

УДК

М.А.Яременко канд.техн.наук, ст.научн.сотр.  
ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины г.Киев, Украина

## ВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СО СТРУКТУРНЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

*Представлены результаты акустико-эмиссионного контроля при исследовании процессов разрушения турбинных лопаток с различными покрытиями.*

*Приведены графики амплитудного распределения акустико-эмиссионных сигналов на разных этапах циклического нагружения.*

*Сопоставлены этапы разрушения образцов с результатами акустико-эмиссионного контроля.*

*Next results of researches are represented in this work:*

*- the results of acoustic-emission control at research of processes of destruction of turbine shoulder-blades with different coveragings are represented*

*- the graphs of the peak distributing of acoustic-emission signals on different stages of the cyclic loading*

*- destruction stages of standards with the results of acoustic-emission control are made*

Нахождение корреляционных связей между параметрами зарегистрированных сигналов АЭ и степенью поврежденности материала (при условии определения координат дефектов) являет собой основу АЭ контроля. Однако, из-за множественности процессов разрушения, протекающих в материале, нахождение таких связей весьма затруднительно, и задача решается для отдельных случаев при помощи моделирования на образцах того или иного доминирующего механизма разрушения.

Образцы для исследований были вырезаны из заготовок лопаток турбин (рис. 1, а).

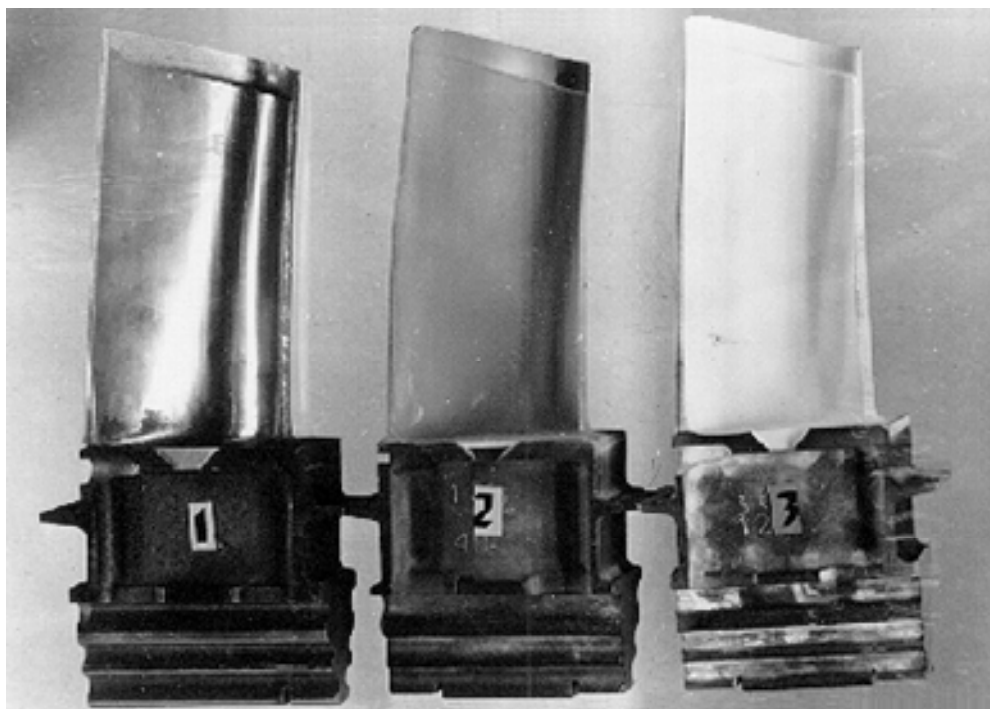


Рис. 1. Внешний вид заготовок турбинных лопаток

Заготовка № 1 представляет собой отливку сложной формы из сплава ЦНК-7, полученную путем направленной кристаллизации из расплава и механически обработанную. Паспортный состав сплава ЦНК-7 представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический элемент	% содержание	Химический элемент	% содержание
C	0.06...0.1	B	0.01
Cr	14.0...15.5	Ce	0.02
Ni	основной	Fe	< 1.0
Co	8.0...9.5	Si	< 0.3
W	6.2...7.5	Mn	< 0.3
Mo	0.2...0.6	S	< 0.012
Ti	3.4...4.4	P	< 0.015
Al	3.4...4.5	Pb	< 0.001
Zr	0	Bi	< 0.0005

Заготовки № 2 и № 3 идентичны по материалу и форме заготовке № 1, но с покрытиями из Co-Cr-Al-Y (№ 2 – черная) и  $Zr_2O_3$  (№ 3 – белая). Покрытие из  $Zr_2O_3$  нанесено поверх покрытия Co-Cr-Al-Y.

Из этих заготовок были изготовлены 3 серии образцов (рис. 2). В средней части образцов были изготовлены концентраторы напряжений с параметрами: глубина – 2 мм, угол раскрытия –  $60^\circ$ , радиус закругления в устье концентратора – 0.1... 0.2 мм. Длина рабочей части полученных образцов составляла 56 мм.

