

OHÝBANÉ VIACVRSTVOVÉ MODULY NA BÁZE LTCC KERAMIKY

(BENT MULTILAYER MODULES BASED ON LTCC)

*Alena PIETRIKOVÁ, *Stanislav SLOSARČÍK, *Radoslav KOKUĽA, **Ján ŠALIGA

*Katedra hybridnej mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Park Komenského 2, 040 38 Košice, tel.: 055/602 3194, E-mail: pietrik@tuke.sk, slosarc@tuke.sk, kokula@tuke.sk

**Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: 055/602 2866, E-mail: jan.saliga@tuke.sk

SUMMARY

The top of a bend in flexural laminated modules has been found to cause warping and cracks in LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) substrates. Experiments have been conducted on the effects of various manufacturer's bending on the structural integrity of DuPont's 951 LTCC and on the delimitation of optimal (marginal) conditions for bending: the bent angle and the number of bent layers. Flexural strengths and stress concentration factors of substrates were measured, and then compared to the literature. This model was able to predict the cracks observed in bent samples and provides a design guideline for unconventional utilization of bent ceramic laminates based on LTCC which should be used for the bent shaped thick film modules. The presented results of investigations and simulations have been realized on the multilayer modulus made in 8 versions, 5 thickness and two types ceramics: as a plane module and ceramic modules warp under the angle up 90° based on Low Temperature 951Cofired Green Tape™. Measurement of cross-talk signal and pulse response in multilayer bent system was described. The results of the investigations can be summarized in design rules for LTCC bent modules (maximum number of layers, maximum bent angle, arrangement and stocking conductor lines in bent laminated electronic modules).

Keywords: Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC), Multichip modules based on MCM-C, Mechanical properties of electronic ceramics, electrical properties of electronics ceramics.

1. ÚVOD

LTCC technológia, považovaná v súčasnosti za elegantné a moderné riešenie rozličných problémov v oblasti tvorby a prepájania elektronických obvodov s vysokou hustotou integrácie, predstavuje proces kompatibilný s technológiou hrubých vrstiev. Z pohľadu materiálov sú LTCC nízkoteplotne vypaľované keramiky s relatívne dobrými mechanickými a elektrickými vlastnosťami, ktoré sú pre svoju výbornú spoľahlivosť často volené pre konštrukciu viacvrstvových modulov na báze hrubých vrstiev. Prednosťou týchto materiálov je flexibilita, ktorá umožňuje použitie v nekonvenčne tvarovaných viacvrstvových aplikáciách elektroniky. Klasické keramické materiály sú zvyčajne krehké, čo limituje ich použitie v ohýbanom tvare. LTCC sa vyznačuje schopnosťou vytvárať ohýbané štruktúry a za určitých technologických podmienok vytvárať aj viacvrstvové ohýbané moduly schopné generovať netradičné elektronické aplikácie.

Cieľom tohto článku je poukázať na nový technologický postup vytvárania ohýbaných viacvrstvových modulov na báze Low Temperature 951 Cofired Green Tape™ keramiky. Ohýbané viacvrstvové moduly na báze LTCC s rozličným uhlom ohybu a rozličným počtom vrstiev boli podrobené analýze mechanických a elektrických vlastností. Analýza mechanických vlastností bola realizovaná na princípe skúšky trojbodovým ohybom. Pre analýzu elektrických vlastností

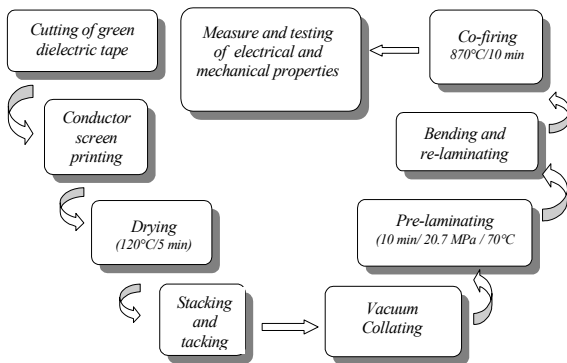
viacvrstvových modulov v ohýbanom tvare boli realizované merania presluchov signálu vodičov a impulzovej odozvy.

