

PROGRESIVNÍ KERAMIKA V ELEKTRONICKÝCH APLIKACÍCH

ADVANCED CERAMICS IN ELECTRONICS APPLICATION

P. Trnka¹⁾, M. Bujaloboková²⁾

¹⁾Katedra technologií a měření, Elektrotechnická fakulta ZČU v Plzni,
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, tel.: +420 37 763 4518, mail: pavel@ket.zcu.cz

²⁾ETD Transformátory a.s., Zborovská 22/54, 301 00 Plzeň,
tel.: +420 378 117 525, mail: magdalena.bujalobokova@etd-bez.cz

Anotace Keramické materiály již od dávných dob výrazným způsobem zasahovaly do života člověka. Spolu s vývojem vědy a techniky se vyvíjely také různé materiály a technologie, úzce spjaté s daným odvětvím, kde pro své vhodné vlastnosti nacházela keramika své uplatnění. Tento článek je věnován především přehledu keramických materiálů, se zdůrazněním několika progresivních technologií a aplikací. Stručně jsou popsány nejfrekventovanější aplikace, kde jsou s úspěchem využívány vynikající vlastnosti keramik. Důraz je kladen na popis progresivních materiálů, včetně poukázání možností aplikace ve výkonové elektronice.

Summary Ceramics materials infringe human life from early years of the humankind. Together with the progress of the science and engineering, various materials and technologies have been used. Suitable materials and technologies have been used in the proper applications. This paper deals with ceramics materials classification. Some progressive technologies and their application are presented especially.

1. VÝVOJ V OBLASTI KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Keramické materiály jsou lidstvem aktivně vyráběny a využívány již několik tisíciletí. Název keramika pochází z řeckého pojmu *keramikos* („*κεραμικός*“ - hliněný). Postupným vývojem se pod tento pojem začaly zahrnovat materiály připravené tzv. keramickou technologií, kde se k dosažení pevné hmoty používá vypalování při vysoké teplotě. Co se týče struktury je klasická keramika tvořena především hlinou s přídavkem jílových minerálů. Později se začaly převážně používat práškové materiály, u kterých je teplota vypalování nižší než teplota tavení jednotlivých složek materiálu [1]. Jak postupoval vývoj lidstva, a nastoupilo období počátku elektrotechniky, nemalým podílem se na jejím prudkém rozvoji podílela kromě skla a jiných elektroizolačních materiálů také keramika. Milníkem a nejznámějším materiálem je dodnes používaný porcelán, který má pevné místo při výrobě např. izolátorů – ve výkonové elektrotechnice. Další oblastí byly vysokofrekvenční aplikace. Vývoj však stále pokračoval dál a v dnešní době není jednoznačnou podmínkou dosažení kompaktní hmoty s definovanými vlastnostmi zpracování při vysoké teplotě.

Snížení teploty a také objevení možnosti slučování rozdílných materiálů vedlo k podstatnému rozšíření dosud známých aplikací, kde nacházely své uplatnění. Speciálně pro oblast elektroniky se začaly používat materiály, které jsou schopny snášet vysoké teploty, a mají různé dielektrické vlastnosti, včetně vhodných jiných elektrických a mechanických vlastností (např. LTCC- Low Temperature Cofired

Ceramic- nízkoteplotně vypalovaná keramika, HTCC- High Temperature Cofired Ceramic- vysokoteplotně vypalovaná keramika). Nacházejí uplatnění jak ve vakuové technice, tak i jako pouzdra pro mikroelektronické součástky. Nenahraditelnými jsou jako substráty pro tenkovrstvé i tlustovrstvé technologie [2].

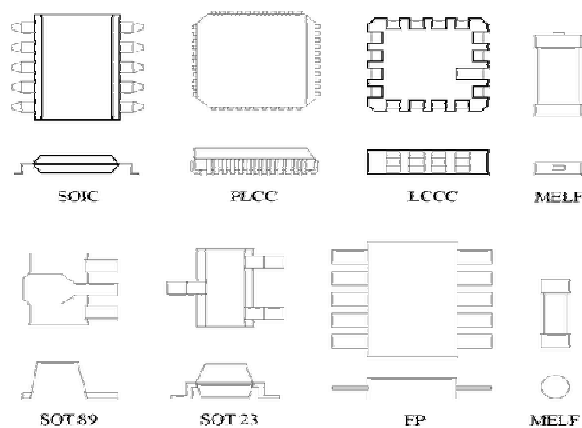
Kromě vhodných vlastností, které lze docílit vhodnou technologií jejich přípravy, je nedílnou součástí také implementace nových postupů do technologického procesu přípravy keramických materiálů, což vytváří pevný základ jejich dalšího rozvoje a použití.

