ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОТ РАЗРУШЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

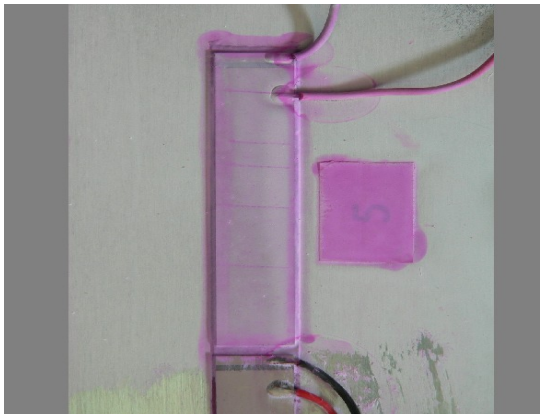
RESEARCH ON THE PROTECTION OF PIEZOCERAMIC TRANSDUCERS FROM THE DESTRUCTION BY MECHANICAL LOADING

Asoc. prof. Pavelko I.
Institute of Aviation – Faculty of Transport and Mechanical Engineering – Riga Technical University, Latvia

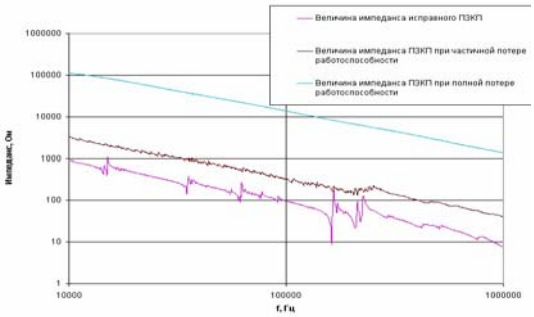
The main issues are considered in this topic: the problem of securing sensitive elements of the integrated system of continuous monitoring of technical condition of aircraft, creation of a pre-stressed design of the piezoceramic transducer, calculation of the required tightness in the perforated lining, experimental checking the mechanical strength of the piezoceramic transducer under static and cyclic loading.
KEY WORDS: *PIEZOCERAMIC TRANSDUCER, DEVICE FOR PRE-STRETCH OF A DURALUMIN LINING, REQUIRED TIGHTNESS*

1. Введение

Одним из перспективных путей эффективного решения проблемы контроля технического состояния конструкции является создание встроенных систем мониторинга, способных непрерывно в автоматическом режиме следить за появлением повреждений и оценивать их опасность. Такие системы должны обеспечивать точность и надежность обнаружения дефекта. С точки зрения статистики это значит, что, с одной стороны, должна быть сведена к минимуму вероятность пропуска дефекта при его наличии (ошибка первого рода), а с другой, очень малой должна быть вероятность ложного срабатывания (ошибка второго рода). Один из подходов предполагает использование активных ультразвуковых волн Лэмба для обнаружения усталостных трещин в тонкостенных элементах конструкции, что является основной задачей исследований, выполняемых в рамках европейских исследовательских проектов AISHA и AISHAII. Для обнаружения усталостной трещины используется теневой метод: ослабление интенсивности сигнала, если на его пути оказывается дефект. Технология ультразвукового контроля предусматривает возбуждение ультразвукового импульса пьезокерамическим излучателем и прием сигнала таким же приемником. По результатам исследований все параметры интенсивности сигнала показали тесную корреляцию с размером усталостной трещины [1, 2]. Другое важное требование к системе – сохранение функциональной способности пьезокерамических преобразователей (ПЗКП) и их соединения с поверхностью детали при длительном усталостном нагружении. По характеру электрического импеданса ПЗКП можно судить о том, что если ПЗКП ориентированы перпендикулярно к нагрузке, то эффект влияния длительного циклического нагружения приемлемо мал. Однако при других условиях ориентации и нагружения механическая прочность ПЗКП может оказаться недостаточной. В частности, это проявилось при ориентации ПЗКП в направлении действия растягивающей нагрузки. На фиг.1 иллюстрируется множественные трещины в ПЗКП Piezoceramic PIC151 (PI Piezoceramic), размерами 0.5x10x50mm, возникшие при усталостных испытаниях панели и выявленные методом проникающих красок. В этом случае фиксируется полная потеря работоспособности ПЗКП. Полная или частичная потеря работоспособности ПЗКП легко выявляется измерением электрического импеданса (фиг.2). Таким образом, проблема исключения или ослабления эффекта усталости является весьма актуальной для данного типа ПЗКП.



