

## POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor práce: **Ing. Karel Rendl**

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

Název: **Optimalizace bezolovnatého pájecího procesu s ohledem na vliv tavidel na spolehlivost spojů**

### Posudek:

Práce je rozdělena na část teoretickou, a část experimentální. Součástí práce, ve formě přílohy, je dvanáctistránková příručka pro nastavování a měření teplotních profilů pro pájení přetavením, která je podkladem pro nastavování profilů v průmyslové praxi konkrétně pro společnost Integrated Micro-Electronics Czech Republic.

Teoretická část práce je poměrně dobře zpracována a je dobrým podkladem pro část praktickou (experimentální). Autor se v teoretické části zabývá úvodem do bezolovnatého pájení a problémy, které jsou s touto technologií spojené. Dále se autor v této části zaměřuje především na tavidla, jejich klasifikaci a na defekty způsobené tavidly u technologie pájení a to především s ohledem na iontovou čistotu desek plošných spojů. Metody měření iontové čistoty jsou přehledně zpracovány s dobrou návazností na literaturu včetně norem.

K teoretické části práce mám následující připomínky, formálního charakteru:

- Počáteční teplota na obrázku 2. u teplotního profilu profilů pro olovnatou slitinu na straně 20 je vyšší jak 50 stupňů. Při porovnání teplotních profilů by měly být tyto teploty stejné, nejlépe začínat na pokojové teplotě.
- Na straně 21 nejsou správně naformátovány indexy:  $N.m-1$ ,  $\gamma LF$  apod.
- U mnohých veličin chybí v textu jednotky str. 22, str. 30.

Experimentální část práce se především věnuje komplexnímu experimentu a to porovnání vlivu teplotního profilu na čistotu DPS, intermetalické vrstvy a voidy u třech typů pájecích past s různým typem tavidla. V druhé experimentální části se autor věnuje sledování iontové čistoty DPS s ohledem na způsoby čištění. Autor provedl četnou řadu experimentů, které následně vyhodnotil a na jejich základě zhotovil příručku pro nastavování teplotního profilu pro praxi.

K experimentální části práce mám následující připomínky většinou se jedná o připomínky formálního charakteru:

- Použité pájecí pasty obsahují jiný typ tavidla, jejich relativní srovnávání s ohledem na použité teplotní profily mi nepřijde zcela korektní. Přesto jsou výsledky práce velice zajímavé, zejména pro průmyslovou praxi.
- Na obr.42, 43 a 44 chybí popis osy x.
- Na str. 59 druhý odstavec, poslední věta chybí slovo „tabulce“.
- I když je jasné že tloušťka IMC s časem roste, na obrázku 33 (str. 61) chybí označení, který sloupec u grafu je tloušťka IMC po ročním stárnutí.

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 na str. 32. autor zmiňuje, že vodivé dendrity jsou nejčastějším druhem vady u pájených spojů způsobeny tavidly a jejich zbytky. Na str. 33 autor píše: jedna čtvrtina defektů vzniká vlivem zbytků tavidel, které vznikají při procesu pájení. Obdobně na str. 69 autor píše: V roce 2005 již 40% výrobců své výrobky podrobuje procesu čištění a v dnešní době je to až 50% z nich, co své výrobky s no-clean pájecími pastami čistí po pájení. U těchto tvrzení mi chybí odkaz na literaturu. Případně nějaké doložení, že tomu tak opravdu je (odkaz na velkosériovou výrobu) apod.

K práci, respektive k její odborné části mám následující otázky:

- V kapitole: Defekty způsobené zbytky tavidel zmiňujete následující defekty: Vodivé dendrity a koroze na povrchu desek plošných spojů, Dutiny (voidy) v pájeném spoji. Věděli byste nějaké další defekty, které mohou zbytky tavidla způsobovat?
- Na str. 30 zmiňujete příčiny růstu dendritů. Za jakých podmínek mohou dendrity růst? Je možný růst dendritů i za přítomnosti střídavého napětí?
- Na straně 36, kapitola: Korozivita tavidla, zmiňujete, že testované tavidlo se aplikuje na připravený testovací substrát. Mohli byste definovat o jaký typ substrátu se jedná s ohledem na použitou metodu?
- Na straně 41, uvádíte v tabulce zvolené pájecí slitiny. V tabulce mi chybí parametr: velikost kuliček pájecí slitiny. O jaké velikosti se jedná?
- Str. 46, rovnice (8) co je  $\sigma$  ?
- Při metodě SIR jste natiskl na desku plošného spoje pájecí pastu, jaká byla tloušťka šablony? Je toto definováno v normě? Bylo nějakým způsobem zohledněno při testech nanesené množství pájecí pasty?
- Jak byste navrhl experimenty pro případ desek plošných spojů s různou hustotou osazených součástek?
- Jak vypadala modelová deska plošného spoje, kterou jste používal pro měření teplotních profilů, respektive kde na ní byly umístěné termočlánky? Jaké byly parametry termočlánků (typ, průměr perličky). Byl teplotní profil na cele desce stejný?
- Ve studii voidů byla v práci zohledněna pouze procentuálně plocha voidů s ohledem na plochu spoje. Jaké nejmenší rozměr voidů byl pro studii zahrnut? Lišila se četnost voidů u použitých past/teplotních profilů? Inspekce byla provedena 2D RTG, pokud ano jaké chyby se dopouštíte?
- V závěru (str. 80) zmiňujete kladný vliv teplotního profilu s vyšší teplotu, jsou nějaká další rizika, kromě IMC, na které je zapotřebí si dávat z pohledu teplotního profilu pozor?

Výsledky práce byly publikovány nejen v impaktované publikaci ale také na několika konferencích. Publikační aktivita doktoranda je adekvátní. Oceňuji zpracování práce s ohledem na průmyslovou praxi.

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

V Praze dne 8.8.2017

  
.....  
doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

# Oponentský posudek disertační práce

**Název:** Optimalizace bezolovnatého pájecího procesu s ohledem na vliv tavidel  
na spolehlivost spojů

**Autor:** Ing Karel Rendl

**Obor doktorandského studia:** Technologie a měření

**Vysoká škola:** Západočeská univerzita v Plzni – Fakulta elektrotechnická

Práci jsem posuzoval dle předložené souborné Disertační práce – komplexního uchopení problematiky i v širších souvislostech, aktuálnosti a relevantnosti použitých materiálů, metody a způsobu řešení s následnými výsledky a závěry.

## 1. Význam práce pro obor:

Předložená práce se prioritně zabývá vlivem tavidel na kvalitu a spolehlivost strojního pájení, jako i na dopad různých nastavení teplotních profilů pájecích strojů na životnost spojů. Problematika je probírána detailně a do hloubky způsobem, který navzdory složitosti nepostrádá přehlednost a umožňuje lehce vyvodit závěry.

## 2. Struktura práce, postup řešení:

Práce je napsaná na 80 stranách a rozdělena do 9 kapitol, přičemž téměř polovinu zabírá experimentální část (kapitola 8 a 9) a závěr - zhodnocení (kapitola 10), ze kterého jsou zjevné výhody a nevýhody různých teplotních profilů pájecích strojů vzhledem na použité materiály.

Zatímco první dvě kapitoly jsou koncipovány v obecnější rovině, třetí kapitola se zabývá bezolovnatou pájecí slitinou s důrazem na možnost vzniku chyb její ne úplně správnou aplikací. Poukazuje na rozdíly – výhody a nevýhody – pájek dle RoHS a pájek s příměsí olova.

Čtvrtá až pátá kapitola velice důkladně popisuje situaci kolem tavidel včetně chyb a anomálií, zaviněných nesprávným pochopením jejich účelu a nevhodným použitím, včetně důsledků takové činnosti na zapájené spoje.

Šestá kapitola se zabývá způsoby identifikace kontaminantů různými způsoby a – velice chytře – i jejich vlivu vzhledem k časové ose a tím i na ovlivnění bezporuchové délky života

pájené desky. Sedmá kapitola popisuje možnosti eliminace důsledků působení kontaminujících zbytků různými způsoby mytí. Je celkem stručná, protože na ni navazují výsledky zkoušek z kapitoly 9.

Osmá kapitola otvírá experimentální část práce. Je z ní znát značné praktické zkušenosti autora. Ověřuje v praxi to, co bylo řečeno v předchozích kapitolách. Závěry jsou podchyceny v další, deváté kapitole.

