

УДК 620.179.17

Ю. Г. Безмянный, Д. В. Галаненко, К. А. Комаров, О. В. Талько

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*Проведено аналіз використання методу акустичної емісії для дослідження та контролю процесу накопичення пошкоджень матеріалу від багатоциклової втоми. Показано, що використання сучасних апаратури та методик дозволяє надійно фіксувати акустичну емісію, починаючи зі стадії розвинення мікродефектів, в одному з найбільш складних для використання цього методу випадку — при резонансному високошвидкісному деформуванні зразків матеріалу. На прикладі матеріалів, які мають характерні особливості процесу пошкодження від втоми, експериментально продемонстровані можливості відображення стадій розвитку мікродефектів від втоми та макротріщини через параметри сигналу акустичної емісії.*

**Ключові слова:** *стадія пошкодження матеріалу, багатоциклова втома, акустична емісія, резонансне навантаження, мікродефекти, тріщина.*

### Введение

Усталость материала — это процесс постепенного накопления поврежденной структуры под длительным действием циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций, приводящий к изменению свойств материала, образованию трещин, их развитию и, в итоге, к разрушению самого материала [1]. Защита деталей от усталостного разрушения остаётся одной из наиболее важных и трудных проблем при эксплуатации машин и механизмов [2, 3]. Процесс усталости реального материала находится под влиянием целого ряда факторов, которые нельзя точно предугадать (таких, как вариации структуры на разных уровнях, наличие концентраторов напряжений, особенности нагружения, условия среды) и поэтому является случайным [4], что приводит к значительному разбросу его показателей. Поэтому использование расчётных методов диагностики усталостной повреждённости материала имеет лишь рекомендательный характер [5] и не гарантирует безаварийной работы конкретного изделия. Решение проблемы возможно посредством использования методов неразрушающего контроля, которые позволяют выявлять усталостные повреждения в исследуемом объекте на ранних стадиях, предшествующих образованию макротрещины [6]. В процессе своего развития усталостные повреждения генерируют сигналы акустической эмиссии (АЭ) [7]. Эти сигналы по своей физической сути связаны с усталостным разрушением, поэтому их характеристики могут быть использованы для отображения процесса накопления усталостных повреждений [8]. Всплеск внимания к этому вопросу наблюдался в 70–90 гг. прошлого века [7–14]. Однако в указанных работах преимущественно представлен анализ сигналов АЭ на стадии развития трещины при ма-

---

© Безмянный Юрий Георгиевич, докт. техн. наук, завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Галаненко Денис Валерійович, Комаров Костянтин Андрійович, Талько Оксана Вікторівна — співробітники цього ж підрозділу.

лоцикловой усталости материалов. После этого наступило некоторое охлаждение внимания к этому вопросу. Очевидно, это следует объяснить, во-первых, ограничениями применимости метода АЭ, связанными с возможностью маскирования информативных сигналов шумовой помехой [15], а во-вторых, несовершенством аппаратуры АЭ-контроля того времени. В современной зарубежной литературе [16] возвращаются к возможности эффективного использования метода АЭ для отображения процесса усталости материалов, однако, уже не только мало-, но и много-цикловой. К сожалению, в отечественной литературе, как по материаловедению [17], так и по АЭ [18, 19], этому вопросу в последнее время практически не уделяется внимание.

Поэтому целью настоящей работы является, во-первых, привлечь внимание украинского материаловедческого общества на возможности метода АЭ применительно к контролю развивающихся в процессе усталости материала дефектов, а, во-вторых, продемонстрировать эти возможности на примере одного из наиболее сложных случаев контроля усталостной поврежденности — выявления сигналов АЭ в процессе высокоскоростного циклического деформирования образцов материала.

