

На правах рукописи

АМВРОСЬЕВА АННА ВЛАДИМИРОВНА

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН С ТРЕЩИНОЙ**

Специальность 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мусалимов Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ефремов Леонид Владимирович
кандидат технических наук, доцент
Иванов Андрей Юрьевич

Ведущая организация: Институт физики прочности и
материаловедения Сибирского отделения
РАН

Защита состоится “8” декабря 2011 в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при Учреждении Российской Академии Наук Институт проблем машиноведения РАН по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., д. 61

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук
профессор



Дубаренко В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время пьезокерамика все чаще используется в технических устройствах, например, в создании биморфов для пьезоэлектрических схватов, зондов для литографии и другое. (Смирнов А.Б., Голубок А.О., W.S. Hwang, H.C. Park). Функциональные детали из пьезокерамики обычно выполнены в виде стержней или пластин. Как показывают опыты, пьезопластины работают в условиях циклических и статических нагрузок. Поэтому расчеты напряженно-деформированного состояния этих пластин, а также учет наличия трещин и использование средств механики разрушения для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений являются основой прогнозирования работоспособности и надежности конструкции на их основе.

Среди работ, которые посвящены вопросам проектирования пьезокерамических *биморфов* (Andrew J Moskalik, Diann Brei, Hwang W.S), практически не встречаются работы по расчетам на прочность, долговечность и разрушению элементов данных систем. Общие вопросы *механики разрушения* для пьезокерамики развивали в своих работах Партон В.З., Морозов Е.М., Кудрявцев Б.А., Фильштинский М.Л и другие. Хеланном К., Керштейном И.М., Ключниковым В.Д., Ломакиным Е.В., Шестериковым С.А. и другими были обоснованы экспериментальные подходы к классической механике разрушения.

Пьезокерамические элементы, обладающие упругими и электромеханическими свойствами, активно используются в качестве электромеханических преобразователей. Пьезокерамические преобразователи основаны на действии пьезоэлектрических эффектов: *прямой пьезоэффект* (образование электрических зарядов на поверхности тела при его механической деформации) и *обратный пьезоэффект* (это образование деформации при наложении разности потенциалов на его

поверхности). Этим свойством обладают некоторые кристаллы, которые относятся к типу сегнетоэлектриков.

В робототехнике системы с такими свойствами используются как средства для прецизионных перемещений миниатюрных изделий. Проблема оценки прочности элементов пьезокерамических систем и их надежности при наличии трещин относится к разряду актуальных.

Целью диссертационной работы является исследование напряженно-деформированного состояния нагруженных пьезоэлектрических пластин с трещинами, оценивание их прочности, долговечности и надежности.

Задачи исследования. Для достижения этой цели в диссертации были поставлены и решены задачи:

Осуществить постановку и решение задач о напряженно-деформированном состоянии пьезокерамических пластин.

Разработать алгоритм расчета коэффициентов интенсивности напряжений для пьезокерамических пластин с трещиной.

Разработать критерий разрушения пластин с учетом связанности полей.

Разработать программу расчета долговечности и надежности пьезокерамических пластин при работе в системе схватов.

Методы исследования. Основные результаты работы получены аналитически, численными методами теории упругости, классической механики разрушения и механики связанных полей в твердых телах, а также с использованием программных пакетов Ansys 13.0 и MatLab 7.0.1.

Научная новизна и практическая ценность работы диссертации заключается в следующем:

Впервые поставлены и решены задачи о напряженно-деформированном состоянии пьезокерамических пластин, используемых в качестве конструктивных элементов схватов.

Рассчитаны коэффициенты интенсивности напряжений для пьезокерамических пластин с внутренними и поверхностными трещинами. Установлено, что в заданных условиях коэффициент интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва K_I и коэффициент интенсивности напряжений для трещин продольного сдвига K_{II} сравнимы по порядку.

Впервые построен критерий разрушения с учетом связанности полей.

Впервые предложена новая характеристика трещиностойкости «скорость освобождения энергии ускорений», численное значение которой определяется частотой колебательности процесса роста трещин.

Разработана программа расчета долговечности и надежности пьезокерамических пластин и оценен их ресурс при работе в системе схватов.

Впервые предложена зависимость для связи параметров критерия Коффина-Мэнсона и параметров закона распределения Вейбулла.

Материалы диссертационной работы использованы в практических занятиях кафедры Мехатроники СПб НИУ ИТМО по дисциплине «Теория надежности».

На защиту выносятся следующие положения.

Метод решения задач о напряженно-деформированном состоянии пьезокерамических пластин.

Алгоритм расчета коэффициентов интенсивности напряжений для пьезокерамических пластин с трещиной.

