

Применение метода акустической эмиссии для мониторинга ультразвуковых усталостных испытаний

© 2021

*Селезнев Михаил Николаевич**^{1,3}, кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник института материаловедения

Виноградов Алексей Юрьевич^{2,4}, кандидат физико-математических наук,
профессор факультета механической и промышленной инженерии

¹Технический университет «Фрайбергская горная академия», Фрайберг (Германия)

²Норвежский университет науки и технологии, Тронхейм (Норвегия)

*E-mail: mikhail.seleznev@iwt.tu-freiberg.de

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3158-9930>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9585-2801>

Аннотация: Ультразвуковые усталостные испытания (УЗУИ) являются эффективным методом для быстрого определения усталостных свойств конструкционных материалов при высокоцикловых ($\geq 10^6$ циклов) нагрузках. Однако процесс возникновения и накопления усталостных повреждений при этом способе испытаний остается неопределенным из-за ограничений существующих методов измерения. Используемые в настоящее время методы мониторинга усталостных испытаний позволяют детектировать усталостные трещины, однако лишь на поздних стадиях разрушения. Несмотря на рекордную чувствительность, использование метода акустической эмиссии (АЭ) при УЗУИ крайне затруднено наличием резонансных шумов. Задачей данной работы являлось подавление резонансных шумов и выделение полезного сигнала с целью раннего выявления усталостных повреждений. Образцы алюминиевого сплава AlSi9Cu3 были испытаны циклически при асимметричном нагружении ($R=0,1$) на резонансной частоте 19,5 кГц с беспороговой регистрацией АЭ. Поверхности разрушения были проанализированы с помощью электронной и оптической микроскопии. АЭ обрабатывалась двумя различными методами: (1) метод цифровой фильтрации заключался в детектировании резонансных шумов и удалении их из спектра; (2) метод ϕ -функции заключался в дифференцировании спектрограммы по времени. Обработанные спектрограммы интегрировались по частоте, и события АЭ извлекались из полученных мощностей сигналов пороговым методом. Метод цифровой фильтрации выявил корреляцию сигналов АЭ с усталостным разрушением, тогда как контрольный образец без усталостных повреждений показал нулевое количество сигналов. Метод ϕ -функции продемонстрировал неоднозначные результаты, показав высокую активность АЭ на контрольном образце.

Ключевые слова: многоцикловая усталость; ультразвуковые усталостные испытания; фрактография; алюминий; усталостное разрушение; акустическая эмиссия; цифровая обработка сигналов.

Благодарности: Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

Для цитирования: Селезнев М.Н., Виноградов А.Ю. Применение метода акустической эмиссии для мониторинга ультразвуковых усталостных испытаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 2. С. 47–56. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-47-56.

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с усложнением условий эксплуатации, срок службы инженерных конструкций смещается в область высокоцикловой и гигацикловой усталости (ВЦУ и ГЦУ соответственно), что повышает требования к усталостным свойствам. Для удовлетворения этих требований необходимо более глубокое понимание микроструктурных механизмов циклической деформации, зарождения и роста трещин в режимах ВЦУ/ГЦУ [1]. Прогресс в этой области в значительной степени зависит от возможностей современных методов, направленных на выявление начальных усталостных повреждений, что особенно сложно при малых циклических деформациях/напряжениях. Эффективным способом оценки усталостной прочности металлов за пределами ВЦУ является метод ультразвуковых усталостных испытаний (УЗУИ) [2; 3], который в настоящее время активно используется в исследованиях. Однако из-за преимущественно внутреннего зарождения и роста усталостных трещин при малых амплитудах напряжения

в режимах ВЦУ/ГЦУ прямое наблюдение ранних стадий развития трещины крайне затруднительно.

Среди прочих непрямых неразрушающих методов контроля (НМК), разработанных для оценки усталостных повреждений (падение электропотенциала [4], ультразвуковой метод [5; 6] в том числе затухание гистерезиса [7], инфракрасная термография [8] и т. д.), метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее универсальных и чувствительных [9]. Метод АЭ широко используется для определения усталостных свойств различных материалов (металлов [10], бетона [11], композитов [12] и т. д.) и конструкций (детали и узлы самолётов [13], лопастей ветровых турбин [14] и т. д.) при циклических нагрузках. Использование метода АЭ при обычном низкочастотном циклическом нагружении является классической темой в области исследований [15–17], однако работ по применению метода АЭ для мониторинга УЗУИ крайне мало [18].

Наиболее вероятной причиной этого является высокий уровень шума ультразвуковой испытательной

установки, который существенно искажает частотную характеристику АЭ. Этот шум не может быть подавлен полосовыми фильтрами, которыми оснащено большинство коммерческих систем АЭ. Прогресс в вычислительной мощности и средствах поиска данных позволяет реализовать сложную обработку сигнала для извлечения полезной информации из зашумленных форм сигнала АЭ. Одним из примеров такого подхода является метод φ -функции, подавляющий шумы путем дифференцирования сигнала [19].

Цель работы – сравнение метода φ -функции и цифровой фильтрации при обработке АЭ для подавления резонансных шумов и выделения полезного сигнала при мониторинге усталостных повреждений во время УЗУИ.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для усталостных испытаний использовался коммерческий сплав $AlSi9Cu3$ (EN AC 46000). Сплав был переплавлен и отлит в цилиндры, которые затем подверглись горячему изостатическому прессованию (ГИП) для закрытия литейных полостей. Химический состав, измеренный методом оптической эмиссионной спектроскопии (таблица 1), определяет микроструктуру сплава, которая состоит из трех основных фаз: матрицы Al, эвтектики Al-Si и интерметаллида $\alpha-Al(Fe, Mn)Si$

с морфологией полиэдра, или «китайского иероглифа» (рис. 1) [20]. Крупные и хрупкие частицы α -фазы служат источниками напряжения и инициаторами трещин, в то время как вязкая матрица затупляет трещины и ограничивает скорость их роста. Образцы для УКУИ с резонансной частотой $F_{res}=19,5$ кГц выточены из цилиндров после ГИП (рис. 2). Рабочая часть образцов была отполирована до зеркального блеска, чтобы устранить концентраторы напряжения на поверхности и тем самым способствовать внутреннему зарождению трещины.

