



OPONENTSKÝ POSUDEK DOKTORSKÉ DISERTACE

Autor : Ing. Tomáš Novák – FEL, Západočeská univerzita v Plzni.
Název : Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji.
Oponent : Prof. Ing. Lubomír Hudec, DrSc – emeritní profesor VŠCHT v Praze.
Obor : Elektronika

Hlavní motiv této práce souvisí s šířením bezolovnatých pájecích slitin. Není totiž dosud známa jediná, která by svými vlastnostmi převyšovala ostatní. To je hlavní důvod, proč **je toto téma stále aktuální.**

Cíle vycházejí ze specifikace na str.12 a jsou celkem tři. Z nich první se týká materiálových vlivů a končí ověřením mechanické pevnosti spoje a prvkovou analýzou testovaných vzorků. Druhý se týká technologických a procesních vlivů pájení a zrychleného stárnutí bezolovnatých spojů. Třetí cíl – definice závěrů pro praktické využití. **Cíle jsou disertabilní, pokud přinášejí něco originálního a vědecky významného.** V tom též vidím smysl této disertace..

Použitá metodika řešení je založena na postupu, který odpovídá cílům a charakteru oboru.

Formálně jde o text zpracovaný velmi dobrou češtinou, i když se najdou nepřesnosti, některé formální i věcné nedostatky (viz dále připomínky). Práce má očekávanou grafickou úpravu a dobré zpracování - obsahuje 149 číslovaných stran textu včetně rozsáhlých a kvalitních příloh. Rešeršní část, představující současný stav problematiky (do str. 51) využívá celkem 61 položek seznamu použité literatury (str. 102 až 106). Radím sem i kap.5, která má ještě charakter přehledu a experimentální autorovy činnosti se netýká. K práci mám některé **formální připomínky, např:**

1. U použitých přístrojů a aparatur bych doporučoval uvádět výrobce.
2. Literární citace nejsou uvedeny podle normy – a hlavně, jsou uváděny nejednotně, např. autoři jsou někde uvedeni bez počátečního písmene křestního jména, někde je křestní jméno před příjmením, jinde za ním.
3. Str.19. Tabulky se nerozdělují na 2 stránky.
4. Str.20 a dále – Pájky nejsou označovány jednotně. Např. Sn-37Pb a Sn37Pb a další. Jak je to správně?
5. Str.33, Obr..6 – V obrázku nevystupuje teplota, tak z něj nemůže plynout, že růstová rychlost je vyšší pro vyšší teploty stárnutí.
6. Str.33 dole Zdánlivá aktivační energie – definice.
7. Na str.33 je uveden odkaz na rovnice (9),(10) v souvislosti s difúzí intermetalické sloučeniny (IMC). Uvedené rovnice se však týkají drsnosti povrchu.
8. Str.49: Uvádíte odkaz na obr.10 v souvislosti p-hodnoty, obrázek však představuje fázový diagram Au-Sn.
9. Str.50: Odkaz na značení vzorků v tab. 10 – 13, asi má být 11 – 14.
10. Str.75: Třetí řádek textu nedává smysl.
11. Str. 84 nad obr.60 jsou uvedeny pájecí profily P1,P2,P3, v textu pod obrázkem jsou však pájecí profily P4,P5,P6.
12. Slovo obrázek pod obrázkem se běžně zkracuje na obr. Stejně tabulka nad tímto objektem na tab.

Věcně : Stěžejní díl disertace představují kapitoly 5 až 9. Kap.5 se týká smáčivosti v závislosti na drsnosti povrchu, kap.6 prvkové analýzy IMC, kap.7 její tloušťky vrstvy, kap.8 měření mechanické pevnosti pájených spojů a kap 9 výsledků experimentů a doporučení pro praxi.

Výsledky zahrnují spektrum náročné inženýrské a výzkumné práce z různých oblastí elektroniky, měřicí techniky a technologie IMC a **jsou přínosné pro obor a společenskou praxi** (kap..9 a Závěr, str. 92 až 101) a nadto podpořeny sedmnácti téměř vesměs konferenčními příspěvky

domácími i zahraničními a jedním funkčním vzorkem z r. 2008. Jedná se o aplikovaný výzkum.. O obrovském rozsahu vykonané práce a přínosu pro praxi a vlastní pracoviště není pochyb.

