

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ISSN 2410-4914

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

1

С. Д. ЗОТОВ, Э. Н. ЛОТКОВА

**О ПРИРОДЕ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

ФИАН — 2017

ПРЕПРИНТЫ ФИАН им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

ISSN 2410-4914

Главный редактор В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус,
научный секретарь С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

Редакционная коллегия: В. С. Бескин, А. А. Горбацевич, О. Д. Далькаров,
Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский,
Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин,
Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес редакции: Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН
Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;
E-mail: pavel@sci.lebedev.ru

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:
<http://preprints.lebedev.ru/>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

С. Д. Зотов, Э. Н. Лоткова

**О ПРИРОДЕ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

№ 1

ФИАН 2017

Аннотация

Работа посвящена установлению природы источников акустической эмиссии, АЭ, от твердых образцов в виде стержней, как из материалов с кристаллической структурой (алюминий и медь), так и из аморфного (стекло), при облучении их поверхности импульсом излучения СО₂ лазера с энергией ~ 1,5 Дж. Исследования проводились путем анализа экспериментально полученных параметров сигналов АЭ (формы и частотного спектра). Проведенный анализ показал, что во всех исследованных образцах основной источник АЭ (не считая сигналов от помех и наводок) – образующиеся микротрещины, причем в случае стеклянного образца наблюдались сигналы сложной формы, которые можно связать с развивающимися трещинами.

Введение

Как известно, в настоящее время лазеры благодаря своим уникальным качествам – узкой направленности излучения, широкого оптического спектра, возможных больших мощностей и др. – широко применяются в науке и технике. При этом актуальным вопросом остается исследование воздействия на материал лазерного излучения, в частности, возможных изменениях в его структуре, возникновения дефектов, вследствие облучения импульсом лазерного излучения с мощностью, не разрушающей материал в целом.

В работах [1,2] при исследовании воздействия сфокусированного излучения лазера CO_2 на твердые образцы из металла и стекла были обнаружены акустические сигналы в ультразвуковом диапазоне, т.е. акустическая эмиссия АЭ. Это свидетельствует о появлении в образцах в результате лазерного облучения источников волн напряжения, т.к. АЭ – процесс излучения волн напряжений, вызванных внутренними источниками в толще материала [3]. Причиной появления этих источников в твердом образце является термическое расширение отдельного его участка вследствие его нагревания за счет поглощения лазерного излучения. Подробно генерация волн напряжений, упругих волн, в твердом образце при быстром нагревании части ее поверхности рассмотрена в работе [4].

Как установлено многими исследованиями [3-6], форма сигналов АЭ (распределение амплитуд сигналов во времени), их продолжительность, частотный спектр и другие ее параметры зависят от природы источников, их порождающих, «акустических событий». Современная диагностическая акустическая аппаратура позволяет фиксировать эти параметры, в связи с чем анализ характеристик АЭ позволяет определять природу этих источников, дефектов структуры, возникших в толще материала вследствие внешнего воздействия.

В данной работе с помощью специальной акустическо-эмиссионной аппаратуры проведено исследование и определение формы сигналов АЭ и его частотного спектра от образцов в виде стержней – металлических (алюминий и медь) с кристаллической структурой и стеклянного, с аморфной, после воздействия на поверхность одного из торцов образца импульса сфокусированного излучения CO_2 лазера. На основании анализа полученных данных и известных из литературы экспериментальных и теоретических результатов исследований АЭ твердых тел при различных нагрузках сделана попытка провести корреляцию между параметрами акустического сигнала и характером его источника, т.е. определить природу источников АЭ в твердых образцах в результате лазерного воздействия.

Техника эксперимента

Исследуемые образцы были в виде стержней с прямоугольным сечением со следующими размерами: алюминиевый – $11,7 \times 3 \times 2,4$ мм³, медный – $190 \times 5 \times 5$ мм³ и стеклянный – $120 \times 5,7 \times 4,4$ мм³. Один из торцов стержня облучался импульсом длительностью 0,3 сек сфокусированного инфракрасного излучения CO₂ лазера мощностью ~5 Вт, сформированным электромеханическим прерывателем. На противоположном торце был закреплен акустический датчик, пьезопреобразователь GT-300, сигнал от которого через дифференциальный широкополосный усилитель попадал в «Анализатор акустической эмиссии СДС 1008» и затем для регистрации выводился на персональный компьютер. С помощью специальной программы на мониторе компьютера воспроизводились общая картина АЭ – время возникновения акустических сигнала АЭ, события, с момента подачи лазерного импульса, максимум его (в мВ), а также для каждого акустического события – его продолжительность, т.е. зависимость его амплитуды от времени, «форма», и зависимость максимума амплитуды от частоты (в кГц) – «спектр». Регистрировалось возникновение сигналов АЭ в интервале частот 10–4800 кГц. Уровень дискриминации сигнала от акустического преобразователя – 0,02 мВ. Подробная схема эксперимента приведена в работах [1–2]

С каждым образцом производилось несколько опытов – последовательно, с интервалом 10–15 минут, 7 – с алюминиевым, 4 – с медным и 3 со стеклянным. Для каждого образца перед серией опытов проводилась запись «нулевки», т.е. показания датчика с включенной всей аппаратурой, но перекрытием лазерного пучка перед торцом образца. Наблюдения АЭ проводились на протяжении около часа после подачи лазерного импульса, т.к. в большинстве случаев никаких сигналов АЭ после этого времени не возникало (не считая помехи), что можно объяснить тем, что после этого периода времени структура образцов с появившимися дефектами в результате лазерного воздействия пришла в устойчивое состояние.

Характеристики наблюдаемых сигналов АЭ

Так как наблюдаемые на выходе акустической аппаратуры электрические импульсы являются следствием преобразования механических импульсов волн напряжения контактным, резонансным, пьезопреобразователем в электрические, которые подвергаются усилению и дальнейшей обработке, то в результате при каждом механическом воздействии будут возбуждаться колебания самого пре-

образователя и наблюдаемый импульс будет иметь тонкую структуру. Для примера на рис.1 приведена форма сигнала АЭ металлического образца из работы [4] на выходе пьезопреобразователя в результате возбуждения коротким (1 мкс) акустическим импульсом, для чего применен пьезоэлектрический излучатель, и на рис. 2 приведены форма сигнала (А) и спектр АЭ (В) из работы [1] при ударе по алюминиевому стержню грифелем карандаша.

