

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2333484

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗРАЗМЕРНОГО ПАРАМЕТРА РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики" (RU)*

Автор(ы): *Никольская Татьяна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2006138629

Приоритет изобретения 01 ноября 2006 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 сентября 2008 г.

Срок действия патента истекает 01 ноября 2026 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



A handwritten signature in black ink, appearing to read "B.P. Simonov".

Б.П. Симонов



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2006138629/28, 01.11.2006

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
01.11.2006

(45) Опубликовано: 10.09.2008 Бюл. № 25

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: МЕДВЕДЬ В.А., НИКОЛЬСКИЙ С.Г., ПУПШИС Л.А., ТЕРЕНТЬЕВ В.П. ВЗАИМОСВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ. ЭЛЕКТРОН. ТЕХНИКА, СЕР.8, УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ, 1979, ВЫП.6, с.20-30. SU 1536251 A1, 15.01.1990. SU 1735761 A1, 23.05.1992. SU 1619159 A1, 07.01.1991. JP 63091557 A, 22.04.1988. JP 1185431 A, 25.07.1989.

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр.,
49, ГОУВПО "СПбГУ ИТМО", ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Никольская Татьяна Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики" (RU)

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗРАЗМЕРНОГО ПАРАМЕТРА РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ

(57) Реферат:

Использование: для определения безразмерного параметра развития трещины. Сущность: заключается в том, что осуществляют нагружение образца различными по значению, но постоянными во времени нагрузками, воспроизводящими напряженные состояния материала образца при эксплуатации изделия, при этом предварительно для образца экспериментально определяют значение максимальной неразрушающей нагрузки,

превышают его, а затем проводят частичные разгрузки, регистрируют активность акустической эмиссии, а также интервалы времени до возникновения акустической эмиссии после каждой частичной разгрузки и до восстановления активности акустической эмиссии, и по этим результатам определяют значения безразмерного параметра по соответствующим математическим выражениям. Технический результат: снижение трудоемкости и длительности при определении безразмерного параметра развития трещины. 2 ил.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(19) **RU** (11) **2 333 484** (13) **C1**

(51) Int. Cl.
G01N 29/14 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2006138629/28, 01.11.2006**

(24) Effective date for property rights: **01.11.2006**

(45) Date of publication: **10.09.2008 Bull. 25**

Mail address:
**197101, Sankt-Peterburg, Kronverkskij pr.,
49, GOUVPO "SPbGU ITMO", OIS i NTI**

(72) Inventor(s):
Nikol'skaja Tat'jana Sergeevna (RU)

(73) Proprietor(s):
**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie
vysshego professional'nogo obrazovanija
"Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj
universitet informacionnykh tekhnologij,
mekhaniki i optiki" (RU)**

(54) **METHOD OF EVALUATION OF DIMENSIONLESS PARAMETER OF CRACK DEVELOPMENT**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: method can be used to for evaluate dimensionless parameter of crack development. Method consists in that the sample is loaded with loadings variable in value and constant in time simulating stress conditions of sample material while in-service. Value of sample maximum nondestructive load is observed and exceeded, followed by partial relieves. Acoustic emission

activity, as well as time intervals preceding acoustic emission after each partial relief and prior to refresh of acoustic emission activity are registered. The results obtained are used to calculate values of dimensionless parameter from appropriated mathematical expressions.

EFFECT: decreased work content and reduced duration of evaluation of dimensionless parameter of crack development.