Фиг. 1. Вид пьезокерамического преобразователя, вышедшего из строя в результате циклического растяжения в продольном направлении.



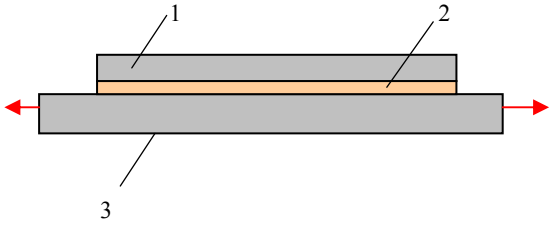
Фиг. 2. Вид импедансных кривых пьезокерамических преобразователей в зависимости от их технического состояния.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

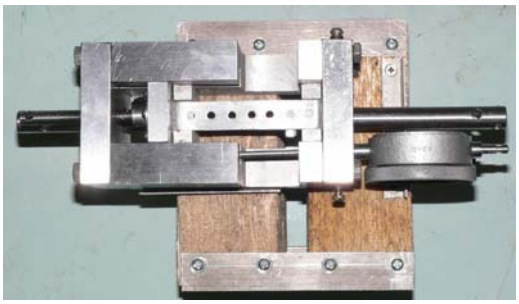
Очевидно, что техническое решение вышеназванной проблемы помимо эффективной защиты ПЗКП должно обеспечивать сохранение ими достаточно высокой чувствительности. Полная или частичная потеря работоспособности связана с очень низким сопротивлением пьезокерамики при растяжении [3]. Поэтому первоначально предпринимались попытки установки ПЗКП на образец через резину, через плексиглас, а также через так называемый «волновод» (фиг. 3). Однако, в связи с неприемлемой потерей чувствительности ПЗКП, от этих решений пришлось отказаться. Известно, однако [3], что при сжатии пьезокерамика имеет достаточно высокую прочность

(более 600 МПа). Поэтому есть основание предполагать, что устойчивость против статического и усталостного разрушения пьезокерамики может быть повышена путем создания такого соединения, в котором ПЗКП предварительно сжат (фиг. 4). Через накладку 1 должны проходить два проводника, идущие к обкладкам конденсатора ПЗКП, поэтому накладка выполнялась перфорированной (фиг. 5), в ней было высверлено 7 отверстий диаметром $d_o = 4$ мм с шагом $t = 10$ мм.

Фиг. 3. Схема установки пьезокерамического преобразователя на образец через «волновод».



Фиг. 4. Схема ПЗКП, защищенного от разрушения при растяжении.
1 – предварительно растянутая дюралюминиевая накладка (1x15x70мм); 2 – пьезокерамический преобразователь (0,5x10x50мм); 3 – элемент конструкции



Фиг. 5. Общий вид устройства для создания предварительного растяжения перфорированной дюралюминиевой накладки.

3. *Решение проблемы*

3.1. Технология создания предварительно напряженной конструкции датчика

Для предварительного растяжения дюралюминиевой накладки было изготовлено специальное устройство (фиг. 5). Предварительно отогнутые под прямым углом концы накладки зажимаются в захватах стяжными винтами. При помощи винтового механизма подвижный захват перемещается в продольном направлении, растягивая накладку. Это перемещение фиксируется индикатором, ножка которого упирается в подвижный захват. Таким образом, в накладке создаются потребные растягивающие напряжения. На накладку, растянутую до $\sigma \approx 210 MPa$ наклеивается пьезокерамический преобразователь с предварительно припаянными проводами, которые пропускаются через отверстия в накладке. После засыхания клея накладка с ПЗКП снимается с устройства. Ее отогнутые концы аккуратно обрезаются. В результате разгрузки накладки ПЗКП становится сжатым до соответствующего значения напряжений. Затем свободная поверхность предварительно сжатого ПЗКП наклеивается на объект испытаний.

