

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

**А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА**

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

В статье рассмотрены особенности формирования событий акустической эмиссии в биметаллах при их деформировании. Результаты получены при растяжении образцов, сваренных из стали 25Х1МФ и манурита (36ХМ). Соединение двух материалов с различными свойствами в испытываемых образцах осуществлялось сваркой в средней их части. В результате испытаний было установлено, что при протяженности привариваемого материала более 0,2 мм наличие границы раздела свойств приводит только к уменьшению амплитуды распространяющихся в материалах волн и не влияет на локацию координат сигналов акустической эмиссии на выбранной базе измерений. В процессе испытаний образца из биметалла на растяжение, вплоть до разрушения, установлено, что технология испытаний, основанная на акустической эмиссии, может быть распространена на испытания разнородных материалов и позволяет отслеживать всю кинетику возникновения и развития повреждений в материале при его деформировании. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* биметаллы, сварной образец, акустическая эмиссия, стержень, расчет, волна, испытание

В промышленности достаточно широко используются разнородные материалы, позволяющие оптимизировать эксплуатационные свойства конструкций. Соединение этих материалов между собой производится, как правило, путем сварки. Как известно, сварка вносит определенные изменения в структуру металла сварного соединения и околошовной зоны. Образуется переходная структура, обладающая промежуточными свойствами. В настоящей работе в качестве примера рассмотрены материалы, используемые в конструкциях, работающих при высоких температурах – соединение манурита типа 36ХМ и стали 25Х1МФ. Химический состав манурита типа 36ХМ, мас. %: 0,4...0,45 С; равно или менее 0,3 S; равно или менее 0,3 Р; 23...27 Cr; 32...35 Ni; равно или менее 2,0 Si; равно или менее 1,5 Mn; равно или менее 1,0 Nb; равно или менее 0,5 Mo; равно или менее 0,25 Cu. Внизу в таблице представлены основные свойства этих материалов.

Как видно из таблиц, свойства двух исследуемых материалов существенно отличаются. В частности, предел текучести у стали 25Х1МФ многократно выше. Очевидно, и затраты энергии, необходимой для движения волны акустической

эмиссии (АЭ) по этим материалам, могут также существенно отличаться.

Рассмотрим аналитически распространение акустических волн в образце, изготовленном из этих материалов и сваренном в его средней части (рис. 1, 2). Диаметр образца 16, длина 200 мм.

В средней части образца выполнено утонение до 9 мм и две прямоугольные выборки на глубину по 2 мм. Утонение и выборки были сделаны для сосредоточения деформаций, возникающих при растяжении образца в зоне сварного соединения.

Образцы, показанные на рис. 2, были изготовлены в соответствии с рис. 1 и растягивались в разрывной машине Р-20 до разрушения. При этом фиксировались события акустической эмиссии, возникающие последовательно по мере увеличения растягивающей нагрузки. На фотографиях образцов хорошо видны конструкция, форма и размеры сварного шва.

После выполнения аналитического расчета распространения волн АЭ в биметаллическом стержне приведем и реальную картину распределения АЭ событий для образца (рис. 1, д), испытанного при температуре 914 °С.

При расчете будет рассмотрен образец-стержень длиной 20 см, в средней части которого на расстоянии  $z_r$  от начала координат имеется свар-

**Основные свойства стали 25Х1МФ и манурита типа 36ХМ при 20 °С**

Состояние поставки, режим термообработки	Диаметр, мм	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Сталь 25Х1МФ					
Прутки:					
Закалка 880...900 °С, масло, отпуск 640...660 °С, воздух.	90	735	880	14	50
Закалка 930...950 °С, масло, отпуск 620...660 °С, воздух.	90	665	780	16	50
Нормализация 1000 °С, отпуск 650 °С	90	810...870	940...980	17	51...58
Манурит типа 36ХМ					
Прутки (продольное направление проката)	90	250	450	40	60

