

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АЭ ДАТЧИКА НА РЕГИСТРИРУЕМЫЕ СПЕКТРЫ ВОЛН

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В ранее опубликованных работах представлены формулы для расчета перемещений наружной поверхности пластин, описывающие полный спектр волн, распространяющихся в пластине. Аналитически было показано, что АЭ волны в пластинах могут распространяться со скоростями значительно выше скорости  $C_1$ . Однако контролирующая аппаратура воспринимает только ту часть спектра волны, которую пропускает акустический датчик, имеющий конкретную амплитудно-частотную характеристику. Эта характеристика связана, в первую очередь, с конструкцией и размерами чувствительного элемента и корпуса датчика. В статье рассмотрены особенности регистрации волн АЭ с использованием датчиков с различной амплитудно-частотной характеристикой. Библиогр. 4, рис. 2.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, амплитудно-частотная характеристика, амплитудно-волновая характеристика, датчик акустических волн, характеристика датчика

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) типичного АЭ датчика на основе пьезокерамики, полученную экспериментальным путем с использованием специальных стендов, позволяющих выполнять такие измерения<sup>1</sup>. На рис. 1 приведены результаты этих измерений в полосе частот от 50 до 500 кГц. Впоследствии такие характеристики были получены специалистами ИЭС в диапазоне частот от 25 до 800 кГц.

Последние измерения АЧХ были приняты за основу при разработке и метрологической аттестации датчика АЭ, разработанного в ИЭС<sup>2</sup>. Учитывая, что расчет волновых полей, вызванных АЭ в материалах при изменении их структуры, производился суммированием элементарных волн по их волновым числам, то кривые АЧХ были пересчитаны с учетом этой особенности. На рис. 1, б представлена полоса пропускания того же датчи-

ка, но в координатах волнового числа  $\alpha$  (см<sup>-1</sup>) и относительной скорости распространения каждой элементарной волны  $C_a/C_i$ . Для аналитического представления АЧХ в этом случае использовали представления  $AЧХ$  в этом случае использовали зависимость  $2\pi f = \alpha C_a$  и приближенную кривую, полученную после обработки экспериментальных данных (рис. 1, а). Эту кривую в виде функциональной зависимости можно приближенно записать:

$$A_y = \exp[-0,006^2(f - f_0)^2],$$

и после подстановки,  $f = \frac{\alpha C_a}{2\pi}$ , получим:

$$A_y = \exp\left[-k_i^2 \left(\alpha \frac{C_a}{C_i} - \frac{2\pi f_0}{C_i}\right)^2\right], \quad (1)$$

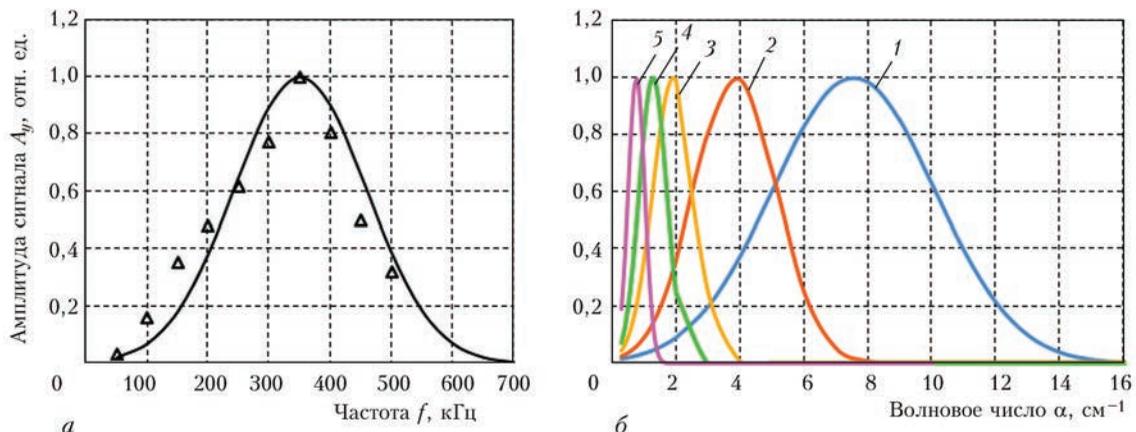


Рис. 1. Амплитудно-частотная (а) и амплитудно-волновая (АВХ) (б) характеристики АЭ датчика в зависимости от частоты и волнового числа ( $\Delta$  – эксперим., — аналит.): 1 –  $C_a/C_1 = 0,51$ ; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 5

<sup>1</sup> Экспериментальные значения АЧХ были измерены специалистами Хабаровского филиала Госстандарта СССР вместе со специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона.