3.2. Оценка потребного растяжения накладки

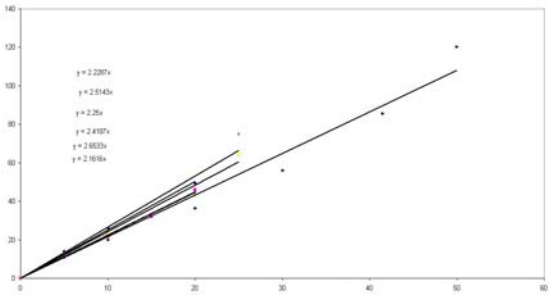
1) Получена корреляционная зависимость между показаниями индикатора (ось OY, фиг. 6) и измеряемой тензометром Гугенбергера деформацией накладки (ось OX, фиг. 6). На основании данной зависимости найден коэффициент корреляции в области упругих деформаций накладки $K = 2.371$. Далее была получена зависимость между показаниями индикатора ind и растягивающими напряжениями σ в накладке. С одной стороны, умножением показания тензометра Гугенбергера hug на коэффициент ***K*** получается соответствующее значение ind; с другой, зная относительное удлинение накладки $\varepsilon = \dfrac{hug}{2 \cdot 10^4}$ по закону Гука определялось соответствующее напряжение $\sigma = E\varepsilon$, где $E = 7 \cdot 10^4\ MPa$. Результаты расчета сведены в таблицу 1. Следует отметить, что данный расчет является приблизительным, т.к. растягивающие напряжения в поперечном сечении перфорированной накладки распределены неравномерно. Таким образом, в первом приближении для создания в накладке натяга $\sigma = 210\ MPa$, ее необходимо растянуть до w_0=60 делений тензометра Гугенбергера.

Таблица 1. Результаты расчета потребного удлинения сплошной накладки

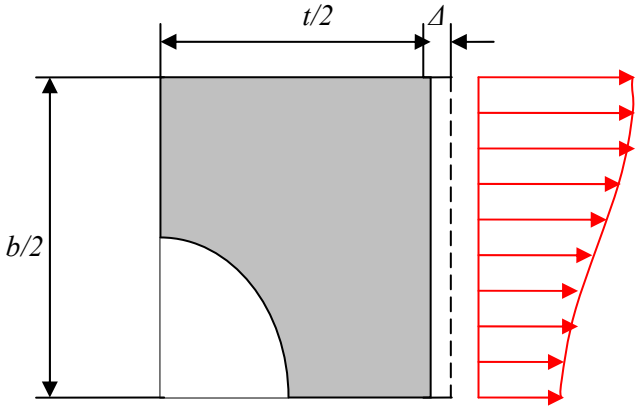
kug	ε	σ, Mpa	ind
0	0	0	0
5	0.00025	17.5	11.8555
10	0.0005	35	23.711
15	0.00075	52.5	35.5665
20	0.001	70	47.422
24.5	0.001225	85.75	58.09195
30	0.0015	105	71.133
35	0.00175	122.5	82.9885
41.5	0.002075	145.25	98.40065
50	0.0025	175	118.555
60	0.003	210	142.266
63	0.00315	220.5	149.3793

Таблица 2. Результаты расчета потребного удлинения перфорированной накладки

x (mm)	σ_y (MPa)	Int_σdx	P (N)	Δ (mm)	λ (m/N)	λ_0 (m/N)	w (mm)
0	95.7		3774.91125	0.02	5.29814E-09	4.329E-09	0.073432
0.375	101.6	36.99375			λ/λ_0	1.223869833	
0.75	113.5	40.33125	t/2 (mm)	5	w_0_real (mm)	0.049024821	
1.125	130.3	45.7125	E (Mpa)	70000	σ_real (Mpa)	171.586875	
1.5	150.6	52.66875	b_0 (mm)	15			
1.875	172.5	60.58125	δ (mm)	1.1			
2.25	194.2	68.75625	σ_potr (Mpa)	210			
2.625	214	76.5375	w_0 (mm)	0.06			
3	231.6	83.55					
3.375	246.3	89.60625					
3.75	258	94.55625					
4.125	267.6	98.55					
4.5	273.4	101.4375					
4.875	278	103.3875					
5.25	281.7	104.9438					
5.625	285	106.2563					
6	288.1	107.4563					
6.375	291.5	108.675					
6.75	295.6	110.0813					
7.125	300.7	111.8063					
7.5	307.2	113.9813					
		1715.869					