### **Описание объекта и методики исследований**

Подход высокоскоростного циклического деформирования при исследовании многоцикловой усталости материалов развивается, в первую очередь, в связи с необходимостью получения характеристик выносливости материала на больших базах нагружения в реальном масштабе времени [20]. При этом используют высокочастотный резонансный режим колебаний образцов в мощных акустических полях (при частоте колебаний до десятков килоГерц). Недостаток такого подхода заключается в том, что увеличение скорости циклического нагружения изменяет физику процессов накопления повреждений в материале и потому требует осторожного использования при прогнозировании циклической долговечности материалов в реальных условиях. Наличие метода контроля процессов накопления усталостных повреждений позволило бы использовать АЭ (акустическая эмиссия). Как и по малоцикловой усталости, в 80-х годах прошлого столетия к этому направлению был проявлен интерес [21–24] и получены ограниченные успехи, подтверждающие принципиальную возможность выявления сигналов АЭ в условиях воздействия на материал мощных акустических полей, однако, методику надёжного выявления сигналов АЭ в условиях высокочастотных усталостных испытаний разработать не удалось. Проявленный интерес ослабел гораздо быстрее, чем в случае малоцикловой усталости. Это связано с особой сложностью задачи, обусловленной высоким уровнем собственных шумов испытательного оборудования при несовершенстве аппаратуры и методик АЭ-контроля того времени [25], а так же недостаточным уровнем понимания взаимосвязи параметров АЭ и кинетики микроразрушения твёрдых тел [26], в том числе, особенностей деформирования материала в условиях мощных акустических полей [27].

Современные достижения в аппаратном обеспечении метода АЭ-контроля позволили вернуться к решению рассматриваемой задачи на новом уровне. Нами был проведен анализ [28] особенностей использования дефектоскопического комплекса акустической эмиссии "ГАЛС-1", разработки "УкрНИИНК" [29] при отображении процесса развития усталостной поврежденности материалов, деформируемых в режиме резонансных изгибных колебаний на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400 [30], исследованы [31] шумовые ха-

рактические характеристики этого вибростенда. В результате была предложена система для анализа сигналов АЭ в процессе резонансного нагружения образцов и разработана методика её использования [32]. Структурная схема варианта этой системы, использованного в настоящей работе, приведена на рис. 1.

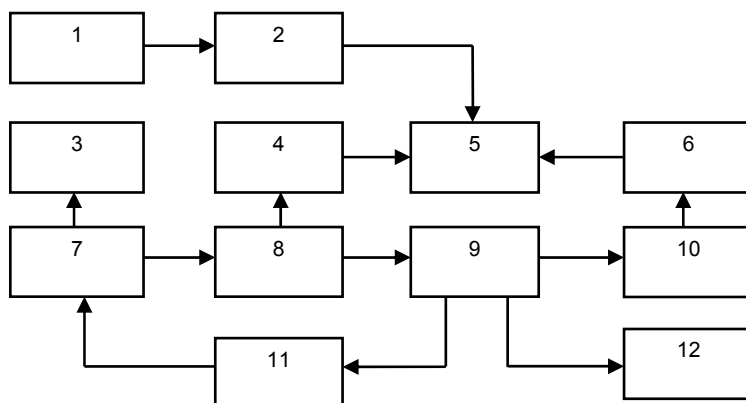


Рис. 1. Структурная схема системы:

1 — воздух; 2 — датчик 2; 3 — частотомер; 4 — датчик 4; 5 — комплекс ГАЛС-1; 6 — датчик 6; 7 — испытательная машина ВЭДС-200; 8 — волновод; 9 — образец; 10 — механическая развязка; 11 — обратная связь; 12 — измеритель амплитуды.

Система работает следующим образом. С помощью испытательной машины 7 через волновод 8 по методике [20] на первой форме симметричных изгибных резонансных колебаний нагружают образец 9 до появления и развития в нём трещин усталости. Уровень разрушающих колебаний контролируют измерителем амплитуд 12. Частоту возбуждения контролируют частотомером 3. Уменьшение резонансной частоты колебаний образца свидетельствует о разрушении материала на уровне развития усталостной трещины [20]. Обратная связь 11 позволяет подстраивать частоту возбуждения для восстановления резонансных колебаний образца. Датчик 6 принимает сигналы АЭ. Механическая развязка 10 по методике [28] защищает датчик 6 от мощного акустического поля в образце 9, пропуская маломощные сигналы АЭ. Для контроля и отсева механических помех, создаваемых работой нагружающего оборудования, на корпусе вибростенда установлен датчик 4, а для контроля и отсева наводок датчик 2 свободно подвешен в воздухе 1. Каждый из этих датчиков подключён к соответствующему каналу комплекса 5, предназначенного для регистрации сигналов АЭ, помех и наводок, а так же для обработки получаемой информации. Настройку каналов комплекса 5 осуществляют по методике [32].

