

УДК 534.6

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ОБРАЩЕНИЯ СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЕНИ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЛНОВОДЕ

© 2021 г. М. А. Миронов¹, *, П. А. Пятаков¹, С. А. Шуляпов¹

¹Открытое акционерное общество “Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева”, Москва, Россия

*E-mail: mironov_ma@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 26.02.2021 г.

Представлены результаты расчетов методом обращения сигналов во времени в ультразвуковом диапазоне (~130 кГц) в условиях сильного точечного нагрева (>250°C) и деформации исследуемого образца – стальной плиты. Показано, что искажения, обращенного во времени сигнала, вызванные изменением свойств образца, могут быть значительно снижены путем уменьшения длительности обрабатываемых сигналов и при использовании нескольких приемников.

DOI: 10.31857/S036767652106017X

ВВЕДЕНИЕ

Акустические волны могут генерироваться как в результате внешнего воздействия на образец (удар, трение), так и при изменении его внутренней структуры (фазовый переход, развитие трещины) [1]. Поэтому отслеживание параметров акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов является мощным методом решения задач неразрушающего контроля и мониторинга состояния объекта. Наряду со спектром, амплитудой, частотой генерации импульсов, важным параметром АЭ сигнала является расположение точки его генерации. Стандартная методика локации АЭ сигналов основана на определении расстояния, пройденного акустической волной по разнице во времени регистрации ее фронта несколькими датчиками, расположенными на поверхности образца [2]. Трудности в применении данной методики могут возникнуть ввиду сложной геометрической формы образца или анизотропии его материала. Также погрешность может внести многократное рассеяние и отражение от неоднородностей и границ объекта.

Другой подход к решению задачи локации АЭ сигналов основан на рассмотрении образца как линейной системы и введении передаточных функций, описывающих распространение акустических волн между любыми двумя точками образца. Тогда взаимная корреляция передаточных функций двух акустических сигналов, зарегистрированных неподвижным приемником, будет свидетельствовать о близком расположении их источников. При этом, взаимная корреляция переда-

точных функций математически эквивалентна операции обращения принятого сигнала во времени (time reversal acoustic-TRA) [3]. В настоящее время принцип TRA применяется для решения широкого круга задач: локация места удара [3–5], визуализация объектов, контактирующих с образцом [6], выявление дефектов образца [7], нагрева образца [8], диагностики рассеивающих центров в среде [9] и др. Методика TRA хорошо подходит для сложных волноводов, причем ее можно реализовать с помощью всего одного приемника [10]. Применение большего числа приемников увеличивает точность метода [3, 11].

Особенностью метода TRA является его чувствительность к изменению свойств образца [11, 12]. Однако при решении ряда задач неизменность свойств образца во времени (стационарность волновода) обеспечить невозможно, например, при контроле состояния сварного шва во время сварки [13], или при исследовании образца, деформирующегося под действием внешней нагрузки. Нестационарные характеристики волновода, как правило, ухудшают качество локации источников акустических сигналов. В данной работе представлены экспериментальные результаты применения TRA для локализации АЭ сигналов в условиях сильного локального нагрева (>250°C) и деформации образца. Продемонстрированы возможности улучшения точности локации в нестационарном волноводе при уменьшении длительности обрабатываемого сигнала и использовании многоканального приема.