Ниже, приводятся рисунки с видом формы наиболее характерных сигналов исследованных образцов и их частотный спектр: рис.3 и рис.4 данные алюминиевого образца, рис. 5 – медного, рис. 6 и 9- стеклянного.

Предпосылки к определению природы источников АЭ при лазерном воздействии на поверхность твердых тел по характеристикам акустических сигналов, «событий».

К настоящему времени, благодаря теоретическим и многочисленным экспериментальным работам (см., например, [5-8] и ссылки в них), установлено, что в случаях твердого материала с кристаллической структурой акустическую эмиссию при нагрузках вызывает, в основном, появление или смещение локальных дефектов в виде дислокаций [11-14], и во всех материалах, включая стекло, образование или развитие микротрещин.

Экспериментально и теоретически показано [4,9], что в случае, когда воздействие источника АЭ резко обрывается, т.е. имеет вид короткого прямоугольного импульса, происходит резкое изменение градиента плотности материала. Вследствие разных зависимостей фазовых и групповых скоростей волн от длины волны (частоты) искажается форма механического импульса по мере его распространения, появляется «хвост» колебаний высокой частоты, который мы видим на рисунках 1 и 2.

В опубликованных работах, касающихся корреляции характеристик АС и видом их источников в основном рассматриваются случаи статических нагрузках, т.е. производимых сравнительно продолжительное время, в течение которого и производится наблюдение возникновения АЭ. В нашем случае продолжительность воздействия относительно короткая. Однако результаты этих работ полезны для анализа наших данных, т.к. в них приводятся данные АС о моменте их возникновения и дальнейшего развития, вид сигналов в зависимости от типа воздействия исследуемого материала, а также ряд других полезных сведений.

В работах [7-8] по анализу индивидуальных сигналов АЭ различных материалов – сталей разных сортов, сплавов, композитов и поликристаллов алмаза, сделана попытка экспериментального определения типа развивающегося дефекта при разного вида нагрузок, (растяжения, сжатия)- При этом было определено, что все сигналы по форме можно разделить на две группы: сигналы от развивающихся микро- и макротрещин и сигналы, возникающие при пластической деформации, т.е. постепенном перемещении дислокаций [8]. На рис. 7 приводится форма сигнала акустической эмиссии (из работы [8]) на стадиях пластического деформирования, (а), и трещинообразования, (б). Отмечается, что наблюдаются в случае (а) – сигналы с небольшой амплитудой и затяжные, в случае (б) – сигналы с широким диапазоном амплитуд и остроконечной формы. Наблюдения велись с помощью автоматизированной аппаратуры в Институте сверхтвердых материалов, Киев, с записью сигналов на магнитных дисках на протяжении 3,5 минут. В первом случае сигналы связывают с дислокациями, во втором случае с трещинами и их развитием, что экспериментально зафиксировано.

В работе [5, стр.38] также приводится вид акустического сигнала, вызванный ростом трещины, при испытании трубы из углеродистой стали на излом (см. рис. 8). При этом на основе проведенного анализа экспериментальных данных также отмечается зависимость продолжительности АС от развития акустического эмиссионного события. Так, например, при рассмотрении АЭ, обусловленной увеличением трещины при испытании металлической трубы на разрыв, представляющей собой высокочастотный пакет акустических событий (см. рис. 8 – рис. 1.4а. из [5] стр. 38), авторы более разумным считают, что наблюдаемый АС представляет собой ряд отдельных эмиссионных событий, ибо «нелогично рассматривать увеличение трещины в пределах одного зерна». В этой же работе подробно анализируется влияние ограниченности рассматриваемого материала, т.е. стенок, от которого могут отражаться акустические волны. Показано, волны с более высокой частотой, т.е. мегагерцового диапазона, затухают вследствие отражения быстрее, чем волны с более низкой – кГц.

Обсуждение результатов исследований

Выше рассматривались данные АС при статических нагрузках, т.е. затяжных. В наших экспериментах воздействие импульсным лазерным излучением более короткое. Поэтому некоторые дефекты не успевают полностью раскрыться, проявиться, и сигналы АЭ будут более короткими, как, например, на рис.2.

Условно, сигналы АЭ относительно короткие, с четко выраженным максимумом и высокочастотным «хвостом», которые обусловлены короткими акустическими событиями, быстродействующими источниками, типа образования микротрещин, и имеют форму аналогичную изображенной на рис. 1 и рис. 2, будем называть сигналами типа I.

Сигналы продолжительные, размытой формы, аналогичной форме акустического сигнала, приведенного на рис. 7, связываемого с акустической эмиссией на стадиях «пластического деформирования» металла, т.е. при дислокации, будем обозначать типом II.

Сравнительная продолжительность процесса дислокации была отмечена в работе [10], в которой было замечено, что дислокации – это дефекты кристалла, представляющие собой в простейшем случае (по сравнению с двойниковостью дислокаций или их столкновений) сдвиг одной цепочки атомов относительно соседних цепочек, который характеризуется «постепенностью» его распространения, т.е. процесс не мгновенный, и соответствующее акустическое событие является сравнительно продолжительным. Движению дислокаций посвящено много работ [см., например, 11-16] и касаются они, в основном, металлов, т.е. материалов с кристаллической структурой. В работе [17] наблюдалось движение дислокаций в металлических стеклах, которые имеют поликластерное строение. Источниками АЭ в этом случае являлись дислокации, рождающиеся на межкластерных границах и движущиеся через толщу металлического стекла.

Развитие трещин, уже имеющих в материале до нагрузки, в отличие от случая их образования в результате нагрузки, как отмечалось в работах [5,8], также является продолжительным событием. Сигналы сравнительно продолжительные, без резких максимумов, но с высокочастотным «хвостом», связанные с ростом трещин, с формой, подобной приведенной на рис. 8, будем называть типом III.

Рассматривая приведенные выше рисунки характерных сигналов АЭ исследуемых образцов, возникших в результате лазерного воздействия, можно отметить следующее.

