–18.
3. **Углов, А.Л.** Об одной модели накопления рассеянных повреждений // Прикладная механика. – 1991. – № 1. С. 77–84.
4. **Волков, И.А.** Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
5. **Углов, А.Л.** Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А.Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов; отв. редактор академик РАН Ф.М. Митенков. – М.: Наука, 2009. – 280 с.
6. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
7. **Хлыбов, А.А.** Оценка напряженного состояния гильотинных ножей, подвергаемых термической обработке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75. – № 4. – С. 54–57.
8. **Хлыбов, А.А.** Исследование накопления рассеянных микроповреждений в образцах из стали 08X18H10T при малоцикловой усталости / А.А. Хлыбов, С.Н. Пичков, А.Л. Углов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 4. – С. 55–61.

*Дата поступления  
в редакцию 10.10.2015*

**A. L. Uglov, A. A. Khlybov, A. D. Makarov, R. R. Ryazapov, A. E. Sobornov**

**TECHNIQUE OF ASSESSING DAMAGE AUSTENITIC STEEL BECAUSE  
OF THERMAL PULSATION BY ACOUSTIC METHOD**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Shown, that for control thermal fatigue damage can be used elastic wave. Proposed the technique of monitoring physico-mechanical characteristics and damage accumulation by acoustic method. Provided data on the evaluation of experimental error. Experimental verification of operability of the proposed monitoring algorithm implemented on the sample tube of austenitic steel by creating thermal pulsation. The proposed method of control allows the control of physical and mechanical characteristics of the material and thus improves the security of controlled structural elements, exposed by thermal pulsation.

*Key words:* thermal fatigue, elastic waves, austenitic steel, damage, physical and mechanical characteristics.