

## Oponentský posudek disertační práce

Autor disertační práce: Ing. Karel Hromadka

Název práce: **Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice**

Studijní obor: Elektronika

Školitel: doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Oponent: Ing. Vojtěch Heřmanský, CSc.

Předložená disertační práce má rozsah 105 stran a třístránkovou přílohu, obsahuje 73 obrázků a grafů a 7 tabulek. Práce uvádí 52 citací literatury. Disertant je autorem nebo spoluautorem sedmi prací vztahujících se k tématu práce a spoluautorem dvou funkčních vzorků souvisejících s tématem disertační práce. Je autorem nebo spoluautorem dalších prací z oboru elektroniky a senzorové techniky.

Cílem disertační práce bylo:

1. Realizovat substrát na bázi korund – měď vhodný pro výkonové aplikace.
2. Porovnat technologii přímého spojení korundu s mědí (DBC) a technologii tisku tlusté vrstvy mědi (TPC).
3. Realizovat a optimalizovat technologii DBC a TPC pro kusovou výrobu.
4. Vytvořit metodiku testování substrátů pro výkonové aplikace.

Všechny shora uvedené body se týkají výzkumu nové technologie spojení mědi a keramiky a jsou proto disertabilní.

Předložená práce řeší velmi aktuální problematiku z oblasti výkonové elektroniky, novou technologii pokovování korundových substrátů tlustými měděnými vrstvami tloušťky až 300  $\mu\text{m}$ . Práce vychází z techniky tlustých vrstev a z použití nejnovějších past, umožňujících postupné dosažení konečné tloušťky. Lze říci, že autor využil nejnověji dostupných materiálů, jejichž výzkum a vývoj probíhal paralelně s řešením tématu disertační práce. Autor správně zvolil pro řešení techniku tlustých vrstev ve variantě „Thick Printed Copper“ (TPC), kterou dosahuje lepších výsledků ve srovnání se starší technikou „Direct Bonded Copper“ (DBC). Autor experimentálně zvládl obě technologie a úspěšně doložil přednosti technologie TPC. Disertační práce má velký praktický význam. Přispěje výrazným způsobem k rozvoji a. s. ELCERAM v Hradci Králové, kde se předpokládá značné komerční využití korundových substrátů pokovených tlustými měděnými vrstvami v oblasti koncentrované fotovoltaiky, osvětlovacích systémů s LED o vysokém výkonu, chytrých výkonových modulů a v dalších aplikacích, kde je třeba odvést značné množství tepla z obvodu a přenést velké proudy.

Pokovování korundových substrátů mědí technikami tlustých vrstev je značně obtížné, ve srovnání s běžnými postupy, které pracují s pastami určenými pro výpal v oxidační atmosféře. Měď v pastě je přítomna ve formě malých částic s obrovským povrchem, které rychle reagují při výpalu jak s kyslíkem, tak s vodní parou. Značný problém proto představuje optimální výpal vrstev v ochranné atmosféře či ve vakuu. I malý obsah kyslíku či vodní páry vede k oxidaci mědi za vzniku oxidu měďného, který brání slinování mědi. Další problém představuje dosažení potřebné adheze měděné vrstvy na korundovém substrátu. Úspěch práce záležel tedy nejenom na úsilí disertanta, ale i na vlastnostech pece pro výpal měděných vrstev a na volbě správných past. Obtížnou byla skutečnost, že v průběhu práce se zdokonalovala jak nová pec CLASIC v a. s. ELCERAM, tak speciální pasty u firmy Heraeus. Lze s potěšením konstatovat, že disertant zvládl jak teoretické řešení problémů pokovování korundu mědí, tak optimalizaci vedoucí k prakticky využitelným vrstvám s dobrou adhezí. Autor v rámci práce vytvořil na fakultě experimentální zázemí a realizoval retortu z nerezavějící oceli pro výpal měděných vrstev i pro přímé spojování mědi s korundem technikou DBC. Velkým kladem jeho práce je úzká spolupráce se společností ELCERAM při optimalizaci vlastností vakuové pece pro výpal měděných vrstev a spolupráce na mezinárodním projektu ASES „Smart High Efficient Alternative Solar Energy Source“, ve kterém česká strana řeší mimo jiné chytrý výkonový modul přijímače slunečního záření využívající měděné vrstvy.