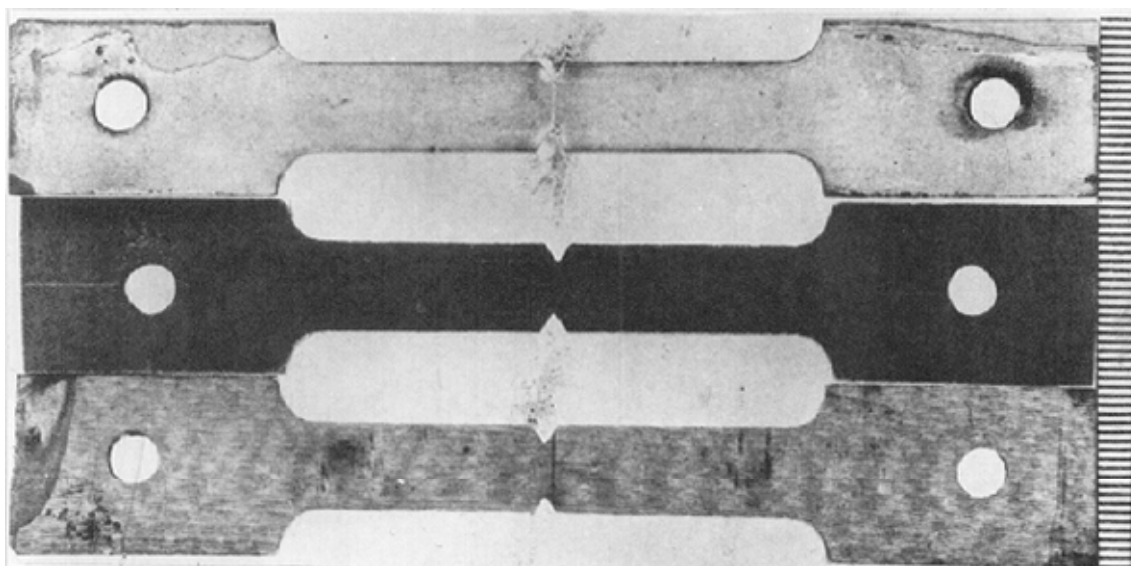


Рис. 2. Образцы, изготовленные из заготовок турбинных лопаток

Испытания образцов проводились на установке "Instron-1250" (Великобритания) с параллельным АЭ контролем. Образцы серии № 1 и № 2 подвергались продольным циклическим испытаниям по гармоническому закону с асимметрией цикла  $k = 0.1$  при

максимальной нагрузке в цикле  $F_{\max} = 450$  кГц ( $F_{\min} = 45$  кГц). Частота циклов была выбрана равной  $f = 30$  Hz для образцов всех серий.

С целью изучения акустико-эмиссионных свойств процессов отслоения защитных покрытий образец серии № 3 нагружался по более сложной схеме: через каждые 30000-40000 циклов повышалось значение  $F_{\max}$  при постоянном значении  $F_{\min} = 10$  кГц = const. Начальное значение  $F_{\max} = 150$  кГц. Шаг увеличения  $F_{\max} = 50$  кГц.

После выращивания трещины длиной 1мм (для образцов серии № 2 и № 3 оценка длины трещины была затруднительна из-за наличия покрытий) циклическое нагружение образцов прекращалось, и далее проводились их квазистатические нагружения до разрушения.

Для наблюдения за процессами, происходящими на поверхности образца в области концентратора напряжений в процессе испытаний, использовался микроскоп типа МБС-9 с ценой деления  $C = 0.0139$  мм.

После механических испытаний разрушенные образцы подвергались фактографическим исследованиям на РЭМ ISM-840 (фирмы "Jeol", Япония), а также исследовалась структура металла и поверхности, образцов на оптическом и растровом электронных микроскопах (рис. 3, а, б).

Элементный состав отдельных микрообластей образцов анализировался на энергодисперсионном спектрометре LINK-860 (фирмы "LINK", Великобритания) с привлечением стандартного блока эталонов и количественной программы анализа ZAF-4FLC этой же фирмы.

Регистрация сигналов АЭ производилась с помощью аппаратуры NEZ-220 (Венгрия) сопряженной посредством интерфейса RS-232C с компьютером. Оптимальный выбор режимов работы указанной аппаратуры и параметров накапливаемой информации стал возможным после двух пробных испытаний образцов серии № 1.

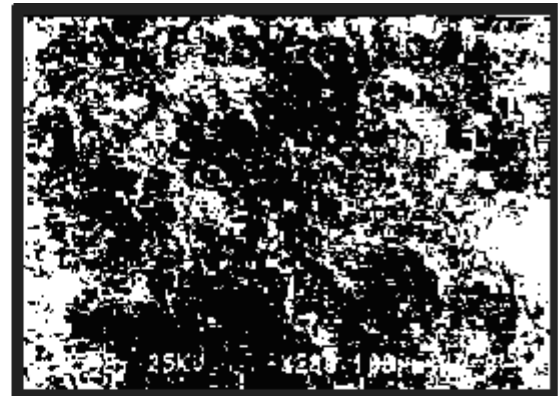
Для обеспечения накопления АЭ информации и ее первичной обработки использовался программный пакет AETOOLS, созданный на базе языка высокого уровня TURBOPASKAL. Использование этого пакета позволяло наблюдать АЭ картину как в процессе испытаний, так и в послеэкспериментальном режиме. Он позволяет в реальном времени:

- классифицировать события АЭ по признакам;
- вычислять координаты источников сигналов АЭ;
- осуществлять кластеризацию сигналов АЭ с вычислением центра тяжести с высокой вероятностью совпадения с местоположением источника сигналов АЭ и отображать эту информацию на экране дисплея;
- производить накопление АЭ информации на диске с образованием файла данных, а также с образованием вспомогательного файла, содержащего информацию о характеристиках кластеров.