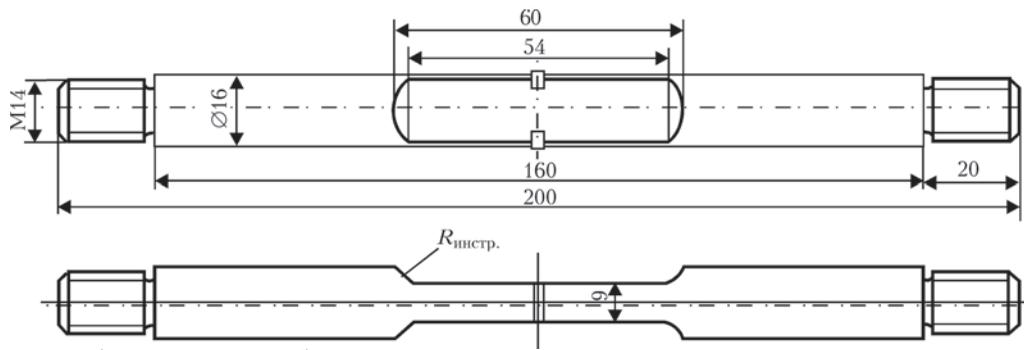


Рис. 1. Конструкция биметаллического образца

ное соединение двух отличающихся по свойствам материалов. Если обозначить коэффициент торможения сигнала АЭ в материале в зоне сварного соединения буквой  $\beta$  (с/см<sup>2</sup>) и отнести его к узкой приведенной плоскости с координатой  $z_r$ , то дифференциальное уравнение задачи можно записать в виде<sup>1</sup>:

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

Здесь:  $\varphi$  – функция перемещения, см<sup>2</sup>;  $u_0^*$  – импульс локального начального перемещения, вызванный изменением структуры растягиваемого материала в месте с мгновенной координатой  $z_{in}$ , см;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $z$  – координата вдоль оси стержня, см;  $t$  – время, с.

Решение представленного дифференциального уравнения будем искать методом интегральных преобразований [1–11]. По мере деформирования в любом месте по длине стержня могут возникнуть сигналы АЭ с координатой  $z_{in}$ . Сосредоточенность мест возникновения сигнала АЭ определим дельта-функцией Дирака. Сосредоточенность изменения свойств материала стержня будет характеризовать также дельта-функция по координате  $z_r$ . Растягиваемый стержень имеет свободные от напряжений границы при  $z = 0$  и  $z = 20$  см. В этом случае функция  $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$ .

Для решения данной задачи с заданными граничными и начальными условиями воспользуемся конечным синус-преобразованием Фурье по координате  $z$  и преобразованием Лапласа по времени  $t$  [2, 5]. В этом случае после выполнения преобразований уравнение (1) примет вид:

$$\left( \omega_n^2 + \frac{p^2}{C_1^2} \right) \overline{\varphi} + p \beta \overline{\varphi}_r \sin(\omega_n z_r) = \frac{1+\nu}{1-\nu} u_0^* \sin(\omega_n z_{in}),$$

где  $p$  и  $\omega_n$  – параметры преобразований Лапласа и Фурье. Черта над символом показывает на выполнение преобразования Лапласа над этой функцией на границе  $z_r$ .

Тогда решение дифференциального уравнения (1) для перемещения  $u$  после выполнения обратных преобразований будет иметь вид:

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{2u_0^* C_1}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_n \cos(\omega_n z) \sin(\omega_n z_{in})}{\sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}} \times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \sin^2(\omega_n z_r)}{a}\right) \sin\left[C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}\right],$$

