

# POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor práce: **Ing. Václav Wirth**

Oponent práce: **doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.**

Název: **Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje.**

## Posudek:

Práce je rozdělena na část teoretickou, a část experimentální. Součástí práce jsou čtyři přílohy obsahující: patenty pájecích slitin pro roky 2005 až 2010, Hornovy kvantity, snímky struktury pájených spojů a katalogové listy pájecích past.

V teoretické části se autor zabývá měkkým pájením, pájecími slitinami, povrchovými úpravami, dutinami v pájených spojích, intermetalickými sloučeninami a jejich vlivem na kvalitu životnost spoje, teplotním profilem a heating faktorem. Teoretická část práce tvoří ucelený přehled a dobře navazuje na část experimentální.

Experimentální část práce nejprve popisuje materiály a teplotní profily, jež byly použity pro přípravu vzorků. Dále se autor v této části práce zabývá počítáním heating faktoru a tloušťkou intermetalických vrstev, kdy sleduje závislosti mezi těmito parametry u různých typů pájecích slitin a povrchových úprav pájecích plošek. Vzorky autor podrobuje zrychlenému stárnutí (suché teplo) a sleduje jeho vliv na další nárůst intermetalických vrstev. Stárnuté a nestárnuté vzorky podrobuje mechanickému namáhání, kde vyhodnocuje pevnost spoje s ohledem na tloušťku intermetalických vrstev ve spoji a s ohledem na četnost dutin (voidů) v pájených spojích. V neposlední řadě se zabývá tloušťkou intermetalických vrstev s ohledem na opakované přetavení pájecí slitiny. Experimentální část tvoří ucelený přehled a experimenty na sebe dobře navazují. V experimentální části práce se mi velice líbilo její provázání a to především porovnání vlivu dutin a IMC na mechanické namáhání.

Práce obsahuje minimum překlepů a po jazykové stránce je na velmi dobré úrovni. Rozsah práce je odpovídající. Autor v práci použil relevantní odkazy na literaturu, kterou řádně cituje v textu. Přesto se v textu najdou pasáže, které by bylo vhodné citovat – například:

- Str. 10 - Při montáži v elektronice se využívá především měkkého pájení, které je charakteristické teplotou tavení pájky do 450 °
- Str. 12 – V dnes nejpoužívanější pastě Type 3.....

Vybrané formální připomínky k práci:

- Autor uvedl katalogové listy pájecích past v příloze práce. Přesto bych u popisu pájecích past – tabulka 6 – doplnil důležitou informaci a to jaký typ tavidla pasty obsahují.
- U grafu na obr. 25 až 48 bych doporučil autorovi lépe popsat osu x, respektive co znamená 80-4, 80-16, 80-32, 120-4, 120-16, 120-32.
- U grafu na obr. 51 až 65 bych uvítal na ose x popis - teplotní profil 1 až 4

Dotazy:

- V souvislosti s uvedeným textem v tabulce 6 na Str. 20 bych se rad zeptal: Jak závisí spolehlivost s růstem intermetalické vrstvy Ag3Sn u SnAg pájek? Proč je SnBi využitelná jen pro některé aplikace?

- Na str. 31-32 autor zmiňuje definici heating faktoru. Jak je definován heating faktor pro případ neeutektické slitiny?
- Na str. 35 autor píše: „Do experimentu byly využity 3 povrchové úpravy, které vyhovují dobrou rovinností, dobrou skladování a jsou vhodné i pro opakované přetavení.“ Je povrchová úprava s imersním cínem vhodná pro opakovatelné přetavení?
- U měřených teplotních profilů například obr. 18 se při chladnutí objevuje nárůst teploty. Co tento nárůst způsobuje?
- Na str. 41 autor zmiňuje, technologické okno pro použité pájecí pasty a s tím související velikost heating faktoru. Obdobně Na str. 52 zmiňujete doporučený rozsah heating faktoru. Nicméně v práci jsem nezaznamenal vypočtené rozmezí heating faktoru pro použité pájecí pasty na základě doporučených teplotních profilů od výrobce. Prosím o doplnění.
- Ve kterém místě došlo při mechanickém namáhání k odtržení - u součástek nebo na pájecích ploškách?
- Na str. 65 autor uvádí: „Zvyšující se hodnota heating faktoru by měla ve spojích snižovat množství dutin, jelikož je slitina déle v kapalném skupenství a plyny mají delší čas na opuštění prostoru spoje.“ V té souvislosti bych se rad zeptal - co ovlivňuje vznik dutin v pájeném spoji? Jaký vliv zde hraje povrchové napětí, teplota, oxidace?

#### **Závěr posudku:**

Výsledky práce byly publikovány nejen v impaktované publikaci ale také na několika konferencích. Publikační aktivita doktoranda je adekvátní. Téma práce řeší aktuální problematiku bezolovnatého pájení. Doktorand provedl zhodnocení současného stavu a navázal na výsledky známé z literatury. Oceňuji experimentální činnost doktoranda, která je dobře provázána. Výsledky experimentu a jejich zhodnocení jsou zajímavé nejenom pro odbornou veřejnost, ale i pro praxi.

