



# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 621.01:539.4

## ОСОБЕННОСТИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ОЦЕНКЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**В. Р. СКАЛЬСКИЙ, И. Н. ЛЯСОТА, Е. М. СТАНКЕВИЧ**Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины.  
79053, Украина, г. Львов, ул. Айвазовского, 56. E-mail: skal@ipm.lviv.ua

Высокопрочные алюминиевые сплавы благодаря комплексу физико-механических и коррозионных свойств широко применяются в современной науке и технике. Для соединения элементов конструкций, в частности в самолетостроении, используют электронно-лучевую сварку. При эксплуатации таких элементов под влиянием различных факторов часто в них происходит зарождение микро- и макроразрушений. Достаточно эффективно распространение трещин определяет метод акустической эмиссии. Целью исследования явилось изучение особенностей генерирования сигналов акустической эмиссии при статической нагрузке образцов и идентификация характера разрушения в различных участках сварных соединений алюминиевого сплава 1201-Т. По схеме трехточечного изгиба исследовали трещиностойкость образцов размерами 10×20×160 мм, изготовленных из сварных соединений плит сплава 1201-Т толщиной 20 мм, выполненных сквозной электронно-лучевой сваркой. Сигналы акустической эмиссии регистрировали системой SKOP-8М. Для селекции полезных сигналов от помех использовали метод параллельного измерительного канала. Из анализа волновых отображений и непрерывных вейвлет-преобразований зарегистрированных сигналов акустической эмиссии установлено, что метод позволяет идентифицировать источники их излучения при статическом разрушении алюминиевых сплавов и их сварных соединений. Вязкое (металл шва и зоны термического влияния) и хрупковязкое (основной металл) разрушение твердого раствора меди в алюминии генерирует сигналы низких и средних амплитуд ( $A = 0,2...0,5$  мВ), для которых критериальный показатель колеблется в пределах 0,15...0,3. Отрыв оплавленных зерен сопровождается генерированием сигналов акустической эмиссии с диапазоном амплитуд  $A = 0,4...0,5$  мВ и  $\kappa = 0,3...0,4$ , а растрескивание хрупких интерметаллидов — мощными сигналами ( $A = 0,5...4$  мВ) с показателем  $\kappa = 0,5...0,9$ . Библиогр. 15, рис. 5.

*Ключевые слова:* алюминиевый сплав, сварные соединения, акустическая эмиссия, микроструктура, микрофрактограмма, вейвлет-преобразование, механизм разрушения

Современное развитие промышленности Украины стимулирует рост объемов производства алюминия и его высокопрочных сплавов благодаря комплексу их физико-механических, коррозионных и технологических свойств, позволяющих успешно применять практически во всех областях науки и техники. Для соединения ответственных элементов конструкций (авиакосмическая промышленность, строительство и пр.) широко применяют электронно-лучевую сварку (ЭЛС), поскольку она обеспечивает высокое качество металла шва во время соединения больших толщин за один проход.

При эксплуатации элементов конструкций, изготовленных из алюминиевых сплавов, под влиянием различных факторов возможно зарождение и развитие в них микро- и макроразрушений. Распространение трещин достаточно эффективно определяет метод акустической эмиссии (АЭ) [1]. Однако для оценки разрушения сварных соединений (СС) алюминиевых сплавов метод АЭ применялся мало [2]. Поэтому для эффективного ди-

агностирования состояния элементов конструкций, изготовленных из алюминиевых сплавов, важно исследовать активность излучения АЭ и особенности сигналов во время зарождения и развития процессов разрушения различных зон СС.

Некоторые результаты таких исследований известны. В частности, авторы работы [3] применяли метод АЭ для исследования развития искусственно созданных дефектов-имитаторов в виде трещин во время нагрузки внутренним давлением сварных резервуаров, выполненных из сплава АМг6М. На основе анализа сигналов акустической эмиссии (САЭ), записанных во время эксперимента, авторы определяли критический размер трещины, при котором емкость еще можно эксплуатировать.