2 dwg

RU 2 3 3 3 4 8 4 C 1

RU 2 3 3 3 4 8 4 C 1

Изобретение относится к неразрушающим методам контроля и может быть использовано для определения длительной прочности хрупких материалов, в которых скорость \dot{a} развития трещины описывается [Эванс А.Г., Ленгдон Т.К. Конструкционная

керамика. - М.: Металлургия, 1980. - 256 с., с115] уравнением

$$\dot{a} = \dot{a}_0 \left(\frac{K/K_0}{K_0} \right)^n, \quad (1)$$

где \dot{a}_0 - стартовая скорость трещины при значении коэффициента интенсивности

напряжений (КИН) $K = K_0 \sqrt{\sigma}$, n - безразмерный параметр, при неубывающем во времени напряжении σ ; этот же параметр при циклическом нагружении будем обозначать m . Для одного и того же материала значение n (или m) зависит от типа развивающейся трещины (отрыва - I, продольного или поперечного сдвига II, III). Интегрирование (1)

позволяет [Эванс А.Г., Ленгдон Т.К. Конструкционная керамика. - М.: Металлургия, 1980. - 256 с., с.117] определить долговечность τ изделия, например, при заданном

напряжении σ , а следовательно, и отношение долговечностей τ_1 и τ_2 при неизменных напряжениях σ_1 и σ_2 и прочих равных условиях:

$$\tau_1/\tau_2 = \left(\sigma_2/\sigma_1 \right)^n. \quad (2)$$

Знание безразмерного параметра n (или m) позволяет прогнозировать большие долговечности (при низких напряжениях σ) по результатам кратковременных испытаний ($\tau=100$ с) при высоких напряжениях. Этим и обусловлена актуальность определения безразмерного параметра для конкретного материала.

Известны оперативные способы определения n (или m) на образцах с искусственными трещинами [Эванс А.Г., Ленгдон Т.К. Конструкционная керамика. - М.: Металлургия, 1980. - 256 с., с.104-108], заключающиеся в нагружении образцов, регистрации изменения во времени нагрузки или длины трещины и в расчете по результатам эксперимента значения n на основании (1). Недостаток этих методов заключается в том, что неизвестен тип трещины, развивающейся при длительном нагружении в реальном изделии. В частности, существовало мнение, что в хрупких материалах развиваются трещины отрыва, и для прогнозирования долговечности определяли n для трещин отрыва. При сопоставлении [Завада В.П., Никольский С.Г., Стрижало В.А., Терентьев В.П. Сопротивляемость разрушению феррита в условиях длительного нагружения // Пробл. прочности. - 1988. - №8. С.42-46] значений n , полученных из (1) и из (2), оказалось, что реально значение n в 2 раза меньше, чем n , полученные для искусственных трещин в условиях отрыва. Недавно показано [Никольский С.Г. Анализ изломов керамических стержней при кратковременном и длительном изгибе // Пробл. прочности. - 2002. - №5. С.133-143], что катастрофическое разрушение хрупких материалов подготавливается в основном развитием трещин сдвига.

Наиболее близок к предлагаемому изобретению способ определения безразмерного параметра развития трещины [Взаимосвязь распределений прочностных показателей керамических элементов при различных режимах нагружения. / В.А.Медведь, С.Г.Никольский, Л.А.Пупшис, В.П.Терентьев // Электрон. техника. Сер.8. Управление качеством и стандартизация. - 1979. - Вып.6. - С.20-30, Завада В.П., Никольский С.Г., Стрижало В.А., Терентьев В.П. Сопротивляемость разрушению феррита в условиях длительного нагружения // Пробл. прочности. - 1988. - №8. С.42-46], включающий:

- комплектацию 2...5 представительных выборок, в каждой из которых количество образцов $q > 150$ [Взаимосвязь распределений прочностных показателей керамических элементов при различных режимах нагружения. / В.А.Медведь, С.Г.Никольский, Л.А.Пупшис, В.П.Терентьев // Электрон. техника. Сер.8. Управление качеством и стандартизация. - 1979. - Вып.6. - С.20-30];

- нагружение образцов различными по значению, но постоянными во времени нагрузками $L_1 \dots L_i \dots L_5$, воспроизводящими напряженное состояние материала при

эксплуатации изделия [Взаимосвязь распределений прочностных показателей керамических элементов при различных режимах нагружения. / В.А.Медведь, С.Г.Никольский, Л.А.Пупшис, В.П.Терентьев // Электрон. техника. Сер.8. Управление качеством и стандартизация. - 1979. - Вып.6. - С.20-30];