2. STANDARDNÍ KERAMICKÉ MATERIÁLY PRO ELEKTRONIKU

Klasické keramické materiály používané v elektronice se vyznačují schopností snášet vysoké teploty (kolem 1300 °C až 1500 °C), vysokým elektrickým odporem, vysokou elektrickou pevností a různými dielektrickými vlastnostmi. Všeobecně lze říci, že se u nich projevuje největší rozptyl tepelné vodivosti, která je obecně nízká, ovšem některé keramiky mají lepší vodivost než kovy (např. BeO, AlN). Z hlediska mechanických vlastností se rozhodně za nevhodnou vlastnost považuje nízká odolnost vůči náhlým změnám teploty, na druhou stranu je však předností jejich chemická a mechanická stálost.

Typickými představiteli standardně používaných keramických materiálů jsou křemičité, titaničité keramiky, nebo materiály na bázi oxidu hliníku, berylia nebo nitridu hliníku. Nejznámějším keramickým materiálem je tzv. korundová keramika Al₂O₃, která má v elektronice stále nejširší uplatnění

[3, 13]. Standardně se připravuje litím keramické práškové suspenze z roztoku makromolekulového pojiva na pás. Jiný způsob přípravy zahrnuje lisování nebo válcování [4]. Používá se jako nosný substrát pro tenké i tlusté vrstvy, i jako materiál pro výrobu keramických pouzder pro mikroelektronické součástky a hybridní elektronické obvody (Obr. 1) [4].



Obr. 1. Příklady keramických pouzder, převzato z [5]
Fig. 1 Ceramic package examples, adopted from [5]

Oxid berylnatý BeO, který se v současnosti již nepoužívá kvůli své toxicitě, se často využíval v aplikacích, kde se předpokládalo vyšší teplotní namáhání struktury (díky vynikající teplotní vodivosti). Dnes je nahrazen AlN, který se také vyznačuje vysokou teplotní vodivostí i vynikající chemickou stálostí. Díky koeficientu teplotní roztažnosti podobnému křemíku umožňuje také přímé připojení VLSI (Very Large Scale Integration) čipů [5]. Všechny uvedené materiály také slouží jako substráty pro výrobu např. tlustovrstvých senzorů (např. odporové snímače teploty). Přehled vybraných vlastností keramických materiálů je uveden v Tab. 1.

Tab. 1 Vlastnosti keramických materiálů.
Table 1 Ceramic material properties.

Vlastnost	AlN	Al ₂ O ₃	BeO	LTCC
Tepelná vodivost λ (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	140 - 170	10-35	150-250	2-4
Koeficient tepelné roztažnosti α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	2,65	5,5	5,40	4,3
Průrazné napětí E _p (kV.mm ⁻¹)	15	> 10	10	8,5
Relativní permitivita ε _r (1 MHz)	8,9	9,7	6,7	1,5-8,0
Pevnost R _m (MPa)	450	400	240	190

3. PROGRESIVNÍ MATERIÁLY

Kromě klasických materiálů v elektronice se do popředí dostávají i jiné, specifické materiály, které se od těch klasických liší zejména technologií zpracování a tím i v některých směrech i význačnými vlastnostmi.