В работе [4] исследовано влияние микроструктуры гладких образцов из технического алюминия и сплава АМг6М на излучение САЭ во время растягивания. В данном сплаве активность излучения АЭ более чем на порядок превышает активность АЭ в алюминии, что обусловлено по-



ведением границ зерен и наличием частиц интерметаллидов. В работе [5] исследовано поведение сигналов АЭ при разрушении СС из сплава АМг6М и построена зависимость характера САЭ от видов дефекта. Значительная активность сигналов АЭ (6...8 имп./с), которые характеризуются большой амплитудой, наблюдается уже при небольших напряжениях в пределах упругой деформации (80...90 МПа). Установлено, что нагрузка образца до напряжений, в результате которых появляется пластическая деформация (300...320 МПа), не вызывает заметной АЭ. Дальнейший рост деформации характеризуется появлением единичных АЭ сигналов малой энергии и активности. В зоне глубокой пластической деформации АЭ носит импульсный характер, т. е. проявляется в виде «эмиссии взрывного типа». Повышение нагрузки вплоть до разрушения сопровождается генерированием САЭ малой амплитуды.

В работах [6, 7] был установлен характер излучения САЭ во время растягивания гладких образцов, изготовленных из различных участков СС. Деформация образцов на 13 % дала суммарный счет САЭ около 500...800 имп., а в зоне сплавления при тех же условиях —  $85 \cdot 10^3$  имп. Такая специфика излучения сигналов АЭ обусловлена наличием в переходной зоне значительного количества дефектов структуры и скоплением различных неметаллических включений вдоль границ зерен. Аналогичные эксперименты проводили также авторы работы [8], во время которых статическим растяжением гладких образцов с СС исследовали влияние погонной энергии аргодуговой сварки на характер излучения САЭ. Показано, что с увеличением тепловложения растет пластичность металла шва, а это приводит к уменьшению активности АЭ.

Цель настоящей статьи — изучение особенностей генерирования сигналов АЭ при статическом нагружении образцов и идентификация характера разрушения различных участков СС сплава 1201-Т.

**Материалы и методика АЭ испытаний.** Исследовали статическую трещиностойкость трехточечным изгибом образцов, изготовленных из СС плит толщиной 20 мм, выполненных сквозной

ЭЛС без присадочного металла. Погонная энергия сварки — 337,3 кДж/см. Материал сварных плит — термически упрочненный алюминиевый сплав марки 1201-Т. Испытывали призматические образцы  $10 \times 20 \times 160$  мм четырех типов с выведенной усталостной трещиной: I — в основном металле, II — в зоне термического влияния (ЗТВ), III — в зоне сплавления и IV — в металле сварного шва.

Образцы изготавливали с соблюдением норм и характерных соотношений геометрических размеров, регламентируемых ГОСТом [9]. Длина усталостной трещины вместе с концентратором напряжений составляла 10 мм. Структурная схема для экспериментальных исследований статической трещиностойкости образцов представлена на рис. 1.

Образцы нагружали на установке СВР-5 1, усилие  $P$  через динамометр 9 передавалось на исследуемый образец 8. Раскрытие берегов трещины регистрировал тензометрический преобразователь раскрытия берегов трещины 7. Сигналы АЭ, генерируемые в результате разрушения, воспринимались первичным преобразователем АЭ 6, который устанавливали на боковой поверхности образца. Для селекции полезных сигналов от помех использовали параллельный АЭ канал 2 [1]. Электрические сигналы АЭ усиливали предусилителями 3, после чего регистрировали многоканальной измерительной АЭ системой 4 SKOP-8M [1] и обрабатывали на персональном компьютере 5. Для снижения влияния ложных САЭ от трения в местах соприкосновения поверхностей балочного образца с опорами установки устанавливали антифрикционные прокладки. Нагрузку и раскрытие берегов трещины регистрировали параметрическими каналами упомянутой выше системы. В режиме постобработки строили диаграммы «нагрузка  $P$  — раскрытие берегов трещины  $v$ », а также акустограммы активности АЭ, сопровождающей разрушение образцов. Результаты испытаний приведены в работе [10].