Vývojový pokrok v oblasti použitia Green Tape™ LTCC materiálov analyzovaný v tomto článku spočíva v zdôraznení možnosti tvarovať viacvrstvové keramiky a poukazuje na nový spôsob ich využitia v ohýbaných hrubo- vrstvových senzoch alebo v netradične tvarovaných elektronických aplikáciách.

Low Temperature Cofired Green Tape™ je vysokopevný sklo/keramický pás obsahujúci 40% Al₂O₃, 45% SiO₂ a 15 % organickej zložky. Je dostupný v troch hrúbkach (114 μm, 165 μm, 254 μm) a pre experimenty uvedené v tomto článku bola použitá keramika o hrúbke 165 μm. Z mechanických vlastností sú zvyčajne najväčším zdrojom limitujúcim ich použitie krehkolomové vlastnosti. Základné pochopenie procesu porušovania viacvrstvových keramik, bolo analyzované u viacvrstvových modulov v nekonvenčnom, ohýbanom tvare. Správne tepelne spracovaný (vypálený) materiálový systém na báze LTCC keramik má v štruktúre zrná Al₂O₃ spájané sklenenými mostíkmi na báze SiO₂. V závislosti od rovnomernosti oblievania Al₂O₃ zrn sklenou zložkou, môže výsledná štruktúra garantovať relatívne vysokú pevnosť s Youngovým modulom okolo 152 MPa. Takáto štruktúra dáva dobrý predpoklad pre proces ohýbania keramik na báze LTCC.

2. POSTUP PRI VÝROBE OHÝBANÝCH VIACVRSTVOVÝCH MODULOV NA BÁZE LTCC

Materiály na báze LTCC sa spracovávajú technológiou, ktorá umožňuje vytvoriť modul pozostávajúci zo 60 vrstiev keramiky. Pre konštrukciu nekonvenčne ohýbaných viacvrstvových modulov na báze keramiky LTCC, ktoré sú analyzované v tomto článku, bola použitá modifikácia klasického postupu spracovania. Vzorky pripravené týmto postupom boli podrobené nasledujúcim technologickým krokom (Obr. 1):



Obr. 1 Postupnosť spracovania ohýbaných viacvrstvových modulov na báze LTCC

Fig. 1 Succession of bent multilayer fabricating process on the base of LTCC

1. Vyrezanie pásov LTCC s vhodnou orientáciou a definovanými rozmermi (5x 47 mm, 5x42 mm, 5x 37 mm, 5x32 mm a od 5 tej po 10 vrstvu boli rozmery pásov 5x27 mm), zohľadňujúcimi následné zmenšenie rozmerov po výpale v dôsledku zrážania štruktúry.

2. Sieťotlač vodičov na báze Ag pasty (DuPont Ag 6158) kompatibilnej s keramikou LTCC doprostred prvých 4 najdlhších (spodných) pásov. Tvar topológie vodičov je jednoduchý: línie čiar o šírke 300 μm pozdĺž celého pásika na koncoch s ploškami pre spájkovanie.

3. Zasušenie pasty pri 120 $^{\circ}\text{C}$ počas 5 minút.

4. Naskladanie jednotlivých vrstiev modulu v usporiadaní typu sendvičovitej štruktúry. Počet naskladaných vrstiev odpovedajúci celkovej hrúbke keramikového modulu sa menil od 0,8 mm (pre 4 vrstvy) po 2,0 mm (10 vrstiev).

5. Vákuová ochrana vzoriek v plastickom vrecúšku voči posunutiu a poškodeniu vzoriek vo vode, ktorá sa používa ako tlakové médium v laminovacom zariadení.

6. Izostatická laminácia v izostatickom laminátore, vhodná pre vytváranie homogénnych viacvrstvových a 3-rozmerne tvarovaných štruktúr.