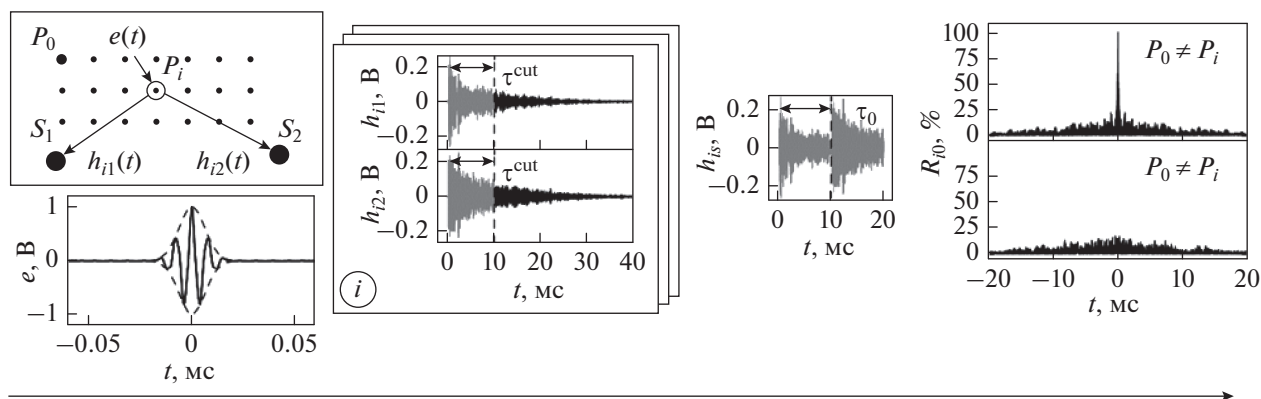


Рис. 1. Схема методики обработки сигналов.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

В качестве образца использовалась стальная плита с размерами $610 \times 400 \times 11$ мм³. Для генерации и приема АЭ сигналов применялись преобразователи Ranis RS-150L и усилители Ranis RPA-05 (ООО «НДТ-Системы»). Формирование зондирующего импульса и оцифровка принимаемых сигналов осуществлялось с помощью многофункционального модуля NI USB 6361 (500 МГц, 16 бит). Обработка данных проводилась на персональном компьютере с помощью программы, разработанной в среде графического программирования LabView.

На рис. 1 приведена схема методики проведения экспериментов. Импульс $e(t)$ с гауссовой огибающей, несущей частотой 130 кГц и длительностью 0.02 мс излучался из точки P_i и принимался в точках S_1 и S_2 . Положение приемников во время эксперимента не изменялось, а излучатель перемещался по поверхности образца от точки к точке с шагом в 2–10 мм, позволяя записать соответствующий им массив принимаемых сигналов. В каждой точке сохранялось ~ 50 импульсов. Поскольку излучаемый импульс $e(t)$ короткий, регистрируемые сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ близки к передаточным функциям $h_{i1}(t)$ и $h_{i2}(t)$ из точки P_i в точки S_1 и S_2 , соответственно. Например, $S_1(t) = e(t) \otimes h_{i1}(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} e(\lambda)h_{i1}(t-\lambda)d\lambda \simeq h_{i1}(t)$, где \otimes – операция свертки. Принимаемые реверберационные импульсы формируются за счет большого количества переотражений исходного импульса в образце и уникальны для каждого из положений излучателя.

Для каждой из точек P_i импульсы с обоих приемников укорачивались до длительности τ^{cut} и объединялись: $h_{is}(t) = h_{i1}^{cut}(t) + h_{i2}^{cut}(t + \tau_0)$, где $\tau_0 > \tau^{cut}$ – задержка импульса со второго прием-

ника. Затем проводилась процедура виртуального обращения сигнала во времени, заключающаяся в вычислении функций $R_{i0}(t) = |h_{is}(-t) \otimes h_{s0}(t)|$ для каждой из точек P_i и выбранной опорной точки P_0 , для которой также была получена обработанная передаточная функция $h_{s0}(t) = h_{0s}(t)$. Математически $R_{i0}(t)$ эквивалентна корреляционной функции $\int_{-\infty}^{\infty} h_{s0}(\lambda)h_{is}(\lambda-t)d\lambda$ между обработанными передаточными функциями от точек P_i и P_0 до приемников. При приближении точки P_i к точке P_0 корреляция между передаточными функциями возрастает, что позволяет использовать данный метод для локализации положения источника произвольного АЭ сигнала.