Для отбора сигналов использовали первичный преобразователь АЭ с рабочей полосой частот 0,2...0,6 МГц. Перед началом каждого эксперимента проводили тарировку измерительных каналов [4]. Устанавливали следующие настройки АЭ системы SKOP-8M: количество измерительных каналов — 4 (два — для регистрации САЭ), усиление каждого канала — 40 дБ, продолжительность выборки — 0,5 мс, период дискретизации аналогового сигнала — 0,25 мкс, частота среза фильтра низких частот — 700 кГц, фильтра высоких частот — 40 кГц, порог дискриминации — 28 %, уровень собственных шумов, приведенных ко входу предварительного усилителя, — 7 мкВ, коэффициент усиления предварительных усилителей составил 34 дБ.

**Исследование микроструктуры и фрактографии сплава 1201-Т.** Для идентификации ис-

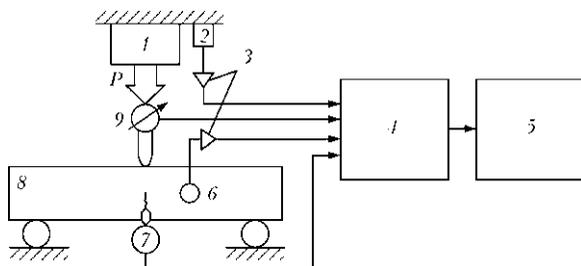


Рис. 1. Схема для экспериментальных исследований статической трещиностойкости образцов: 1...9 — см. в тексте

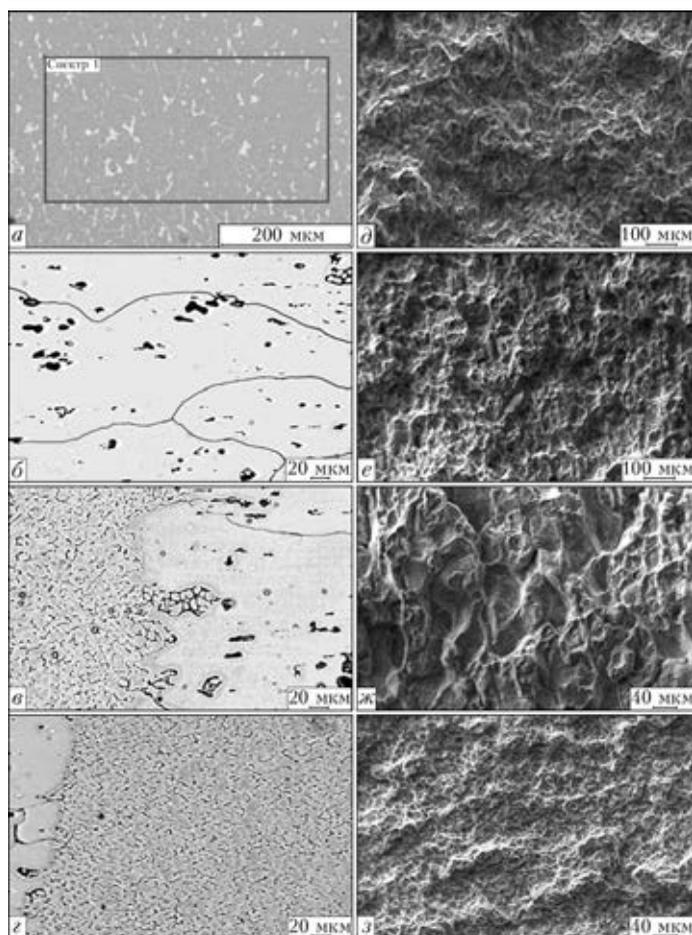


Рис 2. Микроструктуры (а–г) и микрофрактограммы (д–з) основного (а, д), металла ЗТВ (б, е), границы сплавления (в, ж) и шва (г, з)

точников разрушения методом АЭ необходимо провести микроструктурные и фрактографические исследования изломов характерных участков СС. Алюминиевый сплав марки 1201-Т системы легирования Al–Cu–Mn склонен к значительному распаду твердого раствора металла шва и ЗТВ, в которой уже при температуре 673 К и выше происходят структурные преобразования, снижающие прочность СС до уровня, характерного для металла в отожженном состоянии [11]. Поэтому каждая зона СС имеет свои особенности разрушения при квазистатической нагрузке (рис. 2).