- 5 - регистрацию при каждом напряжении σ_i , рассчитываемом по L_i , долговечностей $\tau_{i1}, \tau_{i2}, \dots, \tau_{ij}, \dots, \tau_{ik}; k_m < q$, т.к. часть образцов не разрушается, что мешает определить выборочное среднее $\bar{\tau}_i$ и оценить по нему соответствующее математическое ожидание [Взаимосвязь распределений прочностных показателей керамических элементов при различных режимах нагружения. / В.А.Медведь, С.Г.Никольский, Л.А.Пупшис, В.П.Терентьев // Электрон. техника. Сер.8. Управление качеством и стандартизация. - 1979. - Вып.6. - С.20-30];
- 10 - определение статистической обработкой [Завада В.П., Никольский С.Г., Стрижало В.А., Терентьев В.П. Сопротивляемость разрушению феррита в условиях длительного нагружения // Пробл. прочности. - 1988. - №8. С.42-46] полученных результатов отношений τ_{1j}/τ_{ij} при $\sigma = \sigma_1$, и $\sigma = \sigma_i$, нахождение определенного значения безразмерного
- 15 параметра n по уравнению (2).

Недостаток прототипа - трудоемкость и длительность статистического эксперимента.

Предлагаемое изобретение сокращает трудоемкость и длительность эксперимента.

- Задачу решают следующим образом. Как и в прототипе, нагружают образцы материала нагрузкой, воспроизводящей напряженное состояние материала при эксплуатации изделия,
- 20 но в отличие от прототипа предварительно для каждого образца неразрушающим методом (см., например, авт.св. №1620930, МКИ⁵ G01N 29/00, опубл. 15.01.91, Б.И. №2) определяют значение L_0 максимальной неразрушающей нагрузки, а затем, превысив ее, проводят частичные разгрузки (фиг.1), регистрируют активность \dot{N} акустической эмиссии

- 25 (АЭ), а также интервалы времени до возникновения АЭ после каждой частичной разгрузки (Δt_i) и до восстановления активности АЭ (t_i), а по этим результатам судят о значении безразмерного параметра. Для трещины без сосредоточенной нагрузки на ее поверхности и находящейся в поле номинальных напряжений σ КИН записывают [Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие в 4 т. / Под общей редакцией
- 30 В.В.Панасюка. Т.1. Основы механики разрушения. - Киев: Наук. думка, 1988. - 488 с.] в виде $K = Y\sigma a^{1/2}$, где Y - коэффициент, учитывающий соотношения размеров тела и трещины, а также другие ее особенности. Обозначим через ρ размер той зоны перед вершиной трещины (фиг.2), в которой реализуется механизм разрушения микропластическими деформациями, предшествующими образованию новой поверхности; $\rho = \rho_0$ при $\theta = 0$. Если
- 35 условие микропластичности можно записать через компоненты тензора напряжений и параметр Λ , характеризующий свойства материала, то $\rho \sim K^2 \Gamma_{1j}^{\alpha}(\theta) / \Lambda^2$, где Λ имеет размерность напряжения. При заданном θ $\rho \sim K^2 / \Lambda^2$, а

$$d \ln \rho = 2 \ln K = 2d\sigma / \sigma + da / a. \quad (3)$$

- 40 При быстрой разгрузке $da / a = 0$, а $\Delta \rho / \rho = 2\Delta\sigma / \sigma$, где $\Delta \rho$ - уменьшение ρ_0 при снижении σ на $\Delta\sigma$. При дальнейшей выдержке при $\sigma = \text{const}$ трещина будет подрастать, увеличивая K , без АЭ - в силу эффекта Кайзера, Когда трещина подрастет таким образом за время Δt на величину Δa_c (фиг.2), граница новой зоны соприкоснется с границей
- 45 старой. При этом