Резонансные одноосные усталостные испытания проводились с помощью установки УЗУИ (“ВОКУ”, Австрия) в условиях несимметричного нагружения с положительными средними напряжениями (коэффициент нагружения $R=0,1$) на воздухе (рис. 3). Образцы с резьбой ввинчивались в резонирующий модуль и предварительно нагружались статически с помощью рамы с винтовым приводом (“Hegewald & Peschke”, Германия). Циклическая нагрузка в непрерывном режиме обеспечивалась пьезопроводом, генерирующим стоячие продольные волны, которые усиливались волноводом и управлялись сигналом обратной связи от датчика вибрации. Для поддержания температуры образца на уровне 20 ± 2 °С применялась тепловизионная съемка и охлаждение сжатым воздухом.

Таблица 1. Химический состав (масс.%) исследуемого сплава $AlSi9Cu3$
Table 1. Chemical composition (wt.%) of the studied $AlSi9Cu3$ alloy

Al	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Mg	Sr	Cr
Основа	8,73	2,15	0,99	0,474	0,424	0,213	0,010	0,007

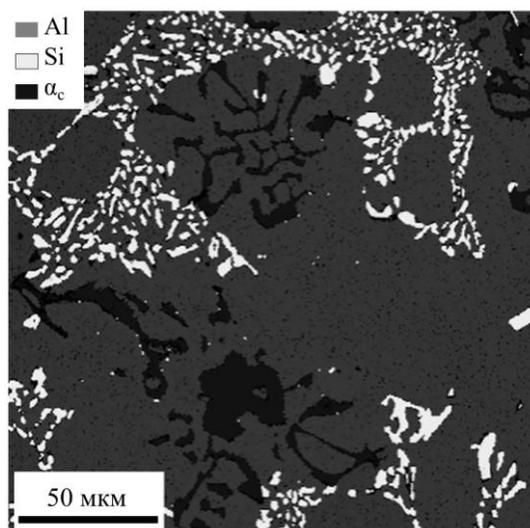
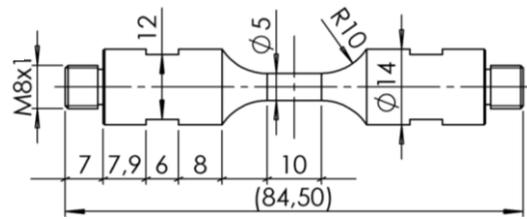
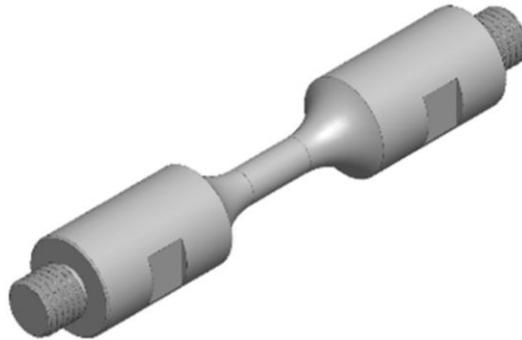


Рис. 1. Микроструктура литого сплава $AlSi9Cu3$, выбранного в качестве материала для испытаний, полученная методом дифракции рассеянных электронов
Fig. 1. Microstructure of the $AlSi9Cu3$ cast alloy selected as a material for testing obtained by the backscattered electron diffraction technique



a



b

Рис. 2. Чертеж (a) и трехмерная модель (b) образца сплава AlSi9Cu3 с резонансной частотой 19,5 кГц для ультразвукового усталостного испытания. Размеры указаны в мм
Fig. 2. A drawing (a) and a 3-D model (b) of the AlSi9Cu3 alloy specimen with the resonant frequency of 19.5 kHz for ultrasonic fatigue testing. The dimensions are specified in mm

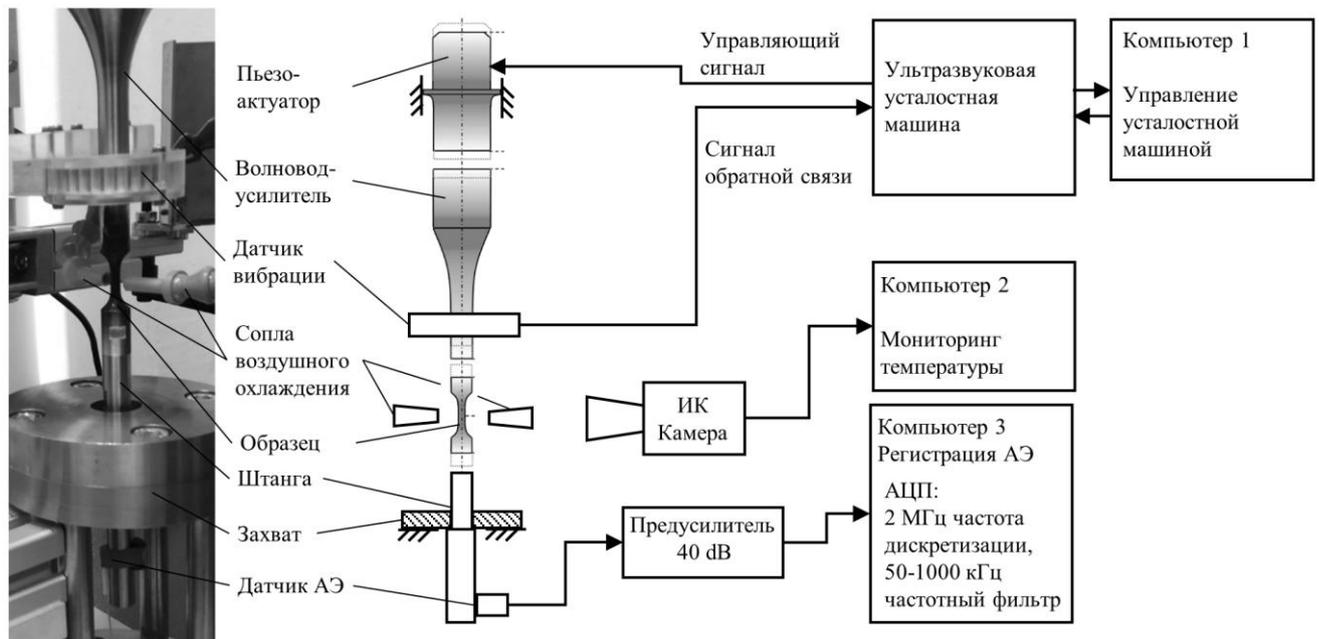


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки: фотографическое изображение резонансного блока (слева), описание деталей (в середине) и блоков управления (справа)

Fig. 3. Basic diagram of experimental setup: photographic image of the resonating unit (at the left), parts description (in the center) and control units (at the right)

Система АЭ на базе PCI-2 компании “Physical Acoustics Corp.” (США) использовалась для регистрации сигнала АЭ волновой формы. Широкополосный датчик АЭ PICO был прикреплен к свободному концу штанги растяжения, соединенной с образцом. Сигнал АЭ усиливался на 40 дБ с помощью предусилителя, пропускаться через полосовой фильтр 50–1000 кГц и регистрировался в непрерывном беспороговом режиме 18-битной платой PCI-2 с частотой дискретизации 2 МГц. Все алгоритмы обработки сигнала были реализованы в программной среде MATLAB.