В случае алюминиевого образца (рис.3а, 3б) наблюдаемые сигналы имеют резкий максимум с амплитудой более 0,40 мВ и высокочастотный хвост, продолжительность сигнала менее 50 мкс. Частотный спектр АС лежит в диапазоне менее 2000 кГц и имеет один резкий максимум, величиной $>0,005$ мВ, на основании чего рассматриваемые сигналы можно связать с одним акустическим событием, с образованием микротрещины, и отнести к типу I. Маленькие пички в

спектре, повторяющиеся с одним и тем же интервалом, обусловлены резонансными сигналами измерительной аппаратуры.

Форма сигналов на рисунках 4а и 4б – без четко выраженного максимума, с резко обрывающейся границей, соответствующие частотные спектры имеют несколько резко выраженных максимумов, т.е. вызваны несколькими источниками. Такие сигналы наблюдались в случае всех исследуемых образцов, их можно связать с различными наводками.

В случае медного образца (рис. 5) наблюдались сигналы, аналогичные приведенным на рисунках 3а и 3б., но со значительно меньшей амплитудой ($<0,1$ мВ). Максимум в частотном спектре также меньшей величины $\sim 0,001-0,002$ мВ. Их также можно связать с образованием микротрещин в результате лазерного воздействия. Меньшее значение максимумов амплитуд в форме сигнала и в частотном спектре по сравнению с данными, соответствующими алюминиевому стержню, можно объяснить тем, что медь относится к группе «тяжелых» металлов, алюминий – к группе «легких» металлов – удельная плотность меди ($8,9$ г/см³) значительно больше алюминия ($2,7$ г/см³), в связи с чем для получения дефекта в меди такой же величины, что в алюминии, потребовалось бы более мощное воздействие.

Сигналы АЭ типа II, которые можно было бы связать с дислокациями, в проведенных исследованиях с металлическими образцами не обнаружены. Возможно, это объясняется недостаточно большой мощностью воздействующего лазерного импульса.

В случае стеклянного образца, исключая сигналы, связанные с наводками и частичным оплавлением места поверхности, на которое падал сфокусированный лазерный пучок [18], все наблюдаемые сигналы (см. рисунки 6а и 6б, а также рис. 9) имели форму с высокочастотным хвостом, с одним (тип I) или несколькими максимумами (тип III), т.е. их можно связать с образованием или ростом микротрещин. Как видно, форма сигнала на рис. 6б и рис. 9 очень похожа на форму сигналов на рис. 7 и рис. 8, связываемых с развивающимися трещинами.

Выводы

На основании проведенного анализа параметров сигналов АЭ при воздействии лазерного излучения на поверхность стержней из твердых материалов в представленной работе можно сделать следующий вывод.

Во всех исследованных образцах, металлических и стеклянном, при воздействии на их поверхность сфокусированного излучения лазерного импульса с

мощностью, не разрушающей образец в целом, основным источником акустической эмиссии являются микротрещины, причем, в металлических – образовавшиеся микротрещины, в стеклянном – как образовавшиеся, так и развивающиеся микротрещины, существовавшие в стеклянном образце еще до облучения.

Авторы выражают благодарность д. ф.-м. наук Е. М. Кудрявцеву, инициирующему проведение исследований по влиянию лазерного облучения на материалы акустическими методами, а также сотруднику ИМЕТ им. А. А. Байкова, к. техн. наук М. М. Ляховицкому за предоставление акустико-эмиссионного оборудования и ценные замечания при обсуждении результатов исследований.

Литература

- 1 С.Д. Зотов, А.М. Кудрявцев, Э.Н. Лоткова, М.М. Ляховицкий, А.А.Лебедев // Регистрация акустических сигналов от металлических стержней (алюминий и медь) в результате воздействия инфракрасного лазерного импульса. Препринт ФИАН, 2013, № 6, 20 с.
2. С.Д. Зотов, А.А. Лебедев, Э.Н. Лоткова, М.М. Ляховицкий // Акустическая эмиссия алюминиевого стержня в результате воздействия импульса инфракрасного лазерного излучения. Инженерная физика. 2015, № 3, с. 3.
3. В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот/ /Акустическая эмиссия. Изд. Стандарт., М. 1976, 271 с.
4. R.M.White// Generation of elasting waves by transient surface heating // Journal of Applied Physics. 1963. V.34. N. 12. P. 3359-3567.
5. Методы неразрушающих испытаний. Физические основы, практическое применение, перспективы развития. Под редакцией Р.Шарпа. Изд. «Мир», М. 1972. Перевод с английского: “Research techniques in nondestructive testing“. Academic Press, London and New York,1970 // Н.Рao, W.Sachse // Physical Acoustics.VII. Academic Press, 1984, P.61-143.
- 6 Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин и др.// Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении// 2002, М., Машиностроение. 240 с.
7. Н.В. Новиков. С.Ф. Филоненко, И.Н. Городыский, В.С. Бирюков// К критерию определения источника сигналов АЭ при нагружении материалов// Сверхтвердые материалы, 1987, № 3, с. 42-45.

8. С.Ф. Филоненко, Н.И.Городыский, В.С.Бирюко// Особенности сигналов акустической эмиссии при пластическом деформировании и хрупком разрушении материалов, Физико-химическая механика материалов, 1985, № 6, с.105-106.
9. Г. Кольский. Волны напряжения. Изд. И.Л. М. 1955, 192 с..
10. Т.А. Конторова, Я.И. Френкель // К теории пластической деформации и двойникования I, ЖТЭФ, 1938,. Т.8. Вып. 1, с. 89-95.
11. N. Kieseletter // Acoustic emission from moving dislocations// Scripta metallurgica. 1974/ V.8, pp. 249-252.
12. N. Kieseletter, P. Shiller// The acoustic emission from moving dislocations in aluminium // Phys. Stat. Sol.(a), 1976, 38, 569.
13. В.А. Greenberg, М.А. Ivanov, Yu.N. Gornostirev, L.E. Karkina // Some aspects of plastic deformation theory with an account for thermally activated dislocation transformations// Phys. Stat. Sol. (a), 1976, 38, 653.
14. ФИЗИЧЕСКИЙ энциклопедический словарь. Главный редактор А. М. Прохоров. М. «Советская энциклопедия», 1983.
15. М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, В.В. Рощупкин, Н.А. Семашко, Н.А. Минина, В.А. Ермишкин, А.И.Чернов // Исследование кинетики структурных превращений и фазового перехода в никеле акустическим методом. Теплофизика высоких температур.2008, т.40, № 3, с. 396-401.
16. Y. Pau, W. Sachse, H.Fukuoka// Acoustoelastic and ultrasonic measurements of residual stresses, Physical acoustic, 1984,v.XVII, p. 61.
17. В.П. Вейко, Е.Б. Яковлев, Е.А. Шахно // Физические механизмы быстрой структурной модификации стеклокерамики при воздействии излучения СО₂-лазера, Квант. Электроника. 2009, 38, № 2, с. 185.
18. С.Д. Зотов, А.А. Кузнецов, А.А. Лебедев // Анализ акустических событий при облучении стеклянного образца импульсом СО₂ лазера // Инженерная физика, 2015, №10, с. 20-26.