если подкоренное выражение положительно и

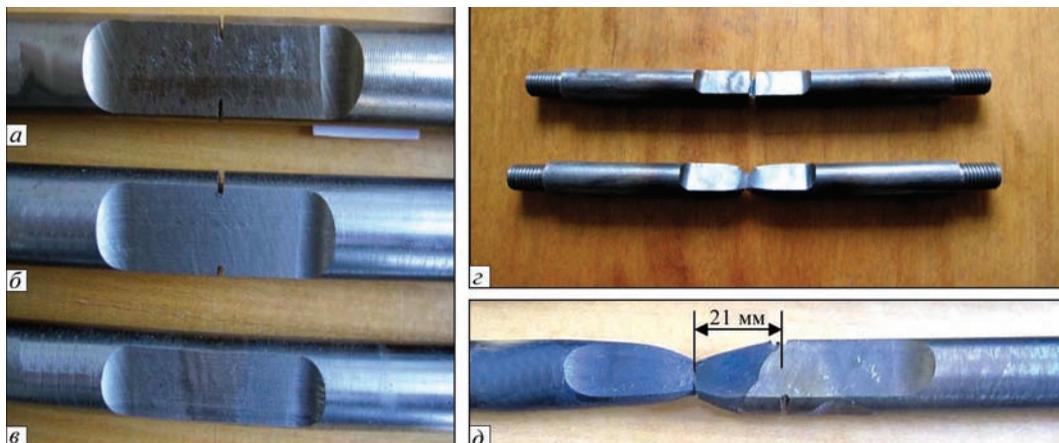


Рис. 2. Образцы с концентратором для испытаний на растяжение в исходном состоянии: а – цельный – манурит; б – цельный – сталь 25Х1МФ; в – составной – манурит (правая часть), сталь 25Х1МФ (левая) и после испытаний: с – при температуре 560 °С; д – при температуре 914 °С

<sup>1</sup> Решение для любой другой ширины области сопротивления можно получить путем интегрирования решения (2) по координате  $z_r$ .

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{2u_0^* C_1}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_n \cos(\omega_n z) \sin(\omega_n z_i)}{\sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}} \times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \sin^2(\omega_n z_r)}{a}\right) \operatorname{sh}\left[C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}\right] \quad (2)$$

если подкоренное выражение отрицательное. В обоих случаях спектральным уравнением будет:  $\sin(\omega_n a) = 0$

В случае отсутствия барьера сопротивления распространению АЭ волн, выражение для  $u$  существенно упростится и примет вид:

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{2u_0^* C_1}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\omega_n z) \sin(\omega_n z_i) \sin[\omega_n C_1 t].$$

Учитывая, что конструкция реального образца предусматривает сосредоточение деформаций, а, следовательно, и источников АЭ, то, располагая теоретический источник волны в районе концентратора, получим подобную реальной картину распределения АЭ в образце. Так, на рис. 3 представлены графики зависимости координат распро-

страняющейся АЭ волны в разные стороны от места возникновения возмущения для случаев, когда  $\beta = 0$ ,  $\beta = 1$  и  $\beta = 110$  с/см<sup>2</sup>. Представлены данные для однородного образца и образца с тонким слоем сопротивления.

Как видим, при наличии достаточно высокого сопротивления области раздела двух соединенных между собой материалов в образце возникают отраженные волны, которые могут существенно исказить картину при локации координат АЭ. Амплитуда отраженных волн зависит от величины коэффициента  $\beta$ . Чем больше значение этого коэффициента, тем выше амплитуда отраженных сигналов, и тем ниже на ту же величину амплитуда основного сигнала. Однако, как показали расчеты, глубина такой области невелика, и ощутимые результаты влияния образуются при ее протяженности до 0,2 мм и менее. Это, как правило, может быть связано с различными прослойками и вставками из других материалов. Наличие протяженной области сопротивления нивелирует общую картину за счет появления второй поверхности отражения, и суммарный сигнал всех отраженных волн равен нулю. В то же время, наличие протяженной области сопротивления приводит, как показывают расчеты, к достаточно ощутимому, в зависи-