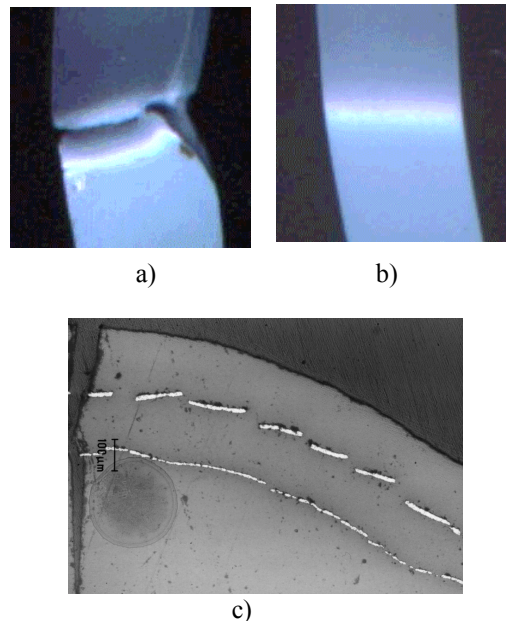
7. Relaminácia a ohyb viacvrstvových nevypálených LTCC laminátov aplikáciou vonkajšieho a vnútorného uhlu prostredníctvom

tvarovacích prípravkov, ktoré umožňovali ohyb na 20°, 40°, 60°, 80° a 90° za rovnakých technologických podmienok ako v bode 6 (Obr. 2).



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

Vzhľadom k tomu, že ohyb viacvrstvových modulov bol kritickejší pri ohýbaní s vnútorným uhlom, v ďalšom budú uvedené len výsledky experimentov modulov s vnútornými uhlami ohybov.



Obr. 3 a) Ohýbaný keramikový modul s mikrotrhlinou na vrchole, uhol ohybu 60° a viac
b) Ideálne ohýbaný modul s uhlom ohybu 40°
c) Mikroštruktúra porušených hrubovrstvových vodičov v ohýbaných viacvrstvových moduloch
Fig. 3 a) Bent ceramic module with microcrack on the top under bent angle of 60° and upper
b) Ideal bent laminate under 40° of bent angle
c) Microstructure of bent multilayer module

Optimalizácia procesu ohýbania viacvrstvových modulov bola posudzovaná vizuálne a na princípe mechanickej skúšky ohybu. Na obr.3 vidieť začínajúci proces porušovania vo vzorke ohýbanej pod uhlom 80°. Proces porušovania je iniciovaný v najviac namáhanom mieste (na vrchole ohybu), kde dochádza aj k porušovaniu vodivých dráh. Tvorba mikrotrhlín v ohybe je závislá nie len na uhle ohybu, ale aj na hrúbke modulu (počte vrstiev).

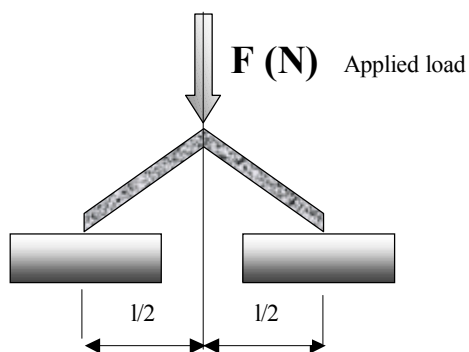
8. Spekanie a výpal keramických modulov konvenčným postupom, v ktorom sa v rovnakom čase spolu-vypália dielektrické pásy a hrubovrstvové vodiče.

9. Merania elektrických vlastností, testovanie mechanických vlastností.

Táto technika prípravy viacvrstvových ohýbaných keramických modulov môže byť využitá v širokom spektre senzorových aplikácií v oblasti technológie hrubých vrstiev.