Каждый материал, в зависимости от своей структуры, имеет особенности усталостного разрушения [33, 34]. Для демонстрации возможностей метода АЭ были выбраны материалы с существенно отличающимися закономерностями процесса усталости: алюминиевый сплав Д16Т, сталь Ст3 и стеклотекстолит. Образцы были вырезаны из листов в виде полос (различных размеров). Для увеличения уровня локальной нагрузки в месте наибольших напряжений

поперечное сечение образцов было ослаблено наполовину пропилом по всей ширине.

Таблица

Характеристики образцов

Материал	Размеры, мм		
	длина	ширина	высота
Д16Т	121	10,9	1,4
Ст3	101	11,8	1,5
Стеклотекстолит	95	11,5	1,5

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Сигнал АЭ, порождаемый деградацией материала в процессе усталостного разрушения, представляет собой одиночную реализацию многомерного стохастического нестационарного процесса в виде последовательности перекрывающихся импульсов, поэтому для его характеристики могут быть использованы десятки параметров, каждый из которых отображает определённое свойство сигнала и имеет физическую связь с процессом разрушения материала [16]. Для иллюстрации результатов исследований выбраны параметры, наиболее наглядно отображающие скорость развития (рис. 2) и процесс накопления (рис. 3) повреждений в исследуемых материалах при их резонансном деформировании. На рис. 4 в тех же масштабах локального времени приведены значения частоты резонанса. На всех рисунках приведенное локальное время начинается на стадии развития микроповреждений материала (для стеклотекстолита отсутствует) за несколько сот секунд до появления макротрещины и завершается, после стадии развития макроповреждения, доломом образца. Уменьшение частоты резонанса обусловлено снижением жёсткости образца, поэтому отсутствует на стадии развития микроповреждений и отображает накопление повреждений в материале на стадии развития макротрещины [20].

Совместный анализ данных, приведенных на рис. 2–4, позволяет показать связь параметров АЭ со стадиями разрушения каждого материала и особенно этого разрушения. Так, в случае Д16Т сигналы АЭ зафиксированы на стадии развития микроповреждений задолго до появления макротрещины, при зарождении макротрещины достигают наивысших значений по всем параметрам с последующим спадом при окончательном сломах образца. В случае Ст3 сигналы АЭ так же зафиксированы на стадии развития микроповреждений задолго до появления макротрещины, однако, при зарождении макротрещины нет столь сильного увеличения значений их параметров, а при развитии трещины эти значения постепенно увеличиваются с резким всплеском при окончательной поломке образца. В случае стеклотекстолита сигналы АЭ зафиксированы с самого начала нагружения, а их уровень изменялся циклически (рис. 2) или ступенчато (рис. 3, в) в соответствии современного разрушения каждой