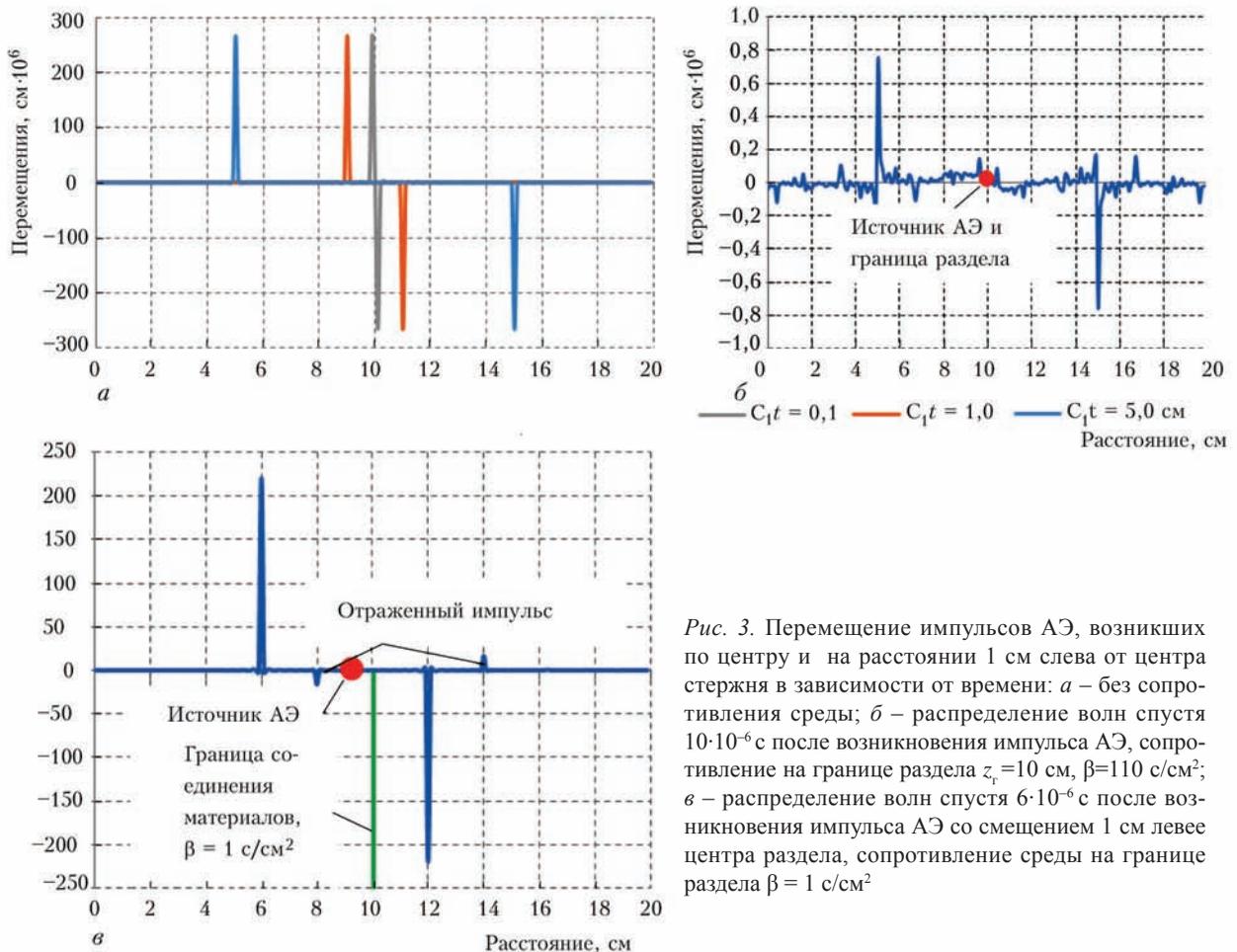


Рис. 3. Перемещение импульсов АЭ, возникших по центру и на расстоянии 1 см слева от центра стержня в зависимости от времени:  $a$  – без сопротивления среды;  $b$  – распределение волн спустя  $10 \cdot 10^{-6}$  с после возникновения импульса АЭ, сопротивление на границе раздела  $z_r = 10$  см,  $\beta = 110$  с/см<sup>2</sup>;  $v$  – распределение волн спустя  $6 \cdot 10^{-6}$  с после возникновения импульса АЭ со смещением 1 см левее центра раздела, сопротивление среды на границе раздела  $\beta = 1$  с/см<sup>2</sup>

мости от коэффициента  $\beta$ , снижению амплитуды распространяющейся волны.

