



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## VLIV GRADIENTŮ CHLADNUTÍ NA PEVNOST BEZOLOVNATÉHO PÁJENÉHO SPOJE

LEAD FREE SOLDER JOINT STRENGTH AND COOLING GRADIENT INFLUENCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

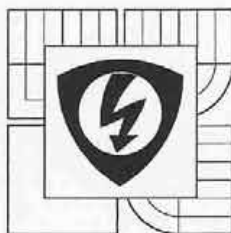
JIŘÍ VÍTEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Jiří Vitek

**Ročník:** 3

**ID:** 119670

**Akademický rok:** 2011/12

**NÁZEV TÉMATU:**

**Vliv gradientů chladnutí na pevnost bezolovnatého pájeného spoje**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s problematikou bezolovnatého pájeného spoje a s metodami měření pevnosti spoje. Navrhněte a realizujte metodu řízeného chladnutí pájeného spoje pro dodané zkušební vzorky. Sledujte vliv rychlosti chladnutí pájeného spoje na jeho pevnost a krystalickou strukturu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**


Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 31.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Starý, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

  
doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.  
předseda oborové rady



**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## Abstrakt:

Předmětem této bakalářské práce je sledování vlivu rychlosti chladnutí pájeného spoje na jeho pevnost a krystalickou strukturu. Pro technologické zkoušky byla použita dummy pouzdra BGA4 pájená na DPS s testovacími motivy. Základní materiál FR4, Cu vodivý motiv s povrchovou úpravou OSP, Ni - Au a pájka SAC405. Vzorky byly vyrobeny při třech odlišných gradientech chladnutí, 6,80 °C/s, 2,00 °C/s a 0,16 °C/s. Pevnost spoje byla měřena pomocí testu stříhové pevnosti na přístroji DAGE PC 2400. Připravené mikrovýbrusy byly studovány na optickém mikroskopu OLYMPUS GX 51.

## Abstract:

The object of this work is to monitor the impact of gradient cooling on the strength of the solder joint and its crystalic structure. Dummy packages BGA4 were soldered on PCBs with test structure. Base material FR4, Cu interconnections were protected with OSP and Ni – Au surface finishes and SAC405 solder was used. The samples were made in three different cooling gradients, 6.80 °C/s, 2.00 °C/s and 0.16 °C/s. The bond strength was measured by using the shear strength test on device DAGE PC 2400. Realised microsections were studied on an optical microscope OLYMPUS GX 51.

## Klíčová slova:

Bezolovnatý pájený spoj, přetavovací profil, gradient chlazení, test stříhem, povrchová úprava, pevnost.

## Keywords:

Lead-free solder joint, reflow profile, cooling gradient, shear test, finishing, strength.

## **Bibliografická citace díla:**

VÍTEK, J. *Vliv gradientů chlazení na pevnost bezolovnatého pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 40 s.  
Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplívajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29. května 2012

  
.....

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 29. května 2012

  
.....



# Obsah

Úvod.....	9
1 Pájení součástek.....	10
1.1 Pájený spoj.....	10
1.2 Faktory působící na životnost spojů.....	11
1.3 Bezolovnaté pájky.....	11
1.4 Složení bezolovnatých pájek.....	11
2 Pájení přetavením.....	13
2.1 Metody pájení přetavením.....	13
2.2 Teplotní profil pro pájení přetavením.....	13
3 Formování pájeného spoje.....	14
3.1 Smáčení a roztékání pájky po povrchu.....	14
3.1.1 Technologické faktory ovlivňující smáčivost.....	14
3.1.2 Vlivy prostředí.....	15
3.1.3 Podmínky pro smáčení.....	15
3.1.4 Smáčecí úhel.....	16
3.2 Intermetalické vrstvy.....	16
3.2.1 Růst intermetalické vrstvy v procesu tuhnutí pájky.....	17
3.3 Životnost a spolehlivost pájeného spoje.....	19
4 Metodika provádění zkoušek pevnosti pájeného spoje.....	19
4.1 Metodika sledování úbytku napětí na pájených spojích.....	19
4.2 Měření stříhové pevnosti.....	19
4.3 Metoda mikrovýbrusu vzorku.....	21
5 Praktické vypracování.....	22
5.1 Výroba desky plošných spojů.....	22
5.2 Postup pájení zkušební desky plošných spojů.....	22
5.3 Měření pomocí čtyřbodové metody a diskuze dosažených výsledků.....	26
5.4 Výsledky stříhového testu na stroji DAGE PC 2400 a diskuze dosažených výsledků.....	28
5.5 Optická kontrola velikosti IMC vrstvy a diskuze dosažených výsledků.....	32
5.6 Krystalická struktura a diskuze dosažených výsledků.....	34
6 Závěr.....	38
7 Seznam použitých zdrojů.....	39
8 Seznam použitých zkratk.....	40

# Seznam obrázků

1 Ukázka pájeného spoje [12].....	10
2 Ukázka faktorů působící na spolehlivost pájeného spoje [13].....	11
3 Ishikawův diagram pro proces pájení [5].....	13
4 Doporučený teplotní profil s popisem [7].....	14
5 Rovnováha povrchových napětí [10].....	15
6 Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecích úhlů [10].....	16
7 Selhání spoje důsledkem velkého podílu IMC [14].....	17
8 Tuhnutí ICM vrstvy [18].....	17
9 Tuhnutí Sn [18].....	17
10 Tuhnutí eutektika [18].....	18
11 Znázornění dendritů a eutektické složky [18].....	18
12 Struktura pájeného spoje [18].....	18
13 BGA pouzdro s kulovými vývody spojenými s vlastním čipem drátovými vývody[14].....	19
14 BGA pouzdro typu FC <sub>7</sub> ve kterém je vlastní čip propojen s pouzdem kulovými vývody [14].....	20
15 Zařízení DAGE PC 2400, které umožňuje test stříhem [14].....	20
16 Princip zkoušky stříhem pouzdra BGA4 [14].....	21
17 Neosazená DPS s imitací součástky BGA4 s povrchovou úpravou OSP.....	22
18 Neosazená DPS s imitací součástky BGA4 s povrchovou úpravou Ni-Au.....	22
19 Průběžná pec ve skleněné komoře.....	23
20 Zařízení SlimKIC 2000 s počítačem a prototypem na měření teplotního profilu.....	23
21 Hotové DPS s povrchovou úpravou OSP.....	24
22 Teplotní profil pro DPS s označení „LED“, 6,80 °C/s.....	24
23 Teplotní profil pro DPS s označení „V“, 2,00 °C/s.....	25
24 Teplotní profil pro DPS s označení „Ž“, 0,16 °C/s.....	25
25 Vývody na DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au .....	29
26 Vývody na BGA4 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	29
27 Hrana BGA4 0,16 °C/s. s povrchovou úpravou Ni – Au.....	29
28 Vývody na DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	30
29 Vývody na BGA4 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	30

30	Hrana BGA4 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	30
31	Hrana BGA4 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	31
32	Vývody na BGA4 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	31
33	Vývody na DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP.....	31
34	Vývody na BGA4 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP.....	31
35	Vývod na DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP.....	31
36	DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou OSP – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,8 μm.....	32
37	DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP s pozlacením 0,54 μm – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,8 μm.....	32
38	DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou OSP – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,9 μm .....	33
39	DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,6 μm.....	33
40	DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,5 μm .....	33
41	DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,7 μm.....	33
42	DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou OSP.....	34
43	DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP s pozlacením 0,54 μm.....	35
44	DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou OSP.....	35
45	DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	36
46	DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	36
47	DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au.....	37



# Úvod

Kvalitu spoje ovlivňuje mnoho faktorů. Jedním z faktorů je vliv gradientu chladnutí na pevnost bezolovnatého pájeného spoje. Průběh chlazení je důležitým parametrem ovlivňujícím strukturu spoje. To může mít zásadní dopad na spolehlivost a životnost pájecího spoje.