В послеэкспериментальном режиме указанный пакет позволяет воспроизвести процесс испытаний при тех или иных исходных данных, построить графики для указанных кластеров или суммарный, наблюдать АЭ картину без кластеризации, выводить информацию на печать.



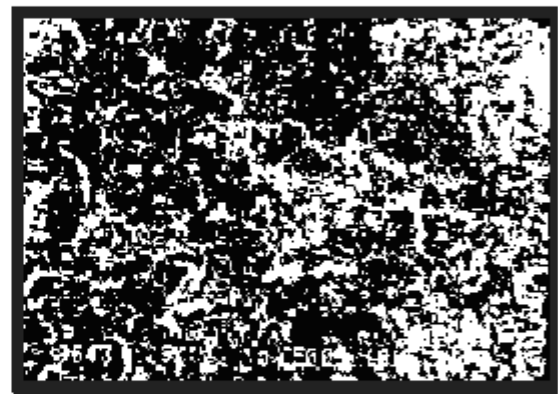
а



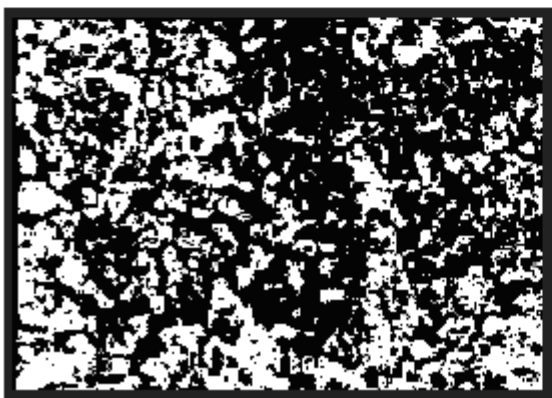
г



б



д



в

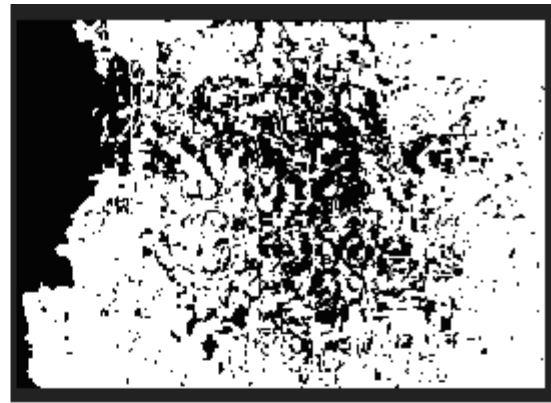


е

Рис.3, а. Поверхностный слой напыленных образцов до механических испытаний:  
а, б, в – образец серии № 3; д, г, е – образец серии № 2



а



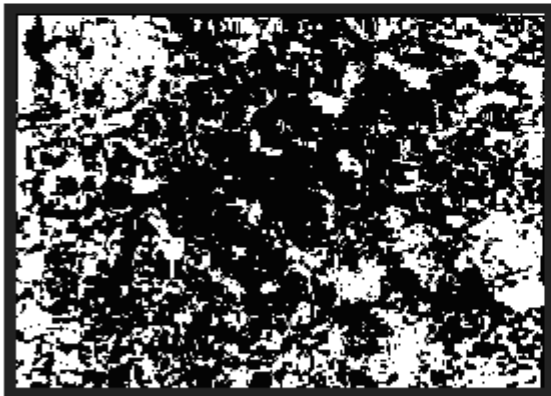
д



б



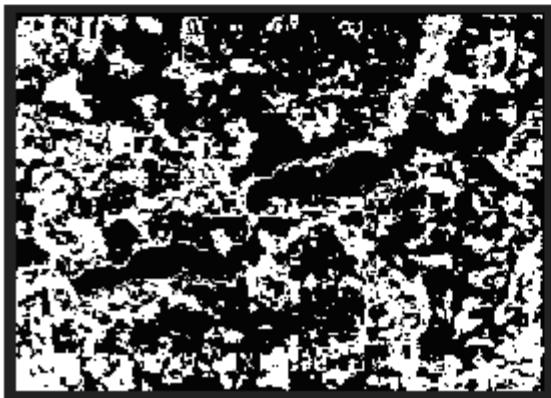
е



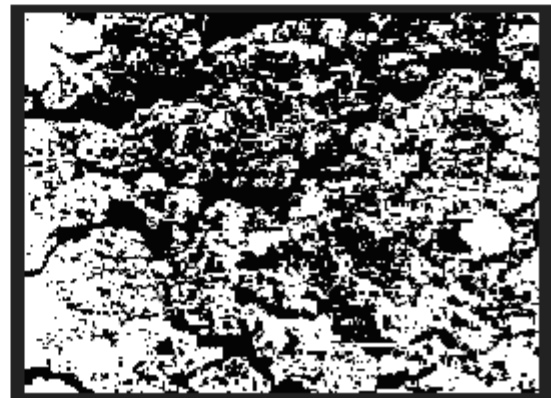
в



ж



г



з

Рис.3, б. Поверхностный слой напыленных образцов после механических испытаний:  
а, б, в, г – образец серии № 3; д, е, ж, з – образец серии № 2

В процессе исследований были испытаны все образцы серий 1–3. Однако, 2 худших образца из 3 серии 1 были использованы исключительно для отработки методики АЭ контроля образцов при их циклических и квазистатических нагружениях. В частности, были подобраны оптимальные исходные данные и режимы работы аппаратуры NEZ-220 и найдены способы снижения помех различной природы, ориентировочно оценены АЭ свойства сплава ЦНК-7 без покрытий, модернизированы датчики-преобразователи АЭ и т.д. Поэтому, зачетными являются результаты испытаний по оставшимся образцам, которые в дальнейшем обозначаются (рис. 2):

- образец № 1 – без покрытия;
- образец № 2 – с покрытием Co-Cr-Al-Y (черное);
- образец № 3 – с внешним покрытием из  $Zr_2O_3$  (белое).