Новый критерий разрушения пьезокерамических пластин с учетом связанности полей.

Частотная характеристика трещиностойкости.

Программа расчета долговечности и надежности пьезокерамических пластин при работе в системе схватов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на конференциях: Конференция Молодых Ученых (2008-2011), Девятая сессия международной школы, посвященная памяти В.П. Булатова, Санкт-Петербург (2009), 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, Лиссабон, Португалия (2009), XV International Colloquium Mechanical Fatigue of Metals, Ополе, Польша (2010), XXXIX Неделя Науки СПбГПУ, Международная научно-практическая конференция, Санкт-Петербург (2010), Профессорско-преподавательский состав, Санкт-Петербург (2011), XVII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь (2011), X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 24-30 августа 2011, Нижний Новгород, на семинарах ИПМаш РАН, кафедры Мехатроники СПб НИУ ИТМО, кафедры Триботехники ПИМаш. Работа выполнена в рамках программы Минобрнауки РФ, проект ПНР 1.2.1/1147

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 11 работ, из них 3 – в журналах из перечня ВАК, 2 – в иностранных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 147 наименований. Диссертация изложена на 104 страницах, включает 44 рисунка и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследований, научная новизна, практическая ценность и основные положения выносимые на защиту.

В первой главе кратко приведено описание процесса поляризации в кристаллах и пьезокерамических материалах. Дано описание конструкций – биморфов, и обосновано использование методов механики разрушения для постановки и решения задач о напряженно-деформированном состоянии и

разрушении пластин – составляющих элементов биморфов и используемых для изготовления схватов.

Вторая глава посвящена решению задачи о напряженно-деформированном состоянии пьезоэлектрических пластин. На рис. 2.1 представлена схема включения биморфа, собранного из двух пластин.

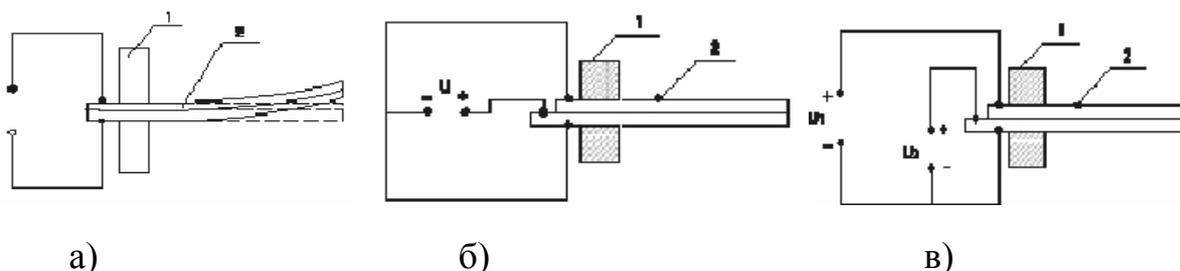


Рис. 2.1 Схема включения биморфа (1 – заделка, 2 – пьезобиморф).

а) последовательное, б) параллельное; в) обе пластины возбуждаются в направлении поляризации.

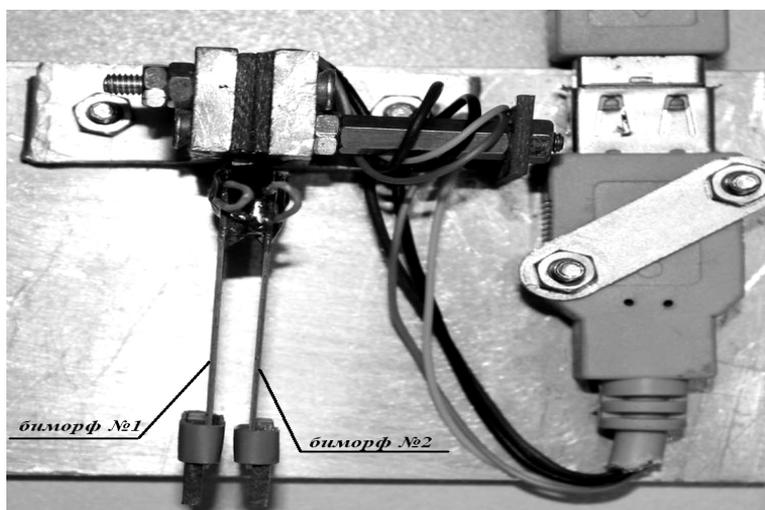
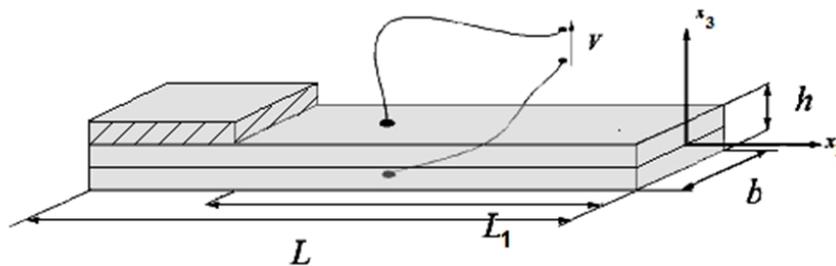


Рис. 2.2 Пьезокерамический схват.