Po teoretickém úvodu a zpracování přehledu o procesu pájení budou navržena přídatná zařízení na úpravu teplotního profilu v oblasti chlazení. Následně budou vyrobeny vzorky při odlišném gradientu chladnutí. Aby byl zjištěn vliv rozdílného gradientu chlazení, je nutné podrobit vzorky vyrobené při odlišných gradientech chlazení měřením, které budou schopny odhalit konkrétní vliv tohoto faktoru na pevnost bezolovnatého pájeného spoje. Vyrobené vzorky budou podrobeny testu stříhové pevnosti na přístroji DAGE PC 2400. Dále budou zkoumány pod optickým mikroskopem OLYMPUS GX 51.

Cílem této práce je prokázat, zda má různý gradient chladnutí vliv na kvalitu pájeného spoje.

# 1 Pájení součástek

## 1.1 Pájený spoj

Propojení musí splňovat následující hlavní kritéria [1]:

1. Mechanickou integritu spoje
  - Správný konstrukční návrh spoje
  - Správná volba pájecí slitiny
  - Správný tvar menisků spoje a spoj s minimem dutin
  - Odpovídající pevnost a tažnost spoje
2. Tepelné a elektrické vlastnosti spoje
  - Odpovídající elektrický kontakt
  - Odpovídající tepelný kontakt
3. Metalurgická stabilita
  - Reakční mechanismy mezi spojovanými kovy a pájkou
  - Sledování reakčních mechanismů v samotné pájce během provozních podmínek
4. Environmentální trvanlivost
  - Odolnost vůči korozi
  - Odolnost vůči oxidaci spoje
5. Kompatibilita se statutárními požadavky
6. Estetické požadavky

Pro vytvoření kvalitního pájeného spoje je potřeba splnit následující kritéria [2]:

1. Uvést pájené části do vhodné vzájemné pozice a fixace této polohy.
2. Nanést tavidlo a zahřátím je aktivovat.
3. Ohřát spoj na potřebnou pracovní teplotu.
4. Přivést pájku do spoje.
5. Pájený spoj volně nechat ochladnout.



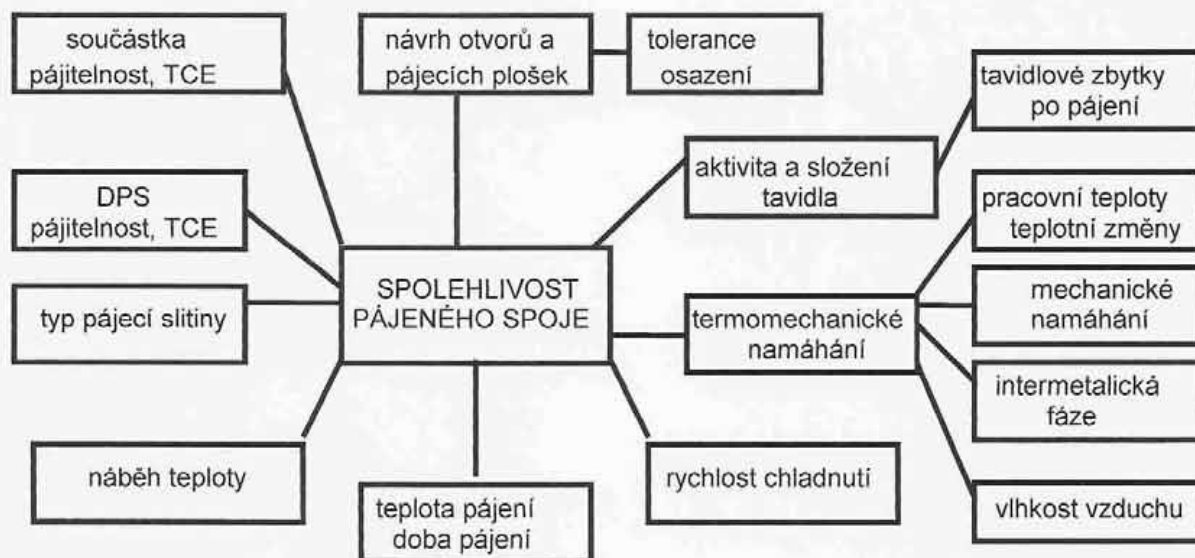
Obr. 1: Ukázka pájeného spoje [12]

## 1.2 Faktory působící na životnost spojů

Faktory, které životnost nejvíce ovlivňují, jsou [3]:

- stárnutí materiálů,
- mechanické namáhání,
- tepelné namáhání.

Zachytit všechny faktory působící na spolehlivost, a tím pádem na životnost je velmi obtížné, avšak alespoň ty nejdůležitější jsou znázorněny na obrázku 2.



Obr. 2: Ukázka faktorů působících na spolehlivost pájeného spoje [13]

## 1.3 Bezolovnaté pájky

Pájky jsou většinou tvořeny binárními nebo ternárními slitinami kovů. Jejich chování je popsáno fázovými diagramy, v nichž je vyznačena čára liquidu určující teplotu přechodu slitiny do tekutého stavu. Přibližně 75 % plochy samotného pájeného spoje tvoří pájka, zbylých 25 % tvoří povrch pájecí plochy a vývod součástky. Z toho je zřejmé, že pájka je v procesu pájení základní součástí, a proto musí být jejímu výběru věnována nejvyšší pozornost. Při volbě pájky je posuzována řada požadavků, z nichž rozhodující jsou ve většině případů následující kritéria:

- cena a dostupnost,
- elektrické a mechanické vlastnosti, spolehlivostní kritéria,
- pájitelnost v daném procesu.

## 1.4 Složení bezolovnatých pájek

Pro bezolovnaté pájky je v převážné většině slitin nutná přítomnost 60 % Sn a zbytek je většinou doplňován drahými kovy. Cena slitiny je závislá na ceně jednotlivých složek a odvíjí se od dostupnosti obsažených prvků. Dostupnost a cena každého prvku je pak závislá na velikosti celosvětových zásob.



Na trhu se již dnes vyskytuje celá řada bezolovnatých pájek. Tyto pájky dosahují tekutého stavu v rozmezí teplot 195 °C – 227 °C, v závislosti na jejich složení (viz tabulka 1) [5].

Tab. 1: Některé používané bezolovnaté pájky dle [4]

Oblast tavení (°C)	Pájka	Využití v průmyslu	Společnost
<b>Slitiny s vysokým bodem tavení (&gt;210°C)</b>			
227	Sn/Cu	Spotřebitelský	Panasonic 3)
		Telekomunikace	Nortel
221	Sn/Ag *		
217	Sn/Ag/Cu	Automobilový	Panasonic 2)
		Telekomunikace	Nokia, Nortel, Panasonic Toshiba
217	Sn/Ag/Cu/Sb *		
	Sn/In/Ag *		
	Sn/Ag/Cu/Zn *		
	Sn/Ag/Bi/Cu	Vojenský/Letecký	Panasonic
	Sn/Ag/Bi/Cu/Ge	Spotřebitelský	Sony
<b>Slitiny s bodem tavení v rozsahu 180-210°C</b>			
206-213	Sn/Ag/Bi/X	Spotřebitelský	Panasonic
206-213	Sn/Ag/Bi	Vojenský/Letecký	Panasonic 1)
		Spotřebitelský	Hitachi
199	Sn/Zn	Spotřebitelský	NEC, Pan., Toshiba 4)
<b>Slitiny s nízkým bodem tavení (&lt;180°C)</b>			
	Sn/Bi/Zn *		
138	Sn/Bi		Panasonic

Poznámky k tabulce 1 :

- 1) Je náchylná na kontaminaci Pb, které zhorší výrazně vlastnosti.
  - 2) Sn95,5/Ag4/Cu0,5 – je nejstarší slitinou objevenou v první polovině minulého století, a proto není patentovatelná, není náchylná na kontaminaci, proto v jiném složení je nejčastěji patentovanou slitinou pro pájky (např. Sn96,5/Ag3/Cu0,5 – bod tavení kolem 220 °C, je asi o 36 °C vyšší než u olovnatých pájek). V důsledku obsahu stříbra je její cena vyšší. Je vhodná pro vlnu, přetavení i ruční pájení.
  - 3) Je náchylná na kontaminace, zvyšuje se teplota tavení (Sn99/Cu0,7).
  - 4) Sn91/Zn9 – je levná, ale Zn je náchylné na oxidaci a k nečistotám celkem (pájení v dusíku zřejmě nutné). Zn pak zhoršuje i smáčivost a zkracuje i skladovatelnost. Má bod tavení blízký olovnatým pájkám (199 °C).
- \*) Zatím nepříliš používané slitiny zkoumané pro jejich možné využití [4].