Образец № 1 имел исходное состояние поверхности. Анализ элементного состава отдельных микрообластей поверхности, проведенный при помощи энергодисперсионного спектрометра LINK-860, показал, что элементарный состав поверхности практически не отличается от его внутреннего состава и по содержанию основных химических элементов близок к паспортному.

Образец № 2 содержал на поверхности покрытие, которое состояло, в основном, из Co и некоторого количества Al, Cr и др.

Для образцов третьей серии характерно покрытие, состоящее, в основном, из Zr, Al.

Результаты сравнительных испытаний исследуемых образцов показали, что наличие поверхностного слоя, несмотря на первоначальное его растрескивание, приводит к определенному повышению механических свойств.

При этом для образцов с поверхностным слоем наблюдается также и заметное изменение АЭ свойств на начальных стадиях роста трещины, соответствующих моменту растрескивания поверхности напыленного покрытия. В таблице 2 и на рис. 4, а, б, в, представлены амплитудные распределения  $N = f(A)$  (где  $N$  – число импульсов АЭ;  $A$  – амплитуда) для образцов без покрытия, с покрытием из Co-Cr-Al-Y, с покрытием на основе керамики  $Zr_2O_3$  на различных стадиях нагружения и за весь период нагружения.

Как следует из представленных данных, зависимости амплитудного распределения для образцов с покрытиями имеют характерный максимум в районе 30...40 дБ, в то время как для образца без покрытия такой максимум отсутствует. Максимумы, находящиеся в районе ~ 55 дБ, следует отнести к процессам, связанным с внутренним дефектообразованием в материале образцов.

Кроме того, сигналы АЭ для образцов с покрытиями регистрируются на более ранних интервалах циклического нагружения. Для этого достаточно сравнить графические зависимости суммарного числа  $N$  зарегистрированных сигналов АЭ от времени  $t$  (или числа циклов  $n$ ) для образцов №№ 1–3 (рис. 5, а, б, в). Так, для образца № 1 первые сигналы АЭ зарегистрированы при достижении момента времени примерно  $t = 124\ 610$  мс, в то время как для образца № 2 первые сигналы зарегистрированы уже при  $t = 116\ 740$  мс.

Амплитудное распределение  $N = f(A)$  для образцов 1-3

Этапы циклического нагружения	Амплитуда											
	40dB	40-45dB	45-50dB	50-55dB	55-60dB	60-65dB	65-70dB	70-75dB	75-80dB	80-85dB	85-90dB	90 dB
Образец № 1												
191300...235500	-	-	-	-	3	12	16	13	2	-	-	-
235500...295000	-	-	-	-	1	26	11	6	2	1	-	-
295000...332400	-	-	-	-	-	10	5	1	1	0	-	-
332400...371900	-	-	-	-	-	11	1	4	1	0	0	1
ИТОГО:	-	-	-	-	4	59	33	24	6	1	0	1
Образец № 2												
34670...150860	3	1	0	1	4	1	0	1	1	1	0	0
150860...190540	3	0	1	9	0	0	1	0	0	0	0	0
190540...225000	1	1	0	4	2	1	0	0	0	0	0	-
ИТОГО:	7	2	1	14	6	2	1	1	1	1	0	0
Образец № 3												
0...26000	7	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26000...63000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63000...85000	25	3	3	7	-	-	-	-	-	-	-	-
85000...127000	14	1	4	6	1	5	1	-	-	-	-	-
127000...162000	15	2	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-
162000-218000	24	1	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-
ИТОГО:	85	7	12	16	1	5	1	-	-	-	-	-
Примечание: В первой колонке приведены результирующие данные на интервале амплитуд 0...35 dB												