Problémem je nalézt vědecký přínos. Uchazeč nerozvádí žádné úvahy o původnosti, které by vzešly např. z rozboru publikací jiných autorů, ze zkušeností odborníků dalších akademických pracovišť a z významné výrobní produkce. Jen tak by mohl doložit originalitu svých závěrů.

K publikační činnosti: Rozsah publikační činnosti jsem již ocenil výše. Jde o kvalitní prezentace, chybí mi však alespoň jedna v zahraničním impaktovaném časopisu, tak jak se to zpravidla dnes sleduje při obhajobách disertací. K podílu na zmíněném prototypu a společných člancích se nejlépe může vyjádřit školitel (nejde o procenta, ale o věcný přínos).

Dotazy a připomínky k věcné stránce :

1. Co Vy sám považujete za originální vědecký přínos a proč.
2. Prosím o vyjádření školitele k podílu na funkčním vzoru a společných publikacích.
3. Str.57: Uvádíte hodnoty smáčecí síly, které jsou zjišťovány z obr.24. Postup není jasný. Vaše vysvětlení.
4. Str.90: Řeší se otázka hmotnosti pájecích past ve spojích.. Rozdíly jsou hodně pod jedním procentem. Má praktický význam zabývat se takovým rozdílem?
5. Závěry: Pro nejlepší vlastnosti pájených spojů dává nejvhodnější povrchovou úpravu čistá měď, problémem je však její postupná oxidace. Nelze použít nějakou chemickou úpravu povrchu, která by oxidy před pájením odstranila.
6. Výsledky jsou podle autora v řadě případů rozporné. Zřejmě by prospělo provádět životnostní testy delší dobu. Nejkratší uváděné doby nemají valný význam..
7. Z praktického hlediska.asi není přínosné studovat závislost smáčivosti plošných spojů na drsnosti za použití brusných papírů. V praxi, myslím, nikdo nebude spoje brousit „šmirglem.“ Nadto postrádám pro upřesnění konkrétní povrchovou úpravu broušením. – počet aplikací, přítlačová síla apod.
8. Oceňuji prvkovou analýzu se záměrem hledat intermetalické sloučeniny ve strukturách pájek (metalografické výbrusy) a měření tloušťky vrstev IMC. Domnívám se, že podrobnější studium vývoje IMC v čase stárnutí by zajistilo větší publikovatelnost výsledků. Vyplatilo by se sledovat podrobněji menší soubor a omezit rozsah studovaných pájek. – Pevnost spojů se zde vysvětluje vznikem dutin v pájených spojích. Originální by bylo zdůvodnit jejich vznik a hledat cestu k jejich odstranění. Zřejmě by to zlepšilo rozptyl naměřených hodnot a reprodukovatelnost výsledků.

Z Á V Ě R :

Mé připomínky mají posloužit ke zkvalitnění textu disertace o určité doplňky, které jsem v práci postrádal. Jde o disertaci s praktickými výsledky a splněnými cíli. Vědecký přínos je třeba upřesnit při obhajobě. Ing. Tomáš Novák splnil avizované záměry svého výzkumu, má potřebné znalosti svého i příbuzných oborů a je schopen samostatně pracovat na výzkumných projektech. Prohlašuji, že jeho práce splňuje s uvedenou připomínkou požadavky zákona č. 111/98 Sb., §47, odst.4 o vysokých školách i čl. 52 odst. 8 Studijního a zkušebního řádu.

Doporučuji práci k obhajobě.

V Praze dne 11. ledna 2013.





Oponentní posudek na disertační práci

Název: Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji

Doktorand: Ing. Tomáš Novák

Autor posudku: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Ústav elektrotechnologie, FEKT VUT v Brně

Tel.: 541 146 140, fax: 541 146 147, e-mail: stary@feec.vutbr.cz

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Bezolovnaté pájení i spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje jsou často diskutované otázky současného elektrotechnického průmyslu. Práce patří do kategorie technologických prací s velkým množstvím experimentů a širším spektrem řešených otázek. Práce je významná pro obor poměrně detailně řešenou problematikou sledování růstu intermetalických sloučenin včetně prvkové analýzy v různých materiálových a procesních kombinacích. Vyhodnocování pevnosti pájeného spoje v relaci s tloušťkou intermetalické vrstvy po definovaném izotermálním stárnutí včetně doporučení pro praxi je významným přínosem disertační práce. Práce se může stát východiskem pro další práce s úzce definovanými teoreticko/technologickými otázkami.

