

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОДОВ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, О. И. БОЙЧУК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты исследований волн, проходящих по волноводам. Показаны два механизма передачи информации волноводу от контролируемой конструкции и связанные с этим особенности сигналов АЭ, распространяющихся по нему. Библиогр. 8, рис. 6.

*Ключевые слова:* волновод, контролируемая конструкция, сигналы акустической эмиссии

Одним из важных элементов в системах непрерывного мониторинга конструкций с применением АЭ технологии является конструкция промежуточных элементов, передающих информацию датчикам АЭ [1–3]. Это волноводы, устанавливаемые на поверхности конструкций для осуществления такой передачи в случае невозможности по тем или иным причинам прямого непосредственного крепления АЭ датчиков к поверхности контролируемой конструкции. Как правило, такими случаями являются конструкции, работающие при высоких температурах, где необходимо вынести датчики из зоны высоких температур или высоких температур и повышенной радиации. Конструкция волновода должна рассчитываться, прорабатываться должна также технология его крепления к поверхности изделия. Учитывая сложность обработки поступающей в компьютер информации, необходимо получить более точные методы расчета волноводов по сравнению с существующими элементарными методами расчета стержней с двигающимися по ним волнами. Последнее требует

более точной постановки задачи с более тщательной проработкой граничных и начальных условий воздействия перемещающейся по поверхности контролируемой конструкции волны на принимающий информацию рабочий торец волновода.

При решении такой задачи могут быть выделены два случая воздействия на рабочий торец волновода. Это случай, когда такое воздействие осуществляется на торец волновода, приваренного к поверхности конструкции, и случай его присоединения механическим путем (рис. 1). Механическое крепление волновода к поверхности конструкции может осуществляться в виде дозированно подпружиненного баяннетного замка (рис. 1, в). Разница в креплении волновода к поверхности приводит к различным условиям воздействия на его рабочий торец. В случае крепления с помощью сварки ввиду отсутствия зазора между торцом волновода и поверхностью конструкции передача информации происходит путем воздействия перемещения поверхности конструкции на его рабочий торец. В случае механическо-

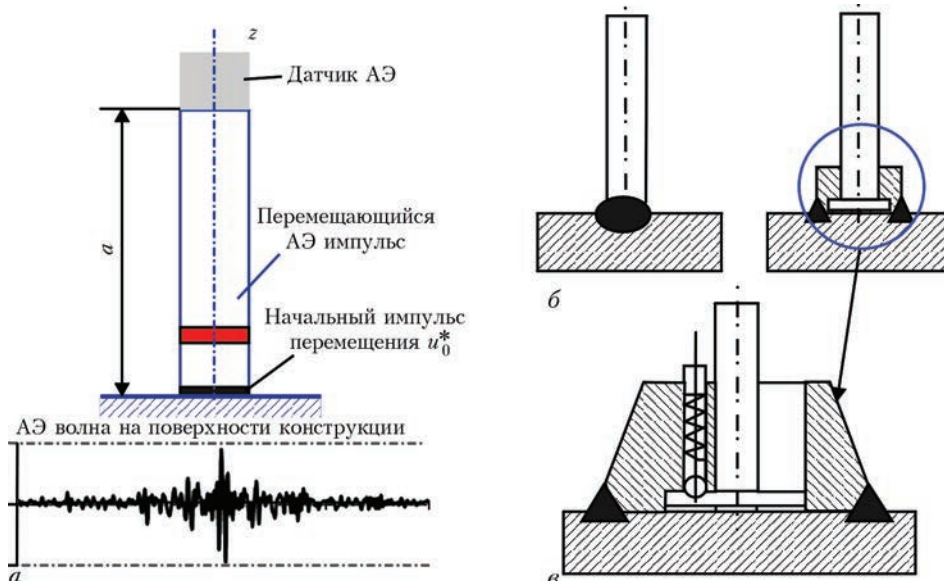


Рис. 1. Схема конструкции волновода (а) и способы его крепления к поверхности контролируемой конструкции (б), конструкция баяннетного замка для крепления волновода к поверхности изделия (в)

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук, 2017

го крепления и наличия, в связи с этим, зазора между двумя поверхностями, информация передается путем удара вертикально перемещающейся поверхности конструкции по свободному рабочему торцу волновода. В зависимости от того, каким способом прикреплен волновод, информация передается различными волнами, что необходимо учитывать при расчете волновода. Учитывая изложенное, рассмотрим два случая передачи информации на рабочий конец волновода.