$$\Delta a_c = |\Delta \rho_0| = \rho_0 |2\Delta\sigma / \sigma| \quad (4)$$

- Дальнейшее подрастание трещины на величину Δa при $\sigma = \Delta\sigma$ будет сопровождаться АЭ и приведет к восстановлению значения ρ_0 (см. короткий пунктир на фиг.2), а следовательно, и K через интервал времени t . В этот момент $\Delta \rho / \rho = 0$, и в
- 50 соответствии с (3)

$$\Delta a / a = |\Delta\sigma / \sigma| \quad (5)$$

В период Δt сопротивление материала распространению трещины ниже обычного, так

как по крайней мере часть микропластических деформаций перед вершиной трещины произошла до частичной разгрузки, и показатель степени в (1) может отличаться от n - его обозначаем через m. На основании (4) запишем

$$\Delta a_{c1} / \Delta a_{c2} = a_1 \sigma_1 \Delta \sigma_1 / a_2 \sigma_2 \Delta \sigma_2 = \sigma_1 \Delta \sigma_1 / \sigma_2 \Delta \sigma_2 (1 + \Delta a_1 / a_1)$$

5 или в соответствии с (5) -

$$\Delta a_{c1} / \Delta a_{c2} = \sigma_1 \Delta \sigma_1 / \sigma_2 \Delta \sigma_2 (1 + \Delta \sigma_1 / \sigma_1), \quad (6)$$

а с учетом (1) -

$$\Delta a_{c1} / \Delta a_{c2} = \Delta t_1 \sigma_1^m / \Delta t_2 \sigma_2^m (1 + \Delta \sigma_1 / \sigma_1)^{m/2}.$$

Подставив этот результат в (6), после логарифмирования получим

$$10 \quad m = \left[\lg \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_2} \frac{\sigma_1}{\sigma_2 (1 + \Delta \sigma_1 / \sigma_1)} \right] / \left[\lg \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma + \Delta \sigma_1}} \right]. \quad (7)$$

Скорость счета АЭ \dot{N} определяется скоростью роста трещины \dot{a} и размером ρ зоны

15 перед вершиной трещины. Величины \dot{a} и ρ определяются значением КИН. В силу этого восстановление \dot{N} после частичной разгрузки свидетельствует о достижении прежнего

значения K при более низкой нагрузке $L = \text{const}$. С учетом этого по аналогии с (7) находим

$$20 \quad n = 2 + \left[\lg \frac{(t - \Delta t)_2}{(t - \Delta t)_1} \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_2} \frac{\sigma_2^3}{\sigma_1^3} \right] / \left[\lg \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma + \Delta \sigma_1}} \right]. \quad (8)$$

Фиг.1. Изменение напряжения σ и активности \dot{N} АЭ при определении безразмерного

параметра неразрушающим методом: σ - напряжение, \dot{N} - активность АЭ, t - время, Δt_i -

25 интервал времени от момента разгрузки до появления \dot{N} АЭ, t_i - интервал времени до восстановления активности АЭ.

Фиг.2. Границы зоны реализации механизма разрушения у вершины трещины (сплошная линия - перед разгрузкой; длиннопунктирная - после частичной разгрузки;

30 штрихпунктирная - в момент касания исходной границы после подрастания трещины; короткопунктирная - после достижения прежнего значения коэффициента интенсивности напряжения, КИН; (a - длина трещины, Δa - приращение a , $\Delta a_c \approx \Delta \rho_0$ - возможное перемещение вершины трещины без АЭ при частичной разгрузке; ρ - радиус-вектор точки на границе зоны при произвольном угле θ ; $\rho_0 = \rho$ при $\theta = 0$).

35 Предложенный способ реализовали изгибом стержней сечением 8x8 мм по четырехточечной схеме (в условиях чистого изгиба) на стандартных устройствах.

Выдержку при σ_1 (фиг.1) проводили не менее 100 с. АЭ регистрировали с помощью прибора

АФ-15 с уровнем собственных шумов 7 мкВ. Использовали резонансный

40 пьезокерамический преобразователь (в диапазоне частот) 20...200 кГц. Предварительные сравнительные испытания показали, что этот преобразователь фиксирует наибольшее количество импульсов АЭ по сравнению с другими при прочих равных условиях. На

образец устанавливали два датчика, каждый с усилием поджатия 2 Н. Для улучшения акустического контакта датчика с поверхностью образца использовали смазку.

