

# Vlastnosti vícevrstevných TPC struktur

Jiří Hlína, Jan Řeboun, Aleš Hamáček

Katedra technologií a měření  
Fakulta elektrotechnická  
Západočeská univerzita v Plzni  
hlina@ket.zcu.cz

## Properties of Multilayer TPC Structures

**Abstract** – This paper is focused on multilayer Thick Printed Copper (TPC) structures on alumina substrates and the testing of their mechanical and electrical properties. Multilayer thick printed copper is a new prospective technology based on sequential printing of copper and dielectric films and their firing in an inert atmosphere. It can be used for power electronics substrate manufacturing. These substrates are used in special applications such as concentrated photovoltaics, smart power modules etc. Adhesion and electrical parameters such as capacity, dielectric constant, resistivity, breakdown voltage, dielectric strength etc. before and after thermal cycling and aging are mentioned in this paper.

**Keywords** – Alumina; Copper; Multilayer Structure; Thick Film

### I. ÚVOD

Mezi běžně používané substráty ve výkonové elektronice patří DBC (Direct Bonded Copper) a IMS (Insulated Metal Substrate) substráty. V poslední době se ve speciálních výkonových aplikacích začínají používat substráty realizované technologií TPC (Thick Printed Copper – tištěné tlusté vrstvy mědi). Tato technologie je založena na nanášení měděných vrstev ve formě pasty pomocí sítotisku a jejich následném výpalu v peci s dusíkovou atmosférou.

TPC technologie v porovnání s DBC substráty disponuje celou řadou výhod. Hlavní výhodou je možnost realizace různých tloušťek měděné vrstvy na jednom substrátu, vysoké rozlišení motivů a snadná výroba vícevrstevných struktur. TPC technologie umožňuje realizaci substrátů s výkonovými i řídicími obvody a představuje perspektivní technologii pro výrobu chytrých výkonových modulů. Tyto moduly vyžadují složité propojení součástek, které není možné realizovat na jednovrstevných substrátech.

### II. EXPERIMENT

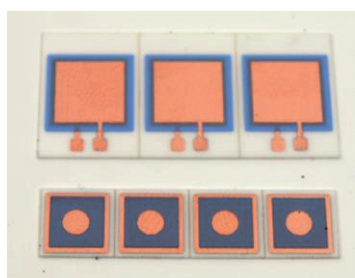
Adheze natištěných vrstev je velmi důležitý parametr pro dosažení vysoké spolehlivosti finálních elektronických zařízení. Kromě adheze vrstev jsou důležité i elektrické parametry substrátů (vysoká elektrická pevnost, vysoká rezistivita a nízká relativní permitivita).

Byly vyrobeny testovací vzorky vícevrstevných TPC substrátů, které obsahovaly motivy pro měření adheze a elektrických parametrů (Obrázek I). Tyto vzorky se skládaly ze dvou vrstev mědi oddělených dielektrickou vrstvou natištěných na keramických substrátech (96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Rozměry, použité pasty a tloušťky dielektrických vrstev jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Tabulce I. Byly vyrobeny tři skupiny těchto vzorků, u kterých byly změřeny elektrické parametry a adheze. První skupina vzorků byla změřena po výrobě. Druhá skupina byla změřena po testu stárnutím

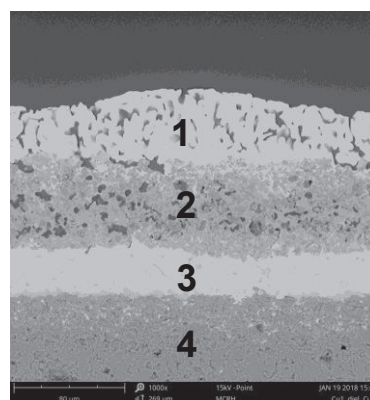
suchým teplem (při 155 °C po dobu 1000 hodin, ČSN EN 60068-2-2). Třetí skupina byla změřena po testu teplotními cykly (1000 cyklů v rozmezí od -40 °C do 125 °C).