## 2 Pájení přetavením

Nejprve se nanese pájecí materiál na pájené místo, a poté se působí tepelnou energií, přičemž dochází k přetavení pájecího materiálu. Důležitým faktorem pro kvalitu pájení je správná volba pájecí pasty.

Technologie osazování do pasty patří mezi nejperspektivnější technologie v SMT. Nevyžaduje žádné speciální postupy na ochranu součástek proti vniknutí tavidla, žádné pájecí rámečky, atd. Pájecím materiálem je zde pájecí pasta. Většina desek s vyšší technologickou úrovní je dnes zpracovávána "do pasty". Parametry pájecí pasty jsou klíčovým prvkem k dosažení bezproblémového pájení s dostatečnou kvalitou [6].

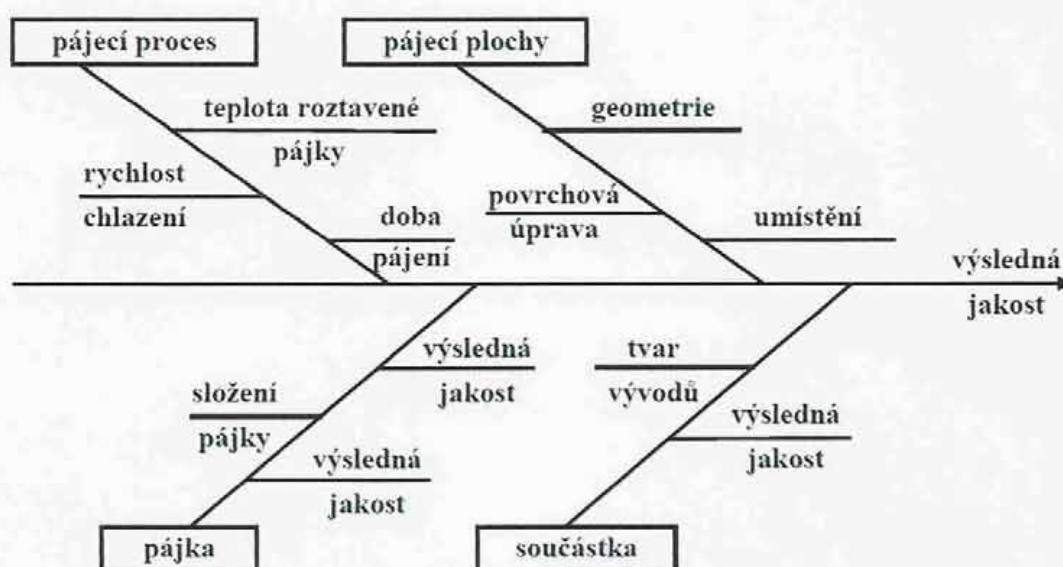
### 2.1 Metody pájení přetavením

Podle způsobu ohřevu se rozlišují tyto metody pájení přetavením [2]:

- pájení infračerveným zářením (krátce nazývané pájení infraohřevem),
- pájení horkým vzduchem nebo plynem,
- pájení v kondenzovaných parách (krátce nazývané pájení kondenzační),
- pájení laserem,
- pájení vyhřívaným nástrojem,
- pájení na horké desce nebo pásu.

### 2.2 Teplotní profil pro pájení přetavením

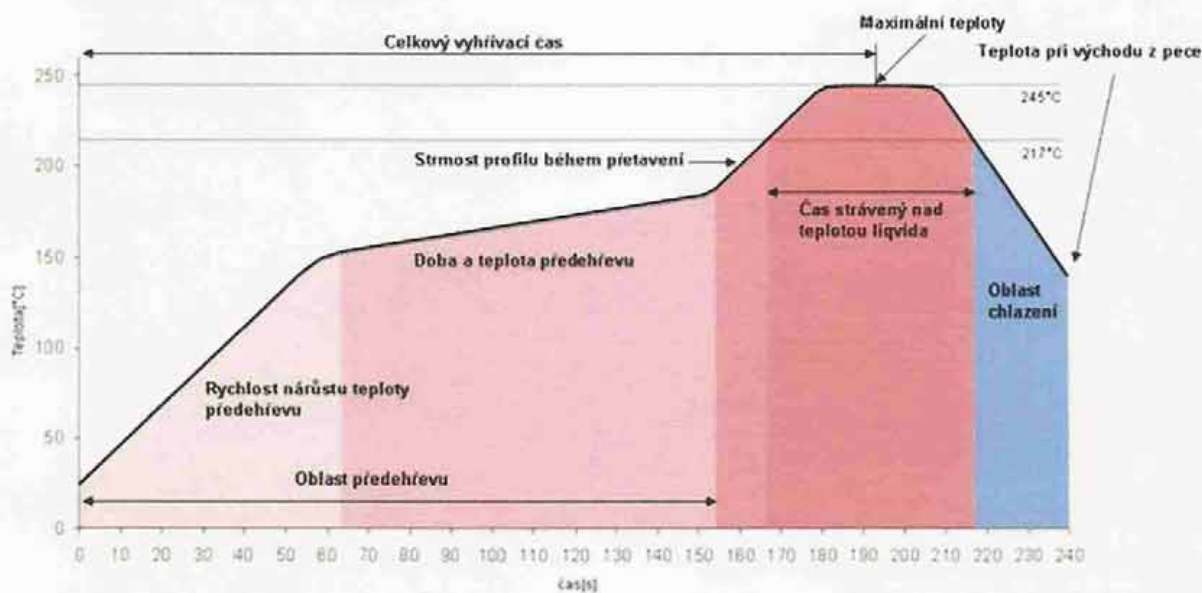
Stanovení optimálního teplotního profilu (závislost průběhu teploty na čase) prochází jistým vývojem. Optimálním teplotním profilem se rozumí takový profil, který zajistí maximální jakost a životnost pájeného spoje. Zachytit všechny technologické faktory působící v procesu pájení je velmi obtížné, avšak alespoň ty nejdůležitější jsou znázorněny v Ishikawově diagramu na obrázku 3.



Obr. 3: Ishikawův diagram pro proces pájení [5]



Doporučený teplotní profil, včetně doby a rychlosti ohřevu, pro bezolovnaté slitiny pájek je zobrazen na obrázku 4 [5].



Obr. 4: Doporučený teplotní profil s popisem [7]

## 3 Formování pájeného spoje

### 3.1 Smáčení a roztékání pájky po povrchu

Základní podmínkou pro vytvoření pájeného spoje je pájitelnost povrchů, což znamená, že tyto musí být smáčitelné pájkou. Smáčivost plochy je vlastnost vyjadřující schopnost vytvořit na jejím povrchu, při styku s roztavenou pájkou souvislou vrstvu pájecího materiálu. V případě pájení součástek musí mít pájka dobrou vzlinavost a přilnavost, aby se vytvořil na pájených materiálech po celém povrchu tuhý roztok v podobě tenké a souvislé vrstvy pájky. Tyto vlastnosti závisejí na složení pájky, a proto při přechodu na bezolovnaté pájení dochází ke změnám ve smáčivosti, což výrazně ovlivňuje nepřítomnost olova.

Pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje je nezbytné dosáhnout dobré smáčivosti jak na kontaktní plošce substrátu, tak na součástce [3].

#### 3.1.1 Technologické faktory ovlivňující smáčivost

Předpoklad smáčivosti povrchu pájkou jsou [8]:

- složení a vlastnosti pájky,
- povrchová úprava substrátu, morfologie povrchu, materiál substrátu,
- složení a aktivita tavidla,
- povrchová úprava vývodu součástek, morfologie povrchu, materiál součástky,
- pájecí proces, ideální teplotní profil, ideální podmínky zajišťující přenos tepla k pájenému spoji,
- pájecí atmosféra (vzduch/dusík/vodík).