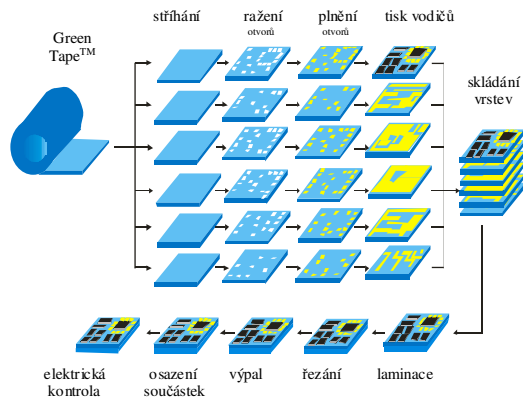
Speciálním druhem keramiky, s rychle se rozvíjející perspektivou je **LTCC keramika** (Low Temperature Cofired Ceramic) – nízkoteplotně vypalovatelná keramika (např. Green Tape™ DuPont [8]). Je tvořena ze 40 % Al₂O₃, 45 % SiO₂ a 15 % představuje organická složka. Jedná se o jemnozrnný polykrystalický materiál, se zrny obvykle menšími než 1 μm. Vnitřní struktura je charakterizována náhodnými defekty a mikrostrukturními heterogenitami. Její velkou předností je, že je v surovém stavu flexibilní, což umožňuje její ohýbání a tvarování. Uvedená vlastnost ji předurčuje k použití ve speciálních elektronických aplikacích. V širokém spektru se využívá k tvorbě různých klasických elektronických obvodů, hybridních elektronických obvodů apod.

LTCC je charakterizována odlišným způsobem zpracování v porovnání s klasickým druhem keramik, což je názorně ukázáno na Obr. 2. Vypalována je při teplotě 850 až 875 °C. Z hlediska jejích dalších vlastností je charakterizována nízkou tepelnou vodivostí, nízkou mechanickou pevností a vysokou relativní permitivitou. Dalším specifickým této keramiky, což je současně její nevýhodou, je smršťování v procesu výpalu. Dle konkrétního výrobce a druhu keramiky se pohybuje smrštění ve směru osy x a y kolem 12,27 % ± 0,3 % a ve směru osy z je to přibližně 15 % ± 0,5 % [6, 7]. Uvedená vlastnost se projevuje nutností přizpůsobení dalších používaných materiálů – past (vodivých, odporových nebo dielektrických), které musí být kompatibilní s keramikou, tj. musí se v procesu výpalu smršťovat stejnou mírou jako keramika [8]. Pasty se skládají z organické a funkční složky, která po výpalu určuje konečné elektrické vlastnosti vrstvy (např. práškové částice kovů určují výslednou vodivost dráhy).

Tab. 2 Vybrané vlastnosti LTCC keramiky ve vypáleném stavu.

Table 2 Cofired LTCC ceramics - selected features.

Vlastnost	DUPONT 951	HERAEUS CT700	FERRO A6-M
Relativní permitivita ε _r (1 MHz)	7,8	7,5 – 7,9	5,9
Izolační odpor R _i (Ω)	10 ¹²	10 ¹²	>10 ¹³
Koeficient tepelné roztažnosti α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	5.8	6.7	7
Tepelná vodivost λ (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	3.0	4.3	2



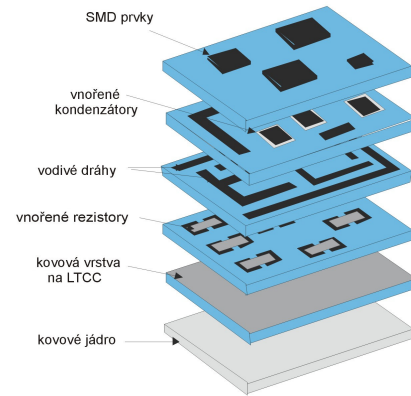
Obr. 2 Zpracování LTCC keramiky.
Fig.2 LTCC ceramics manufacturing.

Předností při zpracování této keramiky je možnost použití různých technologií, jak docílit vytvoření elektronických obvodů se specifickými parametry. Běžnou technologií zpracování je klasická tlustovrstvá technologie – sítotisk. Originálním a velice preferovaným způsobem je použití kombinace fotolitografie se sítotiskem, nebo použití fotocitlivých materiálů (např. Fodel™ fy DuPont), které umožňují docílit velmi jemné a precizní struktury (standardně se vytváří vodivé dráhy o šířce 50 μm). Tím se zvyšuje schopnost dosáhnout na menší ploše výkonnější obvod [9, 10].

Kromě standardních tlustovrstvých odporových a dielektrických past, které vlastnostmi odpovídají vlastnostem LTCC keramiky, přichází do úvahy použití speciálních odporových a dielektrických past – tzv. KQ systémů (Heraeus) [11]. Ty se vyznačují společnou vlastností, kterou je možnost vytváření drah kolem 25 μm , při použití vhodných substrátů a optimálních technologických podmínkách dokonce 10 μm . Uvedené materiály se uplatňují především v mikrovlnných aplikacích [11].

