

# ZRÝCHLENÉ TEPELNÉ STARNUTIE HRUBOVRSTVOVÝCH VODIČOV VNÚTRI OHÝBANÝCH VIACVRSTVOVÝCH KERAMICKÝCH MODULOV

## (ACCELERATED AGING THERMAL STRESS OF THICK FILM BENDING CONDUCTORS IN MULTILAYER CERAMIC MODULES)

Alena PIETRIKOVÁ, Juraj BANSKÝ, Magdaléna BUJALOBOKOVÁ, Ján URBANČÍK  
Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach,  
Park Komenského 2, 043 89 Košice, tel. 055/602 3195, E-mail: Alena.Pietrikova@tuke.sk,  
Juraj.Bansky@tuke.sk, Magdalena.Bujalobokova@tuke.sk, Jan.Urbancik@tuke.sk

### SUMMARY

*This paper deals with quality and reliability of bent multilayer modules for electronics based on LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic). It refers to the method of the bent multilayer ceramic modules preparation with built-in thick film conductors for electronics with number of layers 7, 9, and 11 and with bent angle 0°, 20° and 40°. It is oriented on measurement of basic electrical parameters of thick film conductors in bent multilayer ceramic modules, which contain resistivity (R), conductivity (G), capacitance (C) and inductance (L). The experiments have been concentrated on the effects of reliability tests and on the measurements of electrical properties of bent multilayer modules. The achieved results of accelerated aging stress confirm the influence of temperature as an important factor to the technical life and reliability of electronic systems in working conditions. These tests show the expressive influence of temperature, which limits operation life and reliability of systems applied in electronics. Along with these analyses of characteristics is demonstrated the impact of frequency on the stability of electrical properties. The higher frequency more increases the stability of properties of bent modules.*

**Keywords:** quality, reliability, Low Temperature Cofired Ceramic, multilayer modules, electrical parameters

## 1. ÚVOD

LTCC je vysokopevný sklo/keramický flexibilný pás obsahujúci 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45% SiO<sub>2</sub> a 15% organickej zložky [10]. Zavedenie nízkoteplotne vypaľovanej keramiky (Low Temperature Cofired Ceramic - LTCC) do hrubovrstvovej technológie prináša novú kvalitu, ktorá umožňuje jednoduchú výrobu trojdimenzionálnych (3D) štruktúr. LTCC keramika poskytuje teda výhody nielen pre využitie v elektronike, ale stále častejšie aj v neštandardných aplikáciách v oblasti hrubovrstvových senzorov. LTCC keramika ako vysoko atraktívny elektronický materiál je často využívaný vďaka svojej flexibilitě, možnosti tvorby rôznych tvarov a schopnosti vytvárať mnohovrstvové štruktúry po izostatickom laminovaní. Oblasť pozornosti zaberá hlavne rozvoj substrátovej technológie pre mikroelektroniku a nové viacvrstvé 3D štruktúry používané v senzorovej technike. V oblasti hrubých vrstiev zjednodušuje technológia LTCC puzdrenie elektronických obvodov alebo snímačov. Green Tape™ LTCC materiálové systémy umožňujú v porovnaní s klasickou hrubovrstvovou technológiou, používanou pri tvorbe hybridných integrovaných obvodov, budovať cenovo priaznivejšie viacvrstvé štruktúry. Technologický postup spracovania LTCC keramiky spočíva vo vyrezaní modulu keramiky vo veľkosti potrebného substrátu (berúc do úvahy zmenšenie rozmerov po výpale), jeho dierovaní a vytvorení vodivých prepojení sieťotlačovou pastou a napokon vo vytvorení potrebných vodivých čiar na nevypálenej fólii. Celý tento proces sa opakuje na každej

nevyspekanej LTCC fólii v závislosti od počtu potrebných vrstiev. Oddelené samostatné moduly LTCC keramiky sa napokon naukladajú v správnom poradí, orientácii i polohe na seba a v procese izostatického laminovania sa zlamujú do „green“ viacvrstvého celku. Nasleduje výpal viacvrstvovej štruktúry a osadenie vrchnej vrstvy štruktúry rezistorami.

Pre experimenty uvedené v tomto článku bola použitá keramika Low Temperature 951 Cofired GreenTape™ firmy DuPont o hrúbke 114 μm.

## 2. MERANIE ELEKTRICKÝCH PARAMETROV HRUBOVRSTVOVÝCH VODIČOV

Testovacia štruktúra pre meranie elektrických vlastností hrubovrstvových vodičov zabudovaných do viacvrstvových keramických modulov mala tvar plošných vodičov usporiadaných viacvrstvovo na jednotlivých vrstvách keramiky LTCC usporiadaných do pyramídy. Plošné hrubovrstvové vodiče boli nanesené hrubovrstvovou technológiou (Obr. 1). Hrubovrstvové vodiče na báze pasty AgPd mali tvar priamočiarych dráh, ktoré sú na oboch koncoch zakončené rozšírenými spájkovacími plôškami. Parametre hrubovrstvových vodičov sú uvedené v tab. 1.