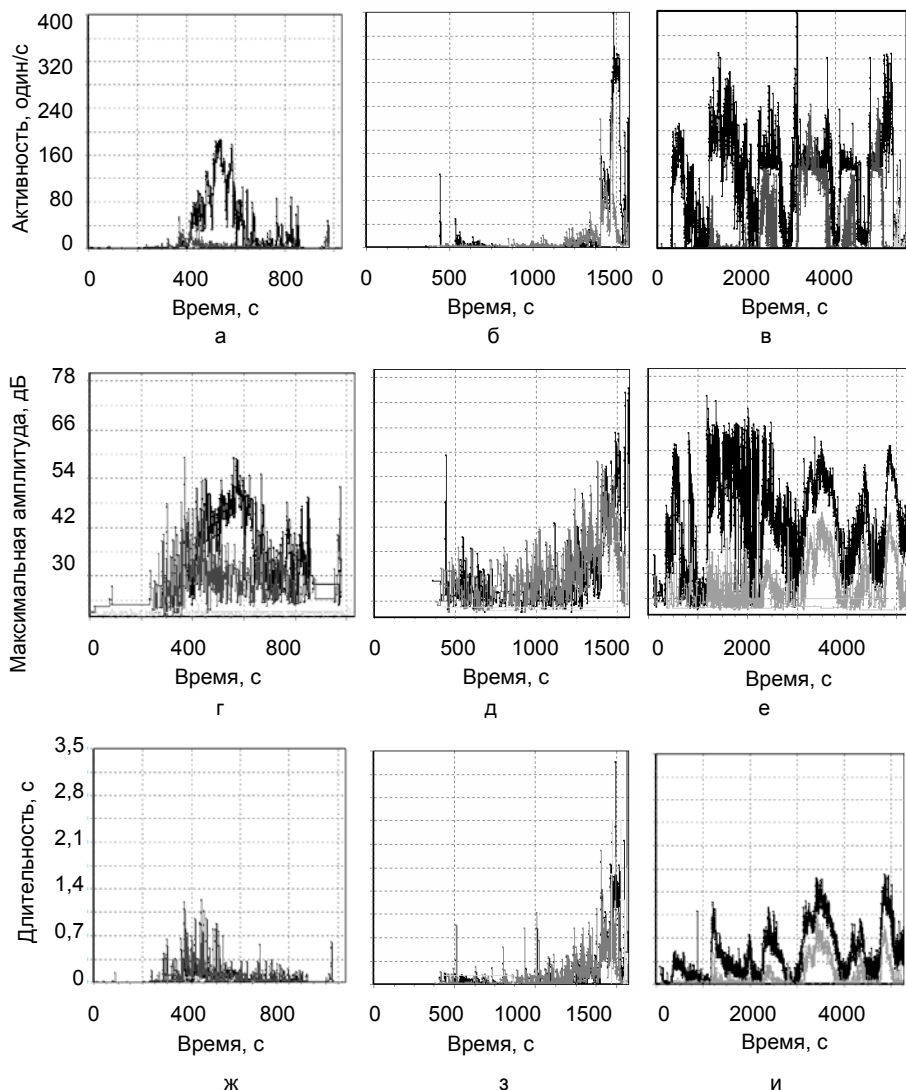


Рис. 2. Зависимости активности сигналов АЭ (а, б, в), их максимальной амплитуды (г, д, е) и длительности (ж, з, и) от локального времени нагружения образцов из Д16Т (а, г, ж), Ст3 (б, д, з) и текстолита (в, е, и)

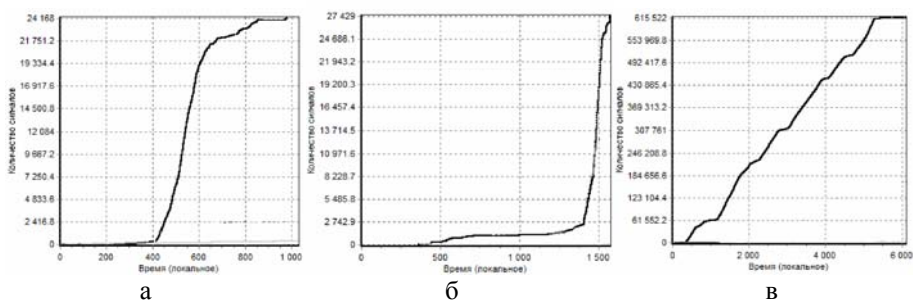


Рис. 3. Зависимости количества сигналов АЭ от локального времени нагружения образцов из Д16Т (а), Ст3 (б) и стеклотекстолита (в)

ячейки материала; доломать образец не удалось из-за потери им жёсткости в повреждённом сечении.

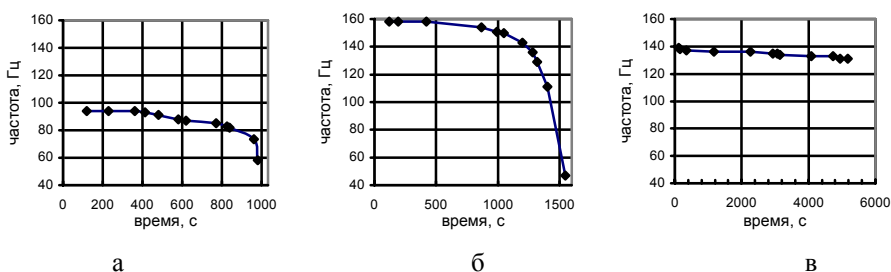


Рис. 4. Зависимости частоты резонанса от локального времени нагружения образцов из Д16Т (а), Ст3 (б) и стеклотекстолита (в)

## Выводы

В работе показано, что использование современной аппаратуры и методик позволяет надёжно, начиная со стадии развития микродефектов, фиксировать акустическую эмиссию, вызванную накоплением многоцикловых усталостных повреждений в материале, в одном из наиболее сложных для применения этого метода случаев — при резонансном высокоскоростном циклическом деформировании образцов материала.