В данной работе рассматривается двухпальцевый пьезоэлектрический схват, (Смирнов А.Б. и Крушинский И.А.), который состоит из двух биморфов (рис. 2.2).

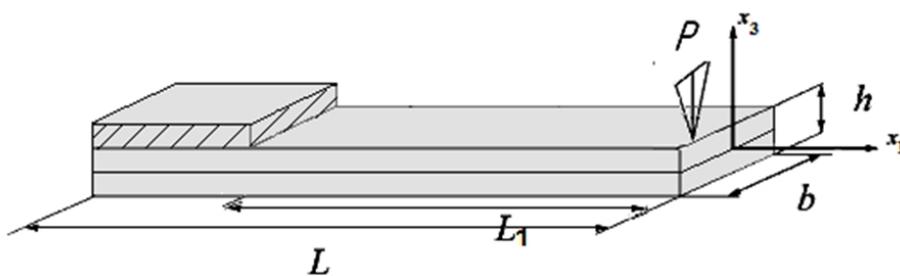
В таблице 2.1 приведены расчетные схемы, используемые в диссертационной работе для анализа напряженно-деформированного состояния пластин.

1



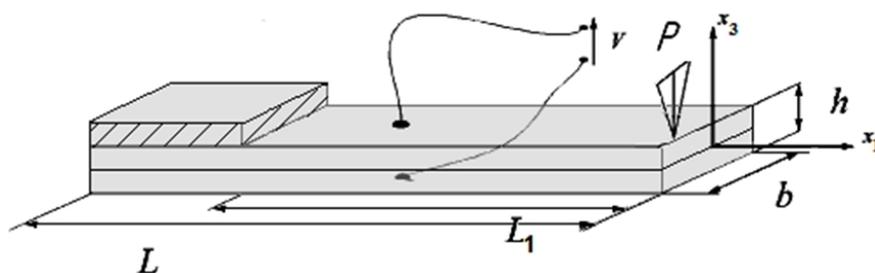
Пластина с электролированными поверхностями

2



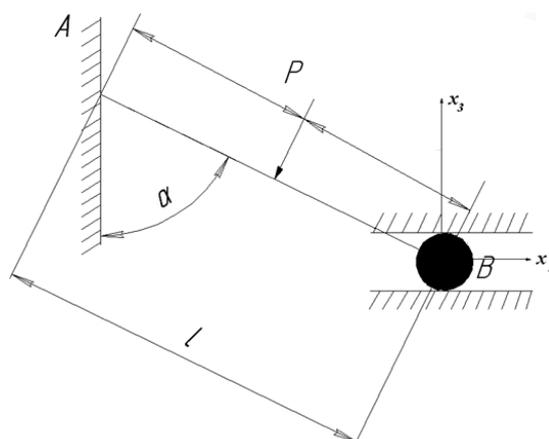
Пластина, нагруженная силой P

3



Пластина, нагруженная силой P и с электролированными поверхностями

4



Пластина, нагруженная силой P

При постановке и решении задач о напряженно-деформированном состоянии были использованы определяющие уравнения пьезоэлектричества (Новацкий В., Бардзокас Д.И., Морозов Е.М. и другие)

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k, \quad (2.1)$$

$$D_i = e_{ikl} \varepsilon_{kl} + \varepsilon_{ij}^s E_j \quad (2.2)$$

В соотношениях (2.1) и (2.2) приняты обозначения: σ_{ij} , ε_{kl} - компоненты тензоров механического напряжения и деформаций, D_i , E_j - компоненты векторов электрической индукции, напряженности электрического поля, c_{ijkl}^E , e_{kij} , ε_{ij}^s - соответственно обозначают модуль упругости пьезосреды, измеряемые при постоянной напряженности электрического поля, пьезоэлектрические постоянные и диэлектрические проницаемости, измеряемые при постоянных деформациях.