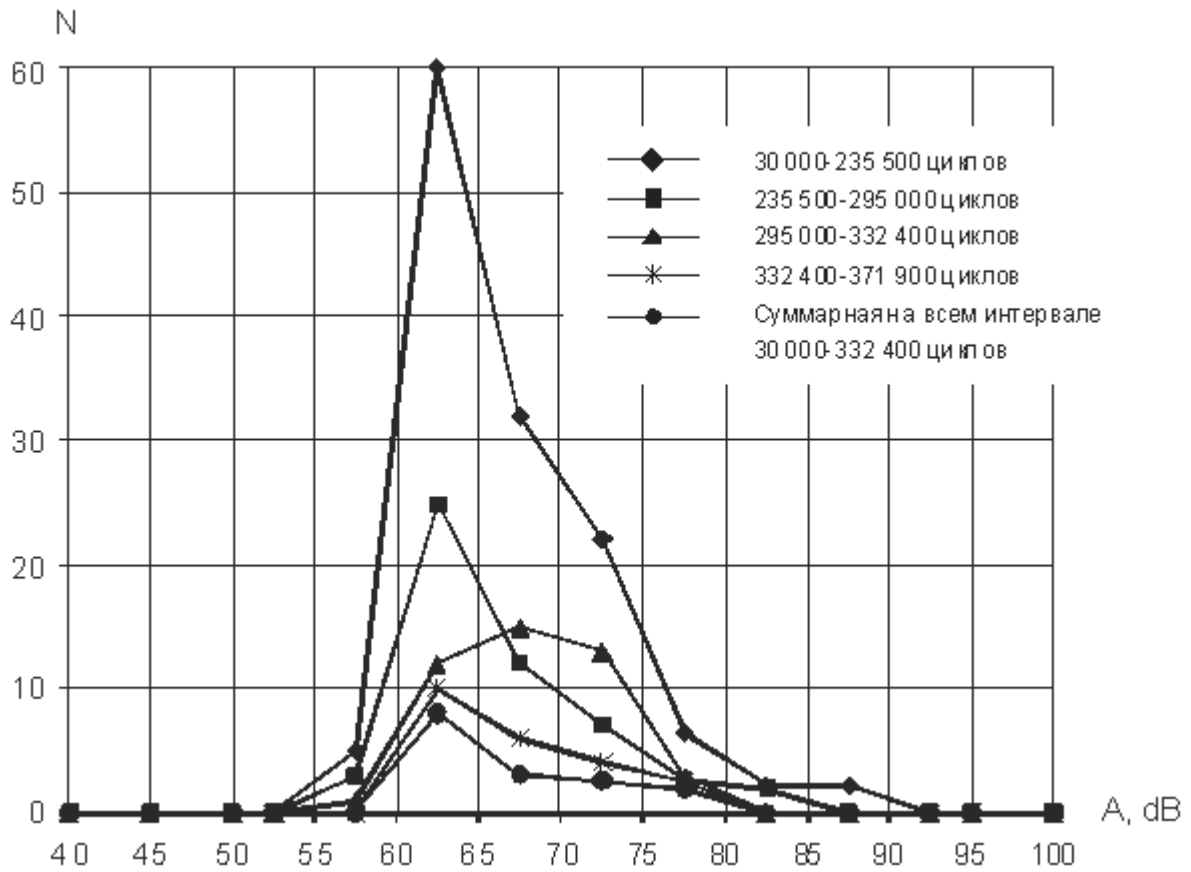


Рис. 4, а. Графические зависимости амплитудного распределения на разных этапах циклического нагружения для образца 1

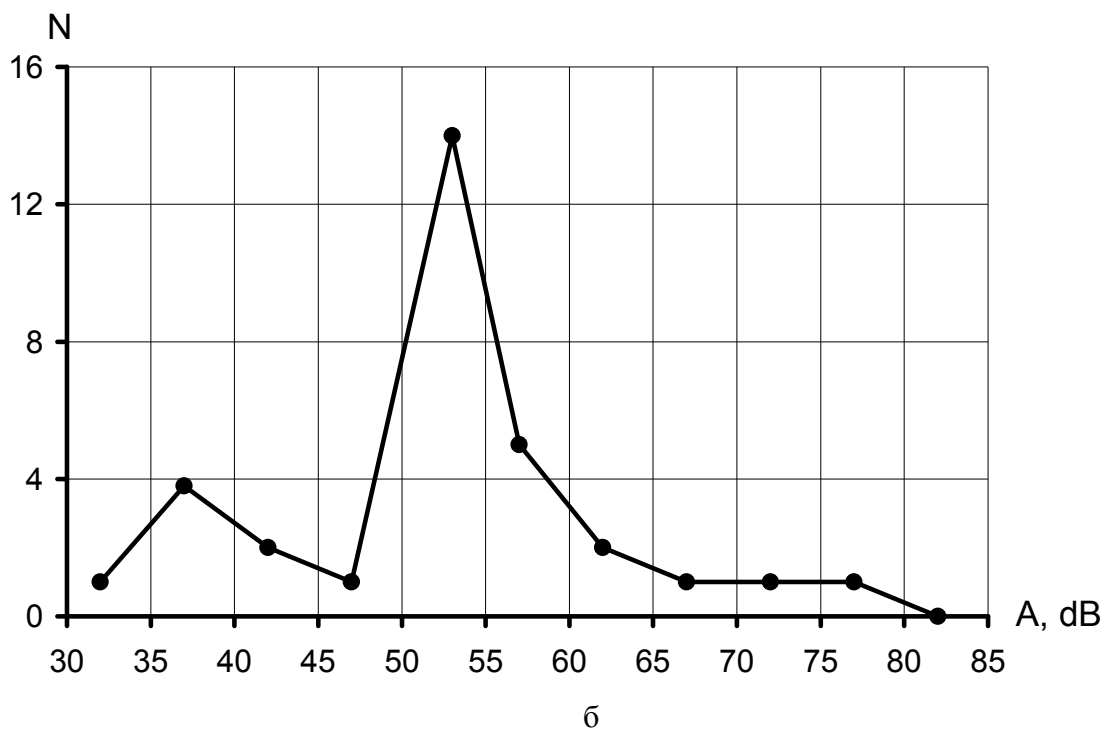


Рис. 4, б. Графические зависимости амплитудного распределения за весь период циклического нагружения для образца 2