Параллельно проводили длительные испытания по способу-прототипу. В таблице

45 приведены значения m и n , определенные с учетом тангенса угла наклона кривых длительной прочности в логарифмических координатах. Ввиду разброса

экспериментальных точек вокруг аппроксимирующих прямых тангенсы угла наклона, а следовательно, и значения m и n , определены с погрешностью 15...20%. Там же

представлены средние m_{cp} и n_{cp} значений m и n , полученных по формулам (7) и (8) при

50 обработке результатов испытаний 16-20 стержней каждой керамики, испытанных с регистрацией АЭ (фиг.1).

Результаты кратковременных и длительных испытаний керамических материалов при $T=295 \pm 2K$				
Керамика	m	n	m_{cp}	n_{cp}
Al ₂ O ₃	8	30	8,0	32

SiC	7	24	6,8	25
Si ₃ N ₄	16	61	15,0	60
MgF ₂	9	29	7,9	34
BaTiO ₃	10	37	11,0	36
Фарфор	10	40	9,9	42
Феррит	10	37	9,5	36
Строительная	10	38	10,0	37

5

Значения m_{cp} и n_{cp} случайно отличались от значений m и n , полученных по результатам длительных испытаний. Коэффициенты вариации значений m и n , рассчитанных по (7) и (8), в среднем составляют 6%, что соответствует погрешности 12% при $P=0,95$. При этом доверительный интервал среднего по 20 результатам не превышает 3%. Следовательно, использование АЭ при определении m_{cp} и n_{cp} позволяет значительно уменьшить погрешность и трудоемкость по сравнению с оценкой m и n по результатам длительных испытаний. Для выяснения возможного влияния размеров изделий на значения m , n и σ_0 их определяли при комнатной температуре с использованием АЭ в условиях изгиба силой посередине пролета трехметровых панелей из строительной керамики, фарфоровых метровых стержней диаметром 200 мм, а также их фрагментов, вырезанных вдоль оси изделия. На каждом изделии или образце определяли от 9 до 16 значений m , n и σ_0 . С этой целью между контрольными нагружениями изделие поворачивали вокруг оси или сдвигали на опорах вдоль оси так, чтобы область приложения силы не перекрывалась с предыдущей по длине образца. Уменьшение объема объекта испытаний приводит к повышению σ_0 , но практически не влияет на значения m , n и их разброс.

15

20

Предложенный способ позволяет оперативно на изделиях определить значения m и n без изготовления образцов за время в сотни раз меньшее, чем требует для этой задачи прототип.

25

Формула изобретения

Способ определения безразмерного параметра развития трещины, включающий нагружение образца различными по значению, но постоянными во времени нагрузками, воспроизводящими напряженные состояния материала образца при эксплуатации изделия, отличающийся тем, что предварительно для образца экспериментально определяют значение максимальной неразрушающей нагрузки, превышают его, а затем проводят частичные разгрузки, регистрируют активность акустической эмиссии, а также интервалы времени до возникновения акустической эмиссии после каждой частичной разгрузки и до восстановления активности акустической эмиссии, и по этим результатам определяют значения безразмерного параметра по выражениям