Было проведено 10 испытаний циклического нагружения при амплитуде напряжения $\sigma_a=70\pm 2$ МПа, что привело к усталостному разрушению вследствие роста поверхностных и внутренних трещин. Число циклов до разрушения N_f варьировалось в пределах $5 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$. Усталостное разрушение определялось автоматически системой управления УЗУИ когда амплитуда вибрации оставалась ниже 85 % от заданного уровня в течение

более 100 мс. Несколько испытаний, в которых АЭ не была обнаружена после нескольких миллионов циклов, были прекращены для проверки отсутствия усталостного повреждения. Все усталостные образцы были охлаждены в жидком азоте и разрушены вручную ударной нагрузкой для раскрытия усталостных трещин. Фрактрографический анализ проводился с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в режиме обратно-рассеянных электронов для выявления мест инициации трещин. Оптическая микроскопия зон усталостного разрушения, различаемых по специфическому цвету, вызванному различиями в скоростях оксидации.

Для удобства обработки больших массивов данных волновая форма АЭ записывалась в виде серии последовательных файлов длительностью 1 мин каждый. Обработка сигнала, применяемая к каждому файлу, кратко описана в блок-схеме, показанной на рис. 4. Оконное преобразование Фурье (ОПФ) использовалось

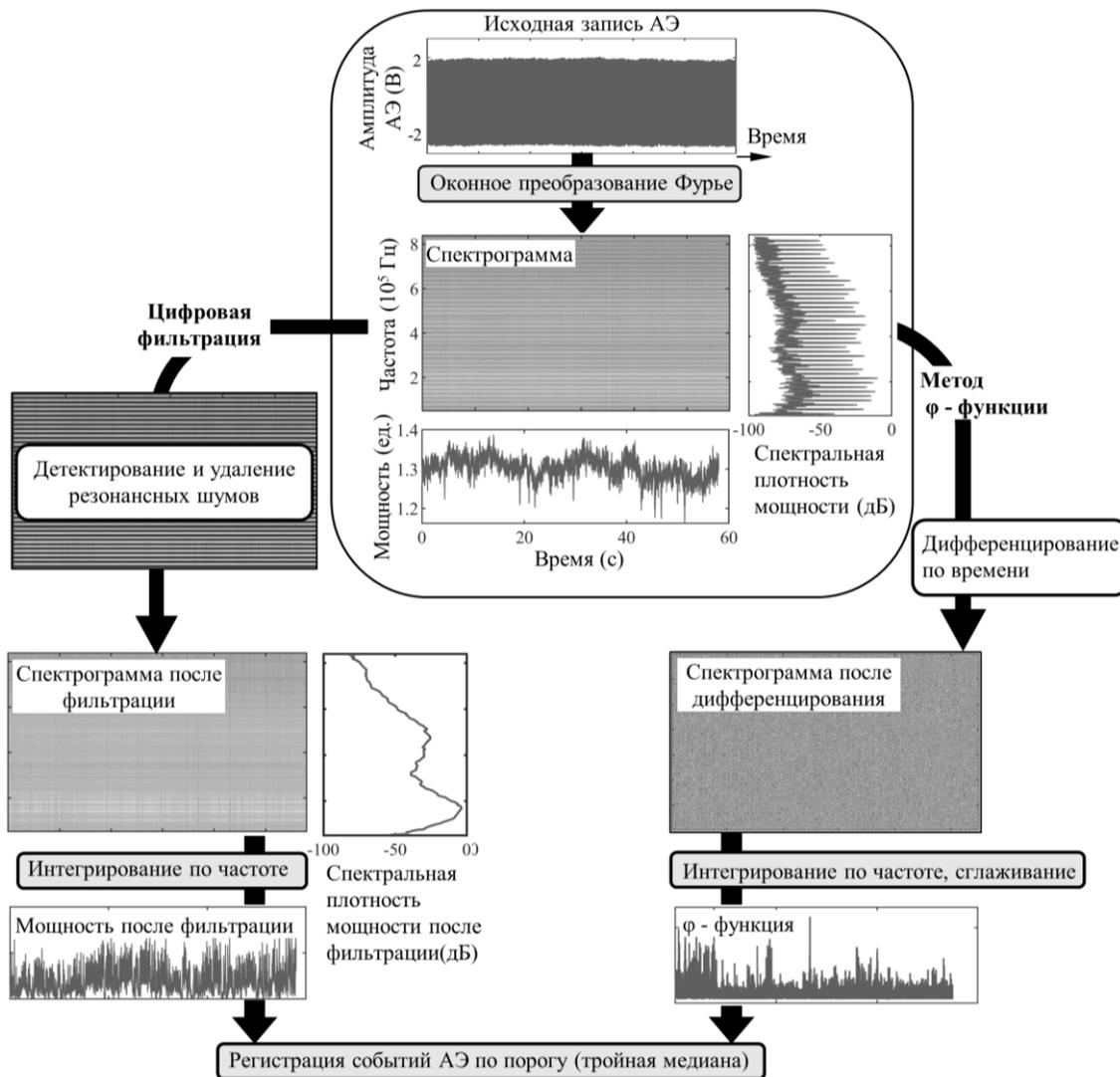


Рис. 4. Блок-схема обработки для анализа непрерывного сигнала акустической эмиссии, полученного при проведении ультразвуковых усталостных испытаний
 Fig. 4. Block-diagram of the processing algorithms for the analysis of an acoustic emission continuous signal produced during ultrasonic fatigue testing

для разложения волновой формы сигнала во временно-частотной области и получения спектрограммы, где каждой точке в координатах «частота – время» соответствует квадрат амплитуды сигнала. Весь поток был разделен на последовательные сегменты по 2048 отсчетов с помощью окна Блэкмана с перекрытием в 80 %, и к каждому сегменту было применено дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Полученная «сырая» спектрограмма демонстрирует периодические горизонтальные линии, соответствующие максимумам функции спектральной плотности мощности (СПМ). Эти пики связаны с модами резонанса на частотах $n \times F_{res}$, где n – целое число.