**Na základě výše uvedeného doporučuji po úspěšném obhájení práce udělení titulu Ph.D.**

V Praze dne 27.9.2017



.....  
 doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
 vedoucí katedry elektrotechnologie  
 Fakulta elektrotechnická  
 ČVUT v Praze

## Oponentní posudek na disertační práci

**Název: Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje**

**Doktorand:** Ing. Václav Wirth

**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

Spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje je často diskutovaná otázka v elektrotechnickém průmyslu. Disertační práce patří do kategorie technologických prací s velkým množstvím experimentů a širokým spektrem řešených otázek. Práce je významná pro obor detailně řešenou problematikou sledování růstu intermetalických sloučenin, výskytem dutin i měřením pevnosti pájeného spoje v různých materiálových a procesních kombinacích. Vyhodnocování a diskuze vlivu materiálových a procesních faktorů, zejména heating faktoru na růst intermetalické sloučeniny, na pevnost pájeného spoje, na výskyt dutin 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 a doporučeními. 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 DPS byly profesionálně a reprodukovatelně osazeny a zapájeny. Dutiny v pájených spojích byly pozorovány rentgenem a SW vyhodnoceny. Mikrovýbrusy byly podrobeny analýzám pomocí metalografického, laserového konfokálního a elektronového rastrovacího mikroskopu. Složení intermetalických vrstev bylo prováděno EDAX prvkovou analýzou.

### 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 4 dílčí cíle:

- Cíl práce č. 1: Pomocí experimentu stanovit působení volby aktuálně využívaných materiálů na vznik a růst intermetalických vrstev v bezolovnatém pájeném spoji. Dále sledovat korelaci mezi vznikem intermetalických vrstev a mechanickou pevností spoje. Při měření tloušťky IMC vrstev využít univerzální postup, který by umožnil snadné porovnání výsledků.
  - dílčí cíl splněn s menší připomínkou, že mohla být stanovena chyba a reprodukovatelnost u navržené metody softwarové úpravy snímku.
- Cíl práce č. 2: Sledovat vliv nastavení teplotního profilu při přetavení pájecí slitiny na vznik intermetalické vrstvy bezolovnatých pájených spojů. Využít popisu teplotního profilu při přetavení pomocí hodnoty heating faktoru.
  - dílčí cíl splněn.
- Cíl práce č. 3: Experimentálně ověřit vývoj intermetalických vrstev v bezolovnatém spoji při vícenásobném přetavení.
  - dílčí cíl splněn
- Cíl práce č. 4: Definovat vhodné závěry, které budou využitelné pro odborníky ve výrobě a návrhu elektronických zařízení.
  - dílčí cíl splněn. Inspirativní je tvrzení ze str. 68 ...množství dutin ve spoji má třikrát větší vliv na maximální sílu pro utržení součástky než tloušťka IMC.

Lze konstatovat, že cíle vytčené v této disertační práci 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**

Sledování vlivu růstu intermetalických sloučenin na pevnost pájeného spoje, výskyt dutin a analýza korelací byla provedena s nadhledem a odbornou erudicí. Pečlivě byly posouzeny materiálové faktory i procesní vlivy heating faktoru na růst intermetalických sloučenin. Sledování mechanického namáhání materiálově rozdílného pájeného spoje stříhem na různé povrchové realizované rozdílnými hodnotami heating faktoru i v časovém horizontu izotermálního stárnutí bylo provedeno pečlivě. Výsledky byly důkladně analyzovány z hlediska růstu intermetalických sloučenin, stříhové síly i výskytu dutin a byly uvedeny odpovídající korelace. Součástí vyhodnocování pomocí elektronového mikroskopu byla prvková analýza, která kvalitativně i kvantitativně přiblížila některé pohledy na mikrovýbrus pájeného spoje.

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 degradace v relaci s následně prováděnými experimenty aj. Více mohly být rozpracovány a diskutovány výsledky části experimentální v návaznosti na teoretickou část 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 a výskytem dutin. 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 systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

Obsahové členění práce je přehledné. Práce je rozdělena do 4 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 realizovaného čtyřmi bezolovnatými pájecími slitinami i sledování mechanického namáhání pájeného spoje stříhem na 3 povrchových úpravách DPS pájených rozdílnými integrály dodané energie, vícenásobného reflow pájení i izotermálního stárnutí. Široký záběr experimentů zvládl doktorand přehledně, metodicky správně s logickým uspořádáním.

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

Odborné připomínky jsou drobného charakteru - např. na str. 35 je použit termín váhové složení místo hmotnostní poměry.

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**

- Diskutujte vliv rozdílné aktivity tavidla ROL1 u pájecí pasty RMA H-1 FDQ slitiny SN100C oproti ROL0 u jiných slitin na dosažené výsledky.
- Je celkový trend uvedený na obr. 72 a 73 typický i pro jednotlivé povrchové úpravy?