<sup>2</sup> Разработчики Яременко М. А., Харченко Л. Ф.

где  $k_i = \frac{0,006 C_i}{2\pi}$ , см;  $f_0 = 350$  кГц – частота с максимальным значением передаваемой амплитуды принятого к рассмотрению АЭ датчика (рис. 1).

Как видно, в координатах волнового числа  $\alpha$  полоса пропускания сигнала АЭ находится в пределах  $1 \dots 14$  см<sup>-1</sup>, что соответствует частотам  $50 \dots 700$  кГц. Анализируя формулу (1), видим, что полоса пропускания того же датчика зависит от относительной скорости распространения волны  $C_\alpha / C_i$ . Здесь  $A_y$  – условная амплитуда АЭ сигнала;  $C_\alpha$  – текущее значение скорости перемещающейся волны АЭ;  $C_i$  – опорные значения скорости. В нашем случае это скорости  $C_1$  и  $C_2$ . В расчетах принято  $C_2 = 0,316 \cdot 10^6$  см/с;  $C_1 = 0,571 \cdot 10^6$  см/с;  $f_0 = 0,35 \cdot 10^6$  Гц;  $k_1 = 0,55$  см (при  $C_i = C_1$  в диапазоне  $C_\alpha \geq C_1$ ) и  $k_2 = 0,3$  см (при  $C_i = C_2$  в диапазоне  $C_\alpha < C_1$ ).

Формула (1) и графики на рис. 1 хорошо иллюстрируют то, что при проведении расчетов в координатах с волновым числом  $\alpha$  в функциональной зависимости АЧХ существенным является параметр скорости. Результаты этих расчетов приведены на рис. 1, б, где видно, что с увеличением скорости движения волны спектр пропускаемых волн сужается и перемещается в сторону меньших значений  $\alpha$ . Рассмотренный процесс фильтрации сигналов АЭ в сильной мере влияет на значения конечной информации, получаемой аппаратурой. Можно сделать заключение, что при высоких скоростях распространения АЭ волн последние могут не фиксироваться датчиком. Расчеты показали, что в данном случае таким пределом оказалось отношение  $C_\alpha / C_1$ , равное 5. Ниже представлена информация о распределении перемещений на поверхности пластины в зависимости от наличия фильтрующих характеристик АЭ датчика. Для расчетов перемещений использованы общие формулы распространения упругих АЭ волн в пластинах, полученные ранее [1–4]. Для наглядности переписем их в упрощенном виде. Формулы (5.69; 5.76) с учетом члена фильтрующей характеристики АЭ датчика примут вид:

1. Для скоростей меньше  $C_2$  (формула 5.69, стр. 560 [1]):

$$w = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \exp \left[ -k_2^2 \left( \alpha \frac{C_\alpha}{C_2} - \frac{2\pi f_0}{C_2} \right) \right] \times \left\{ \alpha \gamma_1 C + P_0 \exp(-z_0 \alpha \gamma_1) + \alpha^2 [A + B] \right\} \times \alpha J_0(\alpha r) \sin(\alpha C_\alpha t) d\alpha. \quad (2)$$

Значения коэффициентов  $A, B, C, P_0$  на стр. 557–558.