Shrnutí předchozího se nalézá v desáté kapitole. Nabízí upřesněné provozní podmínky pájecích zařízení, plněných různými slitinami, v součinnosti s vhodnými tavidly.

Další část práce tvoří rozsáhlý soupis použité literatury a publikací, na kterých se podílel doktorand jako spoluautor, jakož i podniková směrnice firmy IMI CZ, zabývající se nastavováním teplotních profilů pecí SMT, které je rovněž autorem.

### 3. Splnění sledovaných cílů:

Práce zadání „Optimalizace bezolovnatého pájecího procesu s ohledem na vliv tavidel na spolehlivost spojů“ **splňuje** v plném rozsahu. Uvádí závěry a předpoklady, které v souhrnu postihují víc než celou požadovanou oblast (zabývá se i srovnáním s „olověnými“ pájecími slitinami) velice přehledným a prakticky použitelným způsobem.

### 4. Výsledky disertační práce:

Práce přehledně shrnula poznatky z literatury a výsledky experimentů. Důležité je na ni dobré popsání celkem málo známých faktů (vztah proces. parametrů pájecích strojů ke vzniku interkrystalických rozhraní) a nutnosti nalézt nastavení, nejpříznivější nejen pro kvalitní spoj ale taky příznivou délku života spoje.

### 4. Připomínky:

- a/ kap. 2.1: Z RoHSu byly uděleny některým oborům výjimky. Jaké a proč?
- b/ kap.7: Omezení v procesu čištění desek – blíže o důvodech (některé součástky...)

### 5. Závěr:

Předložená práce splňuje požadavky na disertační práci dle zákona č. 111/1998 Sb., par.47. Autor prokázal vlastnosti, potřebné k vypracování samostatné vědecké práce. V dané problematice se orientuje velice dobře, co prokázal i v publikacích, na kterých vzniku participoval. **Doporučuji k obhajobě.**

V Plzni, dne 10. srpna 2017



Ing Pavel Gábriš, CSc.

Integrated Micro – Electronics Czech Republic s.r.o.

Plzeňská 1067

330 11 Třemošná

Tel.: 721 031 793

e-mail: [pavel.gabris@global-imi.com](mailto:pavel.gabris@global-imi.com)

Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc., Fellow IMAPS  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav mikroelektroniky  
Technická 10, 616 00 Brno

## Posudek doktorské disertační práce

**Doktorand:** Ing. Karel Rendl

**Název práce:** Optimalizace bezolovnatého pájecího procesu s ohledem na vliv tavidel na spolehlivost spojů

**Vedoucí práce:** Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.

**Oponent:** Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc., Fellow IMAPS

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

Předložená disertační práce řeší aktuální tematiku z oblasti bezolovnatého pájení, které je doposud neustálou hrozbou a neznámou pro řadu výrobců elektronického hardware z pohledu predikce jakosti pájených spojů. V technologickém procesu pájení, dnes již převážně bezolovnatého, totiž působí celá řada faktorů ovlivňujících výslednou jakost a životnost pájených spojů, které se navíc vzájemně ovlivňují, což se projevuje v řadě vzájemných interakcí omezujících dosažení jednoznačného výstupu. Právě jeden z významných a nezanedbatelných faktorů je vliv tavidla, jímž se zabývá řada výrobců elektroniky, kteří řeší tento problém bez odpovídajícího vědeckého přístupu, a potom často na úkor jakosti a životnosti výrobku, a také na úkor ekonomické rentability. Proto každá vědecká práce v této oblasti je zpravidla přínosem, obzvláště pokud jsou její výsledky ověřeny v praxi, což platí také v tomto případě.

### *b) Postup řešení, použité metody a splnění cíle disertační práce*

Doktorand zvolil tradiční postup řešení, když si hned na začátku stanovil cíle disertační práce. I když jsou tyto cíle stanoveny poněkud obecně, dávají určitý smysl a prostor pro konkrétní výstupy.

Potom v následujících kapitolách je popsána bezolovnatá technologie pájení a zdůrazněny změny v jejím technologickém procesu, s pozorností zaměřenou na nutnost dosáhnout v procesu pájení potřebné smáčivosti pájených povrchů. Zde jsou správně uvedeny tři hlavní faktory ovlivňující smáčivost, kterými jsou teplota pájení, použité tavidlo a příslušná atmosféra.