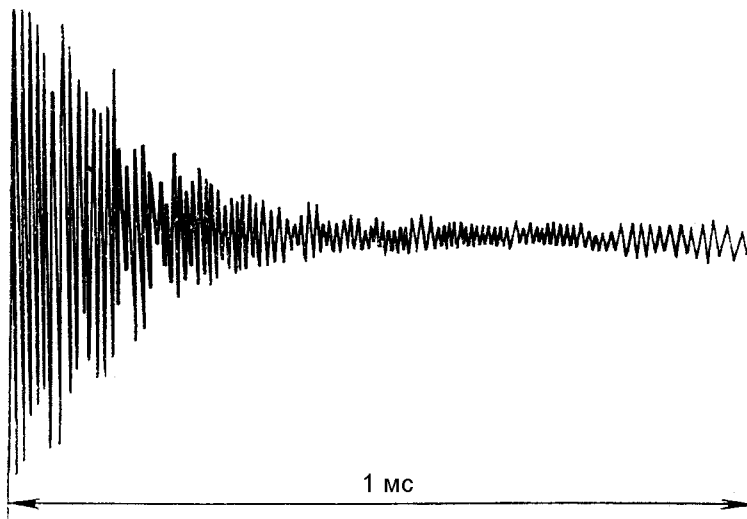


Рис. 1 Форма сигнала акустической эмиссии металлического образца из [4]

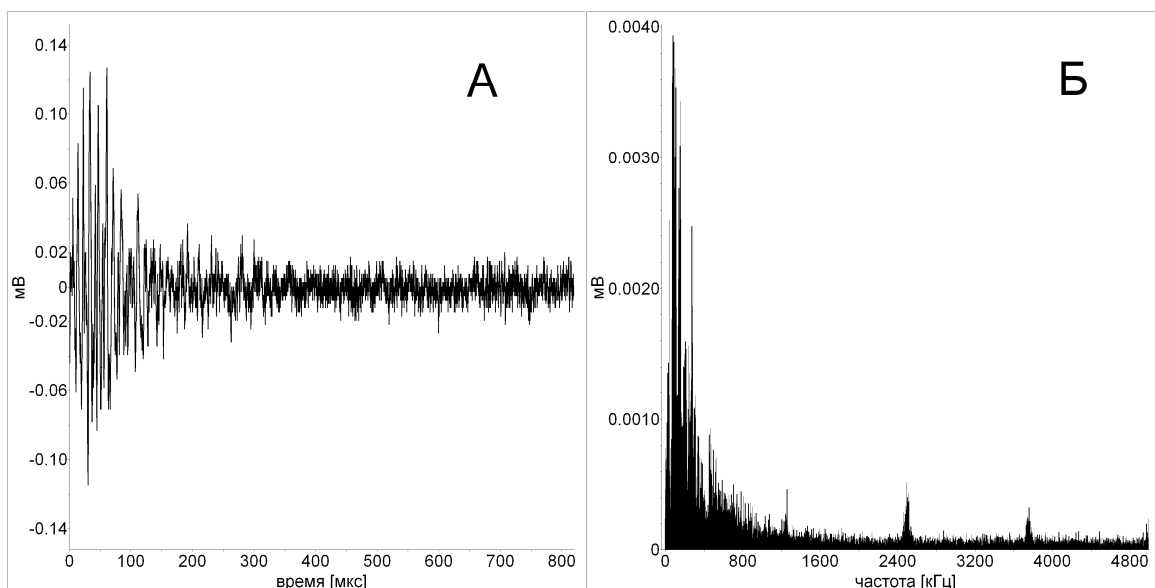
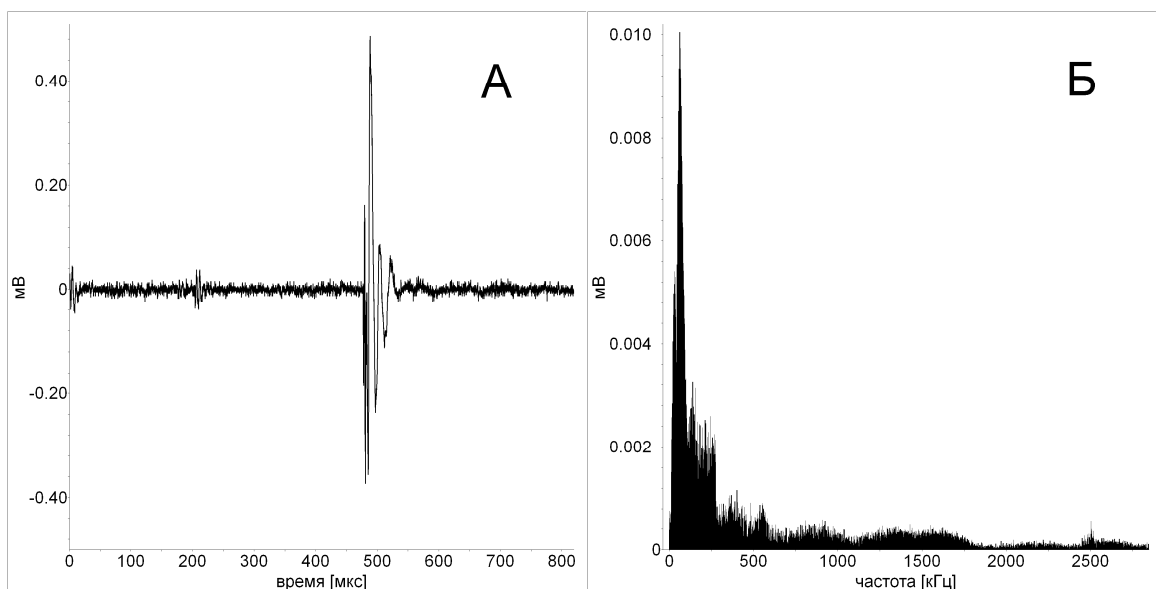
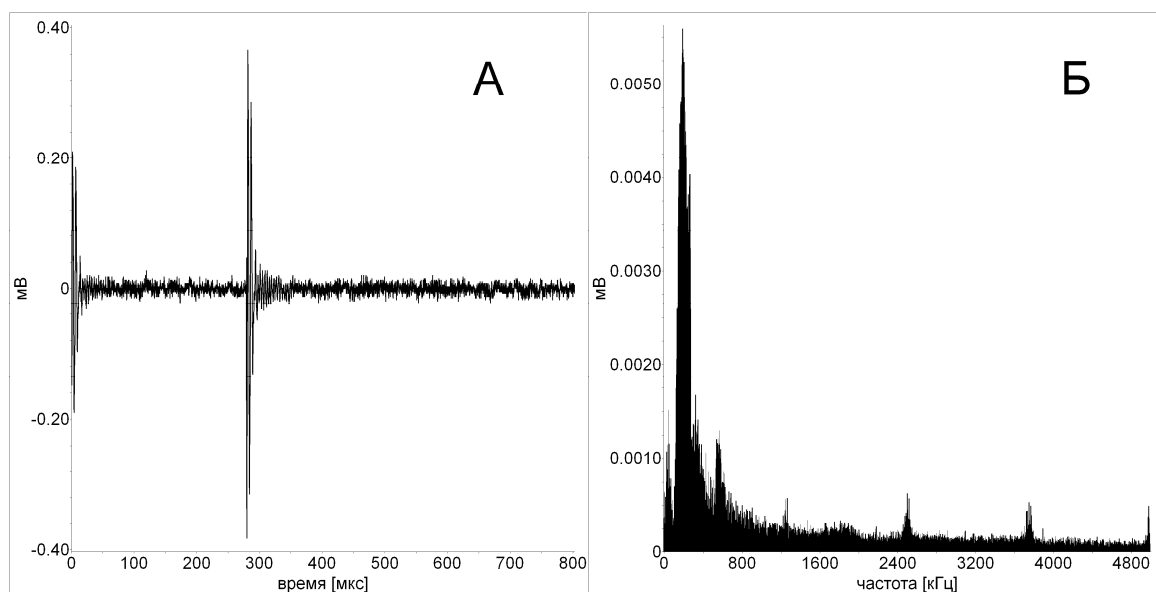