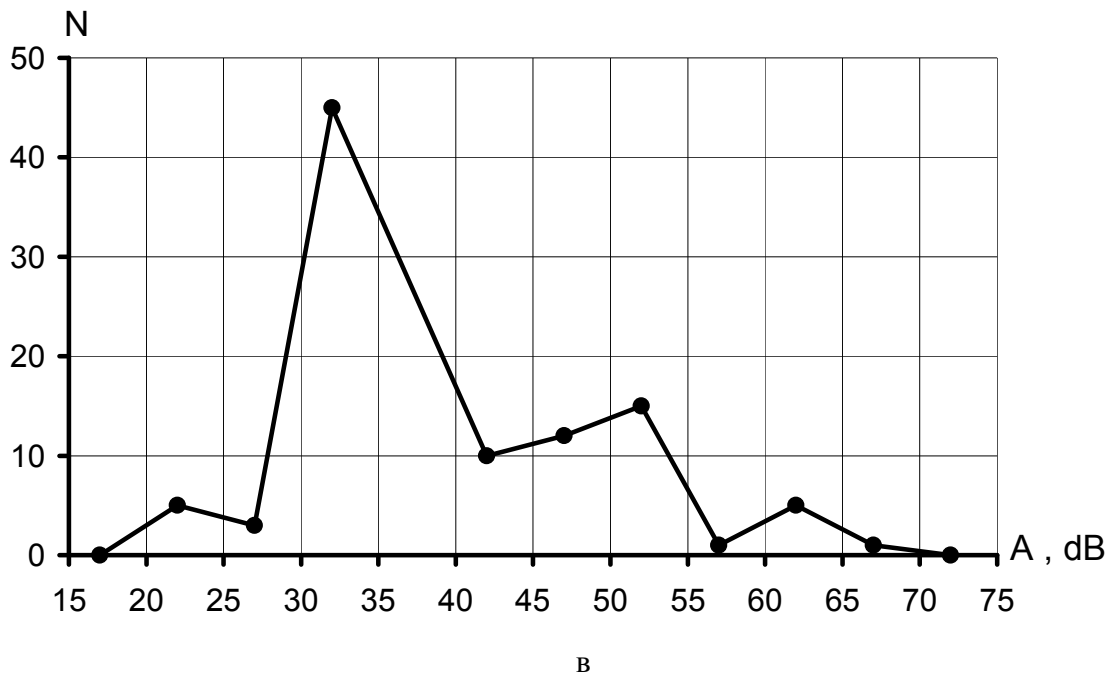


Рис. 4, в. Графические зависимости амплитудного распределения за весь период циклического нагружения для образца 3

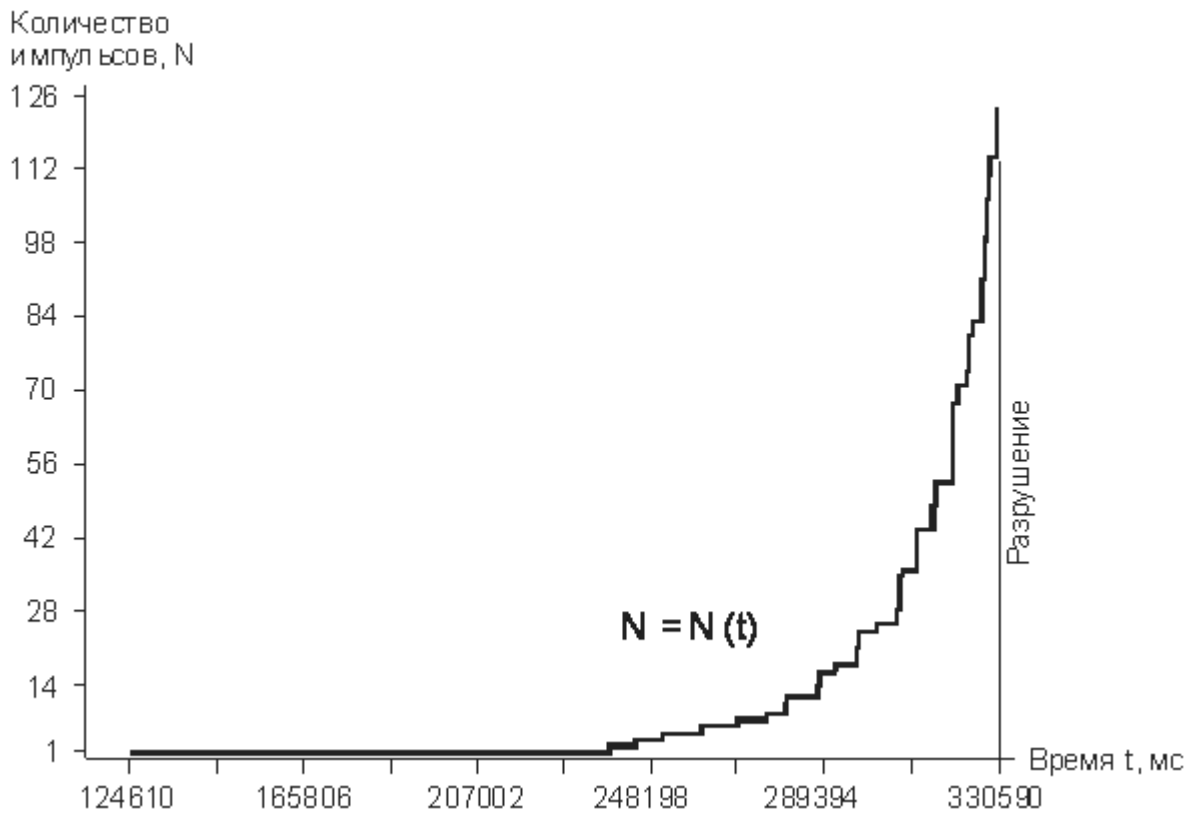


Рис. 5, а. Графические зависимости  $N = N(t)$  для образца 1 при квазистатических испытаниях до разрушения