### 3.1.2 Vlivy prostředí

Vlivy prostředí [9]:

- oxidace povrchu (oxidy, sulfidy),
- vliv vlhkosti.

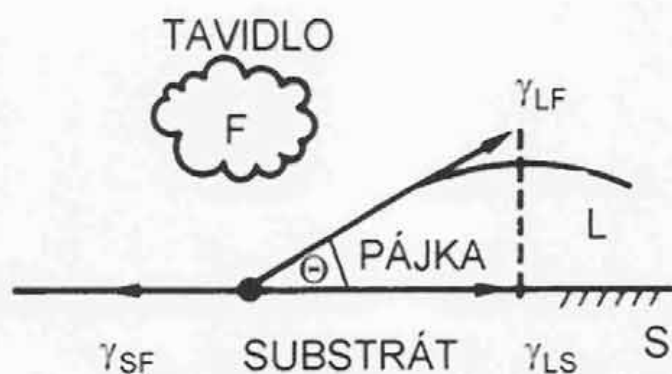
### 3.1.3 Podmínky pro smáčení

Smáčecí charakteristiky jsou výslednicí jednotlivých působících vektorových sil mezifázového povrchového napětí v

- materiálovém systému:  
tavidlo / vzduch nebo dusík / povrchové úpravy pájených povrchů / pájka
- i procesním systému:  
teplota/doba.

Smáčivost je definována pomocí faktoru roztékavosti – tzv. smáčecím úhlem  $\theta$ . Rovnováha procesu smáčení je na obr. 5. Platí Youngova rovnice (1).

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cos \theta \quad (1)$$



Obr. 5: Rovnováha povrchových napětí [10]

F – tavidlo a prostředí

L – pájka

S – substrát

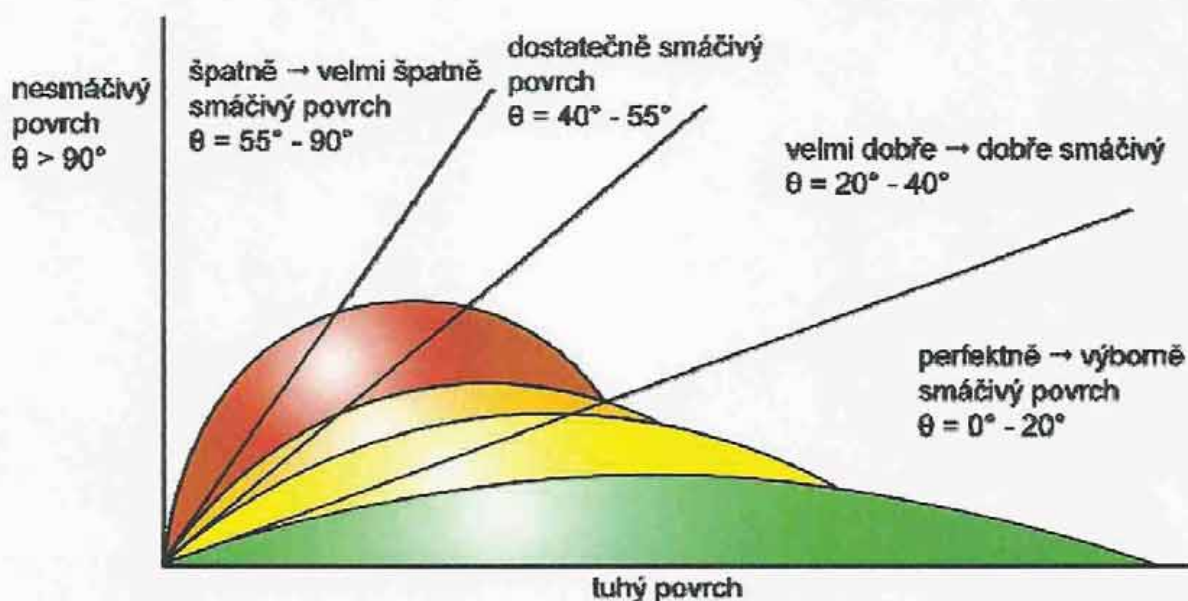
$\theta$  – smáčecí úhel [°]

$\gamma_{LF}$  – povrchové napětí na rozhraní LF [ $Nm^{-1}$ ]

$\gamma_{SF}$  – povrchové napětí na rozhraní SF [ $Nm^{-1}$ ]

$\gamma_{LS}$  – povrchové napětí na rozhraní LS [ $Nm^{-1}$ ]

### 3.1.4 Smáčecí úhel



Obr. 6: Rozdělení smáčivosti povrchů podle velikosti smáčecích úhlů [10]

- **Smáčivý povrch** - pájka pokrývá povrch. Čím je povrch hladší, rovnoměrnější a menší tloušťka pájky, tím je proces smáčení kvalitnější.
- **Částečně smáčivý** - pájka nedokonale pokrývá povrch. Vyskytují se zde oblasti, kde je povrch smáčivý a nesmáčivý.
- **Nesmáčivý povrch** - pájka nepokrývá povrch. Příčinou je velká vrstva oxidů a málo aktivní tavidlo.
- **Odsmačivý povrch** - pájka smočila povrch, ale poté vytvořila na povrchu kapky pájky. Neexistuje přesná hranice mezi špatně smáčivým a odsmačivým povrchem [10].

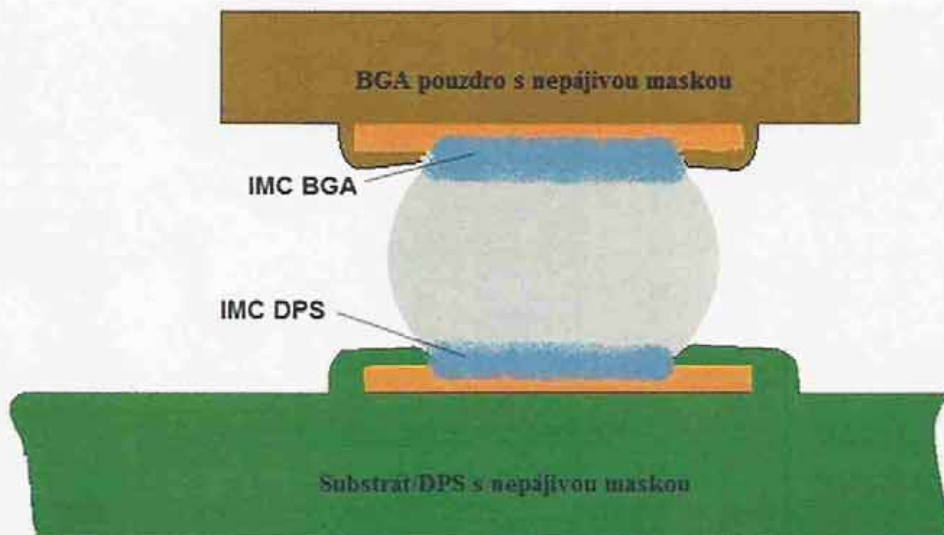
## 3.2 Intermetalické vrstvy

Vlastnosti intermetalické vrstvy (IMC - Intermetallic Compound) se liší od vlastností pájky i podkladového materiálu. Typické pro tyto sloučeniny je vysoká křehkost a vyšší teplota tání než samotné pájky. Další významná vlastnost, zvláště v případě  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , je nesmáčivost.

Tloušťka intermetalické vrstvy není statická, ale s časem roste. Rychlost růstu závisí na teplotě a růst pokračuje dokonce i při pokojové teplotě. Je-li vrstva pájky tenká, může ji intermetalická sloučenina celou nahradit a vlastnosti takovéto vrstvy se výrazně liší od té původní. Například vývod součástky pokrytý pájkou pro dosažení lepšího smočení při pájení je pokryt intermetalickou sloučeninou, která je nesmáčivá a má vyšší teplotu tání.