TABULKA I. POPIS TESTOVANÝCH VZORKŮ

Vrstva	Pasta	Tloušťka (μm)	Rozměry a tvar	
			Měření el. parametrů	Měření adheze
Cu 1	Heraeus C7403	62	Čtverec, 9 x 9 mm	Čtverec, 7 x 7 mm
Diel	Heraeus IP9319D	66	Čtverec, 10 x 10 mm	Čtverec, 6 x 6 mm
Cu 2	Heraeus C7403	46	Čtverec, 8 x 8 mm	Kruh, ø 3 mm



**Obrázek I.** Motivy pro měření elektrických parametrů a adheze



**Obrázek II.** Metalografický výbrus – 1: Cu 2, 2: dielektrikum, 3: Cu 1, 4: keramický substrát

Tloušťka jednotlivých vrstev byla změřena na metalografickém výbrusu pomocí elektronového mikroskopu Phenom ProX (Obrázek II). Na výbrusu je patrné, že druhá vrstva mědi je více porézní. Dielektrická vrstva je také porézní a tato porozita může mít vliv na elektrickou pevnost a další elektrické parametry. Spojení mezi měděnou vrstvou a keramickým substrátem je realizována pomocí zatékání skelné fáze z pasty do keramického substrátu v průběhu výpalu.

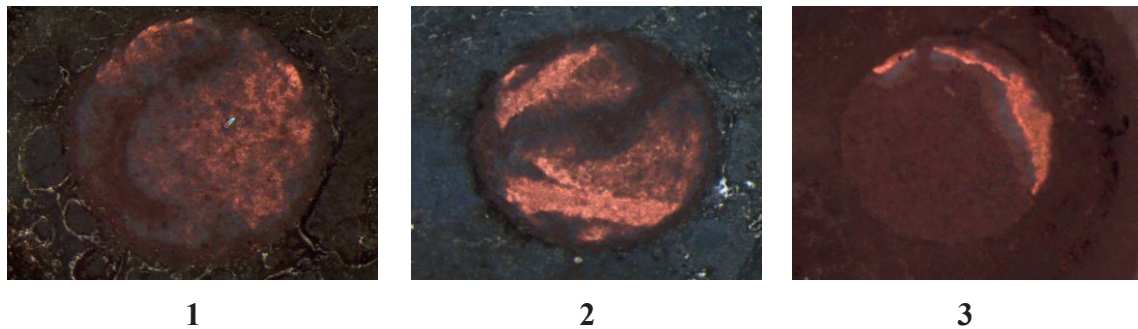
### A. Adheze

Adheze druhé vrstvy mědi byla měřena metodou “Pull off“. Testovací vzorky pro měření adheze měly natištěnou měděnou vrstvu i na spodní straně substrátu. K jednotlivým vzorkům byly z obou stran SnPb pájkou připájeny mosazné šrouby a pomocí nich byly vzorky uchyceny do trhačického zařízení (rychlost pohybu čelistí 50 mm/s). Výsledky měření adheze jsou uvedeny v Tabulce II. Hodnota adhezní síly byla vypočtena jako průměr z deseti vzorků.

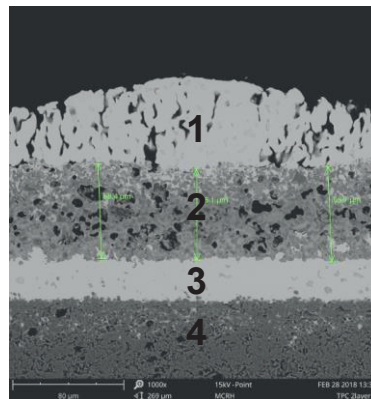
Vzorky po odtržení byly pozorovány mikroskopem (Obrázek III). K odtržení docházelo mezi dielektrikem a první měděnou vrstvou. Tento jev je pravděpodobně způsoben pronikáním skelné fáze z měděné pasty do dielektrické vrstvy v průběhu výpalu druhé vrstvy mědi. Proto je spojení mezi těmito dvěma vrstvami silnější.