**Случай 1.** В результате нагрузок на изделие пусть информация на рабочий торец волновода из вязкоупругого материала передается путем перемещения. В этом случае дифференциальное уравнение линейной задачи вязкоупругости в перемещениях может быть записано следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \beta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} u_0^* \delta(z) \delta(t), \quad (1)$$

где  $\varphi$  – функция перемещений, см<sup>2</sup>;  $C_1$  – физическая константа, равная скорости перемещения волны в стержнях, см/с;  $\beta$  – вязкость материала волновода, с/см<sup>2</sup>;  $u_0^*$  – импульс начального перемещения, передаваемого торцу волновода поверхностью конструкции, см·с;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $z$  – координата;  $t$  – время;  $\delta(z)$  и  $\delta(t)$  – единичные дельта-функции Дирака.

Результатом решения данного дифференциального уравнения будут волны перемещений, распространяющихся вдоль волновода [4, 5]\*:

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_0^* C_1 \omega_n}{a} \frac{e^{-\frac{\beta C_1^2 t}{2}}}{\sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}} \times \sin \left[ C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2} \right] \cos\{\omega_n z\}$$

и

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_0^* C_1 \omega_n}{a} \frac{e^{-\frac{\beta C_1^2 t}{2}}}{\sqrt{\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2 - \omega_n^2}} \times \text{sh} \left[ C_1 t \sqrt{\left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2 - \omega_n^2} \right] \cos\{\omega_n z\},$$

если под корнем первой формулы появляется отрицательная величина. Здесь  $a$  – длина волновода

да, см; величины  $\omega_n$  – суть положительные корни трансцендентного уравнения  $\sin(\omega a) = 0$ .

Начальные условия задачи предполагают начальное мгновенное воздействие перемещений двигающейся в вертикальном направлении поверхности пластины на рабочий торец волновода (рис. 1, а), а граничные – отсутствие напряжений на его свободном конце.

Передача информации от сложного импульса АЭ определяется путем суммирования воздействий от элементарных единичных импульсов, составляющих перемещающийся пакет АЭ (рис. 1, а).

Расчет по представленным формулам достаточно трудоемкий из-за слабой сходимости суммы ряда под знаком суммы, поэтому была создана специальная программа расчета, позволяющая достаточно быстро получать результаты счета.

Программа имеет возможность изменять параметры счета для получения их различных комбинаций. Формулы (1) и (2) обеспечивают счет для двух случаев. Исходные значения счета точно соответствуют приведенной в верхней рамке формуле. При переходе на счет к другому случаю в верхней части программы представляется формула, соответствующая выбранному случаю (рис. 2).

Анализируя графики (рис. 3), убеждаемся, что распространение АЭ волны в виде импульса осуществляется в достаточно широком диапазоне значений вязкости материала вплоть до значений  $\beta C_1$  равных 0,1 см<sup>-1</sup> (в данном случае для удобства счета рассматривается условная величина вязкости  $\beta C_1$  и времени  $C_1 t$ ). При больших значениях  $\beta C_1$  характер перемещений меняется. Так, при  $\beta C_1 = 0,5$  см<sup>-1</sup> появляется пологая часть кривой распределения при приближении импульса к свободному торцу волновода. При еще больших значениях  $\beta C_1$ , например, 1 импульс в графике распределения перемещений отсутствует. Распре-