Mohlo by se zdát, že problémy jsou jen v případě, že upravený materiál budeme skladovat delší dobu. Jak ale výzkum ukázal, současně s tenkou vrstvou se vytvářejí v objemu krystaly intermetalické vrstvy ihned po přetavení a mohou vystoupit až k povrchu. Přítomnost intermetalické vrstvy na povrchu mění jeho reflexivitu. Místa s intermetalickou fází jsou matná. Tento fakt by mohl způsobit problémy například s interpretací optické kontroly korektně zapájených spojů [11].



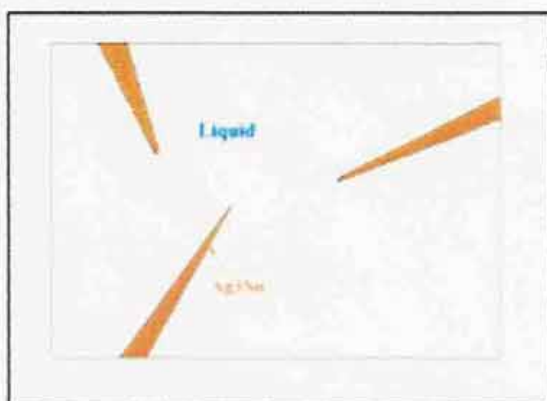


Obr. 7: Selhání spoje důsledkem velkého podílu IMC [14]

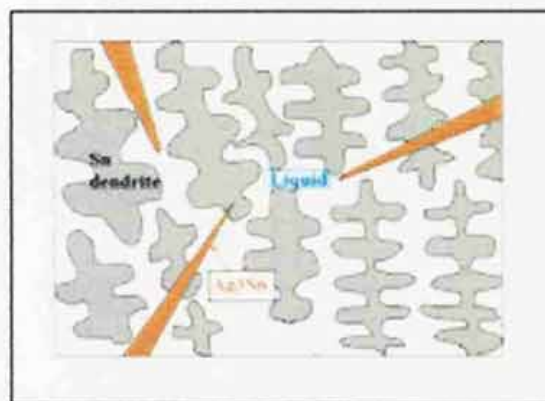
### 3.2.1 Růst intermetalické vrstvy v procesu tuhnutí pájky

Intermetalické vrstvy v izotermickém stavu rostou buď ve fázi tuhá - tuhá, nebo tuhá - kapalina. V druhém zmíněném případě, při dlouhodobém prodlení na bodu tavení pájky, tato intermetalické vrstva roste. Tloušťka a struktura směsi intermetalické vrstvy také závisí na procesu, kterým působíme během ochlazování a tuhnutí. V izotermickém stavu pokračuje tavení intermetalické vrstvy a projevuje se ve vrstvě kapaliny C (krycí vrstva) na rozhraní, která je obohacena substrátem S (substrát). Přesné složení kapaliny na SC - C rozhraní je stejné jako v rovnovážném stavu s pevnou intermetalickou vrstvou při té samé teplotě. Koncentrace obohacujících látek klesá exponenciálně pryč od rozhraní. Když je vzorek zchlazen, kapalina blízko k povrchu rozhraní se přesytí (nasáknutím) s druhem S a intermetalická vrstva roste dál do kapaliny, zatímco se spoj ochlazuje a tuhne [15].

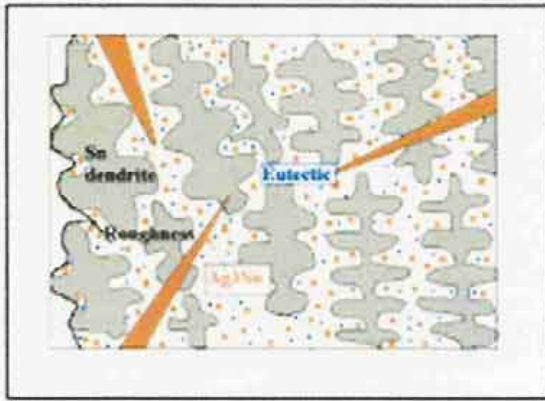
Pájka SAC tuhne ve třech fázích, nejprve tuhne IMC Ag<sub>3</sub>Sn ve formě „jehlic“, obr. 8, následně chladne cín v celém objemu ve formě β - Sn dendritů, obr. 9. V poslední fázi tuhne eutektikum, obr. 10 [17].



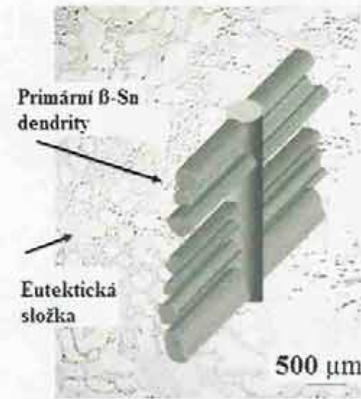
Obr. 8: Tuhnutí IMC vrstvy [18]



Obr. 9: Tuhnutí Sn [18]

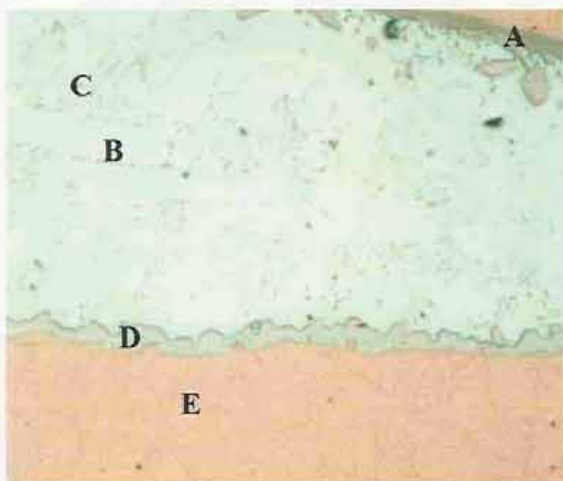


Obr. 10: Tuhnutí eutektika [18]



Obr. 11: Znárodnění dendritů a eutektické složky [18]

Při tuhnutí slitiny se předpokládá stále dokonalá vnitřní rovnováha. Krystalizace se uskutečňuje růstem krystalů zvaných dendrity. Dendrity jsou stroměčkové útvary, které se tvoří postupně vznikem hlavních os a dalších os na ně kolmých. Kostra dendritu je tedy bohatší na složku s vyšší teplotou tavení. Příčinou větvení při růstu kovových krystalů je tzv. koncentrační podchlazení, jehož příčinou je nerovnoměrný průběh tuhnutí. Pokud by tuhnutí probíhalo rovnovážně, pak by při každé teplotě složení koexistujících fází (kapalně a tuhé) odpovídalo v celém objemu křivkám likvidu a solidu v daném rovnovážném stavovém diagramu. Pro dosažení rovnovážného stavu by tedy musela být difúzní rychlost kovu s vyšší teplotou tavení tak velká, aby se složení během krystalizace a ochlazování mohlo stále vyrovnávat. K úplnému vyrovnání však dojde pouze tehdy, není-li rozdíl ve složení příliš velký a postupuje-li chladnutí dosti pomalu. V praxi se však častěji rovnovážného stavu nedosáhne a osy dendritů zůstanou bohatší na kov s vyšší teplotou tavení, kdežto meziosové prostory jsou o tento kov chudší. Ztuhlá tavenina je sice tvořena krystaly jediné fáze, ale uvnitř každého krystalu je složení nestejně. Tento jev se označuje jako dendritické odměšení [17].



- A. pájený spoj a intermetalická mezivrstva
- B. primární dendrity
- C. eutektická složka
- D. vrstva ICM
- E. základní kov DPS

Obr. 12: Struktura pájeného spoje [18]



### 3.3 Životnost a spolehlivost pájeného spoje

Životnost výrobku je obecně definována dobou, za kterou se výrobek opotřebuje natolik, že nemůže plnit svoji funkci. Poněvadž životnost většiny výrobků se pohybuje v rozmezí několika let, již v minulosti se u klasických součástek zjišťovala s pomocí tzv. zrychlených zkoušek. Jedná se o simulaci pracovního režimu za zvýšené teploty, resp. v režimu střídání záporných a kladných teplot a v případné zvýšené relativní vlhkosti. To urychluje stárnutí, dochází k simulaci vnitřních jevů v pájených spojích a součástkách nastávajícím za běžného provozu, a tím je urychlována jejich degradace. Jedná se především o fyzikální procesy difuze a elektrochemický proces koroze.