3. TESTOVANIE OHYBOVEJ PEVNOSTI TVAROVANÝCH VIACVRSTVOVÝCH MODULOV NA BÁZE LTCC

Ohybová pevnosť a faktor koncentrácie napätia viacvrstvových ohýbaných modulov bola stanovená na princípe skúšky trojbodovým ohybom na univerzálnom, ale citlivom testovacom stroji, ktorý je vhodný pre veľmi citlivé snímanie minimálnych zmien predĺženia a zaťaženia v krehkých materiáloch. (Obr. 4)



Obr. 4 Skúška trojbodovým ohybom pre meranie ohybovej pevnosti krehkých keramických materiálov na báze LTCC (schéma)

Fig. 4 Three points loading test for measurement of flexural strength on the bent laminates based on LTCC – schematic design

Pre stanovenie ohybovej pevnosti bol najprv stanovený ohybový moment M_o , počítaný ako:

$$M_o = F \cdot l / 4 \quad (N \text{ mm}) \quad (1)$$

kde F je aplikovaná sila v N a l je rozstup ohýbaných vzoriek (35 mm).

Prierezový modul W_o bol vypočítaný z nasledujúcej rovnice:

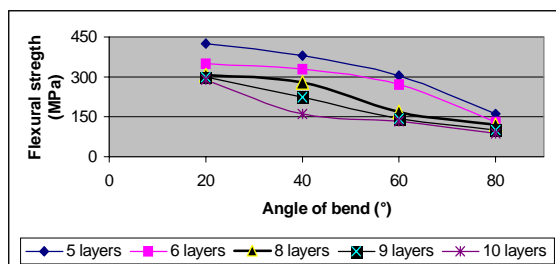
$$W_o = b \cdot h^2 / 6 \quad (mm^3) \quad (2)$$

kde h je hrúbka vzoriek daná počtom zlamovaných vrstiev a b je šírka modulov (konštantne pre všetky moduly 5 mm). Hrúbka sa menila od 0,8 mm do 2,0 mm.

Ohybová pevnosť R_o bola potom vypočítaná ako pomer ohybového momentu a prierezového modulu:

$$R_o = M_o / W_o \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

Výsledky skúšky trojbodovým ohybom v závislosti na uhle ohybu a počte vrstiev (hrúbke) sú na obr.5. Hraničné napätie 425 MPa bolo namerané u vzoriek s uhlom ohybu 20° a s najmenším počtom vrstiev. Pri tejto skúške boli vizuálne pozorované aj vplyvy nesprávneho spôsobu laminovania, ktoré čiastočne ovplyvnili namerané výsledky. Je zrejmé, že porušovanie je iniciované v najviac napínanom stave keramického laminátu.

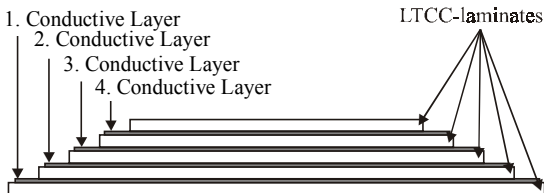


Obr. 5 Vplyv procesu ohýbania na ohybovú pevnosť u ohýbaných viacvrstvových modulov na báze *Low Temperature 951 Cofired Ceramics*
Fig. 5 Influence of bending process to flexural strength in bent laminates modules based on *Low Temperature 951 Cofired Green Tape™*

Mechanické skúšky trojbodovým ohybom ukázali na vhodnosť použitia keramiky LTCC v netradične ohýbanom tvare až do uhlu 60°, od ktorého bola iniciácia a rast sukritických trhlín v mieste ohybu evidentná. Okrem uhlu ohybu má vplyv na kvalitu mechanických vlastností aj počet zlamovaných vrstiev, s rastom ktorých sa úmerne zhoršovali mechanické vlastnosti. Mikroskopická analýza (Obr.3.c) poukázala na nepriaznivý vplyv laminovania veľkého počtu vrstiev. Zvyšovanie počtu laminovaných vrstiev LTCC ovplyvňuje hrúbku vodivých dráh na báze hrubých vrstiev. Čím je hrubá vodivá vrstva hlbšie vo vnútri viacvrstvového modulu, tým je viac stláčaná a teda tenšia. Tento úkaz bolo možné tiež potvrdiť aj meraním elektrických vlastností, tak ako je to uvedené v nasledujúcej kapitole. Rastúci vplyv počtu vrstiev LTCC bol evidentný od počtu 6.