2. Для  $C_2 < C < C_1$  (формула 5.76, стр. 568 [1]):

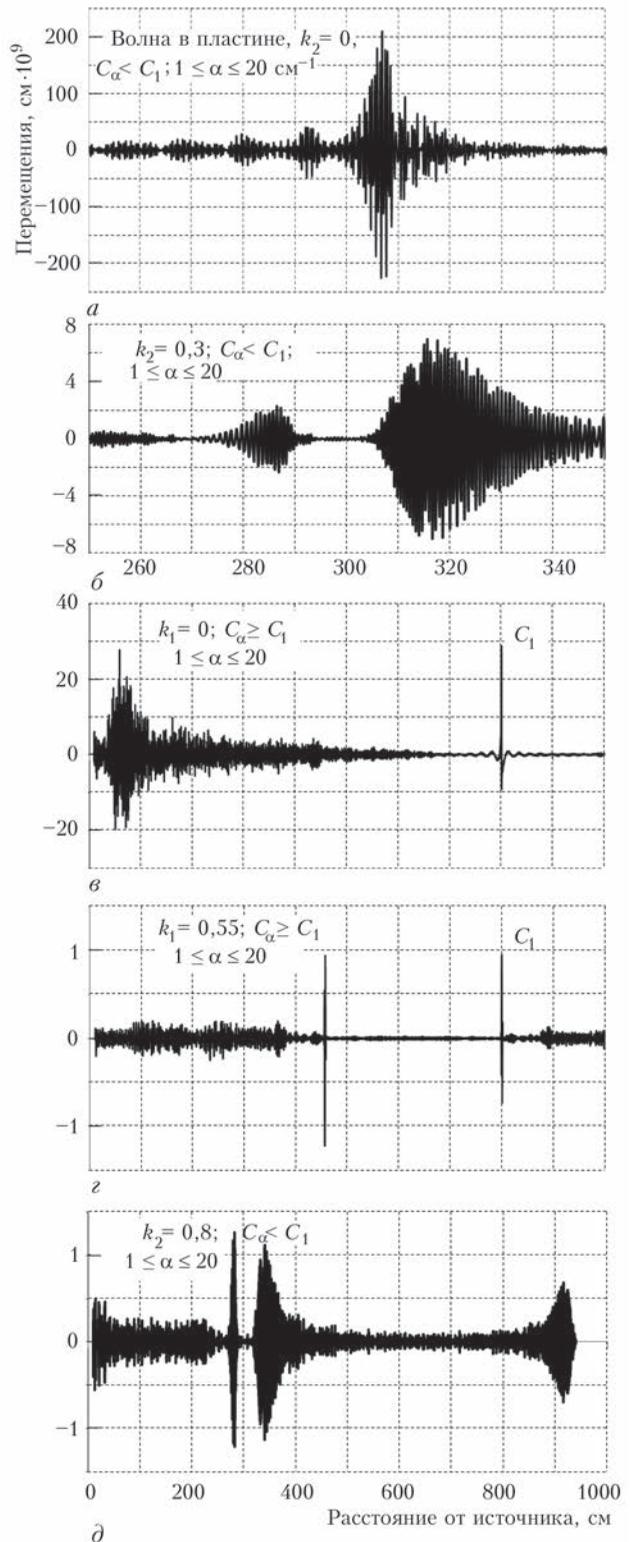


Рис. 2. Графики распространения АЭ волны в пластине толщиной 1 см: а – реальная АЭ волна, распространяющаяся в пластине; б – информация, получаемая от датчика при скоростях волн менее  $C_1$  ( $k_2 = 0,3$  см); в – волна АЭ, реально двигающаяся в пластине при  $C_\alpha \geq C_1$ ; з – информация, получаемая от датчика при скоростях волн больше  $C_1$  ( $k_1 = 0,55$  см); д – фильтрация сигнала АЭ датчиком с более узкой полосой пропускания ( $k_2 = 0,8$  см;  $C_\alpha < C_1$ )

$$w = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \exp \left[ -k_2^2 \left( \alpha \frac{C_\alpha}{C_2} - \frac{2\pi f_0}{C_2} \right)^2 \right] \times \left[ \alpha \gamma_1 C + P_0 \exp(-\alpha \gamma_1 z_0) + \alpha^2 B \right] \times \alpha J_0(\alpha r) \sin(\alpha C_\alpha t) d\alpha \quad (3)$$

3. Для скоростей выше  $C_1$  [2]:

$$w = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{1+\gamma_2^2}{1-\gamma_2^2} \times \exp \left[ -k_1^2 \left( \alpha \frac{C_\alpha}{C_1} - \frac{2\pi f_0}{C_1} \right)^2 \right] \cos(\alpha \gamma_1 z_0) \times \sin(\alpha C_\alpha t) \alpha J_0(\alpha r) d\alpha \quad (4)$$

Здесь  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – пределы рабочей полосы АЭ датчика по волновым числам.