Иными словами, положение источника случайного АЭ сигнала может быть определено посредством вычисления корреляционной функции между этим сигналом и заранее записанными сигналами из различных точек образца. Возможен и другой подход, не требующий предварительной записи сигналов, основанный на группировке сигналов. Он может быть использован, когда требуется отследить появление дефекта в образце, например, трещины. В этом случае по мере развития дефекта из одной точки образца испускается множество АЭ сигналов. Анализируя поток АЭ сигналов и объединяя их в группы, если максимальное значение корреляционной функции между ними достаточно велико, можно сгруппировать сигналы, испускаемые из одной точки. Рост сигналов в такой группе будет означать развитие дефекта.

Укорочение реверберационных сигналов при обработке позволяет сократить время вычислений. Это более существенно, возможно уменьшить их искажение, связанное с изменением состояния образца, поскольку с уменьшением длительности уменьшается и длина пути АЭ волн в образце, учитываемая при обработке. Объединение сигналов от

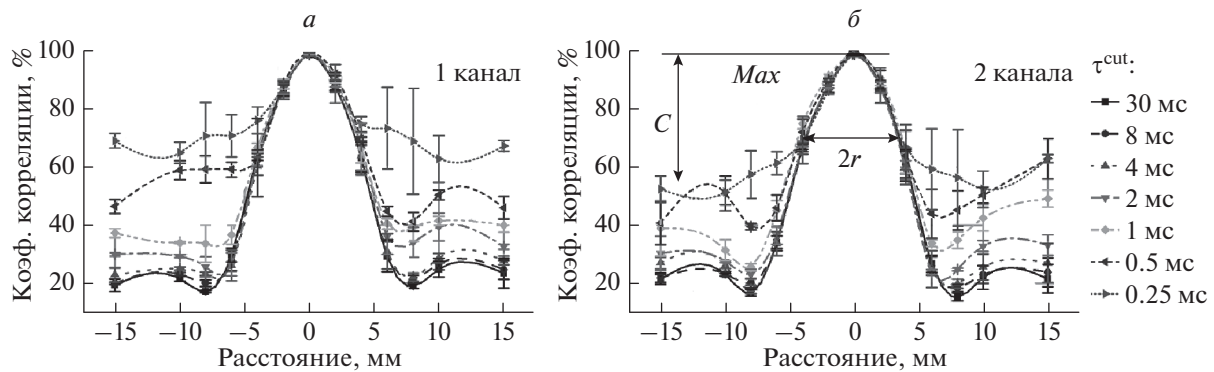


Рис. 2. Зависимости коэффициентов корреляции от расстояния до опорной точки (начало координат), измеренные без внешнего воздействия на образец. Зависимости приведены при разных длительностях принимаемых сигналов, а также при использовании одного (*а*) и двух (*б*) приемных каналов. Обозначения: *C* – контраст, *Max* – максимальный коэффициент корреляции, *r* – радиус корреляции.

разных приемников можно интерпретировать как появление дополнительных переотражений в образце (искусственная реверберация). Объединение сигналов от нескольких приемников является методом повышения точности локализации источника АЭ сигналов за счет многоканальности. При $\tau_0 > \tau^{cut}$ этот метод дает такие же результаты, как и стандартный метод усреднения корреляционных функций от нескольких приемников [3]: $R_{i0}(t) \cong \left| \int_{-\infty}^{\infty} (h_{10}(\lambda)h_{11}(\lambda - t) + h_{20}(\lambda)h_{22}(\lambda - t))d\lambda \right|$, поскольку вклад от перекрестных членов вида $h_{10}h_{12}$ оказывается незначительным.

На рис. 2 показаны профили коэффициентов корреляции (КК) $Max(R_{i0}(t))$, измеренные на образце, не подвергавшемся внешнему воздействию. Измерения КК проводились в двух взаимно перпендикулярных направлениях относительно опорной точки. Для построения профилей КК усреднялись.