При комнатной температуре микроструктура сплава 1201-Т состоит из зерен, тело которых составляет  $\alpha$ -твердый раствор меди и марганца в алюминии и вторичной фазы  $Al_2Cu$ , равномерно распределенной по зерну в виде мелких игольчатых включений, а также вдоль их границ в форме крупных хлопьев (рис. 2, а). По микрофрактограмме основного металла (рис. 2, д) видно, что излом энергоемкий и соответствует хрупковязкому типу разрушения. Наблюдается значительное количество квазиоткольных фасеток. Излом в основном состоит из крупных выпуклостей и вмятин, поверхность которых усеяна мелкими фасетками. Сопоставив микроструктуру и микрофрактограмму основного металла сплава 1201-Т, видно, что

форма и размеры зерен четко совпадают с размерами выпуклостей и впадин и составляют примерно 120...150 мкм. Геометрия включений вторичной фазы  $Al_2Cu$  на микроструктуре сопоставима с размерами хрупких сколов на микрофрактограмме (25...35 мкм).

Таким образом, в основном металле сплава 1201-Т при его статическом нагружении трещина движется преимущественно по границам зерен, характер разрушения является хрупковязким, где вязкая составляющая соответствует разрушению  $\alpha$ -твердого раствора, а хрупкая — растрескиванию включений упрочняющей фазы.

Микроструктура металла ЗТВ представляет собой рекристаллизованные зерна, обедненные по меди (рис. 2, б), которая в виде вторичной фазы  $Al_2Cu$  выделилась вдоль их границ, а также коагулировала в виде локальных скоплений во время повторного распада твердого раствора. Металл этого участка немного пластичнее по сравнению с основным металлом, поэтому из микрофрактограммы (рис. 2, е) видно преобладание вязкого разрушения и лишь кое-где встречаются фасетки растрескивания хрупких включений.

На границе металла шва и ЗТВ наблюдаются резкие структурные изменения. Здесь оплавленные крупные рекристаллизованные зерна основного металла соединены с мелкодисперсным металлом сварного шва (рис. 2, в). В процессе кристаллизации сварочной ванны вторичная фаза выделяется и объединяется в локальные включения прежде всего на выступах оплавленных зерен ЗТВ. Поэтому, как правило, граница сплавления характеризуется большим скоплением интерметаллидных фаз, что и обуславливает снижение ее пластичности. Излом образцов имеет макрорезкий характер (рис. 2, ж) с квазиоткольными фасетками растрескивания крупных эвтектических включений.

Высокая скорость охлаждения металла сварного шва способствует образованию мелкозернистой структуры (рис. 2, г), прочность которой почти вдвое ниже прочности основного металла. Излом имеет вязкий характер разрушения (рис. 2, з) с бугристо-чашечным рельефом и ячейками явно-го пластического течения металла.

Фрактографические исследования показали, что структурная и механическая неоднородность СС сплава 1201-Т, выполненных ЭЛС, вызывает различный характер разрушения в каждой зоне СС. Во время испытания на статическую трещиностойкость металла ЗТВ трещина в большинстве случаев меняла направление своего распространения и двигалась по границе сплавления СС, поскольку на хрупкое разрушение затрачивается значительно меньше энергии, чем на вязкое. А это