Dále následuje kapitola popisující současný stav problematiky bezolovnatého pájení z pohledu tavidel, kde se doktorand věnuje jejich rozdělení a následně i defektům vyvolávaným zbytkovými nečistotami. Teoretická část je završena stručnými kapitolami o měření iontových nečistot a o čištění DPS po pájení.

Experimentální část je rozdělena do dvou kapitol 8 a 9. První je zaměřena na potvrzení hypotézy, že míru znečištění lze pro různé typy tavidel snížit optimalizací pájecího procesu, druhá pak na ověření nutnosti čistit DPS po pájení při použití bezoplachových tavidel.



Za základní cíl v první experimentální části bylo stanoveno optimalizovat pájecí profil tak, aby byl vhodně nastaven vliv čtyř parametrů, kterými jsou minimální zbytkové množství iontových nečistot na DPS, minimální nutná tloušťka intermetalických vrstev ve spoji, co nejmenší smáčecí úhel a minimální množství dutin ve spoji. Pro tento experiment byly zvoleny tři typy pájecích slitin a navržen testovací motiv. Následně byly realizovány také soubory testovacích vzorků. Pro získání výsledků byly využity metoda zjednodušené faktorové analýzy, což lze chápat jako krok k zachování přiměřeného rozsahu celé práce. Dosažené výsledky jsou vypovídající a definují, jak nastavit optimalizovaný pájecí profil pro jednotlivé druhy pájecích slitin. Přesto si lze položit otázku, zda by nebylo dosaženo ještě lepších výsledků např. při nastavení teplotního profilu nesoucího označení SAC,SAC\_O s parametry 250/30/155/45, nebo SnAg,SnAg\_O s parametry 249/30/140/60, případně dalších kombinací, což by vyžadovalo provedení kompletní faktorové analýzy a s tím by narostla i časová náročnost. Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že první část vytyčených cílů je v kapitole 8 splněna, snad jen objasnění či zdůvodnění dosažených výsledků by mohlo být obsáhlejší, i když na druhé straně je třeba pozitivně ocenit praktické ověření a využití ve výrobním procesu.

Druhá experimentální část obsažená v kapitole 9 se věnuje ověření skutečnosti, zda po pájení kompozicemi s bezoplachovými tavidly není skutečně nutné čistit, což je v praxi obecně předmětem často rozporuplných diskuzí, závěrů a rozhodnutí. Zde byly provedeny experimenty s identickými pájecími slitinami jako v první části a bylo použito čištění ultrazvukem ve třech různých oplachových médiích. Výsledky provedené na základě tří různých metod ukázaly na složitost procesu čištění, které je a zřejmě i v dohledné době bude věčným tématem zkoumání, na jehož konci je třeba přijmout určitá kompromisní řešení. Z výsledků dosažených v této práci lze učinit určité konkrétní závěry, i když zde vyvstává otázka, zda čištění s pomocí ultrazvukové lázně je vhodnou metodou, když navíc řada výrobců a typů obvodů tuto metodu přímo zakazuje. Nicméně ze souboru výsledků zpracovaných pečlivě a přehledně v grafické podobě byly učiněny určité konkrétní a lze konstatovat i nové závěry o vlivu čištění bezoplachových pájecích past, jež mohou být přímo aplikovány v praxi, což naplňuje požadavek vytyčený v cílech disertační práce.

K disertabilnosti vytyčených cílů v oboru „Elektrotechnika“ přispívá charakter poměrně širokého zaměření práce, vyžadující nezbytný vědecký přístup k různým odborným oblastem, především pak k materiálovému inženýrství ve spojení s technologickými procesy, ale také k metodice měření a vyhodnocování, a v neposlední řadě i ke zvládnutí, nastavení a provedení samotných technologických postupů. Lze konstatovat, že stanovení cílů a jejich plnění proběhlo v rámci daných možností logicky a cíle byly naplněny.

### ***c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a její přínos***

Obsah práce je v přiměřeném rozsahu 89 + 13 stran přílohy, 47 obrázků, 17 tabulek, a je rozčleněn do deseti kapitol, přičemž je poněkud nezvyklé jako kapitolu číslovat seznam literatury a vlastní publikace. V seznamu literatury je uvedeno celkem 56 publikací, a dále 20 publikací s vlastním autorstvím nebo spoluautorstvím. Přitom jedna publikace je v impaktovaném, a další jedna v recenzovaném časopise.