Пьезоэлектрическая керамика с определенными пьезоэлектрическими свойствами аналогична по свойствам *ромбической системе класса $mm2$* кристалла. Здесь речь идет о двух взаимно перпендикулярных плоскостях симметрии (плоскостями x_1x_3 и x_2x_3) и с двукратной осью симметрии, параллельной оси x_3 , и для этой системы справедлива система уравнений:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} = 0, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial D_1}{\partial x_1} + \frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0, \quad E_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_1}, \quad E_3 = \frac{\partial \varphi}{\partial x_3}. \quad (2.4)$$

$$\sigma_{11} = \frac{\partial^2 U}{\partial x_3^2}, \quad \sigma_{33} = \frac{\partial^2 U}{\partial x_1^2}, \quad \sigma_{13} = \sigma_{31} = -\frac{\partial^2 U}{\partial x_1 \partial x_3}. \quad (2.5)$$

где функции $U(x_1, x_3)$ и $\varphi(x_1, x_3)$ связаны уравнениями (Морозов Е.М., Бардзокас Д.И.)

$$s_{33}^E \frac{\partial^4 U}{\partial x_1^4} + 2(s_{13}^E + s_{44}^E) \frac{\partial^4 U}{\partial x_1^2 \partial x_3^2} + s_{11}^E \frac{\partial^4 U}{\partial x_3^4} + (2d_{15} - d_{33}) \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x_1^2 \partial x_3} - d_{31} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x_3^3} = 0. \quad (2.6)$$

$$(d_{33} - d_{15}) \frac{\partial^3 U}{\partial x_1^2 \partial x_3} - d_{31} \frac{\partial^3 U}{\partial x_3^3} - \varepsilon_{11}^{\sigma} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} - \varepsilon_{33}^{\sigma} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} = 0, \quad (2.7)$$

где d_{31} , d_{33} , d_{15} - пьезомодули.

Рассмотрены четыре варианта нагружения пластины, занимающей область $0 \leq x_1 \leq L$, $|x_3| < h$ (таблица 2.1).

Далее приведены результаты расчетов для пластины: длина $L = 100$ мм, $L_1 = 80$ мм, высота $h = 2,5$ мм, ширина $b = 22$ мм, приложенное электрическое напряжение к поверхностям пластины $V = \pm 80$ В, пьезомодули $d_{31} = -174 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $d_{33} = 374 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, приложенная сила $P = 5$ Н.

1. Для пластины с электродированными поверхностями с $x_3 = \pm h$ (поляризация по оси x_3) (позиция 1 табл. 2.1), с пьезомодулем d_{31} и с граничными условиями $\varphi|_{x_3 = \pm h} = \pm V_0$, получены решения.

$$u_1 = d_{31} \frac{V_0}{h} (L - x_1) = 1,09 \cdot 10^{-7} M, \quad u_3 = -d_{33} \frac{V_0}{h} = 11,97 \cdot 10^{-6} M,$$

$$\varepsilon_{11} = d_{31} \frac{V_0}{h} L = 0,547 \cdot 10^{-6} M, \quad \sigma_{11} = \varepsilon_{11} \cdot E_{33} = 2,9 \cdot 10^4 \frac{H}{M^2}.$$

2. Для пластины, нагруженной силой P на крае $x_1 = L$ с неэлектродированными поверхностями $x_3 = \pm h$ (позиция 2 табл. 2.1) и с граничными условиями $D_3(x_1, \pm h) = 0$, получены решения.

$$\sigma_{11} = -\frac{P}{I} x_1 x_3 = 17,48 \cdot 10^6 \frac{H}{M^2}, \quad \sigma_{13} = -\frac{P}{2I} (h^2 - x_3^2) = 4 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2},$$

$$u_1 = \frac{P s_{11}^E}{2I} (1 - k_{31}^2) (L^2 + x_1^2) x_3 = 52,05 \cdot 10^{-6} M,$$

$$u_3 = \frac{P s_{11}^E}{2I} (1 - k_{31}^2) \left(\frac{2}{3} L^3 - L^2 x_1 + \frac{x_3^3}{3} \right) = 16 \cdot 10^{-5} M,$$

где $I = \frac{bh^3}{12} = 28,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4$ - момент инерции поперечного сечения балки единичной ширины, $k_{31} = 0,29$ - безразмерный коэффициент, s_{11}^E - упругая податливость, $x_1 = L_1$, $x_3 = \frac{h}{2}$.