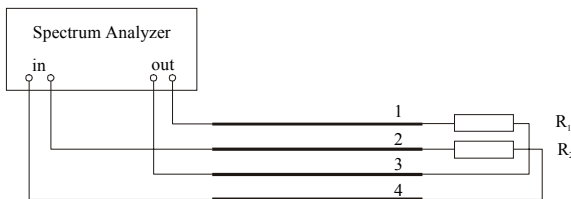
4. MERANIA PRESLUCHOV SIGNÁLOV A ODOZVY NA IMPULZ

Meranie elektrických vlastností ohybaných viacvrstvových modulov na báze LTCC bolo realizované meraním presluchov signálov a meraním impulzovej odozvy. Na obr. 6 je schematické usporiadanie vodivých dráh na báze hrubých vrstiev u viacvrstvového keramikového modulu, ktorý bol meraný v planárnom (rovinnom) a ohybanom stave.



Obr. 6 Schematické usporiadanie viacvrstvového modulu a vodivých dráh na báze hrubých vrstiev
Fig. 6 Schematic design of multilayer module and conductive lines on the base of thick film

Presluchy signálov planárnych a ohybaných viacvrstvových modulov na báze LTCC boli merané spektrálnym analyzátorom Advantest R3132 v rozsahu frekvencií od 1 kHz do 1 GHz pri vstupnej impedancii 50Ω (Obr.7) Zo štvorvodičového usporiadania vodivých dráh bol vodič č.1 a č. 3 zapojený pre vstup vľ signálu zo spektrálneho analyzátoru do vzorky a vodič č.2 a č.4 bol použitý pre snímanie indukovaného napätia. Pri meraní boli použité tienené vodiče a konektory BNC. Schéma zapojenia pre meranie presluchov signálov je na obr. 7.



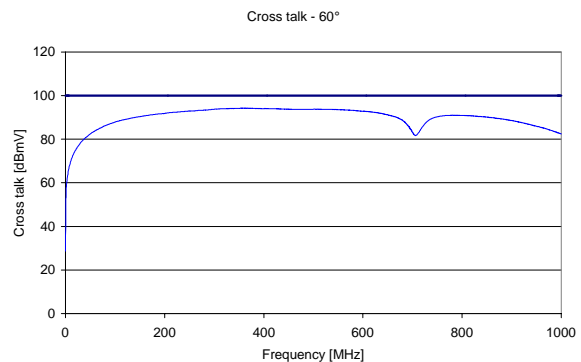
Obr. 7 Schéma zapojenia pre meranie presluchov signálov
Fig. 7 Integration scheme for measurement of cross talk

Pred meraním presluchov signálov bolo potrebné stanoviť tieto elektrické parametre:

- *Rezonančná frekvencia* $95,9 \text{ MHz}$ zmeraná spektrálnym analyzátorom z paralelného rezonančného obvodu pri kapacite 100 pF a indukčnosti tvorenej sériovým zapojením vodivých dráh č.1 a č.2.
- *Impedancia* 60Ω vypočítaná z rezonančnej frekvencie stanovenej pre použitú keramik LTCC a kapacity 100 pF .

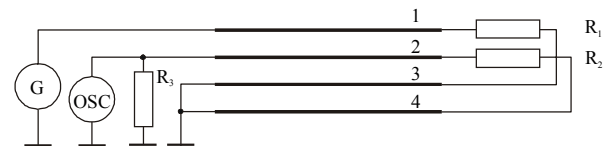
- *Zaťažovací rezistor* R_1 medzi vodičom č.1 a č.3 62Ω stanovený z vypočítanej impedancie a *kompensačný rezistor* R_2 $1 \text{ M}\Omega$ medzi vodičom č.2. a č.4, ktorý bol experimentálne stanovený tak, aby bolo možné identifikovať hraničnú rezonančnú frekvenciu pri meraní frekvenčnej závislosti presluchu signálu. Hodnoty optimálneho zaťaženia vodičov odpormi R_1 a R_2 boli konštantné pre všetky merania presluchov signálov v celom rozsahu frekvencií.
- *Referenčná vstupná napäťová úroveň* $U_{vst} = 100 \text{ dB}\mu\text{V}$ konštantná pre všetky merania presluchov signálov v celom rozsahu frekvencií.