Dĺžka vodivých dráh [mm]	48.5 44.5 40.5 36.5
Hrúbka vodivých dráh [μm]	30

Šírka vodivých dráh [ $\mu\text{m}$ ]	250
Plocha spájkovacích plôch [ $\text{mm} * \text{mm}$ ]	4*4

**Tab. 1** Parametre hrubovrstvových vodičov  
**Tab. 1** Parameters of thick film conductors

Aby bolo možné realizovať pripojenie vodičov pri meraní elektrických parametrov, boli dĺžky vrchných vrstiev postupne skracované (prekrývanie vrstiev). Dĺžky jednotlivých keramik so zabudovanými vodičmi na báze keramiky LTCC o hrúbke 114  $\mu\text{m}$  sa pohybovali v rozpätí od 33 do 49 mm. Šírka keramik 5 mm bola u všetkých vzoriek konštantná. Pre porovnanie a vyhodnocovanie vlastností tvarovaných modulov na báze LTCC, boli vytvorené tri typy štruktúr s počtom vrstiev LTCC 7, 9, a 11 a s uhlom ohybu 0°, 20° a 40°, pozostávajúce z podložných vrstiev (1), krycej vrstvy (2) a nanesených hrubovrstvových vodičov (3) (Obr. 1).



**Obr. 1** „Pyramídový tvar“ viacvrstvovej (sedemvrstvovej) štruktúry pred tvarovaním:  
 1) podložné vrstvy, 2) krycia vrstva, 3) hrubovrstvové vodiče

**Fig. 1** „Pyramid form“ of multilayer (seven layers) structure before bending: 1) bottom layers, 2) top layers, 3) thick film conductors

Na ohýbaných tvarovaných viacvrstvových moduloch (Obr. 2) s nanesenými hrubovrstvovými vodičmi na báze keramiky LTCC boli realizované merania elektrických parametrov a testy spoľahlivosti. Medzi základné elektrické parametre patria odpor, indukčnosť, vodivosť a kapacita.

Na meranie parametrov testovaných štruktúr bol použitý vektorový merač imitancie, ktorý pracuje na princípe merania absolútnej hodnoty impedancie a jej fázového posunu. TESLA BM595 je fázorový merač imitancií, vyznačujúci sa alfanumerickým zobrazením jednotiek, ktorý bol použitý na meranie frekvenčných závislostí základných elektrických parametrov hrubovrstvových vodičov zabudovaných do viacvrstvových tvarovaných keramikých modulov. Meraný objekt sa pripája k prístroju štvorbodovo. Piata zemniaca svorka slúži k pripojeniu tienenia, v prípade, ak ním objekt disponuje. Štvorbodové pripojenie meraného objektu eliminuje vplyv prírodných vodičov. Samostatné vyvedenie a pripojenie svoriek vylučuje ich vplyv na presnosť merania. Na základe týchto zistených hodnôt, považovaných za referenčné, sa potom určovali zmeny elektrických vlastností tvarovaných

modulov a zabudovaných hrubovrstvových vodičov po vykonaní testov spoľahlivosti.



**Obr. 2** Ohýbané viacvrstvové moduly na báze LTCC s vonkajšími a vnútornými uhlami ohybu  
**Fig. 2** Bent multilayer modules based on LTCC by external and internal bent angles

### 3. ZRÝCHLENÉ TEPELNÉ STARNUTIE HRUBOVRSŤVOVÝCH VODIČOV VNÚTRI VIACVRSTVOVÝCH KERAMICKÝCH MODULOV

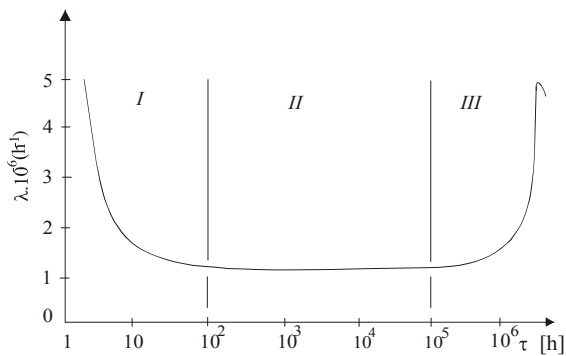
Pojem skúšky spoľahlivosti zahŕňa veľké množstvo náročných testov a metód. Medzi základné patria skúšky bezporuchovosti, skladovateľnosti a životnosti [5]. Ich poslaním je predovšetkým preukázať, že skúšané moduly budú v danom prostredí a pri stanovených prevádzkových podmienkach pracovať určitú dobu bez poruchy. Skúšky sú časovo a finančne náročné, čo si vyžaduje dôkladné plánovanie testov, precíznu prípravu, realizáciu, vyhodnotenie výsledkov, analýzu porúch a ich príčin, a následné opatrenia na odstránenie zistených nedostatkov.