V procesu neustálého zlepšování vlastností LTCC keramiky se soustřeďovala pozornost také na omezení faktoru smršťování v procesu výpálu. Řešením je vývoj tzv. Zero-shrinkage LTCC keramiky (např. HeraLock™ Zero Shrink LTCC fy Heraeus), kde se dosáhlo snížení smrštění na méně než 0,2 % [12]. Jak je možné sledovat u neznámějších producentů LTCC keramiky, vývoj v této oblasti stále pokračuje.

Je důležité podotknout, že použitím této keramiky a jí odpovídající technologie je možné vytvářet také vícevrstvé struktury (tzv. 3D struktury). Jedná se o systémy, tvořené z vodivých drah plošně tisknutých a vzájemně vodivě připojených skrz izolační vrstvu [14]. Tím se docílí vnoření pasivních elektronických prvků (např. odporů nebo kondenzátorů) do struktury, čímž se uvolní místo pro další komponenty obvodu na povrchu struktury Obr. 3.

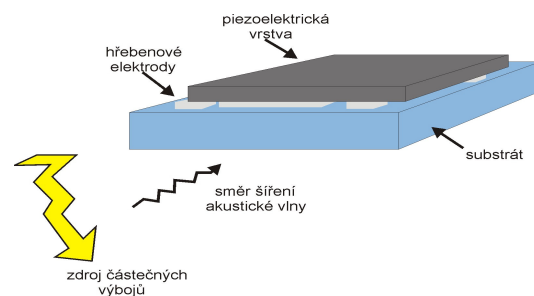


Obr. 3 Průřez vícevrstvou strukturou.
Fig. 3 Cross-section of multilayer structure.

HTCC keramika (High Temperature Cofired Ceramic) – vysokoteplotně vypalovatelná keramika je rovněž jako LTCC keramika široce používaná k tvorbě elektronických obvodů. Rozdíl spočívá především v teplotě výpálu, ta se pohybuje kolem 1300 $^{\circ}\text{C}$ i více. Základním materiálem je Al_2O_3 (96%) substrát, který zaručuje dosažení dobrých dielektrických vlastností [15].

Zpracování neboli technologický proces keramiky je založen na určení základního rozměru substrátu, vyražení otvorů (např. laserem), vyplněním vzniklých otvorů pastou prostřednictvím sítotisku, laminací, výpalem a v konečné fázi také osazením součástek a testováním. Výpál standardně probíhá přibližně při teplotě 1790 $^{\circ}\text{C}$ v dusíkové atmosféře [16].

Uvedené progresivní keramické materiály je možné použít nejen v elektronice obecně, ale na základě znalostí jejich vlastností je možné vidět jejich uplatnění i ve výkonové elektrotechnice. Příkladem jsou již výše uvedené senzory, například se s úspěchem používají piezoelektrické senzory na snímání částečných výbojů v transformátorech, jako součást on-line diagnostiky transformátorů [17]. Jedná se v principu o snímání akustických vln, přičemž senzor konvertuje akustický tlak na napětí. Senzory jsou standardně umístěny na vnější straně transformátorové nádoby [18]. Příklad senzoru je na Obr. 4.



Obr. 4 Senzor akustických vln.
Fig. 4 Acoustic waves sensor.

Jiným příkladem využití senzorů, kde základní substrát je tvořen keramickým materiálem, je senzor teploty. Při vhodné modifikaci klasických teplotních senzorů (NTC nebo PTC senzorů) je možné jejich využití na snímání teploty uvnitř nádoby transformátoru. Údaje získané prostřednictvím teploty v mnoha případech vypovídají o stavu izolace, a tedy i stárnutí materiálu, což je důležitým předpokladem zabezpečení spolehlivého provozu transformátoru [19, 20].

4. ZÁVĚR

Keramické materiály ve své podstatě tvoří nedílnou součást různých průmyslových aplikací. Cílem článku bylo poukázat na některé důležité keramické materiály, které si v současné době drží pevné místo při tvorbě nejrůznějších elektronických obvodů. Poukázáním na to, že existují progresivní materiály, které nejsou zcela známé, se otvírají možnosti jejich použití nejen v úzkém spektru jejich standardních aplikací, ale i v jiných oborech, kde dosud nebylo běžné tyto materiály používat. Příkladem mohou být senzory založené na progresivních keramických materiálech, které lze s výhodou použít při on-line diagnostice výkonových zařízení apod.