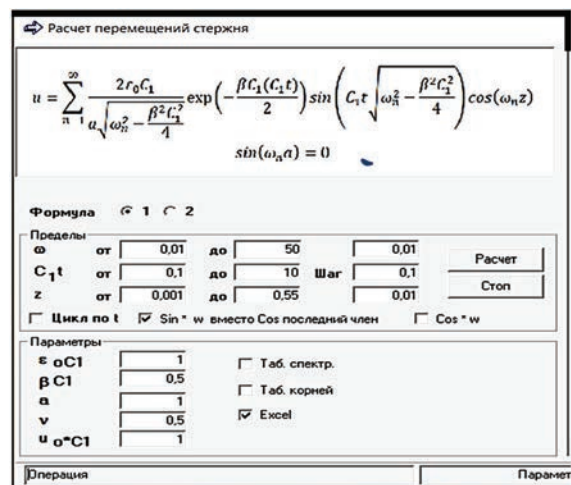


Рис. 2. Программа расчета перемещений импульса в волноводе в зависимости от принятых исходных параметров

\*Решение получено методом интегральных преобразований дифференциального уравнения (1) по Лапласу [6] и конечным sin-преобразованием Фурье [7]

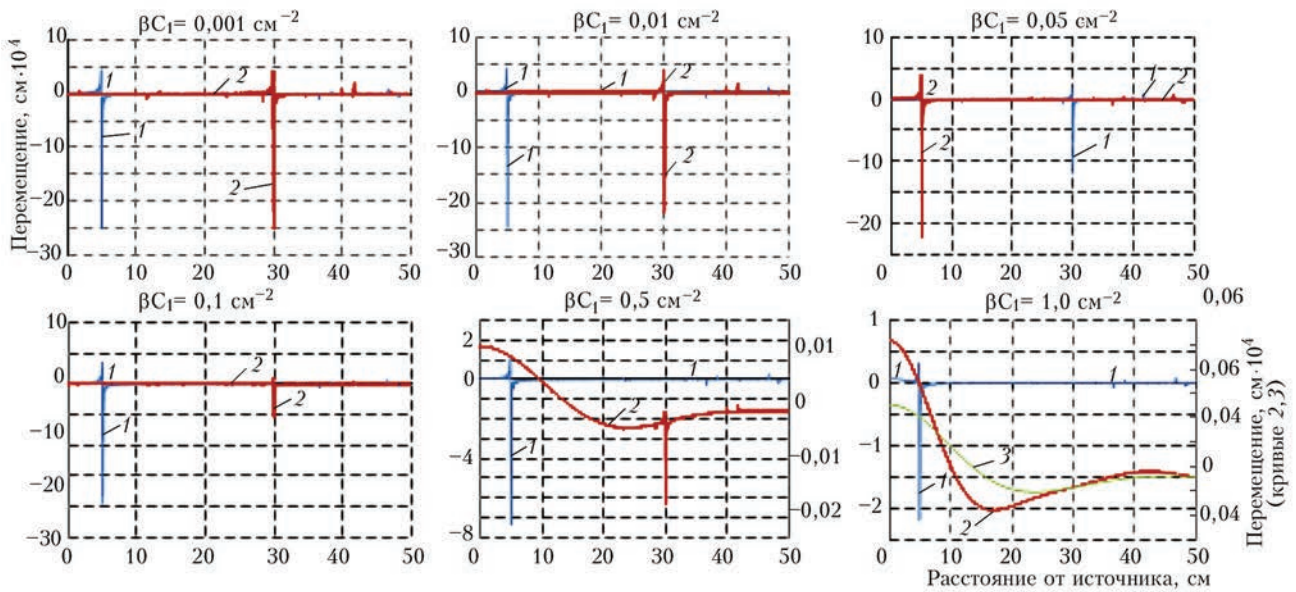


Рис. 3. Графики перемещений импульса АЭ по волноводу при различных значениях коэффициента вязкости материала волновода и времени: 1 –  $C_1 t = 5$ ; 2 – 50; 3 – 60 см

деление перемещений становится плавным без выраженных всплесков.

Следует отметить еще одну особенность в количественных значениях перемещений на свободном конце волновода. За счет отсутствия напряжений на этой части волновода появляется отраженная волна противоположного знака, которая в значительной степени ослабляет подошедшую к этому торцу основную волну. Эффект получения полного сигнала основной волны может быть достигнут за счет наличия датчика АЭ, который как бы удлиняет волновод на свою длину. При этом предполагается, что основная волна рассеивается в АЭ датчике за счет его сложной формы. Математическое обеспечение измерительного оборудования в этом случае должно уметь выделять необходимую для дальнейшего анализа часть сигнала АЭ. На рис.4 показан случай с величиной сигнала АЭ на свободном торце волновода при отсутствии АЭ датчика и вариант, учитывающий прикрепленный к нему АЭ датчик. Как видно из

графика, величина подавления сигнала отраженным очень большая.