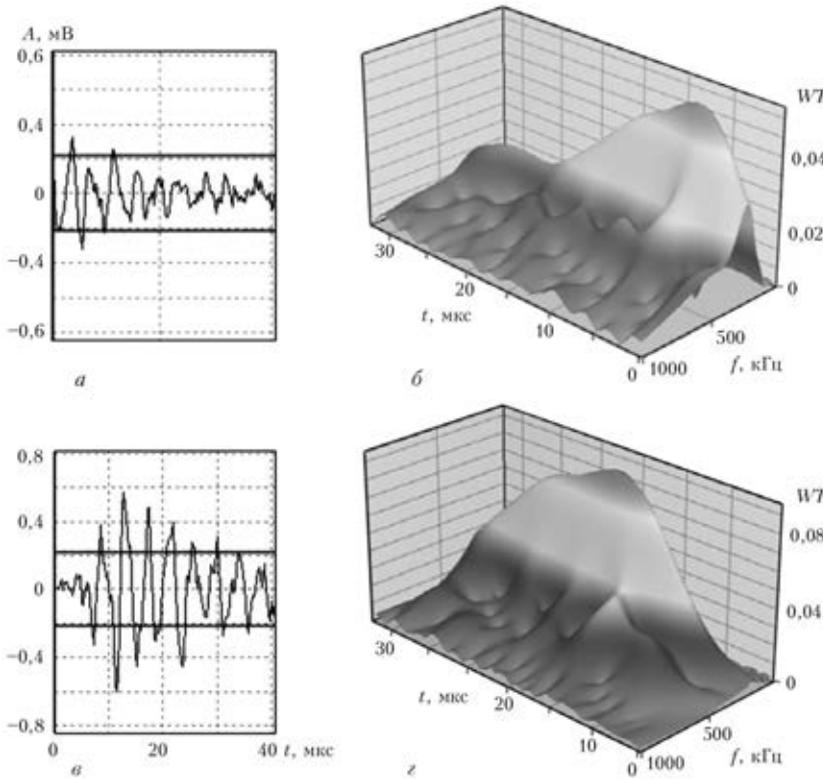


Рис. 3. Волновые отображения (а, е) и непрерывные вейвлет-преобразования (б, з) характерных САЭ (разрушение металла ЗТВ сплава 1201-Т)

свидетельствует о том, что данный участок является опасным с точки зрения прочности СС.

**Изучение особенностей САЭ, генерируемых при разрушении алюминиевых сплавов.** Важную информацию об особенностях динамики процессов разрушения в твердых телах можно получить с помощью методов вейвлет-преобразований [12].

В работах [13, 14] предложен критерий количественной оценки разрушения конструкционных материалов по параметрам непрерывного вейвлет-преобразования САЭ. Для исследования особенностей САЭ использована программа AGU-Vallen Wavelet [15]. В роли материнского выбран вейвлет Габора [12], позволяющий хорошо выделять локальные особенности САЭ и обеспечивающий их частотно-временное представление.

Учитывая свойства вейвлет-коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования САЭ и результаты теоретических исследований изменения амплитудно-частотных характеристик упругих волн АЭ при различных процессах разрушения в твердых телах, для количественной характеристики САЭ и их идентификации предложен критериальный показатель [14]

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \Delta f_0}{\Delta f}$$

где  $WT_{\max}$  — максимальное значение вейвлет-коэффициента события АЭ в определенном мо-

мент времени;  $\Delta f$  — диапазон полосы спектра частот, которая соответствует  $WT_{\max}$  в событии АЭ, в координатах вейвлет-коэффициент  $WT$  — частота  $f$ ;  $\Delta f_0$  — ширина рабочей полосы АЭ тракта, которая определяется рабочей полосой частот преобразователя АЭ (здесь 0,2...0,6 МГц).

В зависимости от значения экспериментально установленного критериального параметра типы макро-разрушения конструкционных материалов разделены на вязкое ( $\kappa \leq 0,2$ ), вязкохрупкое ( $0,2 \leq \kappa \leq 0,3$ ) и хрупкое ( $\kappa \geq 0,3$ ) разрушение. С дальнейшим увеличением значения склонность к хрупкому разрушению материала объекта контроля возрастает [14].

Обработку САЭ, зарегистрированных во время разрушения различных участков СС, осуществляли в такой последовательности:

1) строили непрерывное вейвлет-преобразование для каждого сигнала и устанавливали макси-

мальное значение вейвлет-коэффициента в событии АЭ;

2) строили проекцию непрерывного вейвлет-преобразования в плоскости  $WT - f$  при достижении  $WT_{\max}$ ;

3) определяли ширину полосы частот  $\Delta f$  (МГц), которая соответствует  $WT_{\max}$ ;

4) рассчитывали значение критериального показателя  $\kappa$  по соотношению, приведенному выше.