3. Для пластины, нагруженной силой P на крае $x_1 = L$ с электродированными поверхностями $x_3 = \pm h$ (позиция 3 табл. 1.1), с пьезомодулем d_{31} и d_{33} , и с граничными условиями $\varphi|_{x_3=\pm h} = \pm V_0$, получены решения.

$$\sigma_{11} = -\frac{P}{I} x_1 x_3 = 17,48 \cdot 10^6 \frac{H}{\text{м}^2}, \quad \sigma_{13} = -\frac{P}{2I} (h^2 - x_3^2) = 10 \cdot 10^4 \frac{H}{\text{м}^2},$$

$$u_1 = d_{31} \frac{V_0}{h} (L - x_1) + \frac{P s_{11}^E}{2I} (1 - k_{31}^2) (L^2 + x_1^2) x_3 = 54,1 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

$$u_3 = -d_{33} \frac{V_0}{h} + \frac{P s_{11}^E}{2I} (1 - k_{31}^2) \left(\frac{2}{3} L^3 - L^2 x_1 + \frac{x_3^3}{3} \right) = 17,2 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

4. Для пластины длиной l консольно закрепленной на стойке под углом α к вертикали и нагруженной силой P на расстоянии a от заделки перпендикулярной его оси получены решения.

$$M_{\max} = 0,19P = 0,95 \text{ Н}.$$

$$\Delta \bar{X} = \frac{1}{EF} [H \cos \alpha \sin \alpha l^2] + \frac{1}{GF} [Pb^2 \cos \alpha b - H \sin \alpha \cos \alpha (l - b)^3] -$$

горизонтальное перемещение точки B .

Третья глава посвящена развитию методов оценки трещиностойкости, постановке и решению задач механики разрушения пьезокерамических пластин.

В главе приведен смешанный критерий разрушения

$$G_c = G_I + G_{II}, \quad (3.1)$$

который выражается через коэффициенты интенсивности напряжений так

$$G_c = \frac{(1-\nu^2)(K_I^2 + K_{II}^2)}{(1-\nu)/E} \quad (3.2)$$

K_I - коэффициент интенсивности для трещины нормального отрыва;

K_{II} - коэффициент интенсивности для трещины поперечного сдвига.

E - модуль упругости.

Из (3.1) следует

$$\frac{\sigma^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} = 1 \quad (3.3)$$

$$a^2 = \frac{G_c 4d_{13}}{\pi l(1+4\chi^2)} \text{ и } b^2 = \frac{G_c \Lambda d_{13}}{\pi l(1+4\chi^2)} \quad (3.4)$$

Введены обозначения

$$D^2 = \frac{Gd}{l} \quad (3.5)$$

$$a^2 = D^2 \pi 4(1+4\chi^2), \quad b^2 = D^2 \pi \Lambda(1+4\chi^2) \quad (3.6)$$

В (3.4) пьезомодуль d , интенсивность освобождения энергии G (скорость освобождения энергии) и длина трещины l связаны зависимостью, вычисляющую пьезофизическую величину D^2 , которая имеет размерность «напряжение в квадрате». Из (3.2) и (3.3) вытекает силовой критерий

$$K_I^2 + \frac{K_{II}^2}{1-\nu} = const, \quad const = \frac{1-\nu}{EG_c} \quad (3.7)$$

Показано, что характеристики трещиностойкости ($G_c = 2\gamma$) и частота колебательности ω процесса роста трещины определяют скорость освобождения энергии ускорений – новую частотную характеристику трещиностойкости $\Gamma = \gamma\omega^2$.

На основании расчетов напряжений в первой главе и учитывая поправочный коэффициент для конечного тела $Y\left(\frac{l}{L}\right)$, найдены коэффициенты интенсивности напряжений для трещины в пьезопластине.

Из множества рассмотренных задач в диссертации (растяжение, сжатие, чистый изгиб, поперечный изгиб), в автореферате представлено только четыре задачи с поверхностной трещиной.

1. Для пластины с электродированными поверхностями с $x_3 = \pm h$ (поляризация по оси x_3) (позиция 1 табл. 1.1) с граничными условиями $\varphi|_{x_3=\pm h} = \pm V_0$ поправочный коэффициент берется из расчетов для задачи чистого изгиба, потому что нагружение биморфа напряжениями σ_{11} аналогично нагружению моментами M (парой сил) (рис. 3.1):