Основными параметрами профилей КК являются (см. рис. 2б): максимальное значение КК в опорной точке; контраст – отношение этого максимального значения к фоновому уровню КК вдали от опорной точки; радиус корреляции – расстояние на котором КК спадает до уровня 0.7 от максимального значения.

Видно, что при укорочении импульсов до некоторого порогового значения $\tau^{cut} \sim 1-2$ мс, профили КК меняются незначительно. Однако дальнейшее уменьшение длительности ведет к резкому ухудшению контраста. С одной стороны, уменьшение длительности ведет к уменьшению числа переотражений акустических волн в образце (до 5–10 при длительности в 1 мс), что и приводит к ухудшению контраста. С другой, при наличии затухания именно головная часть импульса, имеющая наиболь-

шую амплитуду (в *e* раз амплитуда уменьшается на временах ~ 10 мс), вносит наибольший вклад в КК и дальнейшее увеличение длительности импульсов не приводит к существенному изменению профиля КК. К улучшению контраста приводит использование двух каналов при обработке. Можно показать, что контраст *C* связан с числом каналов *N*, как $C \sim \sqrt{N}$ [14].

Поскольку состояние образца не изменялось, уровень КК в опорной точке был близок к ста процентам вне зависимости от длительности импульсов. Радиус корреляции *r*, определяющий пространственное разрешение локации, зависит от частоты АЭ сигналов и параметров образца (материал, геометрия), и также не изменяется при варьировании длительности принимаемых импульсов и составляет величину $r = 3.5 \pm 0.5$ мм по уровню 0.7 от максимума КК.

Рассмотрим изменение профилей КК при внешних воздействиях на образец: изгибе плиты и ее точечном нагреве. При изменении свойств волновода изменяются передаточные функции h_{is} и h_{os} от точек на плите до приемников. Поэтому, если исходный массив сигналов был измерен до внешнего воздействия на волновод, а локация опорной точки P_0 производится уже после него (или наоборот), разрешающая способность методики может оказаться заметно сниженной.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ВОЛНОВОДА

Деформации исследуемого образца возможны, например, при его нагрузочном тестировании или при отслеживании его состояния во время эксплуатации.

Для осуществления изгиба плита устанавливалась на опоры, расположенные вдоль ее коротких

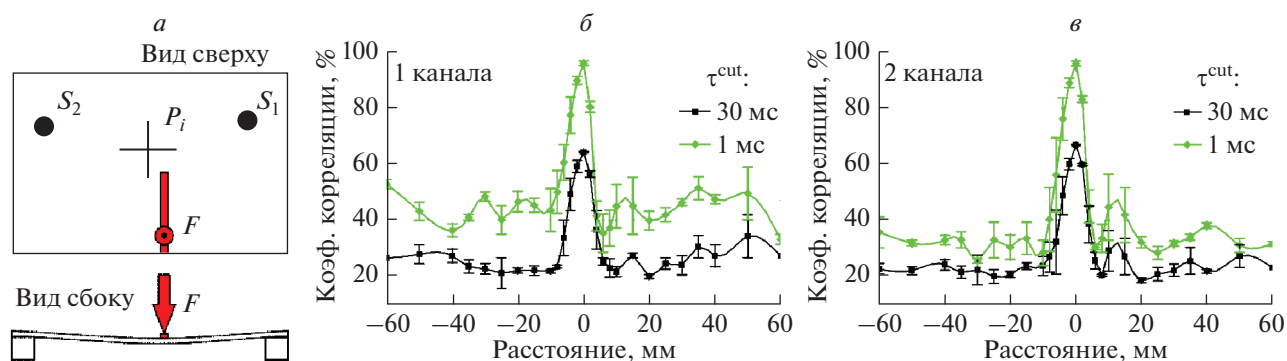


Рис. 3. Схема, показывающая взаимное расположение точки F приложения силы, деформирующей плиту, массива точек P_i , расположенных вокруг опорной точки, и приемников S_1 и S_2 (а). Зависимости коэффициентов корреляции от расстояния до опорной точки (начало координат) (б, в). Сигналы из опорной точки были измерены на недеформированной плите, сигналы из окружающих точек – после деформации плиты. Зависимости приведены при разных длительностях принимаемых сигналов, а также при использовании одного (б) и двух (в) приемных каналов.