Difuze materiálů se projevuje vznikem intermetalických slitin a jejich neustálým nárůstem. Vzhledem k tomu, že tyto vrstvy vykazují zhoršené vlastnosti, především elektrickou vodivost, vede tento proces k degradaci, a postupně k nefunkčnosti spoje. Navíc se zhoršuje tepelná vodivost a vzrůstá křehkost. Tavidlové zbytky a „vhodné“ klimatické podmínky vedou k elektrochemické korozi, která mění vlastnosti materiálu spoje, především narušuje jeho homogenitu, zhoršuje adhezi a rovněž vede k jeho destrukci [5].

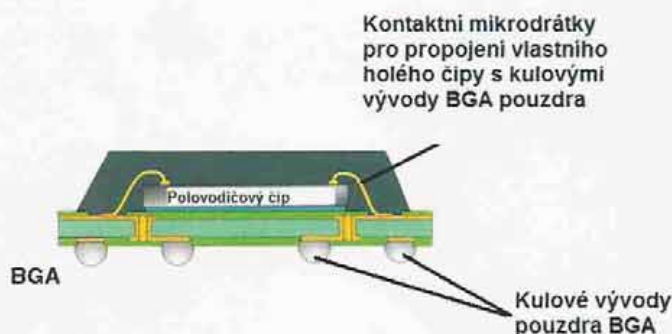
## 4 Metodika provádění zkoušek pevnosti pájeného spoje

### 4.1 Metodika sledování úbytku napětí na pájených spojích

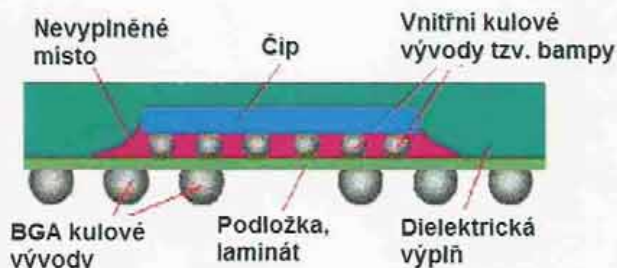
Pro měření odporu jednotlivých pájených spojů se volí stejnosměrná čtyřbodová metoda měření elektrického odporu. Tato metoda měření eliminuje vliv elektrického odporu přívodních měřících vodičů, a proto je vhodná pro měření velmi malých hodnot odporů. Všemi spoji na testované desce se nechá protékat definovaný proud a měří se úbytky napětí vznikající na jednotlivých pájených spojích. Následně se z naměřených hodnot proudů a úbytků napětí může vypočítat elektrická vodivost jednotlivých pájených spojů [15].

### 4.2 Měření stříhové pevnosti

Test stříhem je základním nástrojem schopným otestovat pevnost bezolovnatých spojů na pouzdech BGA - Ball Grid Array. Pouzdra BGA mohou obsahovat klasický čip spojený tenkým drátkem (kontaktování mikrodrátkem) a takzvaným FC - Flip Chipem, rozdíl mezi těmito způsoby kontaktování je vidět na obrázcích 13 a 14.



Obr. 13: BGA pouzdro s kulovými vývody spojenými s vlastním čipem drátovými vývody[14]



Obr. 14: BGA pouzdro typu FC<sub>v</sub> ve kterém je vlastní čip propojen s pouzdem kulovými vývody [14]

Soubor vzorků o dostatečně velkém počtu (vhodné pro relevantní statistické výsledky) otestujeme na přístroji DAGE PC 2400. Daný přístroj působí na vzorek definovanou silou, která způsobuje posunutí (BGA pouzdro vůči substrátu) až odtrhnutí BGA4. Síla, kterou přístroj působí na vzorek, je zaznamenávána. Přístroj udává hodnoty v hmotnostních jednotkách kilogram, tyto jednotky lze přepočítat na tlakovou sílu. Přístroj je vyobrazen na obrázku 15.

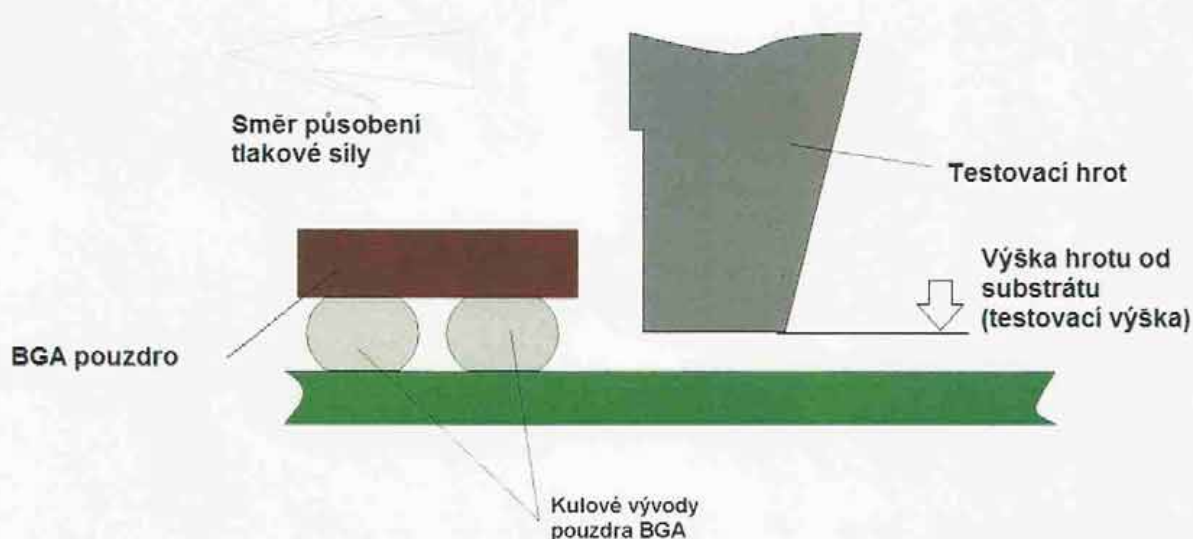


Obr. 15: Zařízení DAGE PC 2400, které umožňuje test stříhem [14]

Testovaný vzorek upneme do přípravku. Celý přípravek byl uchycen v testovacím zařízení, které definovanou silou „stříhem“ působilo na části vzorku. Dané zařízení je propojeno s počítačem, který vyhodnotí velikost síly nutné k oddělení obou částí vzorku od sebe.

Výstupem tohoto měření byla tedy velikost síly potřebné k oddělení obou částí vzorku od sebe a také vzdálenost, ve které došlo k jejich oddělení. Princip testu stříhem je znázorněn na obrázku 16 [14].





Obr. 16: Princip zkoušky stříhem pouzdra BGA [14]

### 4.3 Metoda mikrovýbrusu vzorku

Vzorky testovaných spojů jsou rozměrově upraveny do formiček a musí být zajištěno, aby při zalití byly stále kolmo na podložku. Formičky se vzorky se postupně zalívají transparentní pryskyřicí (Dentacryl - metylmetakrylátová pryskyřice určená na odlévání pro technické použití; na trhu je k dostání již 50 let a vyrábí se v balení jako prášek a tekutina). Polymeruje samovolně tzv. chemickou iniciací po smíchání obou složek. Po jeho vytvrzení vznikne bezbarvá až mírně nažloutlá hmota podobná plexisklu, která se dá snadno řezat, pilovat, brousit a leštit až do výsledné podoby. Po důkladném vytvrzení se provede výbrus na zařízení Metasinex za pomoci speciální hlavy. Vzorky jsou zarovnány tak, aby došlo k rovnoměrnému broušení a nedocházelo ke zbrušování hran.

Na opracování vzorku se používá brusný papír o hrubosti 240, který je na brusném zařízení zavlažován vodou, aby docházelo k odplavení hrubých odbroušených částic a zároveň nedocházelo k zapékání broušeného povrchu. Vzorky jsou broušeny téměř do poloviny pájeného spoje, abychom dosáhli pokud možno nejlepších výsledků. Po dosažení optimálně zbroušené plochy se přechází na jemnější brusné papíry hrubosti 600 a 1200, aby se odstranily hluboké vrypy. Celý proces pokračuje až do použití brusného papíru o hrubosti 2400 nebo 4000.