При переходе к анализу результатов реальных испытаний биметаллических образцов следует отметить, прежде всего, одну интересную особенность в распределении координат событий АЭ. Определение координаты события АЭ, возникшего в образце, происходит расчетным путем и существенно зависит от скорости распространения волн АЭ в металле. Табличная скорость для рассматриваемых материалов составляет  $0,5 \cdot 10^6$  см/с. В то же время определение реальной, фактической скорости распространения волны АЭ в образце предварительным его прозвучиванием специальными имитаторами АЭ показывает более низкие значения. Скорее всего это связано с точечным, происходящим не по всей площади поперечного сечения образца, действием источника АЭ и, возникающими в связи с этим, переотражениями движущейся волны от стенок образца. Таким образом, суммарная скорость становится ниже табличной. В расчетной формуле при определении координат АЭ используется уже не табличная, а полученная путем «прозвучивания»

образцов реальная скорость распространения АЭ волны в материале. В рассматриваемой серии испытаний такая скорость составила  $0,15 \cdot 10^6$  см/с. Вполне удовлетворительные результаты одного из испытаний приведены на рис. 4, 5.

На рис. 4 представлена картина распределения событий АЭ по длине образца (штриховые линии в нижней части рисунка), возникших при испытании биметалла при температуре  $914^\circ\text{C}$  с использованием аппаратуры ЕМА 3.9 (образец показан на рис. 1, д). В процессе испытания наблюдалось, как вплоть до разрушения образца возникают и накапливаются повреждения структуры материалов с ростом растягивающего усилия. Рис. 5 отображает кинетику этого процесса во времени. Таким образом, можно судить о всей картине изменений в структуре материалов в процессе их деформирования [10, 11]. В верхней части рис. 4 представлены суммарно все события, возникшие в образце от начала и до конца испытаний (разрушения образца). Координата образовавшегося кластера указывает место разрушения. Флажок в верхней части кластера показывает число возникших АЭ событий, в данном случае 143. Наиболь-



Рис. 4. Распределение АЭ событий вдоль растягиваемого биметаллического образца (манурит+сталь 25Х1МФ). Образец показан на рис. 2, в, д