Для увеличения отношения сигнал/шум суммарной мощности АЭ (которая представляет собой сумму частотных составляющих мощности вдоль каждой вертикальной (временной) линии спектрограммы) резонансные пики должны быть отфильтрованы. Это было реализовано двумя методами.

Метод цифровой фильтрации (левая часть рис. 4) заключался в использовании алгоритма обнаружения пиков в СПМ [21], удаления их из спектрограммы и заполнения пробелов линейной регрессией. Спектрограммы и СПМ, адаптивно отфильтрованные таким образом, свободны от острых резонансных пиков, и, следовательно, огибающая мощность может быть использована для обнаружения событий АЭ.

Метод ф-функции (правая часть рис. 4) заключался в дифференцировании спектрограммы по времени и рекурсивном сглаживании полученной огибающей мощности (интегрирование по частоте) [19].

Огибающие мощности обеих методов использовались далее для детектирования событий АЭ. В настоящей работе использовался пороговый метод: величина порога определялась как утроенное значение медианной мощности сигнала в пределах первого зарегистрированного потока АЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные результаты представлены на рис. 5 и логически делятся на три категории:

- 1) зарождение и рост поверхностной трещины (рис. 5 а),
- 2) зарождение и рост внутренней трещины (рис. 5 б),
- 3) отсутствие усталостных трещин (рис. 5 с).

Эти три сценария представлены типичными примерами на рис. 5 в левой, средней и правой колонках соответственно. Графики во втором ряду (рис. 5 d–5 f) демонстрируют поведение резонансных параметров, которые обычно используются при анализе УЗУИ: резонансная частота F_{res} и параметр нелинейности $\beta_{rel} = (A_2 - 2A_1) - (A_2(0) - 2A_1(0))$, где A_1 и A_2 – амплитуды на второй гармонике и основной частоте соответственно, дБ; $A_1(0)$ и $A_2(0)$ – их значения в начале процесса циклической нагрузки [5]. Незадолго до наступления усталостного разрушения F_{res} падает, а значение β_{rel} , напротив, возрастает (сплошная и пунктирная линии на рис. 5 d–5 f соответственно). Эти два параметра могут указывать на усталостное повреждение, хотя и с разной степенью достоверности (например, поведение β_{rel} на рис. 5 d и 5 e). Однако обнаружить ранние стадии усталостного повреждения эти методы не в состоянии в связи с их высокой нестабильностью, восприимчиво-

стью к колебаниям воздушного охлаждения, температуры окружающей среды и т. д.

Как видно на рис. 5 g–5 i, нет однозначной корреляции между поведением огибающей амплитуды АЭ и усталостным повреждением. Применение метода цифровой фильтрации выявило корреляцию между мощностью обнаруженных событий АЭ, а также скоростью их накопления с накоплением усталостных повреждений. В случае усталостного разрушения (рис. 5 а, 5 б) наблюдается ярко выраженная активность АЭ (рис. 5 j, 5 к). Контрольный образец без признаков усталостного повреждения (рис. 5 с) не обнаруживает ни одного сигнала АЭ (рис. 5 l). В большинстве случаев метод цифровой фильтрации выявляет активность АЭ значительно раньше, чем происходят какие-либо заметные изменения в волновой форме сигнала АЭ, F_{res} или β_{rel} (рис. 5 j, 5 к). Хотя резонансные параметры могут служить маркером поздних стадий разрушения, они вряд ли предоставляют какую-либо убедительную информацию о процессе накопления повреждений. Напротив, метод цифровой фильтрации АЭ отчетливо обнаруживает стадийность усталостных процессов при сравнении характерного поведения сигналов АЭ и поверхностей разрушения, представленных на рис. 5.

График накопления мощности АЭ состоит из нескольких почти линейных сегментов с различными наклонами, соответствующих различным этапам накопления усталостных повреждений. Несмотря на почти линейное накопление повреждений на отдельном этапе, общий процесс усталостного разрушения оказывается нелинейным. Согласно механике усталостного разрушения и сопутствующему поведению сигналов АЭ может быть выделено четыре этапа эволюции усталостной трещины (0–III на рис. 5 а, 5 б).

(0) *Стадия зарождения трещины* (отмечена черной точкой на рис. 5 а, 5 б), скорее всего, является результатом накопления микроструктурных повреждений из-за концентрации напряжений на границе раздела между матрицей и полиэдрами α -фазы [22]. При достижении критического повреждения частица (или скопление частиц) хрупко разрушается. Эта стадия соответствует самому низкому наклону кумулятивной мощности примерно до половины времени жизни образца. На этой стадии может наблюдаться относительно высокая активность АЭ (рис. 5 а, стадия 0), что можно объяснить инициацией и торможением многочисленных микротрещин до тех пор, пока не будет достигнута критическая величина микротрещины.

(I) *Гладкая зона* (ГЗ) окружает разрушенные частицы α -фазы и простирается до 0,5 мм от эпицентра (вставки на рис. 5 а, 5 б). Диапазон коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ΔK и соответствующий размер плосконапряженной циклической пластической зоны r_c для перехода от ГЗ к следующей зоне усталостного разрушения можно оценить по формулам Y. Murgamäi [23] и S. Suresh [24] соответственно:

$$\Delta K_{ГЗ} \approx 0,65 \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi \sqrt{ГЗ} \approx 3,5 \text{ МПа} \sqrt{\text{мм}}} \quad (1)$$

$$r_{cГГ} \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K_{SA}}{2\sigma_{YS}} \right) \approx 42 \text{ мкм}$$