Для оценки влияния характеристик АЭ датчика на информацию, получаемую приборами, рассмотрим два примера. В первом примере рассмотрим влияние на конечную информацию АЧХ характеристику акустического датчика разработки ИЭС им. Е. О. Патона (рис. 1).

Расчеты будем выполнять по формулам (3) и (4), представленным выше. На втором примере рассмотрим влияние более узкой полосы пропускания АЭ волны, регистрируемые датчиком с такой АЧХ. Сначала найдем численные значения коэффициента  $k_i$  для случая, когда величина скорости  $C_\alpha$  не превосходит  $C_1$  и случай, когда  $C_\alpha > C_1$ . Подставляя в выражение для  $k_i$  сначала  $C_2$ , а затем  $C_1$ , получим искомые величины. Итак, для  $C_\alpha < C_1$   $k_2 = 0,3$  см; для  $C_\alpha > C_1$   $k_1 = 0,55$  см. Для второго случая коэффициент  $k_2$  был принят равным 0,8 см. Ниже представлены результаты расчетов распространяющейся в стальной пластине бесконечных размеров волны. Толщина пластины принята равной 1 см. Момент времени  $t = 0,53 \cdot 10^{-3}$  с (для рис. 2, а, б, д) и  $1,4 \cdot 10^{-3}$  с (для рис. 2, в, з).

Из графиков на рис. 2 видно, чем больше коэффициент  $k_i$ , характеризующий ширину полосы пропускания датчика, тем больше снижается амплитуда сигнала. При этом частотные характеристики сигнала изменяются незначительно. В диапазоне больших скоростей ( $C_\alpha > C_1$ ) амплитуда сигналов АЭ снижается существенно больше, более выражено изменяется и частота сигнала. Из рис. 2, в, з видно, что при распространении волн с высокими скоростями достаточно четко выделяется волна, двигающаяся со скоростью  $C_1$ . При этом передний фронт АЭ сигнала за счет этой волны становится достаточно «крутым», что увеличивает точность определения координат при локации.

Расчетами также показано, что существующие АЭ датчики на основе пьезокерамики могут зарегистрировать АЭ волны, распространяющиеся со скоростями не более  $5C_1$ . В связи с этим волны, распространяющиеся со скоростями выше  $5C_1$ , физически до сих пор не зарегистрированы. Суммарное значение амплитуды сигнала АЭ, как видно из рис. 2, определяется в основном волнами, распространяющимися со скоростями в промежутке между  $C_2$  и  $C_1$ .

В заключение следует отметить, что физическое представление волн в виде суммы элементарных колебаний среды, формирующихся ее граничными и начальными условиями, позволили разработать методику расчета возникновения и изменения суммарного волнового поля в этой среде [1].

Разработанные аналитические зависимости позволяют в конечном счете выбирать конструкцию АЭ датчика и необходимые параметры приборного и программного регулирования полосы пропускания волн в заданном диапазоне волновых чисел или частот и, тем самым, использовать наиболее оптимальный вариант технологии обработки АЭ информации.

### Выводы

1. АЧХ (АВХ) характеристики АЭ датчика существенно влияют на конечный сигнал, поступающий с пластины на физическую и математическую обработку.
2. Амплитуда и частота отфильтрованного датчиком сигнала АЭ зависит от АЧХ датчика.
3. Конструируя АЭ датчик и измерительную аппаратуру, необходимо выбирать аппаратурные и математические фильтры с учетом требований к конечному АЭ сигналу.
4. Суммарная амплитуда АЭ сигнала определяется в основном волнами, распространяющимися со скоростями в промежутке между  $C_2$  и  $C_1$ .
5. Расчетами показано, что существующие АЭ датчики на основе пьезокерамики могут зарегистрировать АЭ волны, распространяющиеся со скоростями не более  $5C_1$ .
6. Необходимо отметить возможность значительного повышения точности определения координат источников АЭ при переходе работы измерительной аппаратуры на сигналы АЭ, распространяющиеся со скоростями, превышающими  $C_1$ .