На примере материалов, имеющих характерные особенности процесса усталостного повреждения, экспериментально продемонстрированы возможности отображения стадий развития усталостных микродефектов и макротрещины с помощью использования акустической эмиссии.

Развитие работ в этом направлении может быть связано с накоплением экспериментальных данных для построения статистически обоснованных корреляционных зависимостей между повреждённостью материала и параметрами акустической эмиссии с последующей разработкой на их основе методов оценки состояния материала.

*Проведен анализ проблем применения метода акустической эмиссии для исследования и контроля процесса накопления многоцикловой усталостной повреждённости материала. Показано, что использование современной аппаратуры и методик позволяет надёжно фиксировать акустическую эмиссию, начиная со стадии развития микродефектов, в одном из наиболее сложных для применения этого метода случаев — при резонансном высокоскоростном деформировании образцов материала. На примере материалов, имеющих характерные особенности процесса усталостного повреждения, экспериментально продемонстрированы возможности отображения стадий развития усталостных микродефектов и макротрещины посредством параметров акустической эмиссии.*

**Ключевые слова:** стадия повреждённости материала, многоцикловая усталость, акустическая эмиссия, резонансное нагружение, микродефекты, трещина.

*Problems on application of the acoustic emission method to investigate and control the process of high-cycle fatigue damage accumulation in material have been analyzed. It has been shown that the use of state-of-the-art equipment and techniques allow the reliable detection of acoustic emission, starting with the stage of microdefect development, in the most complicated*

*case to apply this method, i.e. resonant high-speed deformation of material specimens. The possibilities for representation of the stages of fatigue microdefect development and macrocracks through the acoustic emission parameters have been demonstrated experimentally by the example of the materials exhibiting features of the fatigue damage process.*

**Key words:** *stage of material damage, high-cycle fatigue, acoustic emission, resonant loading, microdefects, crack.*

1. *Физика* твердого тела: энциклопедический словарь. – К.: Наук. думка, Т. 1, 1996. – 656 с., Т. 12, 1998. – 648 с.
2. *Панасюк В. В.* Фізико-хімічна механіка конструкційних матеріалів: здобутки та перспективи. Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. – К.: Наук. думка. 1998. – С. 565–589.
3. *Терентьев В.Ф.* Усталость металлических материалов. – К.: Наук. думка. 2003. – 257 с.
4. *Афанасьев Н. Н.* Статистическая теория усталостной прочности металлов. – К: Изд-во АН УССР, 1953. – 128 с.
5. *Королев И. К.* Численное моделирование накопления повреждений и развития усталостной трещины в упругих материалах / И. К. Королев, С. В. Петин, А. Б. Фрейдін // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, № 3. – С. 34–43.
6. *Почтенный Е. К.* Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.
7. *Дробот Ю. Б.* Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Ю. Б. Дробот, А. М. Лазарев. – М.: Изд-во стандартов, 1987 – 128 с.
8. *Акустическая эмиссия и её применение в ядерной энергетике* / под ред. К. Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
9. *Druillard T. F.* Acoustic Emission: A Bibliography with Abstracts. N. Y.: IFI/Plenum, 1979. – 787 p.
10. *Иванов В. И.* Акустическая эмиссия при развитии усталостных трещин в сосудах высокого давления / В. И. Иванов, В. Н. Куранов, А. Н. Рябов, А. С. Ерёмин // Дефектоскопия. 1980. – № 1. – С. 35–39.
11. *Williams J. H. Jr.* Correlation of Acoustic Emission with Fracture Mechanics Parameters in Structural Bridge Steels during Fatigue / J. H. Jr. Williams, D. M. DeLonga, S. S. Lee // Materials Evaluation. 1982. – Vol. 40, No. 10. – P. 1184–1189.
12. *Иванов В. И.* Об акустической эмиссии при малоцикловой усталости / В. И. Иванов, В. Н. Куранов, А. Н. Рябов // Докл. АН СССР. 1986. – Т. 288, Вып. 6. – С. 1335–1338.
13. *Гуменюк В. А.* Исследование акустической эмиссии от трения берегов усталостной трещины / В. А. Гуменюк, Ю. Г. Иванов, Д. П. Красильников и др. // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. 1988. – Вып. 7. – С. 35–42.
14. *Гуменюк В. А.* Поиск, идентификация и контроль кинетики усталостных трещин по сигналам АЭ от контактирования её берегов / В. А. Гуменюк, Ю. Г. Иванов, В. А. Сульженко // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. 1991. – Вып. 1. – С. 24–31.
15. *Грешников В. А.* Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. – М.: Из-во стандартов, 1976. – 272 с.
16. *Неразрушающий контроль: справ.*; В 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф.Я.Балицкий, А.В.Барков, Н.А.Баркова и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
17. *Назарчук З. Т.* Дефектоскопия и интроскопия материалов / З. Т. Назарчук, В. Г. Рыбачук // Неорганическое материаловедение: энциклопед. изд. в 2 т. / под ред. Г. Г. Гнеси-