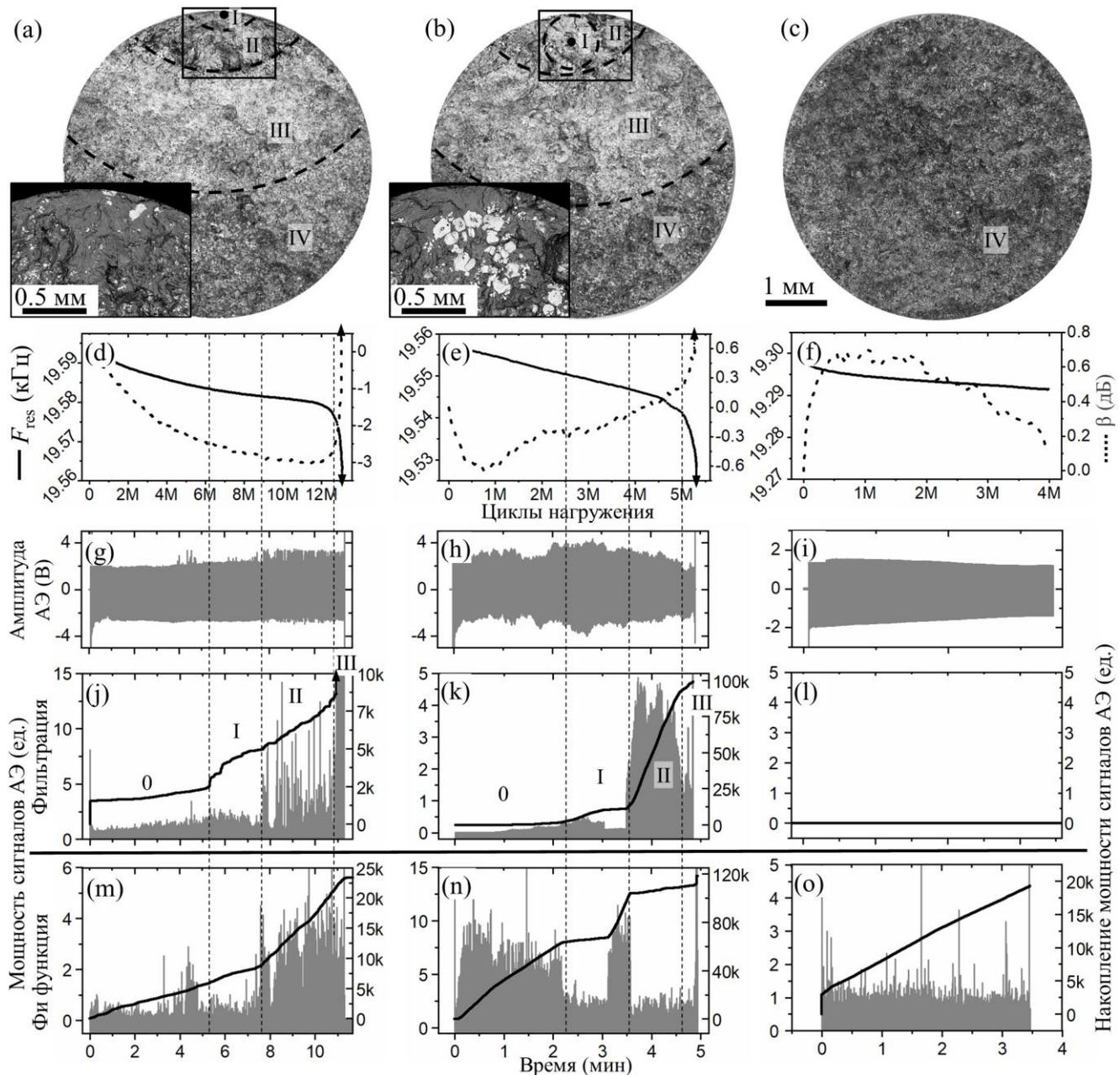


Рис. 5. Сравнение методов обработки АЭ при мониторинге ультразвуковых усталостных испытаний сплава AlSi9Cu3.

Необработанные записи АЭ (g–i) обрабатываются согласно схеме на рис. 4, полученные сигналы/события АЭ и их накопление (j–o, серая огибающая и черная кривая соответственно) сравниваются с резонансными параметрами (d–f) и морфологией разрушения, полученной с помощью оптической (a–c) электронной микроскопии (вставки на a, b).

В левой колонке (a, d, g, j, m) представлен пример типичного зарождения поверхностной трещины;

в средней колонке (b, e, h, k, n) – пример зарождения внутренней (подповерхностной) трещины;

в правой колонке (c, f, i, l, o) – пример, когда эксперимент был прерван без обнаружения усталостного повреждения.

Области морфологии разрушения (a–c), соответствующие стадиям эволюции усталостной трещины (0–III)

и зоны долома (IV), коррелируют с результатами цифровой фильтрации (j–l)

и плохо коррелируют с результатами ϕ -функции (m–o)

Fig. 5. The comparison of the AE processing methods during the monitoring of ultrasonic fatigue testing of the AlSi9Cu3 alloy.

Raw AE logs (g–i) are processed according to the scheme in fig.4, extracted AE signals/events

and their accumulation (j–o, gray envelope and black curve respectively) are compared

with the resonant parameters (d–f) and failure morphology analysed using optical (a–c)

and electron microscopy (insertions on a, b). The left column (a, d, g, j, m) shows an example of typical initiation

of a surface crack; the middle column (b, e, h, k, n) – an example of internal (subsurface) crack initiation;

the right column (c, f, i, l, o) – an example when the experiment was interrupted without fatigue failure detection.

fracture morphology areas (a–c) corresponding to the stages of fatigue crack evolution (0–III) and forced rupture (IV) correlate to the results of digital filtering (j–l) and poorly correlate to the ϕ -function results (m–o)

где диапазон напряжений $\Delta\sigma=2\sigma_a=140$ МПа; площадь $G_3\approx 0,2$ мм²; предел текучести $\sigma_T=150$ МПа.

Этап ГЗ можно отнести к механически короткой трещине, которая распространяется приблизительно вдоль плоскости максимальных нормальных напряжений, образуя таким образом плоскую поверхность до тех пор, пока r_c не достигнет междендритного расстояния $D=34\pm 4$ мкм, рассчитанного для данного сплава в работе Н. Fisher [25]. Результаты экспериментального измерения D и теоретического рассчитанного r_c хорошо согласуются друг с другом.