Účelom skúšok spoľahlivosti je odhaliť vznik porúch z hľadiska ich druhu, mechanizmu, časového postupu až po dominantné príčiny a následky porúch a stanoviť životnosť elektronických systémov, resp. výrobkov. Z toho vyplýva nutnosť prispôbiť skúšky konkrétnemu druhu výrobku, určiť optimálny počet vzoriek v skúšanom súbore, výrobnéj kapacite a úrovni technického zabezpečenia skúšobne.

Skúšky spoľahlivosti sledujú hlavne elektrické vlastnosti, príp. iné vlastnosti v závislosti na čase pri napodobňovaní vplyvov prostredia. Tieto vlastnosti sa zisťujú na začiatku skúšky a ďalej vo vopred stanovených časových intervaloch [5].

Dlhodobým vykonávaním testov sa zistila závislosť množstva vyskytujúcich sa porúch na čase. Táto závislosť má tvar tzv. *vaňovej krivky* (Obr. 3).

Vaňová krivka v interpretovanej závislosti na čase vo vzťahu k analýze spoľahlivosti elektronických súčiastok všetkých úrovní (počnúc diskretnými súčiastkami - tj. súčiastky prvej a druhej úrovne, až po elektronické zariadenia- tj. súčiastky vyšších úrovní) pozostáva z troch oblastí:



**Obr. 3** Vaňová krivka vyjadrujúca časovú závislosť intenzity porúch elektronických súčiastok

**Fig. 3** Bathhtub curve represent time dependence on failures rate of electronic components

- *I oblasť ranných porúch* – na začiatku používania je intenzita porúch najväčšia (trvajúca do  $10^2$  h)
- *II oblasť náhodných porúch* – intenzita porúch minimálna (v rozmedzí  $10^2$  až  $10^{5-6}$  h)
- *III oblasť opotrebovania prvku* – pri dožívaní výrobku poruchovosť narastá ( $10^6$  h vyššie) [2].

Ranné poruchy vznikajú v dôsledku nedokonalého technologického spracovania alebo použitím nevhodného materiálu, resp. jeho vadami. Intrinzné poruchy sú náhodné poruchy, ktorých počet za určitý časový interval je po celú dobu života systému, resp. výrobku približne konštantný. Poruchy opotrebovaním prvku vznikajú dlhodobým používaním zariadenia, jeho starnutím. S narastajúcim časom sa počet porúch opotrebovaním zvyšuje [7].

Časová náročnosť väčšiny testov viedla k zavedeniu zrýchlených skúšok spoľahlivosti. Dlhodobé skúšky spoľahlivosti trvajú približne  $10^6$  h, zatiaľ čo zrýchlené skúšky „starnutím“ tepelným namáhaním sa v závislosti na zvolenej teplote pohybujú rádovo okolo  $10^3$  h [1].

Zrýchlenie skúšok spoľahlivosti sa dosahuje pomocou vhodného namáhania vzoriek (teplota, mechanické namáhanie, napätie a iné), pričom najčastejšie sa volí tepelné namáhanie. Vo vzorke tak dochádza k vyvolaniu poruchového mechanizmu, spôsobujúceho poruchu.

Pri použití zrýchlených testov spoľahlivosti je nutné sledovať, či týmto procesom nedošlo k urýchleniu degračných mechanizmov v materiáloch, vyskytujúcich sa pri dlhodobých skúškach, alebo k objaveniu porúch, ktoré sa za prevádzky pri menovitom režime takmer nevyskytujú. Pozitívom zrýchlených skúšok je, že výsledky dosiahnuté vykonaním týchto testov sú ekvivalentné, resp. porovnateľné s dlhodobými skúškami za oveľa kratší čas a s menším počtom vzoriek. Aby bolo možné považovať získané výsledky za objektívne, treba ich overiť dlhodobými skúškami za rovnakých podmienok.

Vplyv rôznych faktorov prostredia, ich krátkodobým alebo dlhodobým pôsobením,

vyvoláva v materiáloch zmeny vlastností. Týmto zmenami sa zaoberá fyzika porúch, opierajúca sa o zákony procesov pôsobiacich medzi rôznymi látkami a stavmi, za rôznych energetických podmienok, čo je možné využiť pri sledovaní degračných procesov. Teplota predstavuje jeden z faktorov, majúcich zásadný vplyv na prevádzkovú spoľahlivosť materiálov. Dlhodobé pôsobenie teploty vyvoláva v materiáloch zmeny elektrických, mechanických a fyzikálnych vlastností.

Pôsobením teploty dochádza k únave a starnutiu materiálu. Starnutie je definované ako súhrn fyzikálnych a chemických procesov prebiehajúcich v materiáloch, vyvolávajúce nenávratné zmeny ich funkčných vlastností. Zrýchlené tepelné starnutie sa robí podľa týchto zásad:

- Zo skúšaného materiálu sa urobí výber vhodných vzoriek na zvolené skúšky.
- Zvolia sa pozorované znaky (sledované vlastnosti počas zrýchleného „starnutia“ tepelným namáhaním). Pri výbere pozorovaných znakov sa uprednostňujú znaky s významnou funkčnou dôležitosťou v praktickom použití materiálu, resp. výrobku.
- Urobí sa výber kritérií zostarnutia pre jednotlivé sledované vlastnosti. Kritériom zostarnutia je zvolená hodnota pozorovaného znaku, po dosiahnutí ktorej už materiál, resp. výrobok neplní svoju funkciu tak, ako sa pre správnu činnosť vyžaduje.