- на, В. В. Скорохода: Т. 1. Основы науки о материалах. – К.: Наук. думка, 2008. – С. 1019–1092.
18. Недосека А. Я. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций (Обзор) / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 2008. – № 2. – С. 3–11.
  19. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика. – К.: Изд-во КМУГА, 1999. – 305 с.
  20. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / под ред. В. А. Кузьменко. – К.: Наук. думка, 1979. – 336 с.
  21. Гришаков С. В. Использование акустической эмиссии для исследования усталости пьезоэлектрической керамики / С. В. Гришаков, В. А. Кузьменко, Г. Г. Писаренко // Докл. II Всесоюз. семинара “Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения”. – К.: Наук. думка, 1980 – С. 458–460.
  22. Долбин Н. А. Влияние внутреннего давления на долговечность и акустическую эмиссию трубок при высокочастотном нагружении / Н. А. Долбин, И. Г. Довгялло, В. И. Борд // Докл. III Всесоюз. семинара “Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения”. – К.: Наук. думка, 1983 – С. 71–76.
  23. Безьямный Ю. Г. Исследование процесса высокочастотной усталости конструкционной керамики методом акустической эмиссии / Ю. Г. Безьямный, С. В. Гришаков, В. С. Дробинский, А. Д. Шевчук // Там же. – К.: Наук. думка, 1983 – С. 76–79.
  24. Муравин Г. Б. Исследование прочности тел с трещинами в интенсивных акустических полях методом эмиссии волн напряжений / Г. Б. Муравин, Л. М. Лезвинская, Я. В. Симкин, Л. И. Маос // Докл. III Всесоюз. семинара “Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения”. – К.: Наук. думка, 1983 – С. 237–244.
  25. Вакар К. Б. Приборы и информационные системы регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. (1-я Всесоюзная конференция). Ч. 1. Ростов-на-Дону. Изд-во Ростовского университета, 1989. – С. 106–114.
  26. Буйло С. И. О связи параметров акустической эмиссии с особенностями кинетики деформации и микроразрушения твердых тел // Там же. – 1989. – С. 125–132.
  27. Кузьменко В. А. Состояние и перспективы практического использования испытаний на усталость при высоких частотах нагружения // Материалы междунар. симп. “Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения”. – К.: Наук. думка, 1986 – С. 4–11.
  28. Безьямный Ю. Г. Развитие акустико-эмиссионного метода для исследования процесса многоциклового усталости материалов / Ю. Г. Безьямный, Д. В. Галаненко // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: зб. наук. праць. – Л.: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2008. – Вип. 13. – С. 100–106.
  29. Комплекс дефектоскопический акустико-эмиссионный “ТАЛС-1”. Руководство по эксплуатации ГАЛС-1.32828482.001.07РЭ. ЗАО. – К.: “УкрНИИ НК”, 2007.
  30. Вибрационный электродинамический стенд ВЭДС-400А. Паспорт. Таганрог, 1985.
  31. Безьямный Ю. Г. Адаптация метода акустической эмиссии к усталостным испытаниям материалов на высоких частотах нагружения / Ю. Г. Безьямный, Д. В. Галаненко // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій: зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2009. – Вип. 14. – С. 29–35.
  32. Безьямный Ю. Г. Система для выявления сигналов акустической эмиссии в процессе резонансного нагружения образца / Ю. Г. Безьямный, Д. В. Галаненко, А. Н. Колес-



- ников // Вестник Национального технич. университета “ХПИ”: сб. науч. трудов “Электроэнергетика и преобразовательная техника”. – № 16. – 2012. – С. 214–222.
33. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
34. *Серенсен С. В.* Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. – М., 1975.