Рис.2 Форма сигнала и спектр акустической эмиссии при ударе по металлическому стержню грифелем карандаша из [1].

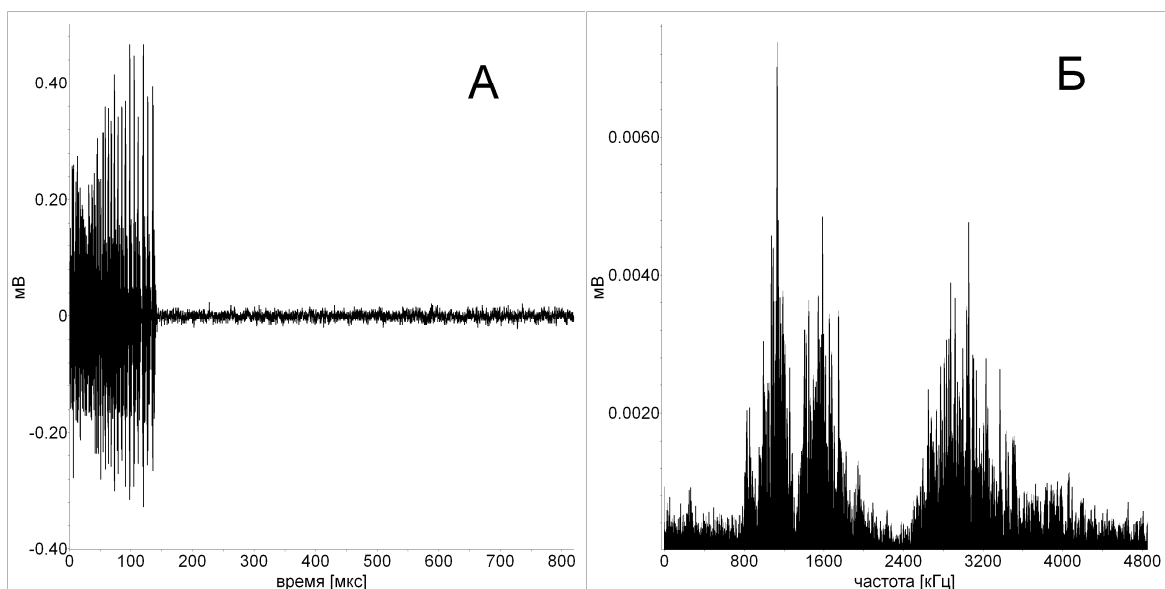


а

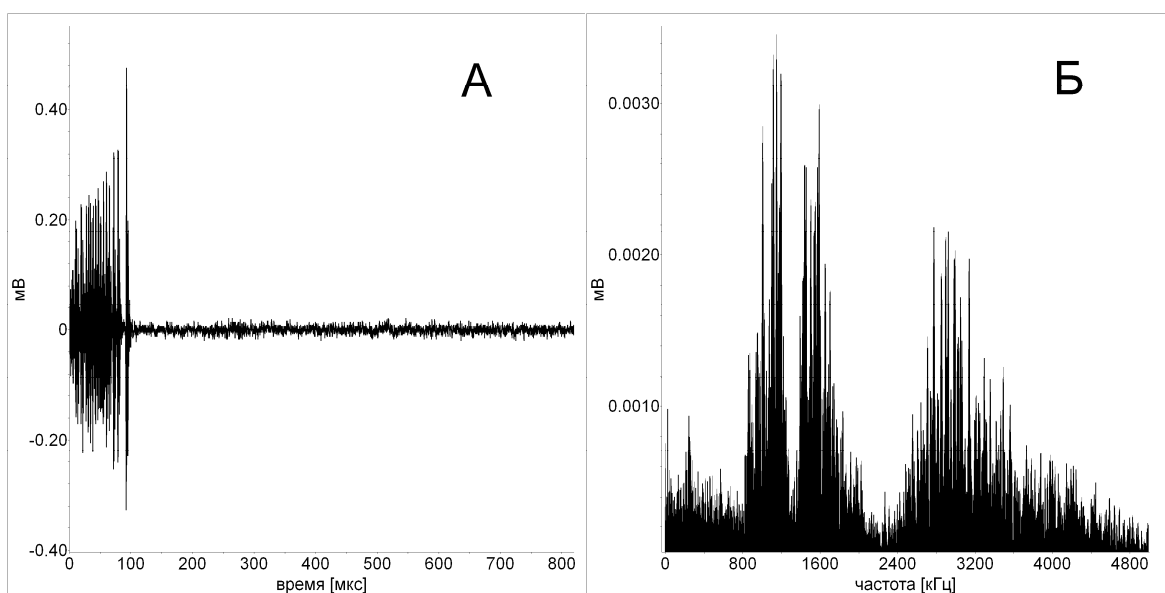


б

Рис.3 Форма сигнала (А) и спектр (Б) АЭ алюминиевого образца в результате воздействия ИК импульса (событие на 1174–ой секунде (а), и (б) – на 1425–ой секунде наблюдений).