**Случай 2.** Во втором случае дифференциальное уравнение задачи может быть представлено в виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \beta \frac{\partial u}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\beta$  как и ранее, коэффициент вязкости материала волновода,  $\text{с/см}^2$ . Решением данного уравнения при граничных условиях  $\varepsilon = \varepsilon_0^*$  на рабочем торце стержня и  $\varepsilon = 0$  на его свободном конце после последовательного прямого и обратного преобразования Лапласа и конечного преобразования Фурье, будет [1–3]:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0^* C_1}{a \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2}{4}}} \exp\left(-\frac{\beta C_1^2}{2} t\right) \times \sin\left(C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2}{4}}\right) \cos(\omega_n z).$$

Если  $\omega_n^2 < \frac{\beta^2 C_1^2}{4}$ , то

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\varepsilon_0^* C_1}{a \sqrt{\frac{\beta^2 C_1^2}{4} - \omega_n^2}} \exp\left(-\frac{\beta C_1^2}{2} t\right) \times \text{sh}\left(C_1 t \sqrt{\frac{\beta^2 C_1^2}{4} - \omega_n^2}\right) \cos(\omega_n z);$$

$\omega_n$  – положительные корни трансцендентного уравнения  $\sin(\omega a) = 0$ .

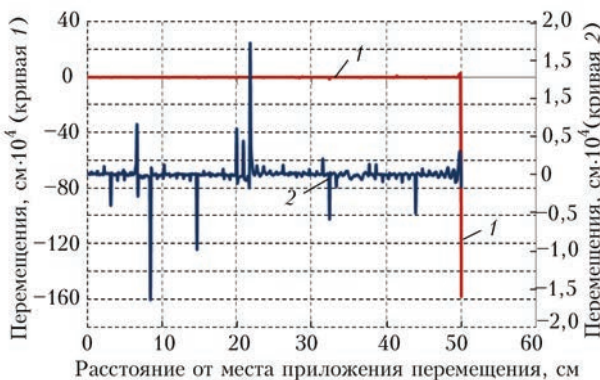


Рис. 4. Перемещения на свободном торце волновода с учетом датчика (1) и без учета датчика (2); 1 –  $C_1(t) = 50$ ,  $a = 52$ ; 2 –  $C_1(t) = 50$ ,  $a = 50$

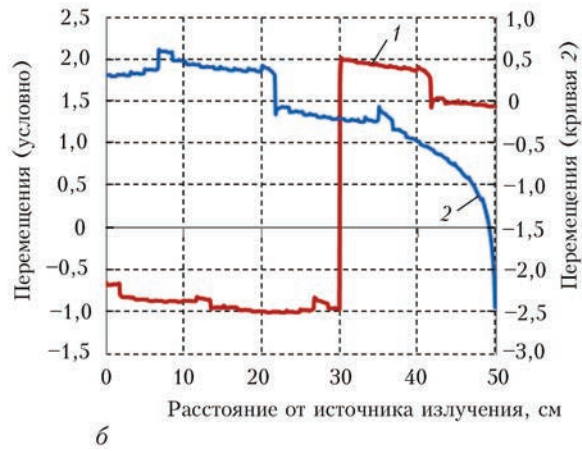
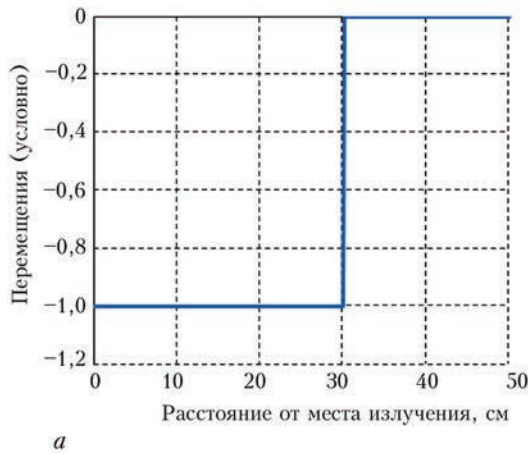