(II) Сильно окисленная темная шероховатая область образуется, когда $r_c > D$, т. е. механически короткая трещина может развиваться за пределы одного дендритного рукава, ветвясь и образуя характерный рельеф (рис. 5 а, 5 б, II). Механика разрушения в пределах и за пределами ГЗ также известна для сталей [26; 27]. Согласно данным АЭ, стадия II занимает до 3 млн циклов в случае поверхностной трещины (рис. 5 j, II) и только 1 млн циклов для внутренней (рис. 5 k, II). Это логично, так как, в отличие от поверхностной, при внутренней инициации зона I покрывает значительную часть области роста стабильной усталостной трещины. Это объясняет и меньшее количество циклов, и более высокую активность АЭ при переходе к стадии II, когда внутренняя круговая трещина (т. н. «рыбий глаз») выходит на поверхность.

(III) Низкоокисленная яркая шероховатая область четко отличима от стадии II и характеризуется более быстрой скоростью распространения трещины. Стадия III наступает по достижении КИН критического значения, т. е. $\Delta K_{KP} \geq 5,8$ МПа $\sqrt{м}$ согласно уравнению (1), и обозначает переход от короткой усталостной трещины к длинной. Известные значения ΔK_{KP} у алюминиевых сплавов находятся в диапазоне 2–5 МПа $\sqrt{м}$ [28–30]. Разброс оценок обусловлен применением различных подходов к оценке КИН, как отмечают U. Zerbst и соавторы [31]. Относительно высокое расчетное значение ΔK_{KP} может быть связано с влиянием закрытия трещины, не учтенным в данном анализе. Согласно результатам АЭ, стадия III занимает приблизительно 0,5–1 млн циклов. Начало стадии III (рис. 5 а, 5 б, III) совпадает с резким изменением параметров резонанса (рис. 5 d, 5 е).

(IV) Зона долома при ударной ручной нагрузке образца, охлажденного в жидком азоте, приводит к появлению темной шероховатой поверхности излома почти без окисления (рис. 5 а–5 с, IV).

Разница между сценариями зарождения поверхностной и внутренней трещины видна на кривых накопления мощности событий АЭ после цифровой фильтрации: наибольший наклон, связанный с наибольшей активностью АЭ, относится либо к стадии I (рис. 5 j), либо к стадии II (рис. 5 k) и, вероятно, связан с началом поверхностного разрушения. Поверхностная трещина излучает устойчивые сигналы АЭ высокой амплитуды, легко обнаруживаемые методом цифровой фильтрации. Сигналы АЭ, исходящие от внутренней трещины, характеризуются значительно меньшими амплитудами, по крайней мере до тех пор, пока трещина не достигнет поверхности. Можно предположить, что это связано с эффектом деформации, роль которого в АЭ, однако, неясна и требует специального исследования. Когда внутренняя трещина достигает поверхности, промежу-

тки между «рыбьим глазом» и поверхностью образца интенсивно разрушаются, что способствует резкому увеличению наклона кривой накопления мощности АЭ.

Метод ϕ -функции продемонстрировал неоднозначные результаты. В условиях поверхностной инициации усталостной трещины мощность сигналов АЭ и кривая их накопления (рис. 5 m) выглядят схоже с таковыми при цифровой фильтрации (рис. 5 j). Однако в случае внутренней инициации трещины метод ϕ -функции демонстрирует непонятное поведение АЭ: мощность сигналов затухает от начала к концу эксперимента с локальным всплеском активности в середине испытаний (рис. 5 n). Наконец, метод ϕ -функции показывает высокую активность АЭ на контрольном образце без усталостных повреждений (рис. 5 о). Причиной неприменимости метода ϕ -функции при УЗУИ может являться нестационарность передаточной функции АЭ. Тогда как в основе данного метода лежит условие стационарности передаточной функции, работа установки УЗУИ происходит в режиме постоянной автонастройки резонансных колебаний по сигналу обратной связи. Таким образом, метод ϕ -функции выявляет не только сигналы АЭ, идущие от образца, но и колебания параметров автонастройки системы (рис. 5 о).

ВЫВОДЫ

Применение мониторинга АЭ при УЗУИ может быть полезно для раннего обнаружения усталостных повреждений. Резонансный шум, связанный с методикой УЗУИ, может быть успешно устранен путем обработки сигнала, включающей ОПФ, цифровую фильтрацию спектрограмм и последующую детекцию событий АЭ по порогу. Обнаруживаемые таким образом события АЭ хорошо коррелируют с накоплением усталостных повреждений. Кривая накопления мощности событий АЭ демонстрирует стадийное поведение, различное при поверхностной и внутренней инициации усталостных трещин. Таким образом, накопление мощности АЭ может служить количественным параметром повреждения, подчеркивающим фундаментальную нелинейность накопления усталостных повреждений. Предложенный метод мониторинга АЭ при УЗУИ металлических образцов позволяет однозначно обнаружить усталостное повреждение раньше, чем традиционно используемые резонансные методы. Предложенная методика обработки сигналов применима не только к сплавам на основе алюминия и непрерывным резонансным испытаниям, но и к другим металлическим материалам и режиму импульсных резонансных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mughrabi H. Fatigue, an everlasting materials problem – Still en vogue // Procedia Engineering. 2010. Vol. 2. № 1. P. 3–26.
2. Stanzl-Tschegg S.E. Time Saving Method for Measuring VHC Fatigue and Fatigue Crack Growth Data with the Ultrasonic Fatigue Technique // Procedia Structural Integrity. 2016. Vol. 2. P. 3–10.
3. Zimmermann M. Very High Cycle Fatigue // Handbook of Mechanics of Materials. Singapore: Springer, 2018. P. 1–38.