Finální podoby mikrovýbrusových vzorků se docílí leštěním za pomoci speciálního plstěného leštícího kotouče a diamantové leštící pasty hrubosti 6  $\mu\text{m}$ , dále 3  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$  za přidávání izopropylalkoholu a deionizované vody. Mikrovýbrusy je nakonec vhodné čistit v ultrazvukové myčce s deionizovanou vodou a vysušit [16].

# 5 Praktické vypracování

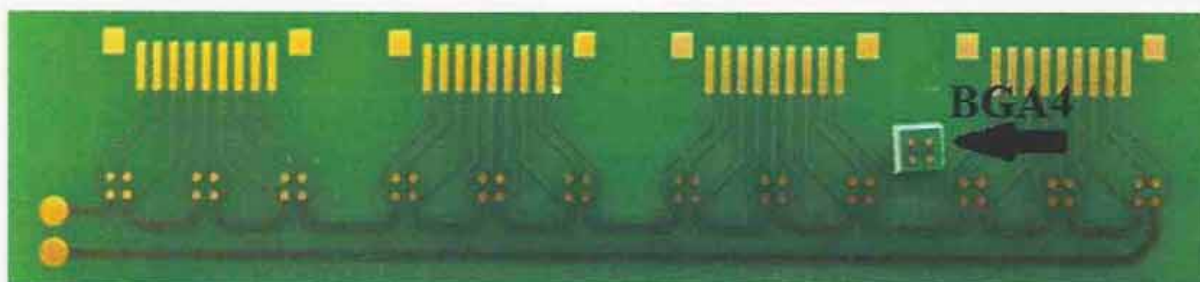
## 5.1 Výroba desky plošných spojů

Pro praktické zkoušky byly použity již vyrobené desky a součástky. Byly vyrobeny firmou zabývající se výrobou desek s plošnými spoji. K dispozici jsem dostal desky i součástky s povrchovou úpravou OSP a Ni-Au.

Obrázek s neosazenou deskou a imitací součástky BGA4 (dummy pouzdro BGA4) je na obrázcích 17 a 18. Deska má rozměry 105 mm x 25 mm a součástka 4 mm x 4 mm.



Obr. 17: Neosazená DPS s imitací součástky BGA4 s povrchovou úpravou OSP



Obr. 18: Neosazená DPS s imitací součástky BGA4 s povrchovou úpravou Ni-Au

Jak vidíme na obrázcích 17 a 18, desky budou osazeny celkem dvanácti součástkami, pomocí kterých budeme zkoumat pevnost pájeného spoje a krystalickou strukturu.

## 5.2 Postup pájení zkušební desky plošných spojů

Na zkušební desku jsem nanesl pastovité tavidlo TSF 6592. Toto tavidlo je bezoplachové se specifikací ROL0 a určené pro pájení BGA pouzder. Následně se nanesly kuličky pájky SAC405 o průměru 760  $\mu\text{m}$  na plošky BGA4 a vše se nechalo přetavit v přetavovací peci. Tavidlo se naneslo na desku a součástka s přetavenými kuličkami se umístila na kontakty DPS.

Přetavení probíhalo v průběžné peci DIMA SMRO-0180, která byla umístěna ve skleněné komoře (viz Obr. 19) z důvodu zadržení tepla, a tím dosažení lepší teplotní charakteristiky. Teplotní charakteristiku jsem měřil pomocí zařízení SLIM KIC 2000, které bylo připojeno k PC, kde byl software na ukládání naměřených dat - jak je vidět na obrázku 20. Na zařízení byly napojeny dva termočlánky, které byly připevněny pomocí kaptonové pásky. Tato páska vydrží krátkodobě až 250 °C. Termočlánek označený jako TC1 snímal okolní teplotu vzduchu. Termočlánek označený TC2 jsem umístil pod součástku, kde byl ovlivněn tepelnou kapacitou součástky.





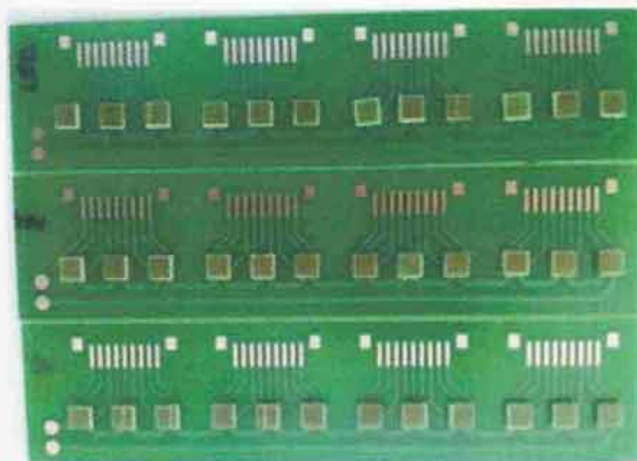
Obr. 19: Průběžná pec ve skleněné komoře



Obr. 20: Zařízení SlimKIC 2000 s počítačem a prototypem na měření teplotního profilu

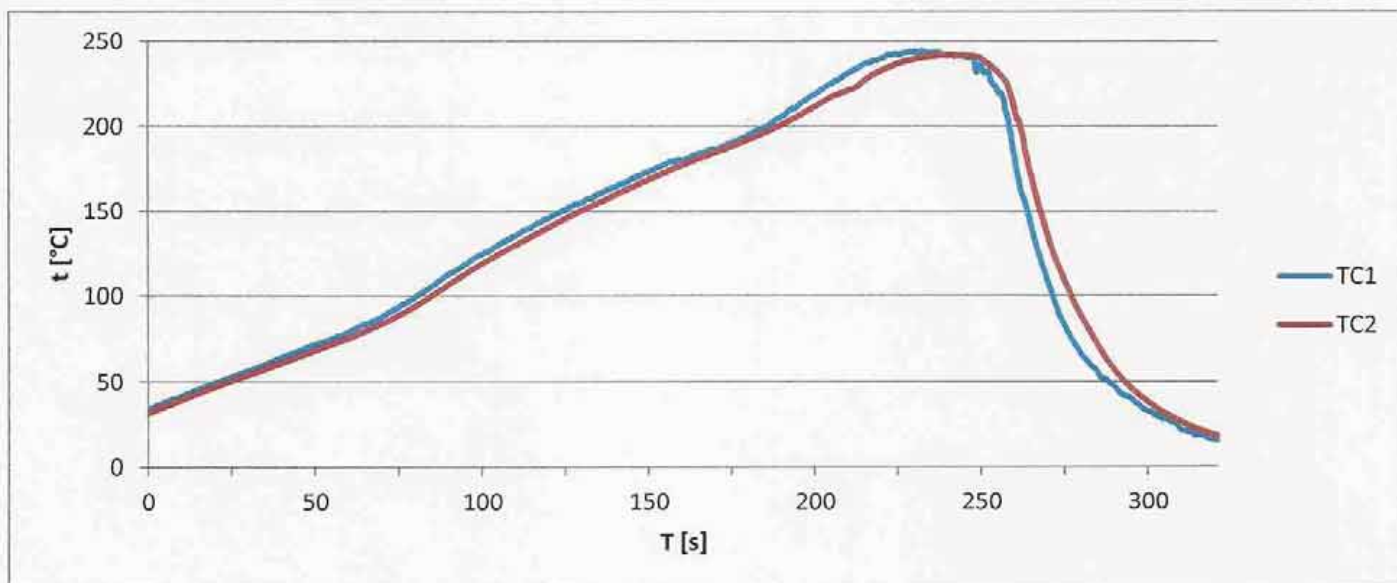
První vzorek označený na obrázku 21 černým lihovým fixem písmenem „LED“ jsem chladil pomocí přídavné desky. V dalších částech práce je označen jako „6,80 °C/s“.