### Список литературы

1. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред.). Киев, Индпром.
2. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. (2013) О движении волн акустической эмиссии с большими скоростями. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 3–9.
3. Недосека А. Я., Недосека С. А. (2015) Моделирование колебаний чувствительной пластинки применительно к датчикам акустической эмиссии. Сообщение 1. *Там же*, 1, 17–22.

4. Недосека А. Я., Недосека С. А. (2015) Моделирование колебаний чувствительной пластинки применительно к датчикам акустической эмиссии. Сообщение 2. *Там же*, **2**, 10–15.

**References**

1. Nedoseka, A.Ya. (2008) *Fundamentals of design and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton, Kiev, Indprom [in Russian].
2. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Voloshkevich, I.G. (2013) On movement of acoustic emission waves at high speeds. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 3-9 [in Russian].
3. Nedoseka A.Ya., Nedoseka, S.A. (2015) Simulation of sensitive plate vibrations in the case of acoustic emission sensors. Information 1. *Ibid.*, **1**, 17-22 [in Russian].
4. Nedoseka A.Ya., Nedoseka, S.A. (2015) Simulation of sensitive plate vibrations in the case of acoustic emission sensors. Information 2. *Ibid.*, **2**, 10-15[in Russian].

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

**ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК АЕ ДАТЧИКА НА СПЕКТРИ ХВИЛЬ, ЩО РЕЄСТРУЮТЬСЯ**

У раніше опублікованих роботах представлені формули для розрахунку переміщень зовнішньої поверхні пластин, що описують повний спектр хвиль, які поширюються в пластині. Аналітично було показано, що АЕ хвилі в пластинах можуть поширюватися зі швидкостями значно вищими швидкості  $C_1$ . Однак контролююча апаратура сприймає тільки ту частину спектра хвилі, яку пропускає акустичний датчик, що має конкретну амплітудно-частотну характеристику. Ця характеристика пов'язана, в першу чергу, з конструкцією і розмірами

чутливого елемента і корпусу датчика. У статті розглянуто особливості реєстрації хвиль АЕ з використанням датчиків з різною амплітудно-частотною характеристикою. *Бібліогр.* **4**, рис. 2.

Ключові слова: акустична емісія, амплітудно-частотна характеристика, амплітудно-хвильова характеристика, датчик акустичних хвиль, характеристика датчика

**EFFECT OF CHARACTERISTICS OF AE TRANSDUCER ON REGISTERED WAVE SPECTRA**

A.Ya. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 11 Kazimir Malevich Str., Kiev, 03150  
E-mail: office@paton.kiev.ua

Earlier published works represent the formulas for calculation of movement of outer surface of the plates, describing the complete wave spectra propagating in the plate. It was shown analytically, that AE waves in the plates can propagate with the velocities higher than  $C_1$ . However, controlling apparatuses take only that part of the wave spectrum, which is passed through acoustic transducer having specific amplitude-frequency characteristic. This characteristic is related, first of all, with design and dimensions of sensing element and transducer housing. The paper considers the peculiarities of registration of AE waves using the transducers with different amplitude-frequency characteristic. 4 Ref., 2 Fig.

Keywords: acoustic emission, amplitude-frequency characteristic, amplitude-wave characteristic, acoustic wave transducer, transducer characteristic

Поступила в редакцію  
05.09.2017

**ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»**

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный»  
10 – 14 сентября 2018 г.



Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ  
Международная Ассоциация «Сварка»

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и вместе с тезисами доклада направить ее в Оргкомитет до 20 июня 2018 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.

Сборники трудов восьми предыдущих конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» на сайте: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

**Оргкомитет**

ІЕЗ ім. Е. О. Патона НАН України,  
ул. Казимира Малевича 11,  
г. Киев, 03680, Украина;  
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>

**Контрольные даты**

Подача заявок на участие и тезисов докладов	до 20.06.2018 г.
Расылка второго информационного сообщения и подтверждение участия	до 12.07.2018 г.
Оплата регистрационного взноса	до 11.09.2018 г.