Testy zrýchleného tepelného starnutia možno vykonať dvoma spôsobmi, kontinuálne alebo cyklicky. *Kontinuálne* (neprešované) starnutie sa realizuje tak, že vzorky sa vložia do skúšobného prostredia (skúšobnej komory) vopred vyhriateho na skúšobnú teplotu. V určených časových intervaloch sa postupne vyberá ten istý počet vzoriek. Vzorky vybrané zo skúšobného prostredia sa nechajú aklimatizovať 2 h v normálnom prostredí (prostredie s teplotou  $21^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  a s vlhkosťou 65% [4]). Potom sa skúša sledovaný znak. Odskúšané vzorky sa už nevystavujú ďalšiemu zvýšenému namáhaniu.

Pri *cyklickom* (prešovanom) namáhaní sa vzorky materiálu vložia do skúšobného prostredia vopred vyhriateho na skúšobnú teplotu. Po uplynutí určeného času namáhania sa vyberú a nechajú 2 h aklimatizovať v normálnom prostredí (prostredie s teplotou  $21^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  a s vlhkosťou 65% [4]). Potom sa skúša sledovaný znak a neporušené vzorky sa opäť vracajú na tepelné namáhanie. Tento postup sa opakuje až do dosiahnutia kritéria zostarnutia v sledovaných znakoch.

Časové intervaly „starnutia“ tepelným namáhaním sú všeobecne stanovené normou ČSN 35 8001 „Zkoušky spolehlivosti součástek pro elektroniku“ na 0, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 h a pri predĺžení skúšok nad 1000 h, po uplynutí každých ďalších 1000 h až do porušenia poslednej, resp. predposlednej vzorky v testovanom súbore.

Pri určení počtu skúšobných vzoriek je potrebné zvoliť súbor s minimálnym počtom 20 vzoriek.

Rozmery a tvar skúšobných vzoriek majú byť také, aby čo možno najlepšie simulovali praktické použitie skúšaného materiálu. Umiestnenie skúšaných vzoriek v skúšobnom prostredí musí vylučovať ich vzájomné pôsobenie [5].

V elektronike sa často vychádza z testovacích metód stanovených pre elektronické zariadenia, ktoré popisuje americká norma MIL-STD-883 „Test Methods and Procedures for Microelectronics“. Podľa tejto normy je skúšobná teplota pre testovaný materiál (LTCC) stanovená na 125°C [8]. Počas skúšok sa musí teplota okolitého vzduchu udržiavať na požadovanej teplote s odchýlkou maximálne  $\pm 3^\circ\text{C}$  [5]. Spracovanie nameraných výsledkov, určenie životnosti, a stanovenie doplnkových podmienok pre skúšaný materiál sa určuje normou ČSN 35 8001 „Zkoušky spolehlivosti součástek pro elektroniku“ [4].

Meranie elektrických parametrov prebehlo pred vykonaním testov zrýchleného tepelného starnutia, v čase  $t = 0$ , a po realizácii stanoveného počtu cyklov, resp. po uplynutí stanoveného času. Všeobecne, pre meranie všetkých parametrov platilo, že sa merali hodnoty pri rôznych frekvenciách, pričom sa využil celý rozsah frekvencií, ktoré merací prístroj poskytoval (100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 10 kHz, 20 kHz).

Namerané hodnoty elektrických parametrov tvarovaných modulov po testoch zrýchleným „starnutím“ tepelným namáhaním sú v tab. 2. V tabuľke je uvedená závislosť počtu vrstiev na uhle ohybu pre hodnoty a) odporu spodnej vrstvy ( $R_{sp}$ ), indukčnosti spodnej vrstvy ( $L_{sp}$ ), odporu vrchnej vrstvy ( $R_{vr}$ ), b) indukčnosti vrchnej vrstvy ( $L_{vr}$ ), kapacity (C) a vodivosti (G).

### 3.1 Kapacita

Kapacita, ako meraný parameter štruktúry, sa pred vykonaním testov pohybovala v rozmedzí 10 až 15 pF. Porovnaním nameraných výsledkov možno skonštatovať, že počas pôsobenia tepelnej záťaže došlo k veľkému výkyvu hodnôt, rádovo z jednotiek na desiatiny až stotiny pôvodných hodnôt. Táto rôznorodosť hodnôt sa prejavuje aj pri porovnávaní výsledkov pri rôznych frekvenciách. V prípade nízkych frekvencií (100 Hz) sú rozdiely badateľné až po 1000 h, ale najvýraznejšie rozdiely sú pozorovateľné v oblasti vysokých frekvencií (10 kHz) (Graf 1).