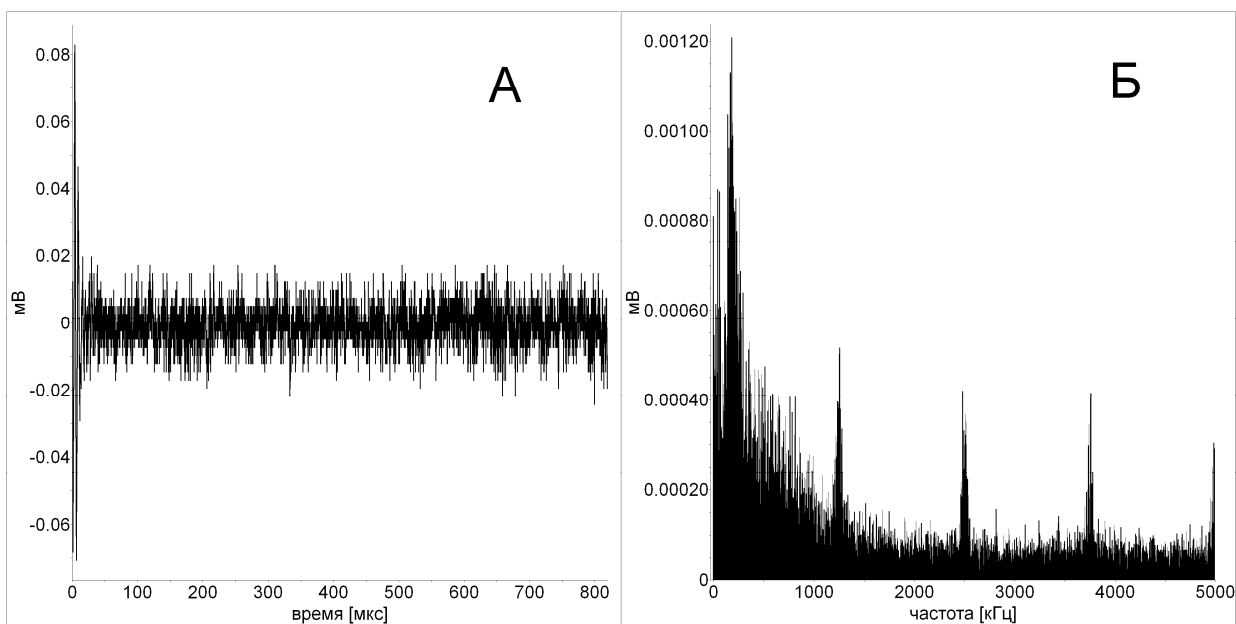


а

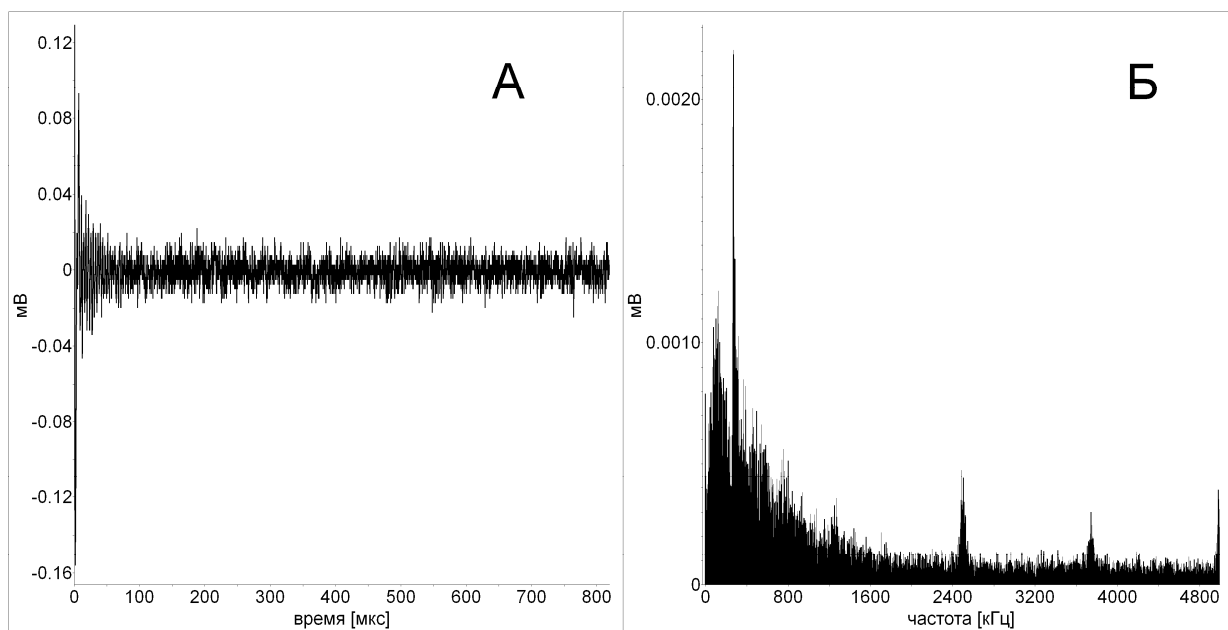


б

Рис.4 Форма акустического сигнала и спектр на 16-й секунде наблюдений АЭ в разных опыта из одной и той же серии экспериментов с алюминиевым стержнем.

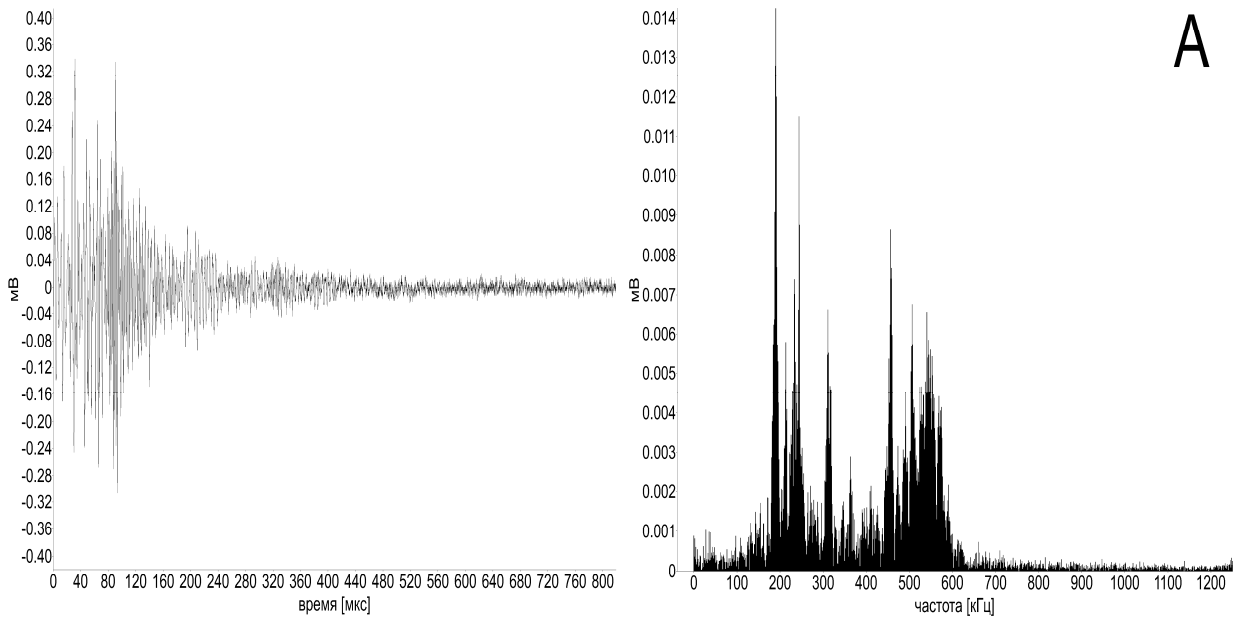