Vyjádření k postupu řešení problému

Řešení práce probíhá od definovaných cílů práce a teoretické části včetně analýzy problému přes těžiště práce, které spočívá v části metodicko-experimentální s vyhodnocením včetně diskuse dosažených výsledků. Postup řešení je v souladu s běžnou praxí.

Vyjádření k použitým metodám

Metody použité pro řešení práce byly voleny racionálně a nelze nic namítat. Testované vzorky i mikrovýbrusy byly podrobeny analýzám pomocí metalografického, laserového konfokálního a elektronového rastrovacího mikroskopu. Složení intermetalických vrstev bylo prováděno EDAX prvkovou analýzou. Je škoda, že k poměrně profesionálním analytickým metodám vyhodnocování výsledků byla použita nižší technologická úroveň zařízení pro realizaci pájených spojů (JBE 1113 a HR 21).

Vyjádření ke splnění cíle disertační práce

Pozornost doktoranda se soustředila na analýzu bezolovnatých pájených spojů realizovaných pájením přetavením na rozdílných materiálových základech s rozdílnými procesními podmínkami.

V práci byly definovány dílčí cíle:

- materiálové vlivy na tvorbu a růst intermetalických sloučenin včetně prvkové analýzy v různých materiálových kombinacích a vyhodnocování pevnosti pájeného spoje.
 - dílčí cíl splněn
- procesní vlivy pájení a zrychleného stárnutí na tvorbu a růst intermetalických sloučenin včetně prvkové analýzy v korelaci s tloušťkou intermetalické vrstvy i s pevností pájeného spoje
 - dílčí cíl splněn s menší výhradou. Procesní vlivy byly v práci soustředěny zejména na izotermální stárnutí. V práci nebyly podrobněji rozebrány a diskutovány vlivy teplotního profilu při pájení včetně integrálu dodané energie. Mechanická pevnost byla sledována po zrychleném stárnutí pouze v kladných teplotách.
- definování závěrů pro praxi k určení správných procesních a materiálových nastavení.
 - dílčí cíl splněn s menší výhradou, neboť byl orientován zejména do materiálových otázek a vlivu izotermálního stárnutí na pevnost pájeného spoje. Procesní vlivy – zejména nastavení teplotního profilu v závěrečném doporučení bylo zmíněno jen okrajově.

Lze konstatovat, že cíle vytčené v této disertační práci i přes uvedené připomínky byly poměrně dobře zvládnuty. Použité závěry z experimentů jsou použitelné pro praktické aplikace.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Pozorování růstu intermetalických sloučenin na rozhraní pájený spoj/pájka pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu byla provedena s nadhledem a odbornou erudicí. Součástí vyhodnocování pomocí elektronového mikroskopu byla prvková analýza, která kvalitativně i kvantitativně přiblížila některé pohledy na mikrovýbrus pájeného spoje. Pečlivě byly posouzeny materiálové faktory i vlivy času v izotermálním stárnutí pájeného spoje na růst intermetalických sloučenin. Sledování mechanického namáhání materiálově rozdílného pájeného spoje stříhem na různé povrchové úpravě v časovém horizontu izotermálního stárnutí bylo provedeno pečlivě. Výsledky byly důkladně analyzovány, jak z hlediska časové závislosti stříhové síly, tak i růstu intermetalických sloučenin.

Nedostatek předkládané práce spatřuji v malém podílu novějších prací v rešeršní části práce, která mohla být více aktuální, chybí i některé nové trendy – např. problematika mikrostrukturální simulace a modelování aj. Více mohly být rozpracovány a diskutovány výsledky části experimentální v návaznosti na teoretické výpočty a úvahy uvedené v teoretické části práce.

Výsledky disertační práce jsou přehledně zpracovány a analyzovány. Konkrétní přínos předkladatele disertační práce je v rozsáhlých měřeních a analýzách materiálových a procesních vlivů na růst intermetalických sloučenin a sledování korelací s pevností pájených spojů. Z výsledků je zřejmé, že jde o původní práci.