Фиг. 6. Результаты тарировки индикатора

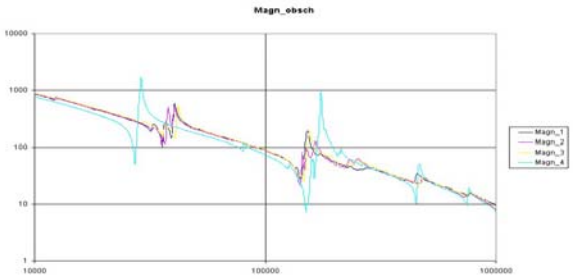


Фиг. 7. Расчетная схема для определения упругой податливости накладки

2) Получена уточненная связь усилия в перфорированной накладке с ее деформацией. Для ячейки накладки задается перемещение Δ на кромке и условия симметрии относительно осей отверстия (фиг. 7), методом конечных элементов определяется распределение растягивающих напряжений σ_x в крайнем сечении ячейки, а затем численным интегрированием определяется нормальная сила:

$$P = 2\delta \int_0^{b/2} \sigma_x dy \approx 2\delta \sum_{k=1}^{n} \frac{\sigma_{x,k-1} + \sigma_{x,k}}{2} \Delta y, \qquad (1)$$

где δ – толщина накладки, $\sigma_{x,k}$ - напряжения в точках сетки конечных элементов на правой кромке ячейки, Δy - шаг снятия значений $\sigma_{x,k}$. Далее вычислены: податливость перфорированной накладки: $\lambda = \frac{\Delta}{P}$; податливость базовой накладки (сплошной) шириной $b = 15$ мм: $\lambda_0 = \frac{t/2}{Eb\delta}$; степень предварительного растяжения перфорированной накладки для получения необходимого натяга. При использовании тензометра Гугенбергера накладка на его базе (20 мм) должна иметь абсолютное удлинение, оцениваемое по формуле $w = w_0 \frac{\lambda}{\lambda_0}$, где w_0=60 делений в соответствии с выполненным ранее расчетом первого приближения. Результаты расчета сведены в таблицу 2. Как видно из нее, ввиду увеличения податливости накладки в результате ее перфорирования в 1.224 раза, необходимо создать абсолютное удлинение перфорированной накладки w=73.4 деления тензометра Гугенбергера, что соответствует **174 делениям индикатора**. После изготовления предварительно напряженных ПЗКП была выполнена проверка их



Фиг. 8. Вид импедансных кривых пьезокерамических преобразователей:
1, 2, 3 – предварительно напряженных;
4 – ненапряженного.

работоспособности на основании измерения электрического импеданса и сопоставления с импедансом ненапряженного ПЗКП. Отмечено, что импеданс напряженных ПЗКП (1, 2, 3) заметно отличается от импеданса ненапряженного ПЗКП (4), при этом работоспособность ПЗКП в результате предварительного сжатия не теряется (фиг. 8).

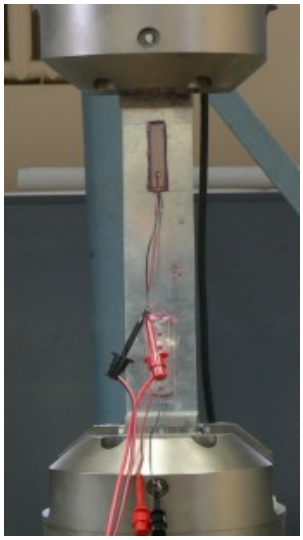
4. Результаты и дискуссия

4.1.Проверка механической прочности пьезокерамического преобразователя при статическом нагружении.

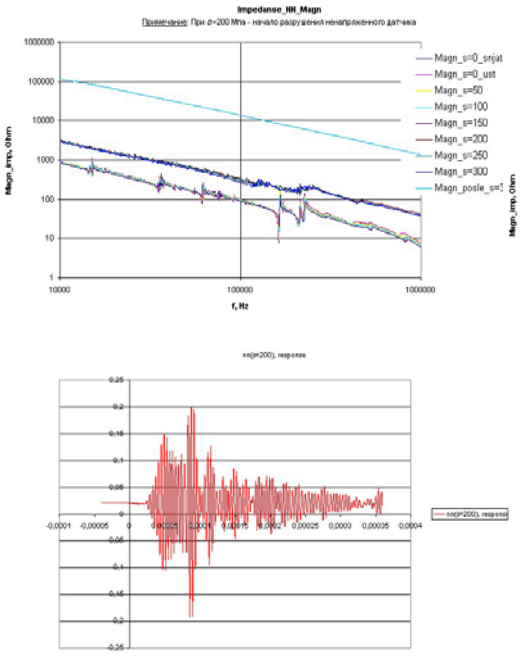
На гладкий образец размерами рабочей части 1x15x230мм (полная длина 300мм) в направлении действия растягивающей нагрузки на расстоянии 140мм между центрами (90мм между краями) были наклеены один предварительно напряженный (далее в тексте - ПН) и один ненапряженный (далее в тексте - НН) ПЗКП. На испытательной машине “Instron” производилось статическое нагружение данного образца (фиг. 9) со ступенчатым увеличением нагрузки.