Во время испытаний АЭ основного металла сплава 1201-Т регистрировали САЭ двух типов: САЭ с небольшими амплитудами ( $A = 0,4...0,5$  мВ) и  $\kappa = 0,2...0,3$ ; мощные САЭ ( $A = 1,5...2$  мВ) и  $\kappa = 0,5...0,6$ .

Как и в случае основного металла, разрушение сопровождалось генерированием САЭ двух типов. Характерной особенностью всех сигналов является их значительная продолжительность во времени ( $t = 20...30$  мкс) по сравнению с САЭ, зарегистрированными при разрушении других материалов [13, 14], что обуславливает характерную форму вейвлет-спектров (см. рис. 3, б, з).

К первому типу отнесли слабые сигналы (см. рис. 3, а) с амплитудами  $A = 0,2...0,3$  мВ, для которых свойственны низкие значения максимальных вейвлет-коэффициентов  $WT_{\max} = 0,04...0,05$  (см. рис. 3, б), а также широкие полосы частот  $\Delta f = 125...130$  кГц,  $\kappa = 0,15...0,2$ . Эти САЭ генерируются при вязком разрушении твердого рас-

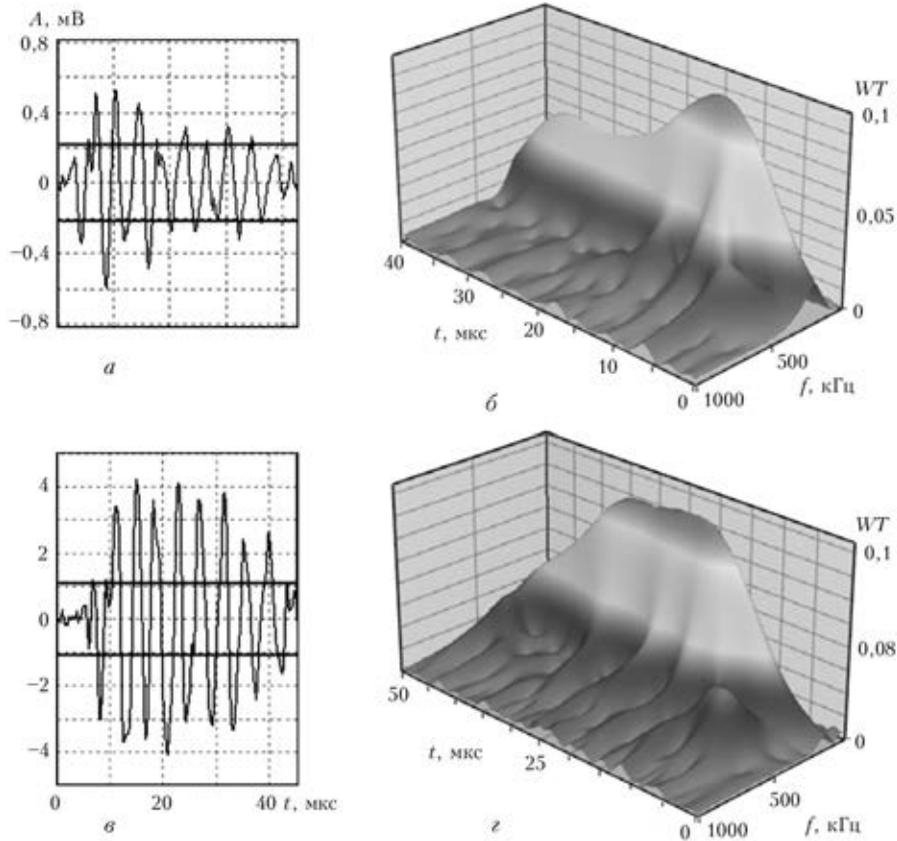


Рис. 4. Волновые отображения (а, в) и непрерывные вейвлет-преобразования (б, г) характерных САЭ (разрушение границы сплавления СС сплава 1201-Т)

твор, который составляет тело рекристаллизованных, пластичных зерен ЗТВ.