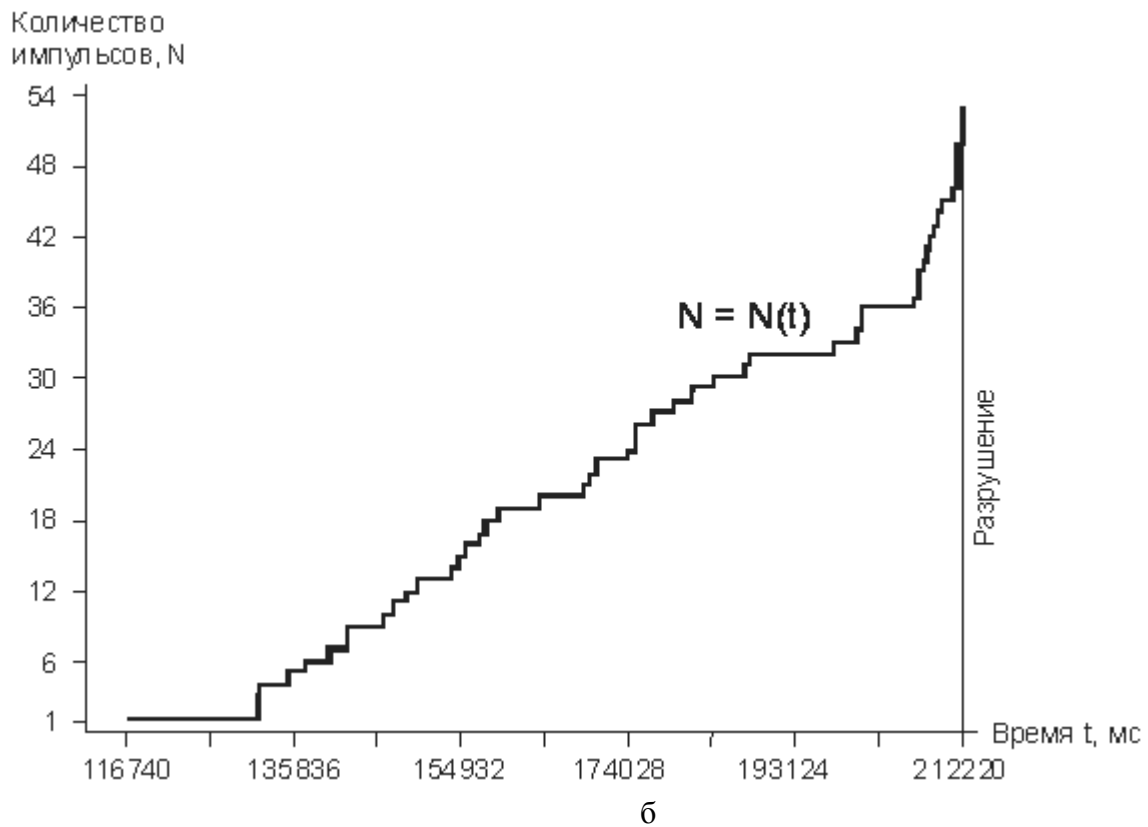


Рис. 5, б. Графические зависимости  $N = N(t)$  для образца 2 при квазистатических испытаниях до разрушения