После каждой ступени нагрузки производилось измерение значения электрического импеданса, а также (до разрушения НН ПЗТ) отклика «ПН ПЗКП (возбудитель) – НН ПЗКП (приемник)» (фиг. 10.*а*) и «НН ПЗКП (возбудитель) – ПН ПЗКП (приемник)» (фиг. 10.*б*); Задавались следующие ступени нагружения: σ = 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 МПа. По результатам статических испытаний отмечено следующее:

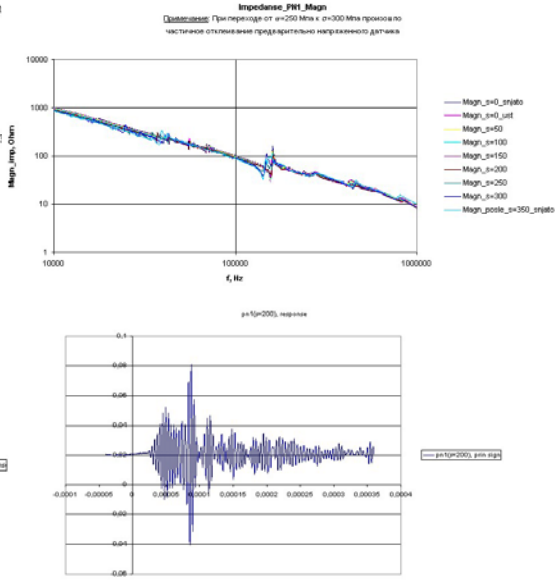
- начало разрушения НН ПЗКП при переходе от 150 к 200 МПа;
- полное разрушение НН ПЗКП при переходе от 300 к 350 МПа (фиг. 11.*а*);
- частичное отклеивание ПН ПЗКП начавшееся при переходе от 250 к 300 МПа (фиг. 11.*б*);
- ПН ПЗКП оставался работоспособным на всем протяжении испытаний, хотя наблюдалось некоторое снижение чувствительности.



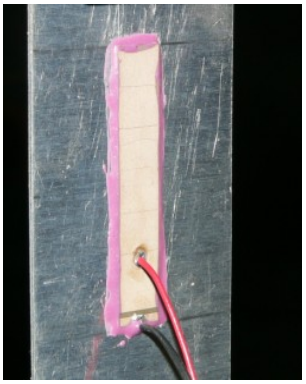
Фиг. 9. Образец с одним предварительно напряженным и одним ненапряженным ПЗТ на прочностных испытаниях.



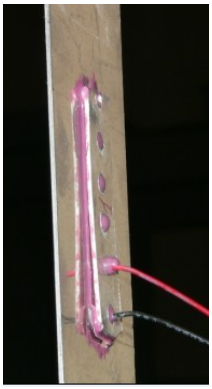
Фиг. 10а. Электрический импеданс НН ПЗКП при различных статических нагрузках и отклик НН ПЗКП при σ=200 МПа.



Фиг. 10б. Электрический импеданс ПН ПЗКП при различных статических нагрузках и отклик ПН ПЗКП при σ=200 МПа.



а



б

Фиг. 11. Вид НН ПЗКП (а) и ПН ПЗКП (б) после статических испытаний

4.2.Проверка механической прочности пьезокерамического преобразователя при усталостном нагружении.