Для второй группы САЭ характерны высокие значения максимальных вейвлет-коэффициентов  $WT_{\max} = 0,08...0,1$  (см. рис. 3, г), а также узкие полосы частот  $\Delta f = 95...105$  кГц. Эти сигналы генерируются при квазихрупком растрескивании локальных скоплений и тонких слоев интерметаллида  $Al_2Cu$ , размещенных на межзеренных границах.

Особенностью разрушения границы сплавления СС является то, что оно сопровождается как растрескиванием крупных скоплений эвтектических включений, так и отрывом оплавленных зерен

ЗТВ. Во время последнего генерируются САЭ с максимальными амплитудами  $A = 0,4...0,5$  мВ и  $\kappa = 0,3...0,4$  (см. рис. 4, а, б).

Хрупкое откалывание интерметаллидов на границе сплавления генерирует мощные сигналы высоких амплитуд  $A = 4...5$  мВ (см. рис. 4, в), значения максимальных вейвлет-коэффициентов которых составляет  $WT_{\max} = 0,15...0,16$  (см. рис. 4, г), а полосы частот  $\Delta f = 80...90$  кГц. Критериальный показатель  $\kappa = 0,7...0,9$  здесь является самым высоким.

Сварной шов соединения сплава 1201-Т по сравнению с основным металлом имеет мелкодисперсную структуру и разупрочнен. Разруше-

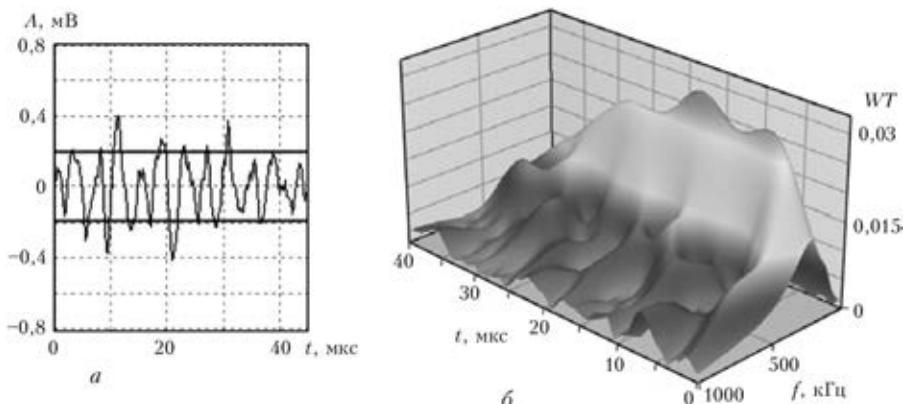


Рис. 5. Волновое отображение (а) и непрерывное вейвлет-преобразование (б) характерных САЭ (разрушение металла шва СС сплава 1201-Т)



ние в этом случае происходит по вязкому механизму и сопровождается слабыми сигналами АЭ (см. рис. 5, а) при  $\kappa = 0,1 \dots 0,15$ . Характерная их особенность — значительная продолжительность ( $t = 40 \dots 60$  мкс) и наличие нескольких пиков на вейвлет-спектрах (см. рис. 5, б), что свидетельствует об одновременном пластическом разрушении матрицы и отслоении включений.

Итак, растрескивание включений интерметаллидов происходит по хрупкому механизму ( $\kappa \geq 0,3$ ) с максимальными значениями  $\kappa$  на границе сплавления, поскольку там наибольшее скопление крупных интерметаллидов, а для твердого раствора меди в алюминии характерно разрушение в основном по вязкому механизму ( $\kappa \leq 0,2$ ). Только за пределами СС характер меняется на хрупковязкий, поскольку твердость основного металла значительно выше, чем в шве и ЗТВ.