4. Si Y., Rouse J.P., Hyde C.J. Potential difference methods for measuring crack growth: A review // *International Journal Fatigue*. 2020. Vol. 136. Article number 105624.
5. Kumar A., Torbet C.J., Jones J.W., Pollock T.M. Nonlinear ultrasonics for in situ damage detection during high frequency fatigue // *Journal Applied Physics*. 2009. Vol. 106. № 2. Article number 024904.
6. Jhang K.-Y. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: A review // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2009. Vol. 10. № 1. P. 123–135.
7. Lage Y., Cachao H., Reis L., Fonte M., De Freitas M., Ribeiro A. A damage parameter for HCF and VHCF based on hysteretic damping // *International journal of fatigue*. 2014. Vol. 62. P. 2–9.
8. Krewerth D., Lippmann T., Weidner A., Biermann H. Application of full-surface view in situ thermography measurements during ultrasonic fatigue of cast steel G42CrMo4 // *International journal of fatigue*. 2015. Vol. 80. P. 459–467.
9. Wadley H.N.G., Mehrabian R. Acoustic Emission for Materials Processing: a Review // *Materials Science and Engineering*. 1984. Vol. 65. № 2. P. 245–263.
10. Chai M., Zhang J., Zhang Z., Duan Q., Cheng G. Acoustic emission studies for characterization of fatigue crack growth in 316LN stainless steel and welds // *Applied acoustics*. 2017. Vol. 126. P. 101–113.
11. Noorsuhada M.N. An overview on fatigue damage assessment of reinforced concrete structures with the aid of acoustic emission technique // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 112. P. 424–439.
12. Saedifar M., Zarouchas D. Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 195. Article number 108039.
13. Holford K.M., Eaton M.J., Hensman J.J., Pullin R., Evans S.L., Dervilis N., Worden K. A new methodology for automating acoustic emission detection of metallic fatigue fractures in highly demanding aerospace environments: An overview // *Progress Aerospace Sciences*. 2017. Vol. 90. P. 1–11.
14. Du Y., Zhou S., Jing X., Peng Y., Wu H., Kwok N. Damage detection techniques for wind turbine blades: A review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 141. Article number 106445.
15. Vinogradov A., Patlan V., Hashimoto S. Spectral analysis of acoustic emission during cyclic deformation of copper single crystals // *Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties*. 2001. Vol. 81. № 6. P. 1427–1446.
16. Chai M., Zhang Z., Duan Q. A new qualitative acoustic emission parameter based on Shannon's entropy for damage monitoring // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 100. P. 617–629.
17. Kotzem D., Arold T., Niendorf T., Walther F. Damage tolerance evaluation of E-PBF-manufactured inconel 718 strut geometries by advanced characterization techniques // *Materials*. 2020. Vol. 13. № 1. P. 247–248.
18. Shiwa M., Furuya Y., Yamawaki H., Ito K., Enoki M. Fatigue process evaluation of ultrasonic fatigue testing in high strength steel analyzed by acoustic emission and Non-linear ultrasonic // *Materials Transactions*. 2010. Vol. 51. № 8. P. 1404–1408.
19. Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A. A new method of low amplitude signal detection and its application in acoustic emission // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020. Vol. 10. № 1. Article number 73.
20. Becker H., Bergh T., Vullum P.E., Leineweber A., Li Y. Effect of Mn and cooling rates on α -, β - and δ -Al-Fe-Si intermetallic phase formation in a secondary Al-Si alloy // *Materialia*. 2019. Vol. 5. Article number 100198.
21. Scholkmann F., Boss J., Wolf M. An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals // *Algorithms*. 2012. Vol. 5. № 4. P. 588–603.
22. Zerbst U., Madia M., Klinger C., Bettge D., Murakami Y. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. II: Non-metallic inclusions // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 98. P. 228–239.
23. Murakami Y. *Metal Fatigue Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. USA: Elsevier Ltd., 2002. 369 p.
24. Suresh S. *Fatigue of materials*. 2nd ed. Cambridge: University Press, 1998. 679 p.
25. Fischer H. Untersuchungen zum einfluss einer schmelzekonditionierung von AlSi9Cu3 auf die mikrostrukturelle ausprägung und die ermüdungslebensdauer. TU Bergakademie Freiberg, 2020. 58 p.
26. Seleznev M., Weidner A., Biermann H. On the formation of ridges and burnished debris along internal fatigue crack propagation in 42CrMo4 steel // *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2020. Vol. 43. № 7. P. 1567–1582.
27. Seleznev M., Merson E., Weidner A., Biermann H. Evaluation of very high cycle fatigue zones in 42CrMo4 steel with plate-like alumina inclusions // *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 126. P. 258–269.
28. Toda H., Sinclair I., Buffiere J.-Y., Maire E., Khor K.H., Gregson P., Kobayashi T. A 3D measurement procedure for internal local crack driving forces via synchrotron X-ray microtomography // *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52. № 5. P. 1305–1317.
29. Davidson D., Chan K., McClung R., Hudak S. Small fatigue cracks // *Comprehensive Structural Integrity*. 2007. Vol. 4. P. 129–164.
30. Xu L., Wang Q., Zhou M. Micro-crack initiation and propagation in a high strength aluminum alloy during very high cycle fatigue // *Materials Science and Engineering A*. 2018. Vol. 715. P. 404–413.
31. Zerbst U., Madia M., Klinger C., Bettge D., Murakami Y. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. I: Basic aspects // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 97. P. 777–792.

REFERENCES

1. Mughrabi H. Fatigue, an everlasting materials problem – Still en vogue. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, no. 1, pp. 3–26.
2. Stanzl-Tschegg S.E. Time Saving Method for Measuring VHC Fatigue and Fatigue Crack Growth Data with the Ultrasonic Fatigue Technique. *Procedia Structural Integrity*, 2016, vol. 2, pp. 3–10.