граней, и подвергалась нагрузке в центральной области, как показано на рис. 3а. Поверхность плиты в месте приложения нагрузки прогибалась на 3–5 мм от исходного состояния. Сигналы из опорной точки на недеформированной плите сохранялись. Массив сигналов из окружающих точек собирался после деформации. Как и ранее, измерения проводились в двух взаимно перпендикулярных направлениях с центром в опорной точке.

На рис. 3в и 3г приведены профили КК, полученные после обработки. Видно, что в результате деформации плиты максимальный КК значительно снижается (до 64%). Его удается восстановить (до 95%) путем укорочения обрабатываемых сигналов с 30 до 1 мс. Однако, как и в случае недеформированного образца (см. рис. 2), это приводит к повышению фона на больших расстояниях от опорной точки. Использование сигналов от двух приемников во время обработки позволяет снизить уровень фона и повысить контраст профиля КК. Таким образом, за счет укорочения и многоканальности удается в значительной мере восстановить исходные параметры профиля КК.

ТОЧЕЧНЫЙ НАГРЕВ ВОЛНОВОДА

Другим типом рассмотренного воздействия на образец был его точечный нагрев. Подобное изменение состояния образца возможно, например, при контроле развития дефектов сварного шва непосредственно во время сварки [13, 15]. Равномерный нагрев образца рассматривался в [11, 12]. В частности, в [12] было показано, что искажения распределения КК могут быть скомпенсированы путем сжатия или растяжения принимаемых сигналов во время обработки, од-

нако в случае точечного нагрева такой подход неприменим.

Измерение массива сигналов из точек, окружающих опорную точку, собирался при комнатной температуре. Затем область вокруг опорной точки разогревалась мощным феном в течение 5 мин, при этом температура T поверхности образца в этой области поднималась до значений $T > 250^\circ\text{C}$. Измерения сигналов в опорной точке проводились как до, так и сразу после нагрева плиты.

На рис. 4а–4в показаны двумерные распределения КК при комнатной температуре. Эти распределения являются расширением профилей на рис. 2 и приведены для сравнения с профилями после нагрева. Видно, что после нагрева максимум КК снижается до уровня фона (до ~25%) и становится неразличим. Как и в эксперименте с внешней нагрузкой, укорочение обрабатываемых сигналов с 30 до 1 мс позволяет значительно увеличить максимальное значение КК в опорной точке (до ~80%), однако повышается и уровень фона в среднем до ~35%. Применение многоканального приема позволяет снизить уровень фона и повысить контраст.

Следует отметить, что в данном случае повышение максимального уровня КК (Max) при укорочении обрабатываемых сигналов происходит неравномерно. Так при $\tau^{cut} = 30$ мс, $Max \sim 25\%$, при $\tau^{cut} = 4$ мс, $Max \sim 35\%$, $Max \sim 40\%$, при $\tau^{cut} = 2$ мс, $Max \sim 50\%$, а при $\tau^{cut} = 1$ мс, $Max \sim 80\%$. Восстановление корреляции в опорной точке происходит достаточно медленно по мере остывания плиты. Так, при $\tau^{cut} = 30$ мс за три часа максимальный уровень КК повышается с ~25 до ~65% а, при $\tau^{cut} = 1$ мс с ~80 до 90%.