**Заключение.** Из анализа зарегистрированных волновых отображений САЭ и непрерывных вейвлет-преобразований установлено, что метод АЭ сигналов позволяет идентифицировать источники излучения САЭ при статическом нагружении алюминиевых сплавов и их СС. Вязкое (металл шва и ЗТВ) и хрупковязкое (основной металл) разрушение твердого раствора меди в алюминии генерирует САЭ низких и средних амплитуд ( $A = 0,2 \dots 0,5$  мВ), для которых критериальный показатель  $\kappa$  колеблется в пределах  $0,15 \dots 0,3$ . Отрыв оплавленных зерен сопровождается генерированием САЭ с диапазоном амплитуд  $A = 0,5 \dots 4$  мВ и  $\kappa = 0,3 \dots 0,4$ , а растрескивание хрупких интерметаллидов — мощными сигналами ( $A = 0,5 \dots 4$  мВ) с показателем  $\kappa = 0,5 \dots 0,9$ .

По результатам экспериментальных испытаний установлено, что наиболее опасной (с точки зрения прочности конструкций) является граница сплавления металла шва и ЗТВ, для которой характерно резкое изменение размеров структурных составляющих и механических характеристик. В этом случае разрушение происходит по квазихрупкому механизму, и, как результат, при статическом нагружении СС трещина направляется в эту область, двигаясь вдоль скоплений вторичных фаз и оплавленных плоскостей зерен ЗТВ, уменьшая затраты энергии на разрушение. При этом

параметры сигналов АЭ меняются согласно механизмам разрушения различных зон СС.

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: У 3 т. — К.: Наук. думка, 2009. — 878 с.
2. Скальський В. Р., Лясота І. М. Застосування явища акустичної емісії для діагностування руйнування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів (Огляд) // *Машинознавство*. — 2009. — № 9. — С. 42–47.
3. Мезинцев Е. Д., Тихий В. Г., Карасев Л. П. Применение имитаторов дефектов при испытании акустико-эмиссионной системы технической диагностики // *Автомат. сварка*. — 1982. — № 9. — С. 28–30.
4. Тихонов Л. В., Прокопенко Г. И. Детонационные механизмы деформации, разрушения и акустической эмиссии в алюминии и его сплавах // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 1991. — № 1. — С. 73–76.
5. Тихий В. Г., Санин Ф. П., Борщевская Д. Г. Исследование зависимости сигналов акустической эмиссии от характера дефектов сварки в сплаве АМг6 // *Автомат. сварка*. — 1982. — № 9. — С. 36–38.
6. Скальський В. Р., Сергієнко О. М., Голаскі Л. Генерування акустичної емісії тріщинами, що розвиваються у зварних з'єднаннях // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 1999. — № 4. — С. 23–31.
7. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. — Львів: СПОЛОМ, 2005. — 396 с.
8. Venkitakrishnan P. V., Sinha P. P., Krishnamurthy R. Study and analysis of effect of various thermal processes in AA2219 annealed sheet using acoustic emissions // *Mater. and Desian*. — 2006. — 27. — P. 770–775.
9. ГОСТ 25506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 61 с.
10. Скальський В. Р., Лясота І. М. Застосування методу акустичної емісії для визначення моменту початку макроруйнування зварних з'єднань алюмінієвого сплаву // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 2012. — № 3. — С. 7–12.
11. Разупрочнение высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением / А. В. Лозовская, А. А. Чайка, А. А. Бондарев и др. // *Автомат. сварка*. — 2001. — № 3. — С. 15–19.
12. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Усп. физ. наук*. — 1996. — 166, № 11. — С. 1145–1170.
13. Скальський В. Р., Буйло С. И., Станкевич Е. М. Критерий оценки хрупкого разрушения стекла по сигналам акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. — 2012. — № 5. — С. 26–34.
14. Скальський В. Р., Ботвіна Л. Р., Станкевич О. М. Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії // *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. — 2011. — № 3. — С. 12–17.
15. Vallen systeme: The Acoustic emission Company. — [www.vallen.de](http://www.vallen.de).

Поступила в редакцию 09.07.2012