Graf nameraných hodnôt typický pre merania presluchov signálov v závislosti na frekvencii u ohybaného viacvrstvového modulu ($60^\circ/8$ vrstiev) je obr. 8.



Obr. 8 Presluch signálu v závislosti na frekvencii u 8 vrstvového modulu (uhol ohybu 60°)
Fig. 8 Frequency dependence of cross talk at 8 layers module under 60° angle bent

Výsledky meraní ukázali takmer nulový vplyv ohybu a vrstvenia vzoriek na báze LTCC na presluchy signálov v celom rozsahu frekvencií. Z pohľadu presluchov signálov nie je ohybanie viacvrstvových štruktúr činiteľom, ktorý by ich ovplyvňoval alebo obmedzoval ich aplikáciu ani pri vysokých frekvenciách.

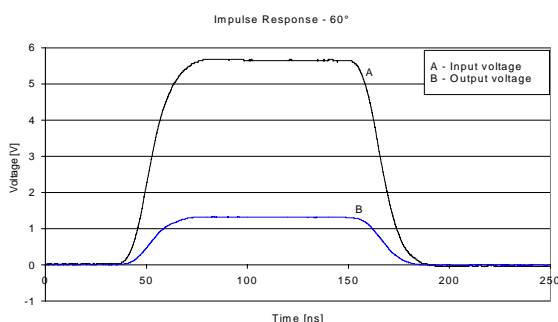


Obr. 9 Schéma zapojenia merania impulzovej odozvy

Fig. 9 Integration scheme for measurement of impulse response

Pre meranie impulzovej odozvy (vodiče č.2 a č.4) bol použitý osciloskop Tetronix TDS 220, do ktorého bol privádzaný signál z generátora funkčných priebehov HP Agilent 33120A (obr.9.) s výstupnou impedanciou 50Ω (vodiče č.1 a č.3) cez rezistor R_3 .

Rezonančná frekvencia, zaťažovací rezistor R_1 a kompenzačný rezistor R_2 boli pred meraním stanovené rovnako ako v prípade merania presluchov signálov. Štvorvodičové zapojenie dráh malo za úlohu kompenzáciu vedľajších nepriaznivých vplyvov a rezistory R_1 a R_2 prispôbenie vedenia. Na rezistore R_3 sa merala časová závislosť napätia na osciloskope (Obr.10). Vstupný impulz mal tieto parametre: vstupný signál hodnotu 10 V, doba nábehu 25 ns a doba spádu 20 ns (čo odpovedá frekvencii 5 MHz). Doba trvania vstupného impulzu bola 80 ns. Frekvencia opakovania impulzu bola 100 Hz (každých 10 ms).



Obr. 10 Časová závislosť odozvy na impulz u vzorky so 6 vrstvami a uhlom ohybu 60°

Fig. 10 Time dependence of impulse response of sample at layers and 60° bent angle

Aj pri tomto meraní nebol preukázaný evidentný vplyv ohybu keramických modulov na impulzovú odozvu. Ako už bolo naznačené pri meraní mechanických vlastností, preukázateľný bol len vplyv počtu vrstiev, v dôsledku rastu ktorého sa hodnota napätia počas doby trvania impulzu menila v rozsahu od 1,3 V (6 vrstiev) po 1,4 V (10 vrstiev). Zmena napätia počas odozvy na impulz o 0,1V v prípade 6 a viacvrstvovej štruktúry môže v niektorých elektronických aplikáciách obmedziť používanie viacvrstvových ohýbaných keramických modulov pri vysokých frekvenciách.