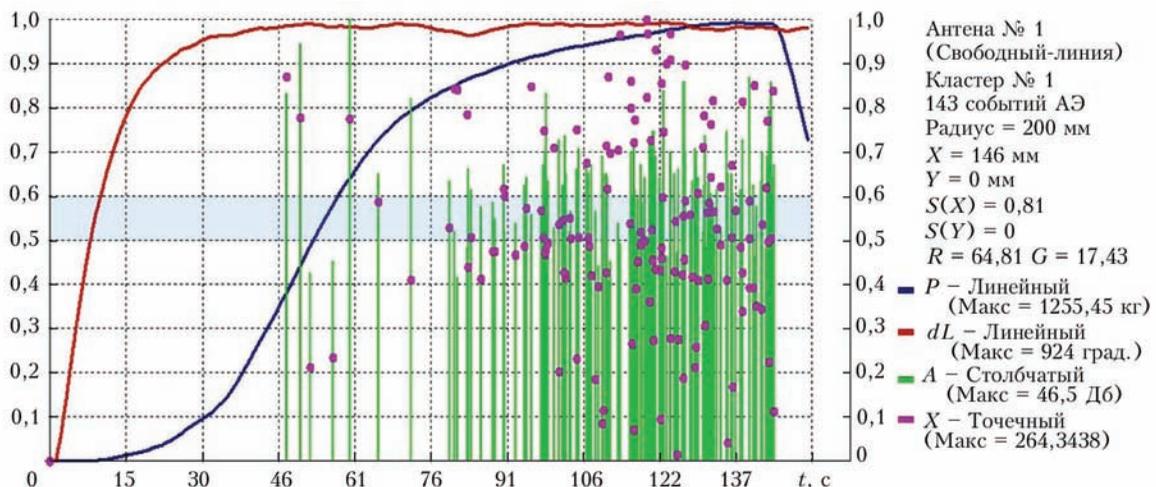


Рис. 5. График развития процесса разрушения и связанной с ним АЭ. Голубая прозрачная полоса выделяет область координат, где произошло разрушение, для более четкой демонстрации кинетики развития деструктивных процессов

шее число событий АЭ сосредоточено на участке из стали 25Х1МФ. По этому материалу и произошло разрушение на расстоянии 21 мм от концентратора, изготовленного в сварном шве.

На рис. 5 красная кривая показывает удлинение образца при нагружении, синяя – растущую нагрузку. Зеленые вертикальные линии показывают амплитуды АЭ импульсов, возникших в каждый конкретный момент времени, точки на линиях показывают координату каждого АЭ события в соответствующий момент времени.

В заключение можно отметить, что выполненные исследования показывают принципиальную возможность испытания биметаллических образцов с применением разработанной АЭ технологии.

На основании полученных результатов при планировании и выполнении дальнейших испытаний образцов с применением АЭ технологии необходимо учитывать следующее:

1. Наличие в образце тонкого поперечного слоя с повышенным сопротивлением приводит к образованию зеркально отраженной от его границы волны.
2. Наличие протяженной области повышенного сопротивления приводит к нивелированию - взаимному компенсированию отраженных волн по всей длине области.
3. Появление отраженной волны снижает амплитуду основной волны, однако амплитуда суммарной волны остается прежней.
4. Реальная скорость распространения волн АЭ в образцах отличается от табличной скорости в материале и при этом всегда меньше нее.

### Выводы

Выполнен теоретический расчет распространения волн АЭ в биметаллических стержневых образцах, в том числе при наличии дополнительного слоя повышенного сопротивления различной толщины. Установлено, при каких условиях слой сопротивления оказывает влияние на определение координат событий АЭ.

Показано, что при распространении АЭ волны наличие сварного соединения разнородных материалов с близкими физическими свойствами сказывается в обоих материалах только на уменьшении амплитуды сигналов.

Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования АЭ технологии при испытании биметаллических материалов, в том числе при высоких температурах, для отслеживания изменений их структуры на протяжении всего процесса деформирования вплоть до разрушения.

### Список литературы

1. Двайт Г. Б. (1966) *Таблицы интегралов и другие математические формулы*. Москва, Наука.

2. Деч Г. (1971) *Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z преобразования*. Москва, Наука.
3. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред). Киев, Индпром.
4. Тимошенко С. П. (1967) *Колесания в инженерном деле*. Москва, Наука.
5. Трантер К. Дж. (1956) *Интегральные преобразования в математической физике*. Москва, Гостехиздат.
6. Назарчук З. Т. (ред). (2001) *Механіка руйнування та міцність матеріалів*. Т. 5, Львів, ФМІ.
7. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 9–16.
8. Недосека А. Я., Недосека С. А., Бойчук О. И. (2013) Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 9–14.
9. Недосека А. Я., Недосека С. А., Овсиенко М. А. (2011) Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 5–14.
10. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарева О. С. (2016) О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 9–13.
11. Недосека А. Я., Недосека С. А. (2014) Некоторые особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–11.