Disertační práce je doplněna i rozsáhlou publikační činností autora vč. účasti na tuzemských i zahraničních konferencích.

Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Obsahové členění práce je poměrně přehledné. Práce je rozdělena do 9 kapitol. Teoretická část je zaměřena do oblasti materiálové i procesní a velkým podílem se zabývá problematikou a hodnocením vlastností intermetalických sloučenin pájeného spoje. Těžiště práce je v části metodicko-experimentální s vyhodnocením a diskusí dosažených výsledků. Pozitivně lze hodnotit rozsáhlý záběr mikrostrukturálního vyhodnocování pájeného spoje i sledování mechanického namáhání pájeného spoje stříhem na rozdílné povrchové úpravě v časovém horizontu izotermálního stárnutí. Značení vzorků pro široký záběr experimentů zvládní doktorand přehledně a logicky.

Grafická úroveň práce i formální úprava je na velmi dobré úrovni a názorně doplňuje řešenou problematiku.

Formální připomínky: V práci se vyskytují drobné překlepy např. mylné značení teplotního profilu 1, 2, 3 místo správného označení 4, 5, 6 na str. 84

Odborné připomínky jsou drobného charakteru - např. na str. 34 ...válený Cu povlak, na str. 41 chybí zmínka o agresivitě tavidla (úroveň aktivace) u pájecích past.

Jazyková úroveň práce je na velmi dobré úrovni, je psaná technicky strohým stylem.

Vyjádření k publikacím

Publikace předkladatele disertační práce jsou poměrně rozsáhlé, původní a zastoupené účastí na zahraničních i tuzemských konferencích a příspěvcích ve sbornících a odborných časopisech.

Otázky pro doktoranda

- Byla kontrolována reprodukovatelnost naneseného množství pájecí pasty dávkovačem, event. jakými metodami?
- Kde vidíte příčinu velké rozkolísanosti výsledků u měření pevnosti – obr. 52 až obr. 56?
- Použité pájecí pasty obsahovaly tavidla rozdílných aktivit. Nedomníváte se, že rozdílná agresivita tavidel mohla vést ke zkrácení některých výsledků?

Vyjádření oponenta

Lze ocenit široký záběr poměrně aktuální problematiky bezolovnatého pájení. Význam pro praxi lze spatřovat ve sledování vlivu materiálových i procesních faktorů na mikrostrukturální i mechanické vlastnosti intermetalických sloučenin pájeného spoje a získané korelace.

Dosažené výsledky lze hodnotit kladně s přínosem pro praxi. Drobné formální i odborné nedostatky a připomínky výrazně nesnižují odborný charakter práce. Doktorand prokázal v práci schopnosti samostatné vědecké práce a orientaci v dané problematice. Předložené výsledky v práci a

publikované výsledky předurčují další úspěšný rozvoj osobnosti doktoranda. Lze konstatovat, že disertace, i přes uvedené připomínky a nedostatky splnila sledovaný cíl.

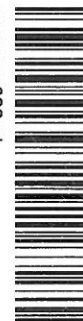
Lze konstatovat, že disertace splňuje podmínky samostatné vědecké práce, obsahuje původní a autorem disertační práce publikované výsledky.

Na základě výše uvedeného disertační práci

d o p o r u č u j i k o b h a j o b ě



Zpracoval: ing. Jiří Starý, Ph.D.
V Brně dne 25. 1. 2013



Posudek oponenta disertační práce
Název: Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji
Autor: Ing. Tomáš Novák

Práce obsahuje 108 textových stran, 39 stran příloh, 227 obrázků, 32 tabulek. Seznam literatury má 61 položku. Seznam všech publikací autora má 18 položek, k tématu práce se jich vztahuje 13.

Téma předložené disertační práce je výrazem dlouhodobě sledovaných trendů v elektronice na mateřské katedře disertanta. Znalost struktury pájených spojů, průběh jejich tvorby, materiálové a technologické aspekty jsou podmínkami konstrukce a realizace spolehlivých spojů v elektronických zařízeních. Globální téměř totální odklon pájecích technologií od měkkých pájek s olovem k materiálovým soustavám pájek bezolovnatých se vyznačuje snahami nalézt technicky i ekonomicky akceptovatelné náhrady. Tématem disertační práce navazující na autorovu stejnojmennou písemnou práci ke státní doktorské zkoušce se dílo řadí do velké množiny prací sledujících obdobné cíle. O významu pro obor nelze pochybovat.