Autor při řešení správně vyšel z fázových diagramů soustavy měď-kyslík, na nichž vysvětlil jak mechanismus vzniku adheze, tak problematiku optimalizace výpalu nanesených měděných vrstev, správně analyzoval rozdíl mezi mechanismy adheze mědi na korundu vytvořené technologií DBC a technologií TPC a shrnul výhody technologie TPC pro výrobní aplikace. Provedl experimentální práce značného rozsahu a vypracoval rozsáhlou zkušební techniku. Práce obsahuje metalografické rozbory využívající rozsáhlou mikroskopickou techniku včetně elektronové mikroskopie a mikrorentgen spektrální analýzy. Za využití termo-gravimetrické analýzy past a vyšetření struktury vypálených vrstev vysvětlil správně mechanismy adheze i navrhl a prakticky odzkoušel optimální podmínky výpalu vrstev v ochranné dusíkové atmosféře za různých tlaků. Práce podává přehled o dosažených fyzikálních vlastnostech měděných vrstev a uvádí jejich aplikaci na praktických příkladech. Práce je pečlivě vypracována jak po formální, tak po věcné stránce, je přehledná a psaná dobrou češtinou. Získané výsledky prokazují, že cíle stanovené v disertační práci byly splněny. Za významný vědecký přínos je možné považovat vyřešenou technologii pokovování korundové keramiky mědí s velkým aplikačním potenciálem.

Publikační aktivita disertanta zahrnuje 16 prací včetně dvou funkčních vzorků. Všechny publikované práce se zabývají aktuálními tématy soudobé technologie pro elektroniku a senzorovou techniku.

K práci mám několik dotazů, které nikterak nesnižují kvalitu předložené práce:

1. Ve struktuře současně vypalovaných měděných vrstev na obr. 15, 16, 18, 21 jsou vidět ve větší či menší míře oxidické vměstky a oxidické povlaky. Kde vidíte zdroje kyslíku a vodní páry v ochranné atmosféře a jaké opatření navrhuje k jejich omezení?
2. V průběhu technologického procesu výroby modulů na substrátech z korundu pokovených mědí procesem TPC dochází v některých případech ke ztrátě adheze měděné vrstvy na korundu. Kde vidíte příčinu a jaké opatření navrhuje pro odstranění tohoto jevu?
3. Při nanášení ochranné vrstvy ENIG na měděné vrstvy TPC může docházet k problémům při nanášení bezproudové vrstvy niklu. Napadá vás nějaké opatření na straně struktury měděné vrstvy, které by mohlo tento jev potlačit?
4. V práci popisujete kombinaci výpalu v ochranné atmosféře s výpalem za sníženého tlaku. Jaké výhody a nevýhody má toto řešení?
5. Jaké principiální výhody vidíte u technologie TPC vůči technologii DBC? Proč doporučujete zavést technologii TPC do výroby v a. s. ELCERAM a ne DBC?

## Závěr

**Disertant splnil v plném rozsahu cíle disertační práce. Prokázal hluboké znalosti a schopnost samostatné vědecké práce. Předložená disertační práce pana Ing. Karla Hromadky splňuje obsahem i rozsahem všechny požadavky kladené na disertační práci, a doporučuji ji k obhajobě v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. § 47. Po úspěšné obhajobě doporučuji udělení titulu Ph.D.**

V Hradci Králové, dne 28. října 2015

  
Ing. Vojtěch Heřmanský, CSc.



## OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

**Autor:** Ing. Karel Hromadka – FEL ZČU v Plzni  
**Název:** Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice  
**Oponent:** Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
**Studijní obor:** Elektronika

---

Předložená disertační práce o 108 stranách textu s tabulkami, grafy, obrázky a přílohami se týká problematiky substrátů pro výkonové aplikace v elektrotechnice. Autor v práci uvádí široký přehled problematiky, kde čerpá z řady klasických pramenů a v průběhu práce přidává vlastní poznatky a návrhy řešení.

### **a) Zhodnocení významu disertační práce pro obor**

Zvolené téma je vysoce aktuální a práce tak přispívá snaze praxe i výzkumu k nalezení nových řešení substrátů, které by umožnily vyšší výkonovou zátěž při současném udržení nebo zlepšení hledisek ekologie, spolehlivosti a samozřejmě i ceny.

### **b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle**

Autorem zvolený postup práce byl logicky uspořádán od přehledu možností přes jejich využití ke konečné volbě vhodného řešení. Občas se tak nevyhnul některým nadbytečným informacím, ale podstatné nevynechal a svoje volby podpořil fakty.

Metody zpracování odpovídají stanoveným záměrům. Autor zjevně hledal i nové možnosti a lze konstatovat, že se úkolu zhostil dobře, přestože podmínky a vybavení pro tak složitou problematiku jistě nemohl mít optimální.

V textu je uvedena řada odkazů na domácí i zahraniční publikace, ale uvedení současného stavu a předpokládaného vývoje v oblasti disertace by mělo být v práci výraznější.

Stanovené cíle lze považovat za splněné, autor provedl velké množství měření, hodnocení a srovnání bylo provedeno z řady možných hledisek.

### **c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce**

Disertační práce jednoznačně uvádí, jak naprostá většina uvedených informací a provedených experimentů směřovala ke konkrétním řešením uvedených cílů, které se dočkaly i zavedení v průmyslové praxi. Práce dokumentuje i schopnost doktoranda komunikovat s cílem konkrétního řešení s externími subjekty.

Přestože autor svůj přínos oboru v práci příliš nezdůraznil, lze jako hlavní přínos jeho práce označit experimenty i realizací podepřený návrh výrobního postupu substrátů s vrstvami realizovanými technologií TPC, konkrétní srovnání s technologií DBC, návrh, realizaci a využití plynotěsné retorty, ale i přispění cílům projektu ASES. O úspěšnosti jeho aktivit svědčí i realizace jeho výsledků v průmyslové praxi.

### **d) Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

Autor postupoval zjevně jak ve studiu, experimentech i psaní disertační práce systematicky, práce je přehledná, dobře členěná, formální úprava splňuje požadovanou úroveň a používání českého jazyka jak po pravopisné, tak po slohové stránce lze označit jako příkladné.

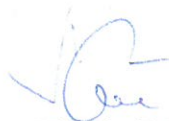
**e) Vyjádření k publikacím studenta**

Autor v disertační práci uvádí čtrnáct publikací, jichž je autorem nebo ve většině případů spoluautorem. Dle mého názoru tak prokázal svoji schopnost prezentovat na patřičné úrovni svoje myšlenky i spolupracovat s jinými autory na společných dílech. Rád bych zdůraznil, že to vše v technologické oblasti, kterou pokládám v plnění všeobecných požadavků na prestižní publikace za obtížnější než v jiných oborech. Výsledky disertační práce jsou jistě využitelné v praxi a některé myšlenky a zkušenosti určitě naleznou pokračování ve vývoji a výzkumu uvedeného oboru jak na FEL ZČU, tak v praxi.

**f) Jednoznačné vyjádření oponenta zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě**

Disertace splňuje podmínky zákona č.111/98 Sb. a doporučuji ji k obhajobě.

V Plzni 5.11.2015



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

Posudek oponenta disertační práce s názvem:  
**Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice**

Autor: **Ing. Karel Hromadka**

Práce obsahuje 105 textových stran, 3 strany příloh, 73 obrázků, 7 tabulek. Seznam literatury má 52 položek. Seznam všech publikací autora má 14 položek, k tématu práce se jich vztahuje 7, vytvořil 2 funkční vzorky.