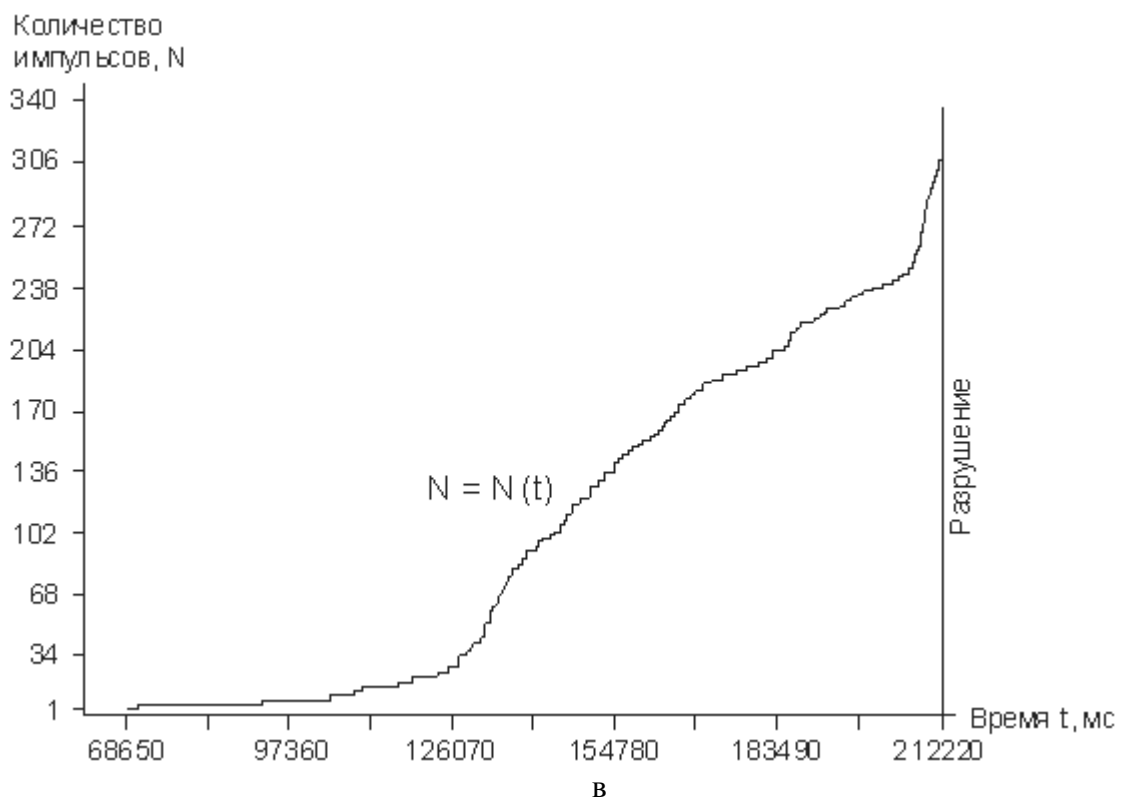


Рис. 5, в. Графическая зависимость  $N = N(t)$  для образца 3 при квазистатических испытаниях до разрушения

Для образца № 3 первые сигналы АЭ были зарегистрированы практически в самом начале нагружения (с 68 650 мс), причем, заметим, при значительно меньших нагрузках в цикле. Для образцов № 1 и № 2 представленные АЭ картины получены за весь период циклического нагружения, а для образца № 3 – на каждом интервале нагружения.

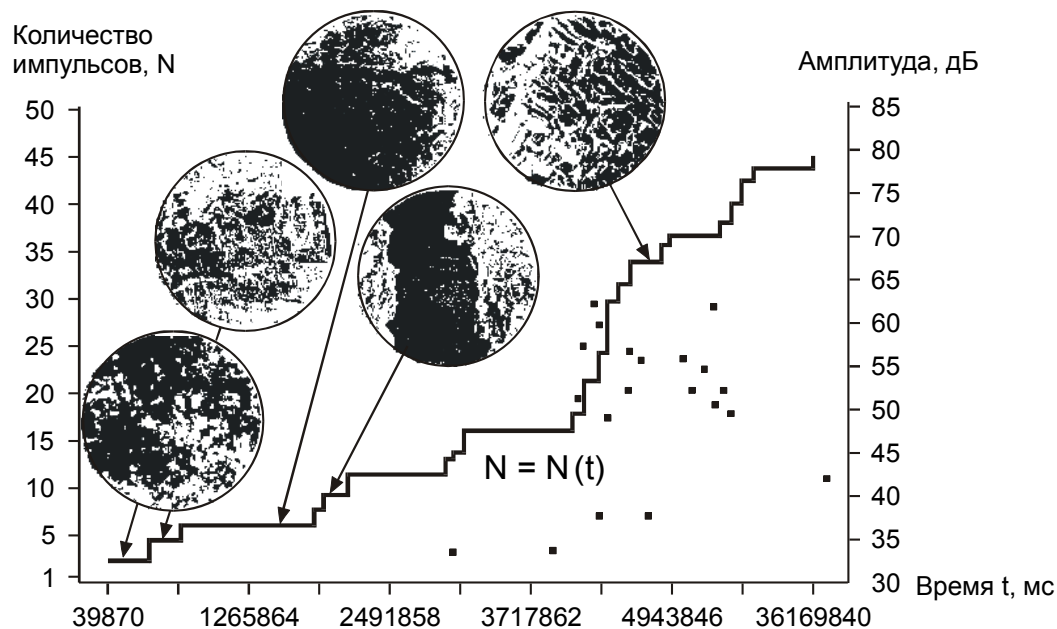


Рис. 6. Сопоставление микромеханизма разрушения образца с результатами АЭ контроля

Результаты сопоставления данных анализа микромеханизма разрушения образцов с поверхностными покрытиями с результатами АЭ контроля приведены на рис. 6.

Дальнейшая обработка АЭ информации полученной экспериментальным путем показала общие закономерности амплитудного распределения сигналов трех типов образцов. Начало зарождения разрушения образцов регистрировалось в данном случае АЭ методом на стадии фазовых выделений, что составляло от 3 % до 7 % от общего времени и количества циклов до появления поверхностных трещин.

Результаты при наборе статистики могут быть учтены в дальнейшем при АЭ испытаниях данных конструктивных элементов.

#### Список литературы

1. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Издательство «Индром», 2001. – 815 с.
2. Патон Б.Е., Недосека А.Я., Фомичев С.К., Яременко М.А. Обоснование методов обследования и выбор мест шурфовки магистральных газопроводов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1999. – № 1. – С. 3–12.
3. ДСТУ 4227-2003 Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки.
4. МИ 207-80 Методика определения местонахождения развивающихся дефектов акустико-эмиссионным методом. – М. Изд-во Стандартов. – 1980.
5. Акустико-эмиссионная диагностика работоспособности трубопроводных систем и сосудов нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств, работающих под давлением до 16 мПа // ТК-78, ГНОТУ, 1995.