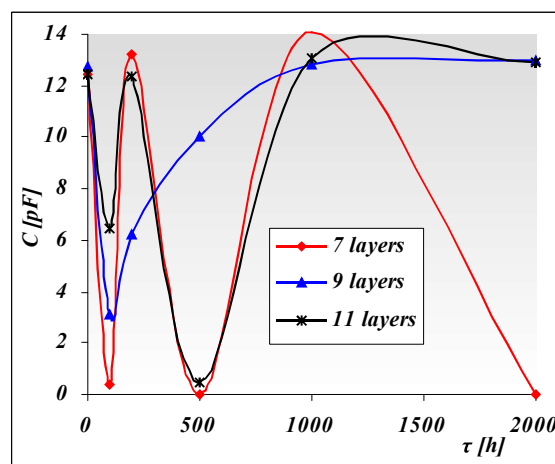
Počet vrstiev	Uhly ohybu $[\circ]$	Elektrické parametre		
		$R_{sp} [m\Omega]$	$L_{sp} [\mu H]$	$R_{vr} [m\Omega]$
7	0	630 -513	-4 - 0,25	265 -216
	20	390 -506	-5 - 0,22	207 -409
	40	300	0	340 -300
9	0	420 -390	-5 - 0,22	312 -270
	20	515 -467	-5 - 0,12	550 -212
	40	720 -332	-5 - 3,2	260 -230
11	0	750 -230	-3,9 - 0,2	290 -250

	20	516 -480	-5 - 0,2	283 -240
	40	440 -370	-4 - 0,22	290 -250

Počet vrstiev	Uhly ohybu $[\circ]$	Elektrické parametre		
		$L_{vr} [\mu H]$	C [pF]	G [nS]
7	0	-5 - 0,23	10,3	0 - 10,8
	20	-5 - 0,2	10,7 - 11	0 - 11,3
	40	-6 - 0,3	14,1 - 13	-0,1 - 15
9	0	-6 - 0,2	38,9 u	2,3 S
	20	-6 - 0,3	11,5	0 - 13,5
	40	-6 - 0,2	12 - 13	-0,1 - 16
11	0	-4 - 0,2	10 - 13	0,1 - 15
	20	-6 - 0,2	4,6 u	367,8mS
	40	-5 - 0,21	13,4 - 12	0,1 - 15

**Tab. 2** Porovnanie hodnôt parametrov po 1000 hodinách „starnutia“ tepelným namáhaním a)  $R_{sp}$ ,  $L_{sp}$ ,  $R_{vr}$ , b)  $L_{vr}$ , C, G

**Tab. 2** Comparison of value parameters after 1000 hours of accelerated aging thermal stress a)  $R_{sp}$ ,  $L_{sp}$ ,  $R_{vr}$ , b)  $L_{vr}$ , C, G



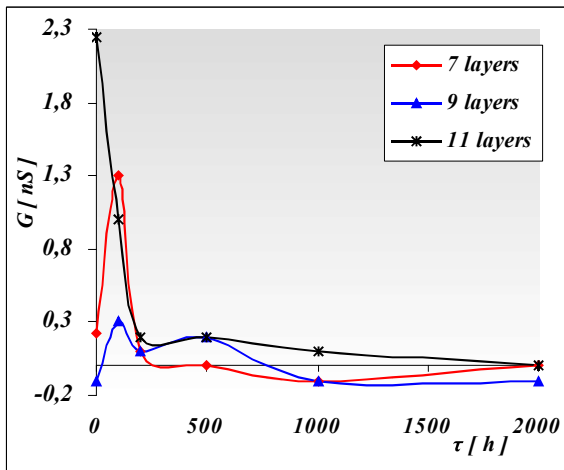
**Graf 1** Závislosť kapacity na čase pre frekvenciu 100Hz vzoriek s uhlom ohybu 40°

**Graph 1** Time dependence of capacity for frequency 100 Hz and samples under 40° bent angle

Významnú úlohu pri posudzovaní správania sa kapacity zohráva aj uhol ohybu a počet vrstiev štruktúr. Najväčšie výkyvy sú pozorovateľné u vzoriek s uhlom ohybu 40°, ktoré v kombinácii s nízkou frekvenciou (100 Hz) vedú k nestabilným priebehom meraných hodnôt.

### 3.2 Vodivosť

Vodivosť keramiky sa na rozdiel od iných parametrov, pohybovala v nízkych hodnotách, rádovo jednotky nS. Procesom tepelného starnutia sa tieto hodnoty nemenili, až pri dlhodobejšom zaťažení (do 1000 h) bol pozorovaný pokles vodivosti na nulu pri nízkych frekvenciách (100 Hz) (Graf 2).