Vývoj v oblasti aplikací keramických materiálů stále pokračuje a budoucnosti se předpokládá jejich výraznější průnik do výkonové elektroniky.

REFERENCES

- [1] Artbauer, J., Šedovič, J., Adamec, V.: *Izolanty a izolácie*, Bratislava: Alfa, 1969.
- [2] Pietriková, A., Somora, M.: *Vývojové trendy materiálův pre hrubé vrstvy*, Košice, 1998. ISBN 80-7099-316-2.
- [3] *Ceramic Technology for Advanced Heat Engines*, Program Plan, ORNL/TM -8896, Správa USA, 1984
- [4] Banský, J., Slosarčík, S., Podprocký, T.: *Hrubovrstvové hybridné senzory*, Royal Unicorn, 1999, ISBN 80-968128-3-1
- [5] Mach, P., Skočil, Urbánek, J.: *Montáž v elektronice, Pouzdření aktivních součástek*. Praha: 2002. ISBN 80-01-02392-3, s. 131-133
- [6] Drue, K. H., Theleman, T., Thust, H.: *Laser Processing of LTCC with different Machine Concepts*. 14th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition, Friedrichshafen, Germany, s. 23-25, 2003.
- [7] Brown, R.: *Materials and Processes for Microwave Hybrids*. International Society for Hybrid Microelectronics, USA: 1991, 294 s. ISBN 0-930815-31-9.
- [8] *Material properties and performance* [online], Dostupné na internete: <<http://www.dupont.com/mcm/gtapesys/part4.html>>.
- [9] Fodel[®] Selector Guide [online], Dostupné na internete: http://www.mcm.dupont.com/MCM/en_US/Products/FODELSelectorGuide.mht.
- [10] Ashby, M. F.: *Advanced Materials and Predictive Design*, Phil. Trans. Soc. London, A322, 1987, s. 393-407 .
- [11] [http://www.heraeus-th.com/wch2/tfd/e_th_Home.nsf/\\$frameset/startneu](http://www.heraeus-th.com/wch2/tfd/e_th_Home.nsf/$frameset/startneu), Accessed: 10-15-2006.
- [12] Newmarkers, Passive Component Industry, May/June2002, pp.37.
- [13] Harper, A.: *Handbook of thick Film Hybrid Microelectronics*. Kingsport Press, Baltimore 1974, ISBN 0-07-026680-8.
- [14] Iwase, N., Ewanich, J.: *AIN LGAs for High Performance Packaging Applications*. Microelectronics International journal of ISHM-Europe, No.3. September 1997, pp.5-6.
- [15] Kulke, R., Simon, W., Rittweger, M a kol.: *Integration Techniques for MMICs and Chip Devices in LTCC Multichip Modules for Radio Frequencies*, Proceedings of the International Symposium on Microelectronics (IMAPS), Boston, 2000, s. 642-647
- [16] Fukui, M., Hori M., Makihara C., Terasawa M.: *Multi-layer ceramic Substrates (MCLS) The alternative Printed Circuit Board Technology*, ISHM 93 Proceedings, s. 172-177.
- [17] Bujaloboková M., Trnka P.: *Fail detection of HV machines through analysis-focused on transformers*, Advanced, 2007, [in print].
- [18] Marinescu A., Georgescu G., Filiseanu V.: *Ultrasonic equipment for detecting, measuring and locating of partial discharges at power transformers*. Dresden, 1991.
- [19] Gutten, M., Šimko, M., Michalík, J.: *Monitoring of Power Transformers with Thermovision Utilization*, Proceedings Measurement 2005, 5th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia, May 15-19, 2005.
- [20] Beran, J., Kmet', S.: *Predikcia spoľahlivosti a bezpečnosti (RAMS) elektrotechnických systémov v náročných prevádzkových podmienkach*, zborník medzinárodnej konferencie „Elektrotechnologie 06“, Plzeň - Nečtiny 2006, str. 194-197, ISBN 80-7043-476-7.