30

40

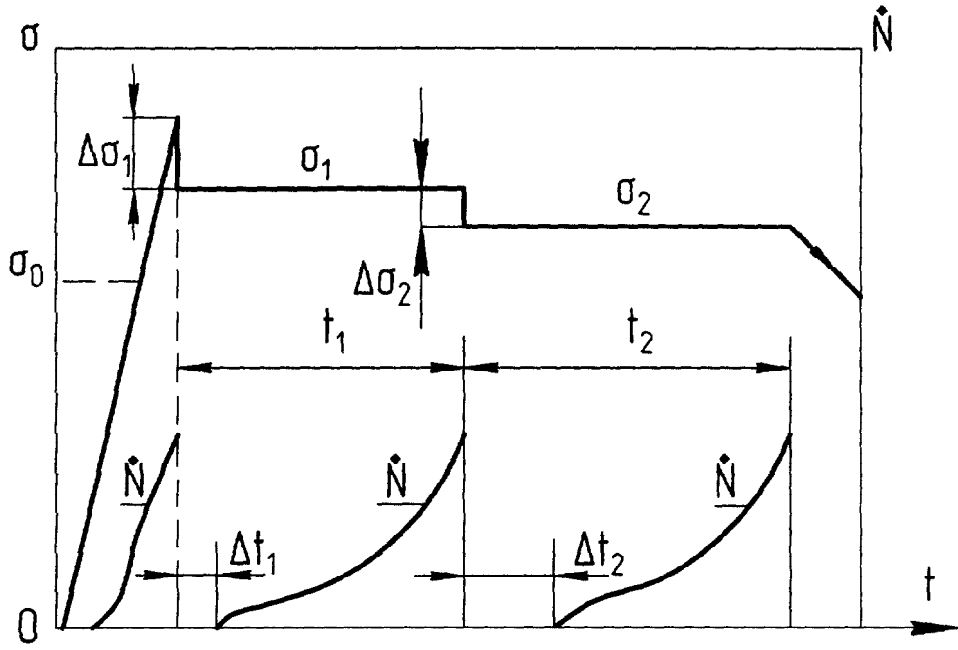
$$m = \left[\lg \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_2} \frac{\sigma_1}{\sigma_2 (1 + \Delta \sigma_1 / \sigma_1)} \right] / \left[\lg \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma + \Delta \sigma_1}} \right];$$

$$n = 2 + \left[\lg \frac{(t - \Delta t)_2}{(t - \Delta t)_1} \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_2} \frac{\sigma_2^3}{\sigma_1^3} \right] / \left[\lg \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma + \Delta \sigma_1}} \right],$$

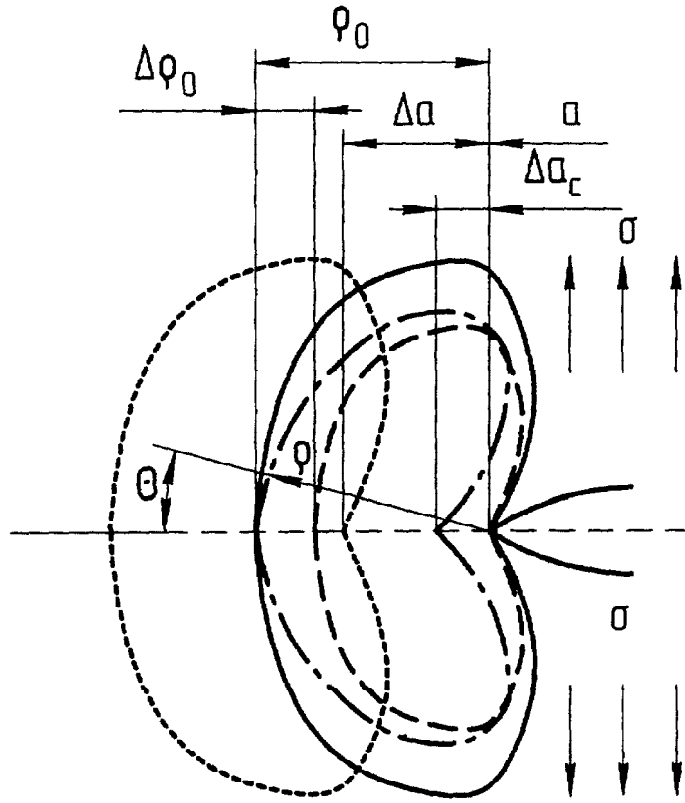
где n и m - значения безразмерного параметра, σ - напряжение, Δt_i - интервал времени от момента разгрузки до появления АЭ, t_i - интервал времени до восстановления активности АЭ.

45

50



Фиг.1



Фиг.2