Disertant vycházel ze své písemné studie. Úvodem si stanovil tři dílčí cíle práce. V teoretické části přehledně uvedl základní echnologie propojování, souvisecí materiály a vybrané technologie. Charakterizoval jednotlivé fáze tvorby pájeného spoje. Detailněji se zabýval stěžejní problematikou práce – intermetalickými sloučeninami (dále jen IMC). S ohledem na formulované cíle vybral materiály a metody rozsáhlých experimentů, metody měření, měřicí přístroje a zařízení. Zvláštní pozornost věnoval zpracování a analýze naměřených hodnot. Škála sledovaných povrchů vzorků, pájek, variant zrychleného stárnutí a procesních faktorů atd. dala vzniknout velkému objemu dat. Je možné snad vytknout provádění experimentů bezprostředně nesouvisejících se sledovanými intermetalickými sloučeninami, jako je hodnocení smáčivosti různě drsných povrchů. Význam zejména s odkazem na důležitost při pájení vlnou již není aktuální.

Výsledky práce prezentované zejména v 9. kapitole a souhrnně na str. 100 odpovídají stanoveným cílům, které jsou splněny. Bohužel formulace závěrů není dost přesvědčivě koncentrovaná a exaktní. Očekávám při představení práce při její obhajobě "hutnější" formu.

Za disertabilní považuji komplexní pohled na růst IMC v široké paletě kombinací materiálů povrchové úpravy připojovacích plošek, aplikovaných pájek a zrychleného stárnutí.

Práce je systematicky sestavená, přehledná, po grafické stránce vynikající. Fotografie metalografických výbrusů jsou příkladné. Drobné prohřešky jazykové, stylistické i formální jsou výjimečné. Není uveden seznam veličin, pouze užitých zkratk.

Z věcných připomínek některé závažnější uvádím (pokud je text formulován jako otázka, prosím při obhajobě o vysvětlení):

materiálografický výbrus – vžitý a běžně užívaný termín je "metalografický výbrus",

str. 16 – tvrzení o tvorbě IMC na Cu plošce chemicky ovrstvené Sn je správné?

str. 18 – výčet kritérií pro výběr složek bezolovnaté pájky není správný, vylučoval by Cu a Ag,

str. 33 – aktivační energie Q_x zdánlivá aktivační energie Q ?

str. 46 – užití rezistorové čipy 1206 mají kovové kontaktní vývody. Jejich materiál ovlivní mechanickou pevnost i růst IMC v jejich blízkosti. Specifikujte!?

str. 47 – tabulka 9 – čas pájení je a) doba setrvání při teplotě pájení nebo b) celková doba průchodu pecí?

str. 72 – v textu je tvrzení, že Cu_3Sn je nesmáčivá. Je to ve sledovaném případě relevantní? Jak se z hlediska smáčivosti chová Cu_6Sn_5 ?

str. 77 – Jaký vliv množství pájky (M1, M2) má na průběh tvorby spoje? Z fotografií v příloze je patrné, že tvar filetu pájky na čipu 1206 je dutý i vypuklý. Je opravdu příčinou rozdíl M1-M2?

kap.9.1.2 – tvrzení vyžadující vysvětlení: Sn galv. Sn im. – změny F_{\max} jsou zaviněny dutinami, ENIG – kde se vzalo Ag v IMC, když pasta je SnPb(bez Ag)?

Publikační aktivita disertanta je více než dobrá – celkem 18 položek. V práci uvedený přehled svědčí o dlouhodobém zájmu o materiály a technologické procesy v elektronice. Je autorem či spoluautorem celkem 13 položek blízkých tématu práce. Většinou jde o referáty na mezinárodních konferencích.

Disertační práce pana Ing. Tomáše Nováka na téma *Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji* splňuje podmínky dle zákona č. 111/1998 Sb., § 47 a **doporučuji** ji k obhajobě.

V Praze dne 8. března 2013



doc. Ing. Jan Urbánek, CSc.