5. ZÁVERY A SMEROVANIE ĎALŠIEHO VÝSKUMU

V uvedenom článku autori vyvinuli nekonvenčný technologický spôsob ohýbania keramik na báze LTCC a zaviedli koncepciu používania ohýbaných viacvrstvových modulov v nekonvenčne tvarovaných elektronických aplikáciách alebo v oblasti tvarovaných senzorov na báze hrubých vrstiev. Nová technika spracovania 3-dimenzionálnych keramických modulov s možnosťou aplikácie technológie hrubých vrstiev je možná vďaka vysokej flexibilitě keramiky LTCC v nevypálenom stave. Modifikácia existujúcej technológie spočíva v novej možnosti tvarovania viacvrstvových keramických modulov a následne v poskytnutí netradičných elektronických aplikácií, ktoré po ďalšom vývoji a zdokonalení

môžu prispieť k tvorbe špeciálnych vlastností a ďalších technologických aplikácií.

Vlastnosti keramiky LTCC sú vhodné pre splnenie stanoveného vedeckého cieľa. Tvarová flexibilita LTCC je veľmi dobrá i keď pri veľkých ohyboch existujú v najviac namáhanej časti, na vrchole ohybu, nerovnomerne rozložené zvyškové napätia a mikrotrhliny, ktoré sú zárodkom začínajúceho porušenia najmä pri veľkom počte vrstiev LTCC. Izostatická laminácia do počtu 6 vrstiev pri vnútornom uhle ohybu do 60° nespôsobuje problémy. Meranie presluchov signálov medzi vodivými vrstvami potvrdilo možnosť pracovať s takými netradične tvarovanými hrubovrstvovými vodičmi aj pri vysokých frekvenciách. Podobné výsledky boli namerané aj pri meraní odozvy na impulz, kde sa navyše potvrdil predpoklad stláčania vnútorných vodivých vrstiev pri viac ako 6-vrstvových moduloch. Realizované ohýbané moduly na báze LTCC pripúšťajú v hraničných podmienkach aj širšie použitie v iných ako typických aplikáciách pri zachovaní dobrej kvality. Sú zárodkom možnosti generácie nových elektrických aplikácií v tvare 3-dimenzionálnych modulov.

Autori článku pracujú v súčasnosti na zdokonalení netradičnej techniky spracovania modulov na báze LTCC, na stanovení jej hraničných podmienok pre tvarovanie, na analýze procesov starnutia a stanovení dlhodobej životnosti. Okrem toho podrobujú analýze ďalšie elektrické vlastnosti netradične ohýbaných vodičov na báze hrubých vrstiev.

LITERATÚRA

- [1] Bauer, R.-Strickert, V.-Wolter, K.J.-Sauer, W.: Investigation of an Integrated Liquid Cooling system in LTCC-Multilayer, Conference proceedings, ISSE 2001, The 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, Romania, pp.178 – 182.
- [2] Gongora-Rubio, Espinosa-Vallejos, P at all.: Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST), Sensors and Actuators, 2869, (2000), p1-20.
- [3] <http://www.dupont.com/mcm/product/tape.html>

BIOGRAPHY

Alena Pietriková graduated (doc., Ing., PhD.) 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.

Stanislav Slosarčík (doc., Ing., PhD.), was born in 1956. He graduated from the Slovak Technical University of Bratislava in 1980 and received CSc. (PhD.) degree in Radioelectronics from the Technical University of Košice in 1987. He is Associate Professor of Hybrid Circuits Department, TU Košice, engaged in the research of sensor technology.

Radoslav Kokuľa (Ing.) was born in Humenné in 1975. He received Ing. degree in Material Engineering at the Department of Hybrid Microelectronics, Technical University of Košice,

Slovak Republic in 1999 with excellent evaluation. Since this time up to this day he has been worked at the same department as PhD. student. His PhD. thesis is focusing on unconventional shaping of multilayer LTCC structure.

Ján Šaliga (Ing., PhD.) received Ing. degree in Electrical Engineering in 1982 and his PhD. in Radioelectronics in 1995 from the Technical University in Košice. Since 1984 he has been assistant professor at Technical University in Košice, Department of Electronics and Multimedial Telecommunication. His research activities cover ADC and DAC testing methodology, virtual instrumentation and distributed measurement systems.