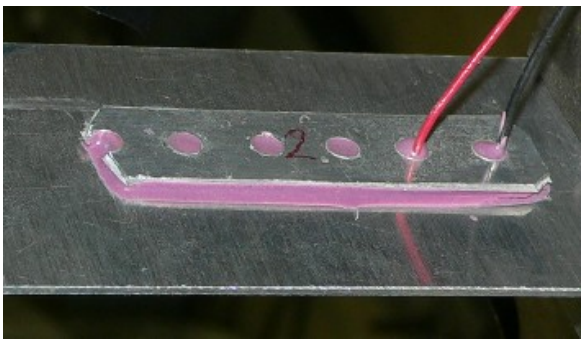
Эксперимент был выполнен после успешного завершения статических испытаний. На гладкий образец размерами рабочей части 1x15x230мм (полная длина 300мм) в направлении действия растягивающей нагрузки на расстоянии 90мм между центрами (40мм между краями) были наклеены один ПН ПЗКП и один НН ПЗКП. На испытательной машине “Instron” производилось циклическое нагружение данного образца (фиг. 12) на следующих режимах:

Таблица 3. Режимы усталостного нагружения

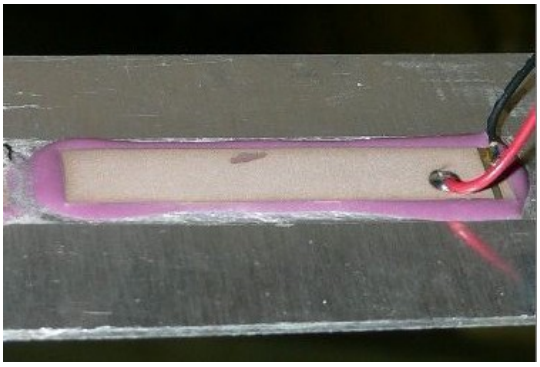
σ_{max} цикла, МПа	σ_{min} цикла, МПа	Число циклов, млн.
90	30	4
120	40	0.5 (4.1 - 4.5)
150	50	1.5 (4.6 - 6)

По результатам усталостных испытаний отмечено следующее:
- частичное отклеивание ПН ПЗКП (фиг.13.*а*), начавшееся после 0.2 млн. циклов на режиме 120/40 МПа (4.2 млн. циклов с момента начала испытаний);
- полное разрушение НН ПЗКП (фиг. 13.б) после 0.14 млн. циклов на режиме 150/50 МПа (4.64 млн. циклов с момента начала испытаний);
- ПН ПЗКП оставался работоспособным на всем протяжении испытаний, хотя наблюдалось некоторое снижение чувствительности.

Фиг. 12. Испытательная машина с установленным образцом и подключенной контрольно-измерительной аппаратурой при усталостных испытаниях.



а



б

Фиг. 13. Вид ПН ПЗКП (а) и НН ПЗКП (б) после усталостных испытаний

5. Заключение

В результате проведенных исследований разработан и экспериментально проверен эффективный способ защиты пьезокерамтческих преобразователей ультразвуковых сигналов от разрушающего влияния усталостного растяжения. Наблюдаемое при этом снижение чувствительности ПЗКП является приемлемым для обнаружения дефекта достаточно малых размеров. В настоящее время проводятся дополнительные исследования для выявления оптимального предварительного натяжения накладки с точки зрения, как защищенности ПЗКП, так и его чувствительности. Выявлена дополнительная проблема частичного отклеивания ПН ПЗКП после долговременного циклического нагружения, требующая отдельного решения.

Благодарность
Результаты получены в результате исследований, финансированных по гранту N°212912 в рамках 7ой программы [FP7/2007-2013] Европейского сообщества. Автор благодарен Европейской комиссии за финансовую поддержку и всем партнерам за научное и технологическое сотрудничество.

Литература

1. S. Kuznetsov, E. Ozolinsh, I. Ozolinsh, I. Pavelko, V. Pavelko, Martine Wevers, Helge Pfeiffer. Lamb wave interaction with a fatigue crack in a thin sheet of Al2024-T3 /AircraftISHA 2007 ID6964. October 2008.
2. S. Kuznetsov, E. Ozolinsh, I. Ozolinsh, I. Pavelko, V. Pavelko. Fatigue crack indication by ultrasonic Lamb wave/ Conference RRDPAE2008 Volume ISSN: 1425-2104, Brno: University of Technology, 2008.
3. Piezoceramic materials/ Piezotechnology, www.piceramic.de.