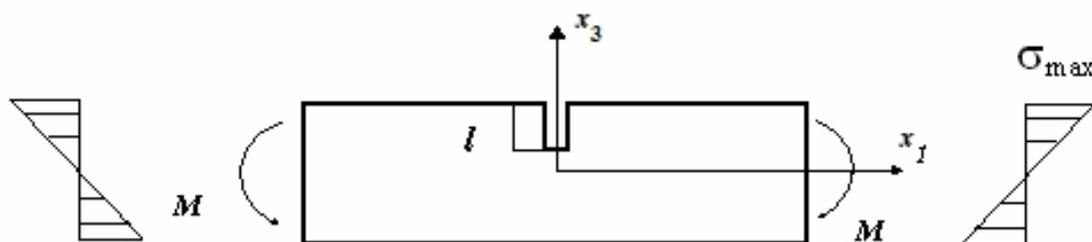


Рис. 3.1 Трещина, расположенная на поверхности пластины

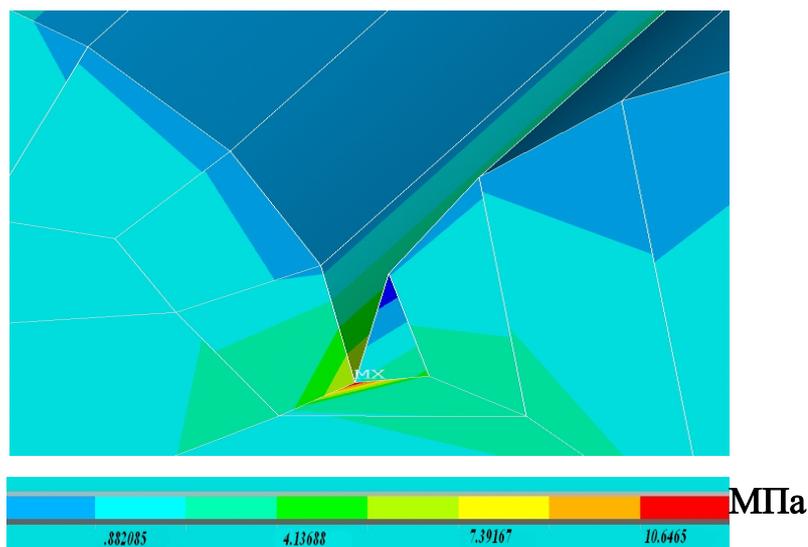


Рис. 3.2 Напряжение в кончике трещины

На рис. 3.2 приведено решение данной задачи с помощью пакета Ansys 13.0.

$$\varepsilon_{11} = d_{31} \frac{V_0}{h} L = 0,547 \cdot 10^{-6}, \quad \sigma_{11} = \varepsilon_{11} \cdot E_{33} = 2,9 \cdot 10^4 \frac{H}{M^2},$$

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{\frac{h}{2}-l}^{\frac{h}{2}} \sigma_y(x) \frac{\sqrt{l+x}}{\sqrt{l-x}} dx = \frac{M}{I\sqrt{\pi l}} \int_{\frac{h}{2}-l}^{\frac{h}{2}} \frac{x(l+x)}{\sqrt{l^2-x^2}} dx = 1,4 \cdot 10^3 \frac{H}{M^2}. \quad (3.8)$$

где $\sigma = \frac{M}{I}x$, $M = N \cdot h$, $N = \sigma_{11} \cdot S$,

2. Для пластины, нагруженной поперечной силой P на крае $x_1 = L$ с неэлектродированными поверхностями $x_3 = \pm h$ (позиция 2 табл. 1.1) и с граничными условиями $D_3(x_1, \pm h) = 0$ поправочный коэффициент берется из решения задач для поперечного изгиба (рис. 3.3):

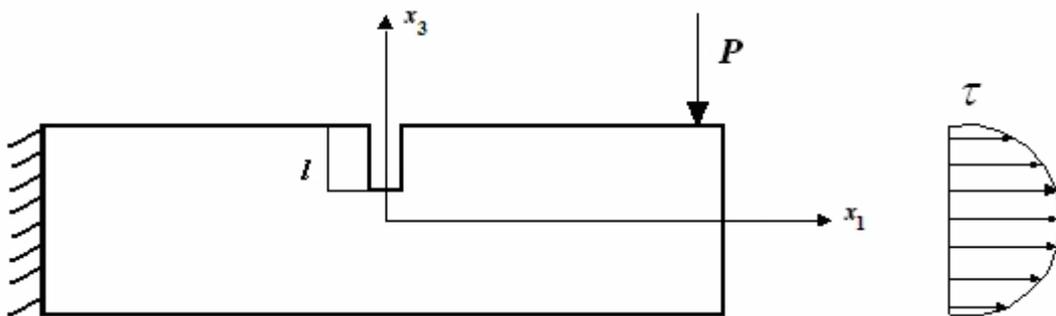


Рис.3.3 Трещина, расположенная на поверхности пластины

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} l \int_{\frac{h}{2}-l}^{\frac{h}{2}} \tau_{yx}(x) \frac{\sqrt{l+x}}{\sqrt{l-x}} dx = \quad (3.9)$$

$$= \frac{3P}{2bh\sqrt{\pi l}} \int_{\frac{h}{2}-l}^{\frac{h}{2}} \left(1 - \frac{4}{h^2}x^2\right) \frac{(l+x)}{\sqrt{l^2-x^2}} dx = 6,9 \cdot 10^3 \frac{H}{M^2}$$