Рис. 5. Перемещения в волноводе бесконечной длины (а) и в волноводе длиной 50 см (б) при одинаковых параметрах излучения:  $C_1t = 30$  (1) и 50 см (2)

Следует отметить некоторые особенности работы волноводов, получающих информацию в виде ударов по их рабочему торцу. В этом случае наблюдается сильное влияние свободной поверхности противоположного торца. Так, если рассмотреть движение волны в волноводе полубесконечных размеров, где перемещения вдоль него могут быть описаны выражением [1]:

$$u = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon_0 C_1}{\omega} \sin(\omega C_1 t) \cos(\omega z) d\omega = S(C_1 t - z) \varepsilon_0 C_1,$$

являющегося решением дифференциального уравнения (2) для стержня полубесконечных размеров, то движение волны описывается ступенчатой функцией и имеет вид, представленный на рис. 5, а. Перемещения в волноводе ограниченной длины (рис. 5, б) также выражаются ступенчатой функцией, но вид ее за счет переотражения волны от свободного торца волновода существенно отличается от рис. 5, а. В то же время пики волн в обоих случаях совпадают с координатой  $z = C_1 t$ . Расчеты перемещений в случае волновода ограниченной длины выполнены по программе, представленной на рис. 2 (формула (1)). На графике рис. 5, б также приведены перемещения в случае, когда импульс сигнала достиг свободного торца волновода ( $C_1 t = 50$  см). Как видим, эта зависимость еще более отличается от приведенной на графике рис. 5, а.

Достаточно большое влияние на распределение перемещений в волноводе, вызванных волной АЭ, оказывает величина коэффициента вязкости материала волновода  $\beta$ . Как было уже сказано, эта величина характеризует сопротивление материала продвижению АЭ волны. На рис. 6 представлены графики распределения перемещений в волноводе при двух значениях коэффициента  $\beta$ , равных 0,1 и 0,4 с/см<sup>2</sup>. Как видно из графиков, с увеличением сопротивления материала волновода продвижению АЭ волны происходит сглаживание распределения перемещений, а пик

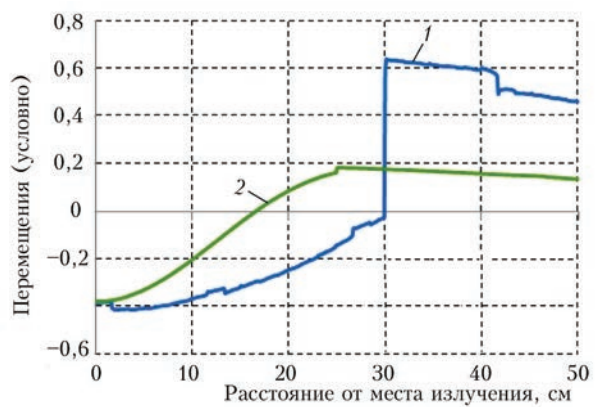


Рис. 6. Распределение перемещений в волноводе длиной 50 см в зависимости от величины коэффициента  $\beta$  (1 – 0,1; 2 – 0,4) и положения импульса излучения (1 –  $C_1 t = 30$ ; 2 – 25 см)

перемещений становится еле заметным на общем фоне (кривая 2 на рис. 6).

В заключение отметим, что необходим тщательный анализ дальнейшего использования АЭ информации, получаемой от контролируемого объекта с помощью волноводов, что связано в первую очередь с выбором волновода и способом его крепления на изделии.

### Выводы

Получены аналитические выражения и разработаны оригинальные программы расчета перемещений в волноводах при различных способах их крепления.

Формы волн, распространяющихся в волноводе, существенным образом зависят от способа воздействия пластины на рабочий торец волновода – путем передачи перемещения торцу или ударным воздействием на него.