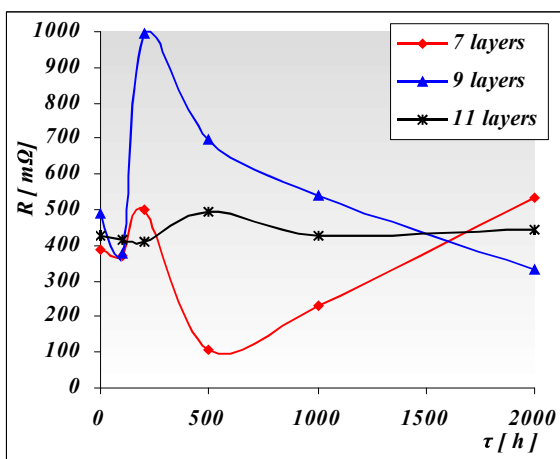
**Graf 2** Závislosť vodivosti na čase starnutia pre vzorky s uhlom ohybu  $40^\circ$  (100 Hz)  
**Graph 2** Dependence of conductivity on time aging for the samples with bent angle  $40^\circ$  (100 Hz)

Tento efekt je preukázateľný aj u vzoriek s iným uhlom ohybu, čo dokazuje zanedbateľný vplyv ako uhla ohybu, tak aj počtu vrstiev testovaných štruktúr.

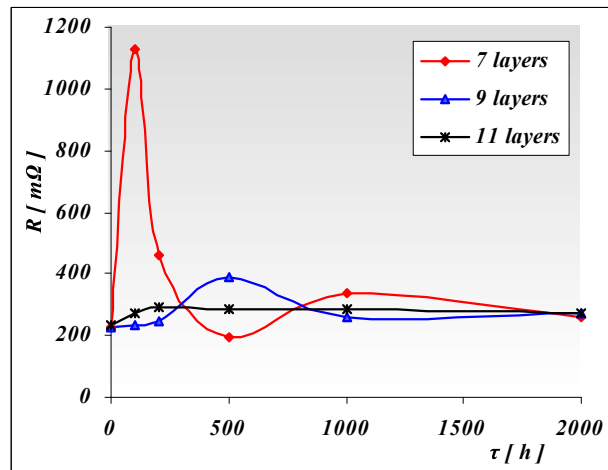
### 3.3 Odpor

V prípade odporu je nutné vyhodnotiť správanie sa parametrov hrubovrstvových vodičov na spodnej a na hornej vrstve. Spodná vrstva, vykazujúca hodnoty v rozmedzí 200 až 800 m $\Omega$ , po vykonaní testov tepelného starnutia pri dlhodobejšom zaťažení nevykázala výrazné výkyvy. V závislosti na uhle ohybu sa prejavujú nestabilné hodnoty u vzoriek ohýbaných pod uhlom  $40^\circ$  (Graf 3).

Odpor hrubovrstvového vodiča vrchnej vrstvy mal v porovnaní so spodnou vrstvou hodnotu nižšiu, v priemere 200 až 300 m $\Omega$ . Vplyv tepelného starnutia výrazne neovplyvnil správanie sa parametra, aj keď na začiatku starnutia sú viditeľné určité výkyvy (Graf 4).



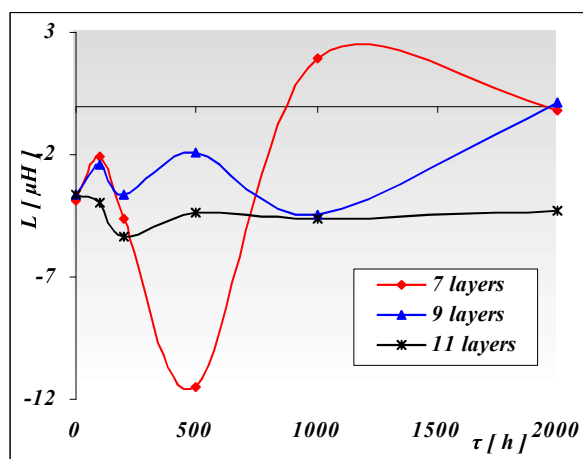
**Graf 3** Závislosť odporu spodnej vrstvy na čase starnutia u vzoriek ohýbaných pod uhlom  $40^\circ$  (100 Hz)  
**Graph 3** Resistance dependence on time of bottom layer for samples under  $40^\circ$  angle bent (100 Hz)



**Graf 4** Závislosť odporu na čase vrchnej vrstvy vzoriek ohýbaných pod uhlom  $40^\circ$  (100 Hz)  
**Graph 4** Dependence of top layer resistance on time for samples with bent angle  $40^\circ$  (100 Hz)

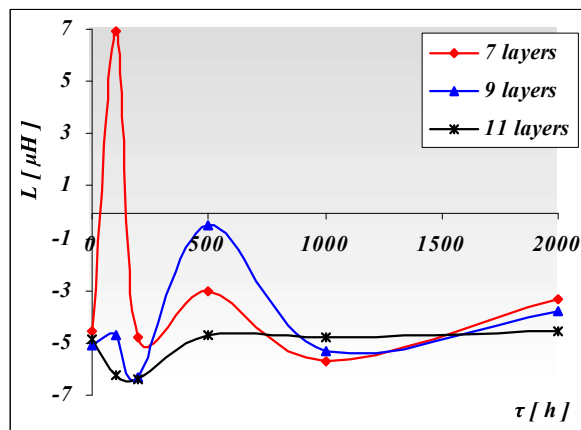
### 3.4 Indukčnosť

Najvýraznejšie rozdiely možno pozorovať v prípade indukčnosti. Pri analýze je potrebné opäť rozlišovať, či sa jedná o parameter spodnej, alebo vrchnej vrstvy. Spodná vrstva vykazuje hodnoty, meniace sa v závislosti na frekvencii. Pri nízkych frekvenciách (100 Hz) vykazovala indukcia záporné hodnoty. Najvýraznejšie sa prejavil výskyt záporných hodnôt indukčnosti u vzoriek ohýbaných pod uhlom  $40^\circ$  (Graf 5).