### **Vyjádření oponenta**

Lze ocenit velmi široký záběr 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 následně diskutované korelace.

Dosažené výsledky lze hodnotit kladně s přínosem pro praxi. Drobné formální i odborné nedostatky a připomínky nesnižují odborný charakter práce a je zřejmé, že disertace splnila sledovaný cíl. 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 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 15. 10. 2017

Posudek oponenta disertační práce s názvem:  
**Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje**  
Autor: Ing. Václav Wirth

Práce obsahuje 85 textových stran, 4 přílohy, 79 obrázků, 13 tabulek. Seznam literatury má 61 položku. Publikace autora v impaktovaných či recenzovaných časopisech – 3, ostatní – 16, funkční vzorky – 2.

Předložená disertační práce Ing. Wirtha vychází ze snah nalézt vhodná kritéria umožňující optimalizovat technologické procesy spojené s užíváním bezolovnatých pájek v elektronické výrobě. Přechod k materiálům neobsahujícím nežádoucí olovo lze charakterizovat jako hledání technicky i ekonomicky akceptovatelné materiálové soustavy. O aktuálnosti tématu svědčí i stále narůstající počet nových bezolovnatých pájek často vyvíjených podle konkrétní výrobní materiálové sestavy. Přitom komplexní znalosti o jejich zejména mechanických i elektrických vlastnostech důležitých pro aplikace jsou často omezené. O tomto jevu se ve své práci autor též zmiňuje.

Navazuje na svoji stejnojmennou práci – teze k disertaci. Problematiku životnosti pájených spojů kromě intermetalických vrstev (IMC) rozšiřuje o dutiny vznikající v objemu spojů. V úvodní rešeršní části se těmto oblastem podrobněji věnuje. Ze studia mnoha pramenů (literárních odkazů je přes padesát) a provedených měření odvozuje dílčí cíle práce, které v samostatné kapitole uvádí.

V rozsáhlých experimentech sleduje souvislosti mezi vznikem IMC a jejich mohutností a parametry procesu tvorby spojů a jejich tepelnou historií. Stejně se věnuje vzniku dutin a jejich četnosti vzhledem k parametrům pájené soustavy. Ze široké palety bezolovnatých pájek vybral typické představitele – SAC, BiSnAg, SN100C, SnSb. Z užívaných povrchových úprav připojovacích plošek vybral tři představitele. Kvalitu spojů hodnotil zjišťováním jejich odolnosti vůči mechanickému namáhání. Tepelné poměry při pájení byly hodnoceny pomocí topného faktoru ("heating factor" – časový integrál teploty pájky nad čarou likvidu). K vyhodnocení měření vhodně aplikoval Hornovu metodu analýzy malých výběrů.

Postup řešení prezentovaný v práci odpovídá běžným zvyklostem při řešení nového technického problému. Využil adekvátních metod pro řízení a vyhodnocení experimentů. Porovnáním výsledků souhrnně uvedených v závěrečné kapitole a stanovených cílů lze konstatovat úspěšné a úplné jejich splnění. Zejména kvantifikaci tloušťky IMC v závislosti na hodnotách topného faktoru pro zkoumané pájecí slitiny a vliv vícenásobného přetavení lze považovat za nový zásadní přínos předložené práce.

Hodnocená disertační práce je příkladná co do přehlednosti, uspořádání, formální úpravy i jazykové úrovně. Lze vytknout nejednotné označení hodnot topného faktoru – někdy "s.K" jinde "s.°C". Chybí i přehled užitých symbolů a zkratek.

Publikace autora – vztažené k tématu práce v celkovém počtu 14, z toho 3 recenzované. Dosvědčují dlouhodobé sledování problematiky a dodržování zásady "make, finish, publish".

Dotazy k předložené práci:

1) Z literatury je známo, že růst tloušťky IMC lze omezit intenzivním chlazením spojů na výstupu z přetavovací pece. Teplotní profily uváděné v práci mají tuto dobu relativně dlouhou, typicky asi (100 až 150) s. Uvažoval jste tuto skutečnost?

2) V textu se vyskytují formulace "mechanická pevnost pájeného spoje" či "pevnost ve smyku pájeného spoje" nebo podobné. Na str. 55 uprostřed sám uvádíte, že se nejedná o pevnost ..., neboť neznáte plochu na kterou síla působí. Je obecně nutné pro stanovení pevnosti znát plochu nebo závisí i na vztahu mezi působištěm a směrem síly vůči ploše? Jakou formulaci byste navrhoval, aby nedošlo k rozporu s obecně platnou definicí pevnosti (ve smyku)?

3) Na str. 28 uvádíte "Únava materiálu působením teploty je často sledovaným důvodem selhání pájeného spoje ...". Je dále uváděný princip vzniku poruchy jediným důvodem?

Disertační práce pana Ing. Václava Wirtha na téma Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje splňuje podmínky dle zákona č. 111/1998 Sb., §47 a doporučuji ji k obhajobě.

V Praze dne 17. října 2017

  
Doc. Ing. Jan Urbánek, CSc.