### References

1. Dvayt G. B. (1966) *Tablitsy integralov i drugie matematicheskiye formuly*. Moskva, Nauka. [in Russian]
2. Dech. G. (1971) *Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasa i Z preobrazovaniya*. Moskva, Nauka. [in Russian]
3. Nedoseka A. Ya. (2008) *Osnovy rascheta i diagnostiki svarnykh konstruksiy*. B. Ye. Paton (red). Kiyev, Indprom. [in Russian]
4. Timoshenko S. P. (1967) *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moskva, Nauka. [in Russian]
5. Tranter K. Dzh. (1956) *Integralnye preobrazovaniya v matematicheskoy fizike*. Moskva, Gostekhizdat. [in Russian]
6. Nazarchuk Z. T. (red). (2001) *Mekhanika ruinuvannia ta mitsnist materialiv*. T. 5, Lviv, FMI. [in Ukrainian]
7. Nedoseka S. A., Nedoseka A. Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol*, 1, 9–16. [in Russian]
8. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Boychuk O. I. (2013) Influence of local accumulation of defects on propagation of acoustic emission waves. Information 2. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 2, 9–14. [in Russian]
9. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Ovsienko M. A. (2011) Influence of methods of acoustic-emission data treatment on formation of AE events and determination of their coordinates. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 2, 5–14. [in Russian]
10. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Markashova L. I., Kushnareva O. S. (2016) On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 4, 9–13. [in Russian]
11. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A. (2014) Features of application of acoustic emission method at destructive testing of materials. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 2, 3–11. [in Russian]

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ РОЗТЯГУВАННІ  
БІМЕТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ

У статті розглянуто особливості формування подій акустичної емісії в біметалах при їх деформації. Результати отримані при розтягуванні зразків, зварених зі сталі 25Х1МФ і мануріта (36Х). З'єднання двох матеріалів з різними властивостями в досліджуваних зразках здійснювалося зварюванням в середній їх частині. В результаті випробувань було встановлено, що при протяжності приварюваного матеріалу більше 0,2 мм наявність кордону розділу властивостей призводить тільки до зменшення амплітуди хвиль, що поширюються в матеріалах і не впливає на локацію координат сигналів акустичної емісії на обраній базі вимірів. В процесі випробувань зразків з біметалу на розтягнення, аж до руйнування, встановлено, що технологія випробувань, заснована на акустичній емісії, може бути поширена на випробування різнорідних матеріалів і дозволяє відстежувати всю кінетику виникнення і розвитку пошкоджень в матеріалі при його деформації. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: біметали, зварений зразок, акустична емісія, стрижень, розрахунок, хвиля, випробування

A. YA. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU  
11 Kazimir Malevich str., Kyiv-150, E-mail: office@paton.kiev.ua

ACOUSTIC EMISSION IN TENSION  
OF BIMETAL SPECIMENS

The paper considers the peculiarities of formation of acoustic emission events in bimetal at their deformation. The results were obtained in tension of the specimens made of steel 25Kh1MF and manurite (36XM). Joining of two materials with different properties in tested specimens was carried out by welding in their average part. The results of tests showed that presence of a boundary of properties division at welded-up material extension more than 0.2 mm leads only to reduction of amplitude of waves propagating in the material and does not effect location of coordinates of acoustic emission signals for selected measurement base. The process of tensile testing of bimetal specimen up to fracture revealed that testing technology based on acoustic emission can be used for dissimilar materials testing and allows tracing whole kinetics of nucleation and propagation of damages in material at its deformation. Ref. 11, Table 1, Figures 5.

Keywords: bimetal, welded specimen, acoustic emission, rod, calculation, wave, testing

Поступила в редакцію  
13.02.2014

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ  
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»**





**Міжнародна конференція  
ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ**

**Присвячується 100-річчю  
Національної академії наук України**

**5 – 6 грудня, 2018 р.  
Україна, м. Київ**

**Голова:  
академік НАН України Л. Лобанов**

**НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ**

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали

- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

**Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.**

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680  
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com