**Graf 5** Závislosť indukčnosti spodnej vrstvy na čase starnutia u vzoriek ohýbaných pod uhlom  $40^\circ$  (100 Hz)  
**Graph 5** Inductance dependence on time aging (bottom layer) for samples under  $40^\circ$  bent angle (100 Hz)

Aj v prípade vrchnej vrstvy sa hodnoty indukčnosti pre frekvenciu 100 Hz udržujú v záporných hodnotách. Tento jav je pozorovateľný u všetkých uhlov ohybu ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$  a  $40^\circ$  (graf č. 6)).



**Graf 6** Závislosť indukčnosti vrchnej vrstvy na čase starnutia u vzoriek ohýbaných pod uhlom  $40^\circ$  (100 Hz)

**Graph 6** Inductance dependence on time aging (top layer) for samples under  $40^\circ$  bent angle (100 Hz)

#### 4. DISKUSIA VÝSLEDKOV

K zmenám elektrických parametrov došlo na základe pôsobenia poruchových mechanizmov spôsobených teplotou. Teplota má zásadný vplyv na nosný materiál na báze keramiky LTCC, a tiež aj na vnútorné hrubovrstvové vodiče zabudované do tvarovaných viacvrstvových modulov. Test zrýchleným „starnutím“ tepelným namáhaním ovplyvnil nielen elektrické parametre modulov, ale skrátil tiež životnosť a prevádzkovú schopnosť modulov. Tieto závery možno vyvodiť na základe meraní, ako aj výpočtov súvisiacich s odhadom technického života daného výrobku. Treba zdôrazniť, že týmito meraniami možno odhadnúť len dolnú hranicu technického života, pretože testy boli z časových dôvodov ukončené pred porušením poslednej, resp. predposlednej vzorky.

Pri hodnotení správania sa elektrických parametrov možno skonštatovať, že vystavením modulov dlhodobiejšiemu pôsobeniu teploty v procese zrýchleného „starnutia“ tepelným namáhaním, došlo k ustáleniu parametrov v určitom rozsahu hodnôt, i keď na začiatku sú pozorovateľné výrazné výkyvy hodnôt.

Pri porovnávaní hodnôt z hľadiska frekvencií možno preukázať frekvenčnú závislosť parametrov, pričom najvýraznejšie sa táto závislosť prejavila v oblasti vysokých frekvencií (10 kHz až 20 kHz).

Osobitným prípadom je indukčnosť, ktorej záporné hodnoty sa objavujú pri nízkych frekvenciách. Tento jav je možné vysvetliť na základe toho, že pri meraní bol zvolený nesprávny náhradný model, a prístroj v skutočnosti meral hodnotu kapacity. Iný faktor, ktorý mohol ovplyvniť správnosť merania, bola zlá kalibrácia prístroja pred začiatkom merania. Svoju úlohu tu zohral fakt, že pri zmene frekvencie je nutná opätovná kalibrácia prístroja, čo sa v priebehu merania zanedbalo. Štvrtým faktorom, majúcim vplyv na záporné

hodnoty indukčnosti, bola kalibrácia prístroja pri pripájaní vzoriek s uhlom ohybu  $20^\circ$  a  $40^\circ$ , pretože ohybom sa vytvára posun parazitných parametrov prívodných vodičov, vnášajúcich chybu do nameraných výsledkov.

Na základe dosiahnutých výsledkov možno skonštatovať, že významnú úlohu pri analýze elektrických parametrov tvarovaných modulov zohráva nielen frekvenčná závislosť parametrov a rozmery štruktúr, ale aj vplyv mechanických javov. Významne k tomu prispieva faktor, akým je uhol ohybu, hrúbka nosného materiálu, hrúbka natlačených vodivých vrstiev a mnohé iné, vyskytujúce sa v procese technologického spracovania.

#### 5. ZÁVER

Úlohou článku bola analýza vlastností hrubovrstvových vodičov zabudovaných do tvarovaných modulov pre elektroniku na báze LTCC. Realizácia spočívala v troch základných krokoch. Prvým krokom bola príprava viacvrstvových tvarovaných modulov pre elektroniku na báze LTCC s uhlom ohybu do  $40^\circ$ . Na základe predchádzajúcich výskumov boli vyhotovené tvarované moduly s počtom vrstiev 7, 9 a 11, s uhlom ohybu  $0^\circ$ ,  $20^\circ$  a  $40^\circ$ .