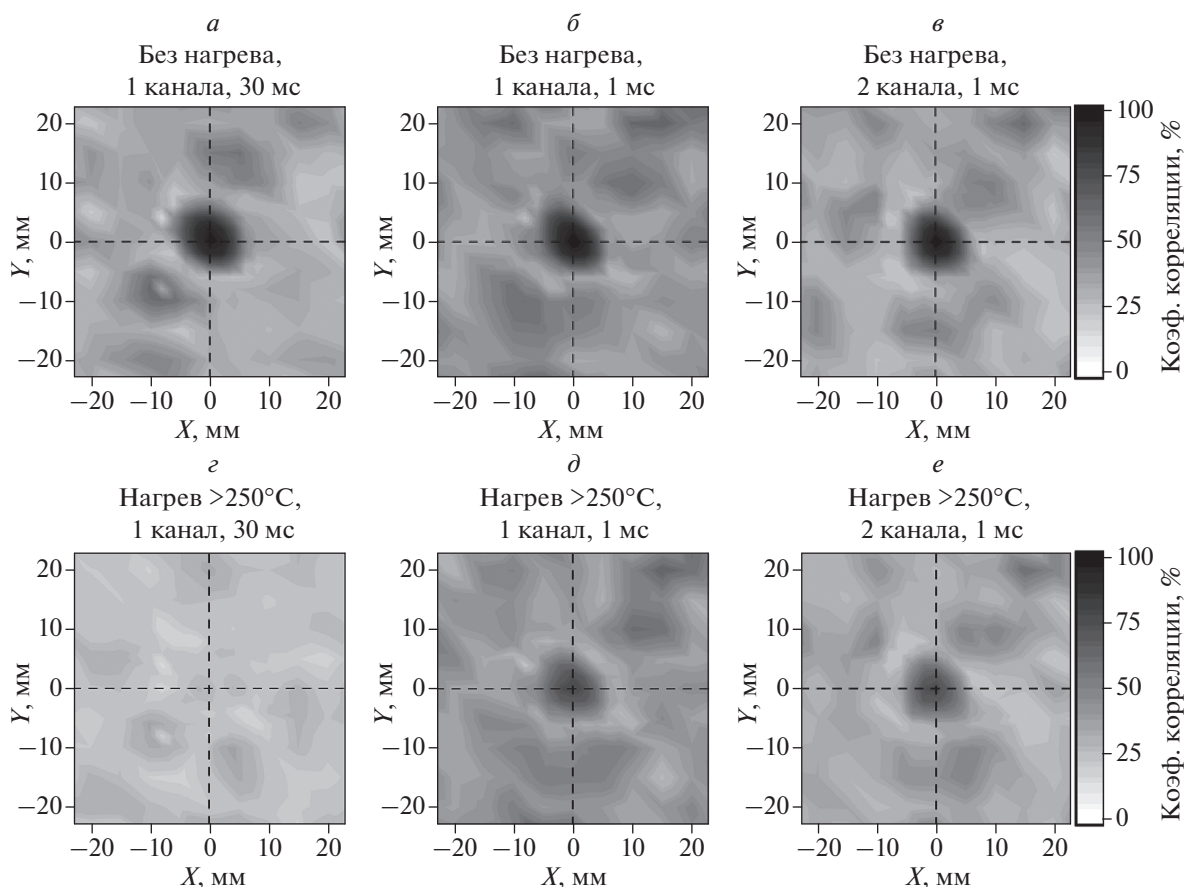


Рис. 4. Зависимости коэффициентов корреляции от расстояния до опорной точки (начало координат). Сигналы из опорной точки измерялись как при комнатной температуре (24°C) плиты (а, б, в), так и после ее нагрева ($>250^{\circ}\text{C}$; з–е). Сигналы из окружающих точек измерялись на ненагретой плите. Зависимости приведены при длительностях принимаемых сигналов 30 мс (а, з) и 1 мс (б, в, д, е), а также при использовании одного (а, б, з, д) и двух (в, е) приемных каналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чувствительность методов обращения сигналов во времени к изменению состояния волновода может быть заметно снижена при уменьшении длительности обрабатываемых сигналов. Это происходит потому, что при обработке устраняются искажения, которые накапливаются в импульсе по мере увеличения его длительности за счет многократного распространения АЭ волн в волноводе с измененными параметрами. Укорочение обрабатываемых импульсов до определенного предела практически не изменяет профиль КК.