где $\tau = \frac{3P}{2bh} \left(1 - \frac{4}{h^2}x^2\right)$

3. Для пластины, нагруженной силой P на крае $x_1 = L$ с электродированными поверхностями $x_3 = \pm h$ (позиция 3 табл. 1.1) и с граничными условиями $\varphi|_{x_3=\pm h} = \pm V_0$ рассчитаны эффективный коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_{\varphi}^2 = K_I^2 + K_{II}^2,$$

$$K_{\varepsilon\phi} = 7,2 \cdot 10^3 \frac{H}{M^2} \quad (3.10)$$

- эффективный коэффициент интенсивности напряжений

4. Для пластины длиной l консольно закрепленной на стойке под углом α к вертикали и нагруженной силой P на расстоянии a от заделки перпендикулярной его оси (позиция 4 табл. 1.1), поправочный коэффициент берется из решения задачи о трехточечном изгибе (Хеллан К., Шестериков С.А.):

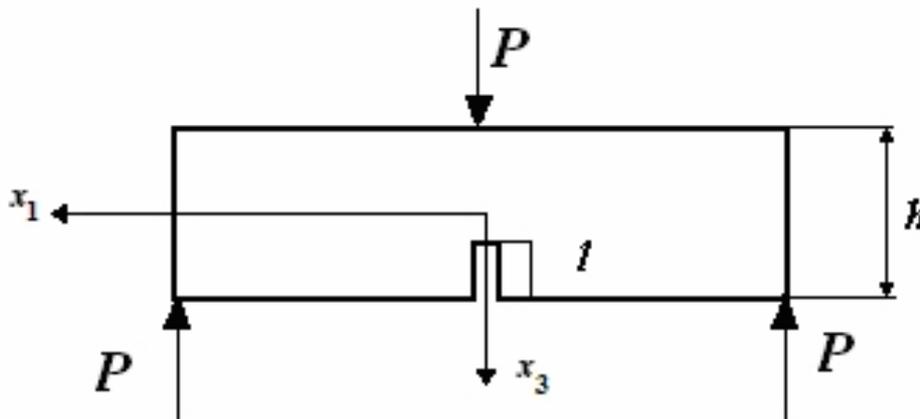


Рис. 3.4 Трещина, расположенная на поверхности пластины

$$K_I = 3,75 \frac{Ph}{t(h-l)^2} = 6,1 \cdot 10^3 \frac{H}{M^2}$$

Четвертая глава посвящена расчету усталости пьезопластин. Сопротивление разрушению при циклическом деформировании существенно зависит от характера нагружения и деформационных свойств материала. Пьезоэлектрические (пьезокерамические) пластины находятся в условиях жесткого нагружения – при постоянных амплитудах деформации. При фиксированной циклической деформации напряжения от цикла к циклу снижаются; затем размах напряжений стабилизируется, и он определяет долговечность элемента. Долговечность, в свою очередь, определяется числом циклов до разрушения.

Для решения задачи о долговечности пьезопластин без трещины используется зависимость

$$[\sigma_{-1}] = 0,375\sigma_B, \quad (4.1)$$

где σ_{-1} - предел усталости,

σ_B - предел прочности;

и зависимость Коффина-Мэнсона

$$(4.2) \quad N = e^{\frac{\ln(\frac{L}{\sigma_{\max}})}{\lambda}}$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение, E – модуль упругости, N – число циклов до разрушения, L и λ – константы.

Для решения задачи о долговечности пьезопластин с трещиной используется закон Пэриса, где существенную роль играет размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK , который связан с размахом напряжений $\Delta\sigma$

$$\frac{dl}{dN} = C_1(\Delta K)^n, \quad \text{где} \quad (4.3)$$

$\frac{dl}{dN}$ – текущая интенсивность роста трещины;

n – числовой параметр, изменяющийся обычно в пределах от 2 до 8;

C_1 – зависящая от n размерная константа материала.

Для расчета N -циклической долговечности были приняты значения $n = 4$

и $C_1 = 5 \cdot 10^{-13} \frac{M}{(MПа\sqrt{m})^n}$ (К. Хеллан).

Получено значение $N = 0,5 \cdot 10^{21}$ цикла.

Далее обоснован подход к решению проблемы надежности рассматриваемой системы. Установлено, что значительную ошибку в расчеты вносят погрешность физико-механических свойств пьезокерамики и не четко определенная геометрия пластин. Всё это говорит о том, что

целесообразно использовать вероятностный подход при определении надежности пластин.