Druhým krokom bolo zmeranie elektrických parametrov tvarovaných modulov na báze LTCC. Z nameraných výsledkov je zrejmé, že veľmi dobré elektrické parametre vykazujú tvarované viacvrstvové moduly ohýbané pod uhlom  $20^\circ$ , s počtom 9 vrstiev.

Poslednou úlohou bolo vyhodnotenie vplyvu zrýchleného tepelného starnutia na elektrické parametre hrubovrstvových vodičov zabudovaných do ohýbaných viacvrstvových modulov na báze LTCC. Získané výsledky potvrdzujú vplyv teploty ako dôležitého faktora v prevádzkových podmienkach na životnosť a spoľahlivosť elektronických zariadení. Následkom pôsobenia teploty sa výrazne skracuje dĺžka technického života a spoľahlivosť jednotlivých zariadení, čo dokazujú aj vykonané výpočty.

Podľa zistených výsledkov skúšok zrýchleného starnutia možno konštatovať, že teplota ako dôležitý faktor v prevádzkových podmienkach má výrazný vplyv na životnosť a spoľahlivosť elektronických štruktúr na báze keramiky LTCC. Následkom pôsobenia teploty sa výrazne skracuje dĺžka technického života a spoľahlivosť štruktúr zabudovaných do ohýbaných viacvrstvových modulov na báze keramiky LTCC.

#### LITERATÚRA

- [1] ARTBAUER, J. – ŠEDOVIČ, J. – ADAMEC, V.: *Izolanty a izolácie: Urýchlené tepelné starnutie elektroizolačných materiálov a stanovenie ich teplotnej odolnosti*, Bratislava, Alfa, 1969

- [2] BANSKÝ, J. – SLOSARČÍK, S. – PODPROCKÝ, T.: *Hrubovrstvové hybridné senzory*, Royal Unicorn, 1999, ISBN 80-968128-3-1
- [3] BROŽ, J. a kol.: *Základy fyzikálních měření I*, Praha, SPN, 1967
- [4] ČSN 34 5684, *Klimatické zkoušky elektrických zařízení*,
- [5] ČSN 35 8001, *Zkoušky spolehlivosti součástek pro elektroniku*, 1993
- [6] JESD22-A106-A, *Thermal Shock*, JEDEC Standard, Electronic Industries Association, 1995
- [7] MACH, P. – SKOČIL, V. – URBÁNEK, J.: *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1 vyd., Praha, ISBN 80-01-02392-3, str. 131-133
- [8] MICHAELI, L. – HRÍBIK, J.: *Rádioelektronické meranie*, Košice, 1992
- [9] URBANČÍKOVÁ, N.: *Spoľahlivostné aspekty ultrazvukového kontaktovania vodivých vrstiev hybridných integrovaných obvodov s použitím nízkoteplotne vypaľovanej keramiky (LTCC)*, dizertačná práca, Košice, 1995, str. 74
- [10] [www.ltcc.de](http://www.ltcc.de)
- [11] [www.ltcc.de/what-is-ltcc/material-supplier/material-supplier.html](http://www.ltcc.de/what-is-ltcc/material-supplier/material-supplier.html)
- [12] [www.national.com/quality](http://www.national.com/quality)
- [13] ZGODAVOVÁ K., URBANČÍKOVÁ N.: *Učebný text: "Manažovanie kvality v službách, časť „Cyklus a nástroje zlepšovania kvality"*, 1999

## BIOGRAPHY

**Alena Pietriková** (doc., Ing., PhD.) graduated in Physical Metallurgy at the Metallurgical Faculty at Technical University in Košice (Slovakia) in 1980 and defended her PhD. in the field of material engineering from Technical University in Košice in 1986. Since 1998 she is working as educationist at Faculty of Electrical Engineering at Technical University of Košice. Her research interests include thick film and micro-electronic materials, MCM-C technology and thick film sensors.

**Juraj Banský** (Prof., Ing., PhD.) graduated in 1971. His professional orientation is concentrated on unconventional applications of hybrid multilayer LTCC for plasma technology and (bio)sensors. He is a member in editorial board of „International Journal of Microcircuits & Electronic Packaging“, published in USA, member of „International Society for Hybrid Microelectronics“, USA, chairman of Slovak Commission for PhD. study in the branch 26-39-5 Electrotechnology and materials. He is author or co-author of 109 publications and 6 patents.

**Magdaléna Bujaloboková** (Ing.) was born in Košice in 1977. She received Ing. degree in Material Engineering at the Department of Technologies in Electronics, Technical University of Košice, Slovak Republic in 2002. Since October 2002 she has been working at the same department as PhD. student. Her PhD. thesis deals with quality and reliability of electronic systems.

**Ján Urbančík** (Ing.) received Ing. degree in 1984. His professional orientation is controlling of quality in microelectronic technology and acquisition of material characteristics in electronic applications. His PhD. thesis deals with quality and reliability of systems applied in electronic.