Для стальной плиты, рассматриваемой в работе в качестве образца, предел укорочения соответствует пространственной длине импульса в несколько (5–10) ее характерных размеров. Было показано, что в условиях механической деформации и точечного нагрева стальной плиты укорочение импульсов позволяет значительно повысить уровень максимального КК в опорной точке (с 64 до 95% и с 25 до 80%, соответственно). Многоканаль-

ность приема позволяет повысить контраст, т.е. отношение максимального коэффициента корреляции к его фоновому уровню.

Указанные выше свойства могут оказаться полезны в практике акустико-эмиссионного контроля объектов, состояние которых меняется во времени, а также в случае сильного акустического затухания в материале контролируемых образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ohtsu M., Kaminaga Y., Munwam M.C. // *Constr. Build. Mater.* 1999. V. 13. No. 1–2. P. 57.
2. Sengupta S., Datta A.K., Topdar P. // *Lat. Amer. J. Sol. Struct.* 2015. V. 12. No. 8. P. 1565.
3. Ing R.K., Quieffin N., Catheline S. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. No. 20. Art. No. 204104.
4. Chen C., Li Y., Yuan F.G. // *Shock Vibr.* 2013. V. 20. No. 3. P. 561.
5. Ernst R., Dual J. // *Ultrason.* 2014. V. 54. No. 6. P. 1522.
6. Anderson B.E., Griffa M., Bas P. et al. // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2011. V. 129. No. 1. Art. No. EL8.

7. *Chehami L., Moulin E., de Rosny J. et al.* // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. No. 10. Art. No. 104901.
8. *Брысев А.П., Клопотов Р.В., Крутянский Л.М.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 10. С. 1406; *Brysev A.P., Klopotov R.V., Krutyansky L.M.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 10. P. 1251.
9. *Преображенский В.Л., Ширковский П.Н., Pernod P.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 10. С. 1393; *Preobrazhensky V.L., Shirkovskiy P.N., Pernod P.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 10. P. 1238.
10. *Ciampa F., Meo M.* // J. Acoust. Soc. Amer. 2011. V. 130. No. 1. P. 168.
11. *Hudin C., Lozada J., Hayward V.* // J. Sound Vib. 2014. V. 333. No. 6. P. 1818.
12. *Ribay G., Catheline S., Clorennec D. et al.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 2007. V. 54. No. 2. P. 378.
13. *Степанова Л.Н., Канифадин К.В., Лазенко С.А.* // Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 73; *Stepanova L.N., Kanifadin K. V., Laznenko S.A.* // Russ. J. Nondestruct. Test. 2010. V. 46. No. 1. P. 56.
14. *Montaldo G., Palacio D., Tanter M. et al.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 2005. V. 52. No. 9. P. 1489.
15. *Серъезнов А.Н., Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю. и др.* // Дефектоскопия. 2009. № 5. С. 25; *Ser'eznov A.N., Stepanova L.N., Lebedev E.Yu. et al.* // Russ. J. Nondestruct. Test. 2009. V. 45. No. 5. P. 310.

Application peculiarities of the time-reversal technique for a non-stationary waveguide

M. A. Mironov^{a,*}, P. A. Pyatakov^a, S. A. Shulyapov^a

^a*Andreyev Acoustics Institute, Moscow, 117036 Russia*

^{*}*e-mail: mironov_ma@mail.ru*

We present the experimental results of applying the time reversal technique in the ultrasonic frequency range (~130 kHz) under conditions of strong spot heating (>250°C) or deformation of the sample—the steel plate. It was shown that the spatial distribution distortions of the time-reversed signal caused by changes in the sample properties can be significantly reduced by reducing the duration of the processed signals and by using several receivers.