Aplikace výkonových elektronických součástek pro řízení pohonů, využití LED pro osvětlovací systémy v automobilech, solární zdroje s koncentrátory světla – to jsou vybrané příklady z mnoha dalších, jejichž společný problém je efektivní odvod ztrátového tepla při vysoké provozní spolehlivosti a současně přiměřených pořizovacích i provozních nákladech. Předložená disertační práce se právě touto vysoce aktuální problematikou zabývá.

Disertant po stručném přehledu způsobů vytváření podložek pro výkonové čipy vybírá dvě varianty, obě s izolantem z keramiky. Posuzuje technologii přímého spojení měděné fólie s keramikou (DBC) a tiskem nanášené měděné pasty na keramický podklad (TPC) s ohledem na jejich mechanické a tepelné vlastnosti a dosažitelné jemnosti vytvářeného obrazce spojů. Na základě kritického hodnocení obou metod volí přednostně tlustovrstvou technologii a určuje cíle disertační práce (kap.2.).

Rozsáhlá experimentální činnost směřovala k nalezení optimálních technologických podmínek přípravy keramických podložek s tloušťkou měděné vrstvy až 300  $\mu\text{m}$ , ověření metod zjišťování dosažených výsledků a návržení obrazce testovací struktury, k optimalizaci vybraných procesů výroby. Výsledky disertační práce měly i bezprostřední aplikační výstup vázaný na podnik společnosti ELCERAM, kde byly navrženy a ověřeny substráty zavedeny do výroby.

Cíle disertační práce, uvedené v kap. 2. byly splněny v plném rozsahu. Navíc byl proveden transfer technologie TPC do společnosti ELCERAM. Za zcela nové považují komplexní srovnání technologií DBC a TPC, hodnoty materiálových veličin vypálených vrstev a soubor testovacích zkoušek včetně postupů přípravy zkušebních vzorků.

Předložená práce je sestavena systematicky, je přehledná. Formální stránka je téměř výborná, drobnými nedostatky jsou

- opakování odstavce na str. 35 a 36 (Mezi výhody ... tepelně izolačním materiálem),
- zápis čtyřvodičového připojení ("čtyř – vodičový") měřicího přístroje pro měření malých odporů,
- opakované užívání nesprávných názvů veličin rezistivita, konduktivita.

Publikace disertanta obsahují 7 titulů vztahujících se k tématu práce (u 1. a 6. dle seznamu na str. 104 chybí anotační údaje), 7 titulů mimo téma. V rámci řešení disertační práce byly zhotoveny 2 funkční vzorky.

Dotazy a připomínky k práci:

- 1) V textu je několikrát zmiňována "plynotěsná retorta" užitá k přípravě vzorků v muflové peci. Význam označení "plynotěsný" je poněkud v rozporu s tvrzením v odst. 6.1.1, kde uvádíte, že: "Kyslík může do retorty vnikat z jejího okolí ...". Je nutná dokonalá plynotěsnost? Nebylo označení retorty voleno chybně?
- 2) V odst. 6.9.1 a na str. 45 uvádíte, že: "V případě měření termokamerou je vhodné měřenou oblast opatřit černou vrstvou s definovanou emisivitou a usnadnit tak určení emisivity měřeného vzorku." Vysvětlíte!
- 3) Na str. 52 až 59 se věnujete výskytu Bi ve vrstvě Cu a v keramickém substrátu. Jaký je zdroj Bi a jaký význam má jeho přítomnost ve vrstvách?

Disertační práce pana Ing. Karla Hromadky na téma *Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice* splňuje podmínky dle zákona č. 111/1998 Sb., § 47 a **doporučuji** ji k obhajobě.



Doc. Ing. Jan Urbánek, CSc.

V Praze dne 5. listopadu 2015