3. Zimmermann M. Very High Cycle Fatigue. *Handbook of Mechanics of Materials*. Singapore, Springer Publ., 2018, pp. 1–38.
4. Si Y., Rouse J.P., Hyde C.J. Potential difference methods for measuring crack growth: A review. *International Journal Fatigue*, 2020, vol. 136, article number 105624.
5. Kumar A., Torbet C.J., Jones J.W., Pollock T.M. Nonlinear ultrasonics for in situ damage detection during high frequency fatigue. *Journal Applied Physics*, 2009, vol. 106, no. 2, article number 024904.
6. Jhang K.-Y. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, vol. 10, no. 1, pp. 123–135.
7. Lage Y., Cachao H., Reis L., Fonte M., De Freitas M., Ribeiro A. A damage parameter for HCF and VHCF based on hysteretic damping, *International journal of fatigue*, 2014, vol. 62, pp. 2–9.
8. Krewerth D., Lippmann T., Weidner A., Biermann H. Application of full-surface view in situ thermography measurements during ultrasonic fatigue of cast steel G42CrMo4. *International journal of fatigue*, 2015, vol. 80, pp. 459–467.
9. Wadley H.N.G., Mehrabian R. Acoustic Emission for Materials Processing : a Review. *Materials Science and Engineering*, 1984, vol. 65, no. 2, pp. 245–263.
10. Chai M., Zhang J., Zhang Z., Duan Q., Cheng G. Acoustic emission studies for characterization of fatigue crack growth in 316LN stainless steel and welds. *Applied acoustics*, 2017, vol. 126, pp. 101–113.
11. Noorsuhada M.N. An overview on fatigue damage assessment of reinforced concrete structures with the aid of acoustic emission technique. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 112, pp. 424–439.
12. Saedifar M., Zarouchas D. Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review. *Composites Part B: Engineering*, 2020, vol. 195, article number 108039.
13. Holford K.M., Eaton M.J., Hensman J.J., Pullin R., Evans S.L., Dervilis N., Worden K. A new methodology for automating acoustic emission detection of metallic fatigue fractures in highly demanding aerospace environments: An overview. *Progress Aerospace Sciences*, 2017, vol. 90, pp. 1–11.
14. Du Y., Zhou S., Jing X., Peng Y., Wu H., Kwok N. Damage detection techniques for wind turbine blades: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 141, article number 106445.
15. Vinogradov A., Patlan V., Hashimoto S. Spectral analysis of acoustic emission during cyclic deformation of copper single crystals. *Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties*, 2001, vol. 81, no. 6, pp. 1427–1446.
16. Chai M., Zhang Z., Duan Q. A new qualitative acoustic emission parameter based on Shannon's entropy for damage monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 100, pp. 617–629.
17. Kotzem D., Arold T., Niendorf T., Walther F. Damage tolerance evaluation of E-PBF-manufactured inconel 718 strut geometries by advanced characterization techniques. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 247–248.
18. Shiwa M., Furuya Y., Yamawaki H., Ito K., Enoki M. Fatigue process evaluation of ultrasonic fatigue testing in high strength steel analyzed by acoustic emission and Non-linear ultrasonic. *Materials Transactions*, 2010, vol. 51, no. 8, pp. 1404–1408.
19. Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A. A new method of low amplitude signal detection and its application in acoustic emission. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, vol. 10, no. 1, article number 73.
20. Becker H., Bergh T., Vullum P.E., Leineweber A., Li Y. Effect of Mn and cooling rates on α -, β - and δ -Al-Fe-Si intermetallic phase formation in a secondary Al-Si alloy. *Materialia*, 2019, vol. 5, article number 100198.
21. Scholkmann F., Boss J., Wolf M. An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals. *Algorithms*, 2012, vol. 5, no. 4, pp. 588–603.
22. Zerbst U., Madia M., Klinger C., Bettge D., Murakami Y. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. II: Non-metallic inclusions. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 98, pp. 228–239.
23. Murakami Y. *Metal Fatigue Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. USA, Elsevier Ltd. Publ., 2002. 369 p.
24. Suresh S. *Fatigue of materials*. 2nd ed. Cambridge, University Press Publ., 1998. 679 p.
25. Fischer H. *Untersuchungen zum einfluss einer schmelz-konditionierung von AlSi9Cu3 auf die mikrostrukturelle ausprägung und die ermüdungslebensdauer*. TU Bergakademie Freiberg, 2020. 58 p.
26. Seleznev M., Weidner A., Biermann H. On the formation of ridges and burnished debris along internal fatigue crack propagation in 42CrMo4 steel. *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2020, vol. 43, no. 7, pp. 1567–1582.
27. Seleznev M., Merson E., Weidner A., Biermann H. Evaluation of very high cycle fatigue zones in 42CrMo4 steel with plate-like alumina inclusions. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 126, pp. 258–269.
28. Toda H., Sinclair I., Buffiere J.-Y., Maire E., Khor K.H., Gregson P., Kobayashi T. A 3D measurement procedure for internal local crack driving forces via synchrotron X-ray microtomography. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, no. 5, pp. 1305–1317.
29. Davidson D., Chan K., McClung R., Hudak S. Small fatigue cracks. *Comprehensive Structural Integrity*, 2007, vol. 4, pp. 129–164.
30. Xu L., Wang Q., Zhou M. Micro-crack initiation and propagation in a high strength aluminum alloy during very high cycle fatigue. *Materials Science and Engineering A*, 2018, vol. 715, pp. 404–413.
31. Zerbst U., Madia M., Klinger C., Bettge D., Murakami Y. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. I: Basic aspects. *Engineering Failure Analysis*, 2019, vol. 97, pp. 777–792.

The application of acoustic emission method for ultrasonic fatigue testing monitoring

© 2021

*Mikhail N. Seleznev**^{1,3}, PhD (Physics and Mathematics),
the researcher of the Institute of Materials Engineering

Aleksey Yu. Vinogradov^{2,4}, PhD (Physics and Mathematics),
Professor of the Department of Engineering Design and Materials

¹*Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg (Germany)*

²*Norwegian University of Science and Technology, Trondheim (Norway)*

*E-mail: mikhail.seleznev@iwt.tu-freiberg.de

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3158-9930>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9585-2801>

Abstract: The ultrasonic fatigue testing (USFT) is an effective method for rapid determination of the fatigue properties of structural materials under high cycle ($\geq 10^6$ cycles) loading. However, the occurrence and accumulation of fatigue damage with this test method remain uncertain due to the limitations of the existing measurement methods. Currently used monitoring methods allow detecting the fatigue cracks, but only in the late stages of failure. Despite the superior sensitivity to localized processes in materials, the use of the acoustic emission (AE) method in ultrasonic testing is extremely difficult due to the presence of resonant noise. This work aimed to suppress resonant noise and extract the signal for early detection of fatigue damage. The authors tested the samples of the AlSi9Cu3 aluminum alloy under the asymmetric cyclic loading ($R=0.1$) at a resonant frequency of 19.5 kHz with a non-threshold AE registration. The fracture surfaces were analyzed by electron and optical microscopy. The authors processed AE by two different methods: (1) the digital filtering method consisted of detecting resonant noise and removing it from the spectrum; (2) the ϕ -function method consisted of differentiating the spectrogram by time. The processed spectrograms were integrated by the frequency with further extraction of the AE events using the threshold method. The digital filtering method revealed a correlation between AE signals and fatigue damage, whereas the undamaged control sample showed no signals. The ϕ -function technique demonstrated ambiguous results, showing high AE activity on the control sample.

Keywords: high cycle fatigue; ultrasonic fatigue testing; fractography; aluminum alloys; fatigue failure; acoustic emission; digital signal processing.

Acknowledgments: The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

For citation: Seleznev M.N., Vinogradov A.Yu. The application of acoustic emission method for ultrasonic fatigue testing monitoring. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 2, pp. 47–56. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-2-47-56.