а

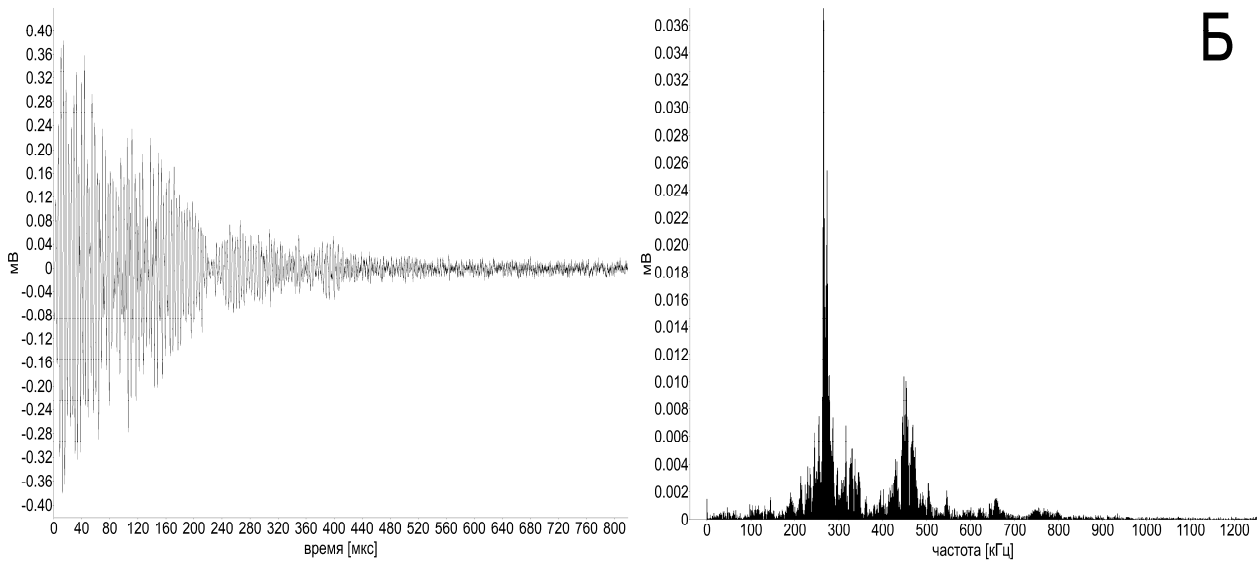


б

Рис.5 Форма сигнала и спектр АЭ медного образца для двух разных событий: на 1641-ой секунде наблюдений (рис. «а») в одном опыте и на 2036-ой (рис. «б») в другом в одной и той же серии экспериментов.