Adheze byla rovněž změřena po stárnutí a po teplotních cyklech. V obou případech došlo k výraznému poklesu adheze (o 53,7 % po stárnutí a o 57,1 % po teplotních cyklech). Na metalografickém výbrusu vzorku po teplotních cyklech (Obrázek IV)

nejdou patrné žádné viditelné změny ani delaminace v porovnání s metalografickým výbrusem na Obrázku II.



**Obrázek III.** Ukázka vzorků po měření adheze – 1: před testy, 2: po teplotních cyklech, 3: po stárnutí



**Obrázek IV.** Metalografický výbrus po teplotních cyklech – 1: Cu 2, 2: dielektrikum, 3: Cu 1, 4: keramický substrát

### B. Elektrické parametry

Prvními měřenými parametry byly kapacita a dielektrické ztráty. Relativní permitivita  $\epsilon_0$  pak byla vypočítána pomocí následujícího vzorce:

$$\epsilon_r = \frac{d \cdot C}{\epsilon_0 \cdot S}, \quad (1)$$

kde  $d$  je tloušťka dielektrické vrstvy,  $C$  je kapacita,  $\epsilon_0$  je permitivita vakua a  $S$  je plocha měděné elektrody (Cu 2).

Dalším měřeným parametrem byl svodový proud  $I$  protékající skrz dielektrickou vrstvu při napětí 200 V, ze kterého byla vypočítána rezistivita  $\rho$  podle následujícího vzorce:

$$\rho = \frac{U \cdot S}{I \cdot d}, \quad (2)$$

kde  $d$  je tloušťka dielektrické vrstvy,  $U$  je napětí a  $S$  je opět plocha měděné elektrody (Cu 2).

Nejdůležitějším parametrem je elektrická pevnost dielektrické vrstvy  $E_p$ , která byla vypočtena podle následujícího vzorce:

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (3)$$

kde  $d$  je tloušťka dielektrické vrstvy a  $U_p$  je průrazné napětí.

Elektrické parametry vícevrstvých TPC substrátů jsou uvedeny v Tabulce II. Tyto hodnoty byly vypočteny jako průměr ze šesti vzorků. Elektrické parametry byly rovněž změřeny po stárnutí a po teplotních cyklech. U všech vzorků došlo ke zvýšení rezistivity (více než desetinásobně) a elektrické pevnosti (o 13,1 % po stárnutí a o 8,8 % po teplotních cyklech). Tento nárůst je pravděpodobně způsoben rekrytalizací dielektrické vrstvy. U ostatních elektrických parametrů (kapacita, relativní permitivita, dielektrické ztráty) nedošlo po uvedených testech k výrazným změnám.

TABULKA II. PARAMETRY VÍCEVRSTVÝCH TPC SUBSTRÁTŮ

Parametr	Před testy	Po stárnutí	Po teplotních cyklech
Adhezní síla (N/mm <sup>2</sup> )	22,33	12,00	12,76
Kapacita při 100 kHz (pF)	43,62	44,27	43,75
Relativní permitivita při 100 kHz (-)	5,08	5,16	5,10
Ztrátový činitel při 100 kHz (-)	0,005	0,003	0,005
Rezistivita (10 <sup>12</sup> Ω.m)	2,88	20,97	125,23
Průrazné napětí (kV)	0,578	0,653	0,617
Elektrická pevnost (kV/mm)	8,75	9,90	9,34

### III. ZÁVĚR

Bylo prokázáno, že TPC technologie je vhodná pro realizaci vícevrstvých struktur. Elektrické a mechanické parametry těchto struktur jsou dostatečné pro použití ve výkonové elektronice, zejména při realizaci inteligentních výkonových obvodů, kde je vyžadováno komplexní propojení elektronických součástek, které nelze realizovat na jednovrstvých substrátech.

### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005 a projektu SGS-2018-016: Diagnostika a materiály v elektrotechnice.

### LITERATURA

- [1] HLÍNA, J., ŘEBOUN, J., HAMÁČEK, A. Multilayer Thick Printed Copper Structures. In Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2018). Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4.
- [2] GUPTA, T. K. Thick – and Thin – Film Hybrid Microelectronics, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [3] SERGENT, J. E., HARPER, CH. A. Hybrid Microelectronics Handbook, McGraw-Hill Inc., 1995.