Передача сигнала АЭ датчику путем перемещения вызывает острый импульс,двигающийся по волноводу вплоть до его свободного торца, где в сильной мере ослабляется за счет отраженного импульса.

При передаче сигнала волноводу путем удара форма сигнала существенно отличается от сигнала

ла, образующегося передачей перемещения. Сигнал представляет собой ступенчатую функцию и не изменяется на свободном торце волновода.

В случае передачи информации перемещением значительную роль играет датчик АЭ, удлиняющий на величину своего размера по высоте длину волновода. При этом существенную роль очевидно играет рассеяние сигнала АЭ в сложном по форме корпусе датчика.

Полученные формулы позволяют учитывать материал, из которого изготовлен волновод.

Разработанные программы счета позволяют достаточно быстро и с заданной наперед точностью проводить расчет и сравнение различных вариантов волноводов и способов их крепления к конструкции.

**Список литературы**

1. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1966. – 228 с.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций; под ред. Б. Е. Патона. – К.: Индпром, 2008. – 815 с.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
4. Механіка руйнування та міцність матеріалів. Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика; під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – 1132 с.
5. Недосека А. Я., Недосека С. А. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 1 // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 2. – С. 3–8.
6. Недосека А. Я., Недосека С. А., Бойчук О. И. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2 // Там же. – 2013. – № 2. – С. 9–14.
7. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
8. Трантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.

**References**

1. Dvayt G. B. Tablitsy integralov i drugiye matematicheskiye formuly. – M.: Nauka, 1966. – 228 s. [in Russian].
2. Nedoseka A. Ya. Osnovy rascheta i diagnostiki svarnykh konstruktsiy; pod red. B. E. Patona. – K.: Indprom, 2008. – 815 s. [in Russian].
3. Timoshenko S. P. Kolebaniya v inzhenernom dele. – M.: Nauka, 1967. – 444 s. [in Russian].

4. Mekhanika ruynuvannya ta mitsnist materialiv. T. 5. Neruivnyi kontrol i tekhnichna diahnostryka; pid red. Z. T. Nazarchuka. – Lviv: Fyzyko-mekhanichnyi instytut im. H. V. Karpenka NAN Ukrainy, 2001. – 1132 s. [in Ukrainian].
5. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A. Vliyaniye lokalnogo skopleniya defektov na rasprostraneniye voln akusticheskoy emissii. Soobshcheniye 1 // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol. – 2013. – № 2. – S. 3–8. [in Russian].
6. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Boychuk O. I. Vliyaniye lokalnogo skopleniya defektov na rasprostraneniye voln akusticheskoy emissii. Soobshcheniye 2 // Tam zhe. – 2013. – № 2. – S. 9–14. [in Russian].
7. Dech G. Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasya i Z-preobrazovaniya. – M.: Nauka, 1971. – 288 s. [in Russian].
8. Tranter K. Dzh. Integralnye preobrazovaniya v matematicheskoy fizike. – M.: Gostekhizdat, 1956. – 204 s. [in Russian].

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОССКА, О. І. БОЙЧУК

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДІВ**

Наведено результати досліджень хвиль, що проходять по хвилеводах. Показані два механізми передачі інформації хвилеводу від контрольованої конструкції та пов'язані з цим особливості сигналів АЕ, що поширюються по ньому. Бібліогр. 8, рис. 6.

Ключові слова: хвилевід, контрольована конструкція, сигнали акустичної емісії

A. Ya. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA, O. I. BOICHUK

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevych str., 03680, Kiev. E-mail: office@paton.kiev.ua

**RESULTS OF WAVEGUIDE INVESTIGATIONS**

Results of studying waves moving through waveguides are given. Two mechanisms of data transfer to waveguide from the controlled structure and the associated features of AE signals propagating through it, are shown. 8 References, 6 Figures.

Keywords: waveguide, monitored structure, acoustic emission signals

Поступила в редакцію 17.11.2016



**Восьмая международная конференция  
ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И  
ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

11 – 15 сентября 2017 г.  
Украина, Одесса, отель «Курортный»

**Тематика конференции**

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- 3D-технологии
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Моделирование лучевых технологий
- Гибридные процессы
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2017