V práci je provedeno na realizovaných vzorcích velké množství testů formou měření, což bylo bezesporu časově náročné a vyžadovalo samostatné a systematické zvládnutí sestavení a vyhodnocování získávaných výsledků.

### ***d) Přehlednost, formální úprava a jazyková úroveň***

Práce je uspořádána přehledně v deseti kapitolách, z nichž dvě experimentální lze považovat za základ disertabilního jádra této práce. Formální úpravě nelze vytknout žádné nedostatky, grafická úprava je na vysoké úrovni. V práci je minimum překlepů (např. na str. 39 má být správně „proudění“ místo „poudění“ apod.). Doktorand se v práci vyjadřuje jasně a zřetelně, jeho rétorika je na velmi dobré úrovni.

Novost je dána obecně charakterem řešící oblasti, která není ve světě jednoznačně objasněna a popsána. Zde každé nové originální řešení či poznatek přináší rovněž řadu nových skutečností a výzev, které je třeba prozkoumat a dořešit na základě jak teoretických, tak experimentálních poznatků a zjištění, což se obvykle děje opakovaně v delším časovém horizontu. Lze tedy konstatovat, že doktorand řešil problematiku vlivu tavidel na jakost pájených spojů, která je neustále otevřená pro nové poznatky a řešení. Jeho postup byl založen na řešení ve formě experimentálního výzkumu, kde jsou prezentovány výsledky získávané na základě měření parametrů, tedy na praktické bázi.

#### ***e) Naplnění samostatné vědecké práce a vyjádření k publikacím***

Práce obsahuje v seznamu literatury 56 odkazů, a dále je uvedeno 20 publikací, kde je doktorand autorem či spoluautorem. Ke zvýšení hodnoty práce a dosažených výsledků by nesporně přispěla vlastní publikace v zahraničním impaktovaném časopise, případně orální příspěvek na některé renomované mezinárodní konferenci. Co se týče kvantity, je požadavek na publikace bohatě splněn.

Z citované literatury je zřejmé, že doktorand se dokázal orientovat v literatuře a dokázal využít dosud známých výsledků jak pro vytvoření metodiky své práce, tak pro sestavování experimentů. Z toho je rovněž zřejmá jeho schopnost samostatně vědecky pracovat a řešit úkoly pro praxi vědeckým přístupem.

#### ***g) Shrnutí***

Problematika byla dořešena do realizační fáze s konkrétními závěry získanými měřeními. Měření parametrů a tím i ověřování vlastností a hledání optimálního nastavení je provedeno rozsáhlým souborem testů, jež si vyžádaly náročnou přípravu materiálů a následně i testovacích vzorků. Poměrně obsáhlý rozsah testů může být důvodem pro poněkud stručnější rozbor dosažených výsledků, včetně závěrů a doporučení pro případnou další optimalizaci.

Lze konstatovat, že zvolené téma a zvolený způsob řešení s vytyčenými cíli je dle §47, odst. 4 zákona č. 111/98 Sb. a článku 32, odst. adekvátní požadavkům na disertační práci PhD.

**Proto doporučuji disertační práci Ing. Karla Rendla k obhajobě.**

*V Brně dne 30. 7. 2017*

#### *Otázky*

1. Na str. 20 je tvrzení, že zvýšená teplota u bezolovnatého procesu přináší větší náchylnost pájecích plošek k oxidaci. Máte pro toto tvrzení vědecké zdůvodnění?
2. Na str. 20 je uvedeno, že pro bezolovnaté pájení je třeba použít delší čas s vyšší teplotou pájení. To není zřejmé z obr. 2, kde navíc chybí uvedení doby na liquidem. Na základě čeho je tento parametr volen a nastavován?
3. V kap. 3.2.3 se hovoří o intermetalických slutinách. Chybí zmínka os litinách mezi SnAg a CuAg. Mají tyto vliv na některý ze zkoumaných parametrů?
4. Který výsledek v této práci by mohl být publikován v impaktovaném (recenzovaném) časopise?
5. Je možné navázat na výsledky této práce a v případě, že ano, můžete uvést tři základní doporučení pro další pokračování, případně, které testy jsou vypovídající pro zjišťování vlastností lepidel.