Для описания усталостных отказов используется распределение Вейбулла (Ефремов Л.В., Светлицкий В.В.).

Критерий Коффина-Мэнсона можно преобразовать к виду:

$$\ln N = \frac{\ln 3,5 + \ln \frac{\sigma_m}{\sigma_{\max}}}{\chi} \quad (4.4)$$

В диссертации закон распределения Вейбулла преобразован к виду

$$\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) = \frac{\ln \lambda - \ln \frac{C}{t_0}}{C-1}, \quad (4.5)$$

что позволило связать его параметры с параметрами критерия Коффина-Мэнсона (4.4). Приравниваются $\ln N$ и $\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$, где t_0 – масштабный

коэффициент, связывающий время и число циклов колебаний, тогда

$$\lambda = \frac{C}{t_0} \left(3,5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{\max}}\right)^{\frac{C-1}{\chi}} \quad (4.6)$$

Данное выражение связывает параметры критерия Коффина-Мэнсона и закона распределения Вейбулла, то есть физические параметры и параметры распределения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые поставлены и решены задачи о напряженно-деформированном состоянии пьезокерамических пластин, используемых в качестве конструктивных элементов схватов.

2. Рассчитаны коэффициенты интенсивности напряжений для пьезокерамических пластин с внутренними и поверхностными трещинами. Установлено, что в заданных условиях коэффициент интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва K_I и

коэффициент интенсивности напряжений для трещин продольного сдвига K_{II} сравнимы по порядку.

3. Впервые построен критерий разрушения с учетом связанности полей.
4. Впервые предложена новая характеристика трещиностойкости «скорость освобождения энергии ускорений», численное значение которой определяется частотой колебательности процесса роста трещин.
5. Разработана программа расчета долговечности и надежности пьезокерамических пластин и оценен их ресурс при работе в системе схватов.
6. Предложена зависимость для связи параметров критерия Коффина-Мэнсона и параметров закона распределения Вейбулла.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

Амвросьева А.В., Мусалимов В.М. Усталостное разрушение миниатюрного пьезоэлектрического схвата. // Известие вузов. Приборостроение. Т. 54 №1, 2011. С. 145-148.

Амвросьева А.В., Мусалимов В.М. Связанные поля перемещений в нагруженной пьезокерамической консоли с трещиной. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011 №4 (4). С. 1347-1348.

Амвросьева А.В., Мусалимов В.М. Расчет усилий в клеммных соединениях. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 48. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. С.81-86.

Прочие публикации:

Амвросьева А.В. Смешанный критерий прочности для пьезокерамических конструкций // Сборник трудов XVII Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2011. С. 23-24.

Амвросьева А.В. Смешанный критерий разрушения пьезоэлектрика. // Сборник трудов XXXIX Недели Науки СПбГПУ, 6-11 декабря 2010. –

СПб: Издательство Политехнического университета, 2010. С. 6-7.

Амвросьева А.В., Мусалимов В.М., Дудьева Е.П. Механизм разрушения клеммы с плоскопружинным зажимом. // Сборник трудов Девятой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы машин и механизмов».- СПб: ИПМАШ РАН, 2009. С. 145-149.

A. Amvrosieva, V. Musalimov. Fatigue fracture of miniature piezoelectric grabs. Proceedings of XV International Colloquium Mechanical Fatigue of Metals, Opole, 2010. С. 13-14.

A. Amvrosieva, V. Musalimov. Fracturing Mechanism the Push-Wire Connector. Proceedings of 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, Lisbon, 2009. Pap_0138_MS-06.

Амвросьева А.В. Эквивалентный стержень с двумя степенями неопределенности в задаче механики разрушения для трещины продольного сдвига. // Сборник трудов VI Всероссийский межвузовской конференции молодых ученых. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. С. 142-143.

Амвросьева А.В. Механизм разрушения клеммы с плоскопружинным зажимом. // Сборник трудов VII Всероссийский межвузовской конференции молодых ученых. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. С. 73-77.

Амвросьева А.В. Расчет усилий в клеммных соединениях. // Сборник трудов V Всероссийский межвузовской конференции молодых ученых. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. С. 81-86.

Мусалимов В.М., Ротц Ю.А., Астафьев С.А., Амвросьева А.В. Расчет надежности упругих подвесов микромеханических приборов. Учебное пособие по дисциплине «Теория надежности». Издательство, СПб НИУ ИТМО, 2011. 120 С.

Тиражирование и брошюровка выполнены в учреждении
"Университетские телекоммуникации"
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49.
Тел. (812) 2334669.
Объем 1 печ. л.
Корректор Мусалимов В.М.
Тираж 100 экз.