а



б

Рис.6 Типичные форма сигнала и спектр АЭ, наблюдаемые в опытах со стеклянным образцом.

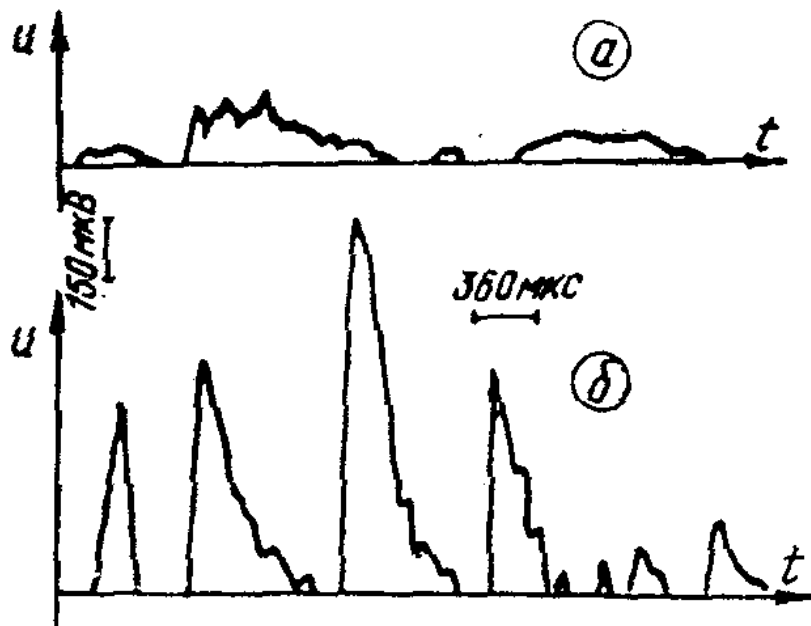


Рис.7 Форма сигналов акустической эмиссии на стадиях пластического деформирования (дислокаций) (а) и образования трещин (разрушение материала) (б). (Из работы [8])

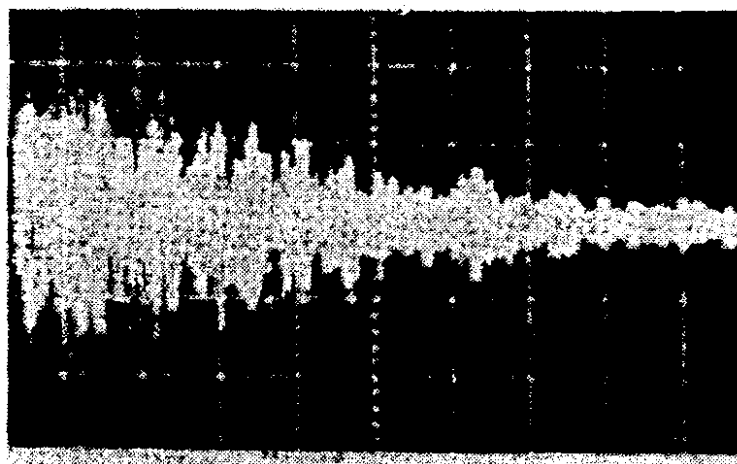


Рис.8 Сигнал акустической эмиссии, вызванный ростом трещины, при испытании трубы на разрыв. (Из работы [5])

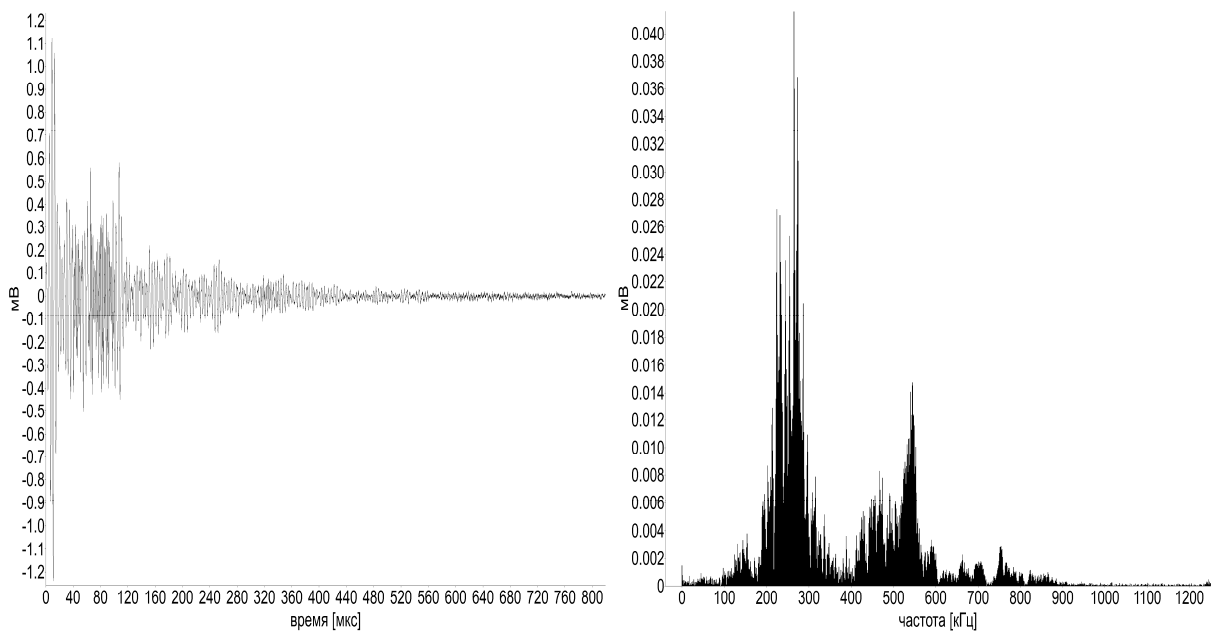


Рис. 9. Форма типичных сигналов АЭ стеклянного образца, связываемых с образованием и развитием микротрещин, наблюдаемых в опытах со стеклянным образцом .

Сергей Дмитриевич ЗОТОВ
Эмма Николаевна ЛОТКОВА

**О ПРИРОДЕ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Формат 60x84/16. П. л. 1,25. Тираж 140 экз. Заказ №3
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН
119991 Москва, Ленинский проспект 53