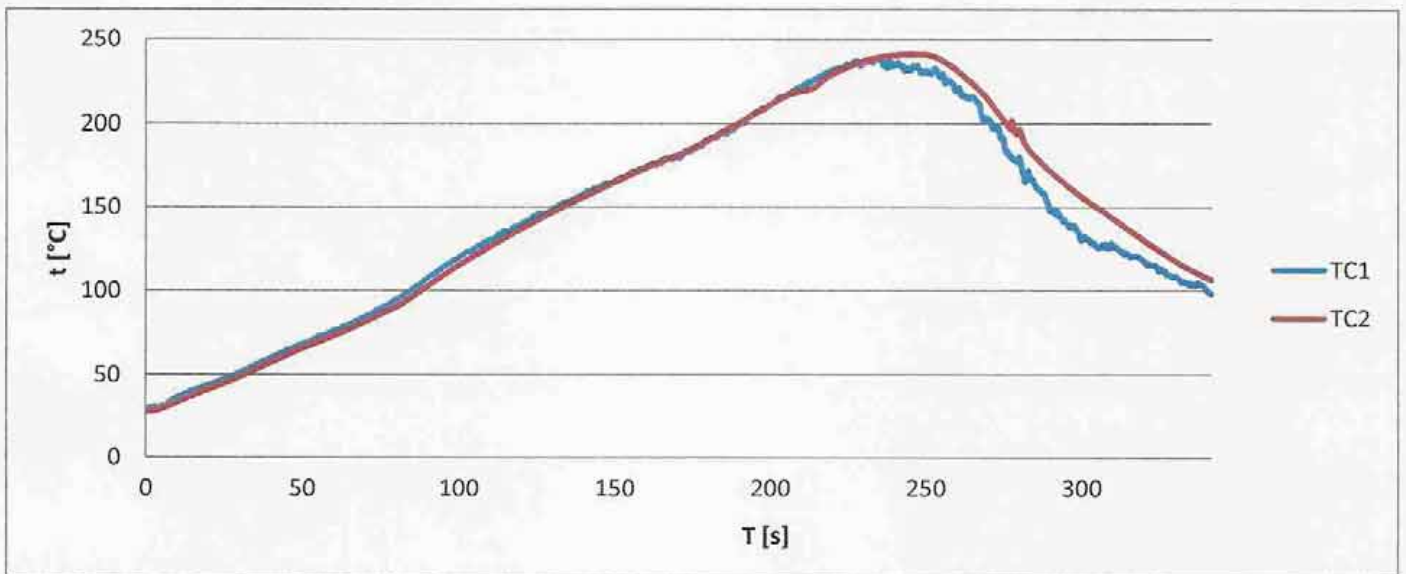
Obr. 21: Hotové DPS s povrchovou úpravou OSP

Naměřený teplotní profil vidíme na obrázku 22. Při tomto typu chladnutí jsem dosáhl gradientu chlazení  $6,80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ .



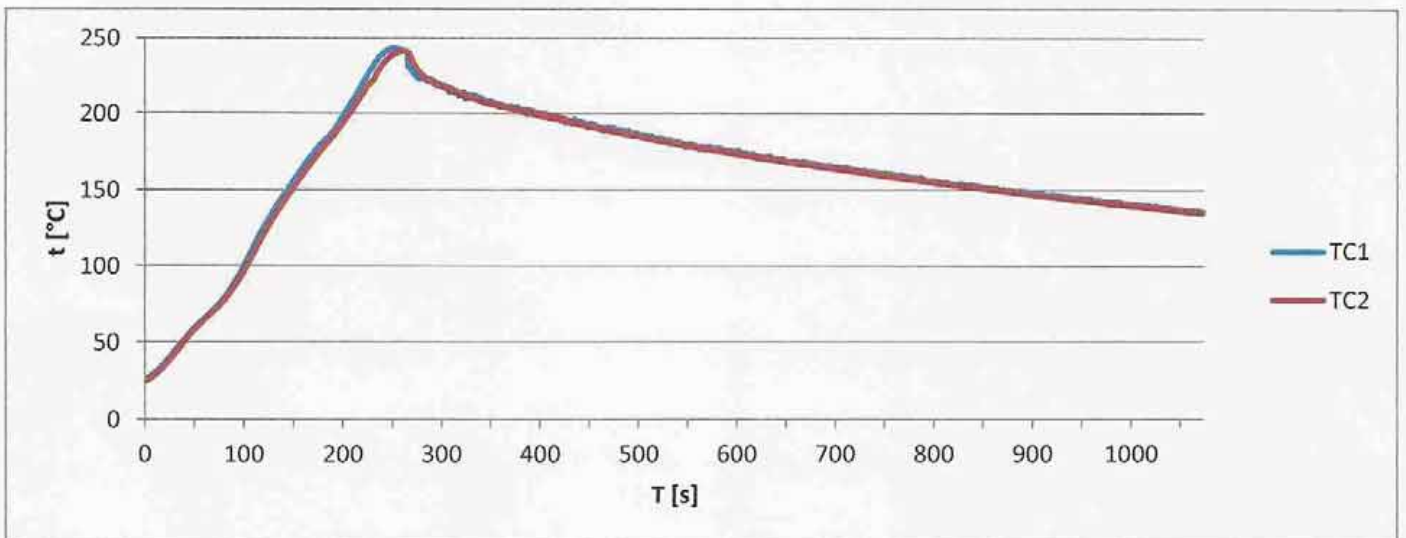
Obr. 22: Teplotní profil pro DPS s označení „LED“,  $6,80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$

Druhý vzorek označený na obrázku 21 černou lihovou fixou písmenem „V“ jsem chladil vzduchem pomocí větráku, který je součástí peci. V dalších částech práce je označen jako „ $2,00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ “. Naměřený teplotní profil vidíme na obrázku 23. Vidíme, že u teploty  $198\text{ }^{\circ}\text{C}$  nám u TC2 zvedla nepatrně teplota. To může být způsobeno vzduchovou turbulencí v peci. Při tomto typu chladnutí jsem dosáhl gradientu chlazení  $2,00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ .



Obr. 23: Teplotní profil pro DPS s označení „V“,  $2,00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$

Třetí vzorek označený na obrázku 21 černou lihovou fixou písmenem „Ž“ jsem chladil pomocí přídavné desky, která byla ohřátá. V dalších částech práce je označen jako „0,16  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ “. Naměřený teplotní profil vidíme na obrázku 24. Při tomto typu chlazení jsem dosáhl gradientu chlazení  $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ .



Obr. 24: Teplotní profil pro DPS s označení „V“,  $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$

Postup a tedy i teplotní profily jsou totožné jak pro přípravu vzorků s povrchovou úpravou OSP, tak i pro Ni-Au.

### 5.3 Měření pomocí čtyřbodové metody a diskuze dosažených výsledků

U měření úbytku napětí jsem použil čtyřbodovou metodu.

Pro měření byl jako proudový zdroj použit regulovatelný symetrický zdroj Diemtral. Jako voltmetr byl zapojen multimetr MIT 291 výrobce Metra Blansko. Nastavený proud byl 0,6 A, který byl kontrolován multimetrem Agilent 34410A. Testované DPS byly během měření uloženy v přesném teplotním stabilizátoru Friocell s přesností teploty 0,1 °C. Zařízení udržovalo nastavenou teplotu 40 °C. Vzorky byly uloženy po dobu 30 minut a byly temperovány na teplotu 40 °C. Tato teplota byla pro měření zvolena tak, aby měřené DPS nebyly ovlivněny okolní teplotou, ale na druhou stranu nebyly zbytečně teplotně zatěžovány.

Hodnoty naměřených úbytků napětí jsou v tabulce číslo 2. Z této tabulky je patrné, že nejmenší přechodový odpor je při ideálním gradientu chladnutí 2,00 °C/s. Pro povrchovou úpravu OSP byl průměrný úbytek 1,0827 mV a pro Ni – Au byl průměrný úbytek 1,1048 mV. Největší úbytek měly desky 0,16 °C/s. Pro OSP byl průměrný úbytek 1,0874 mV a pro Ni – Au 1,1133 mV. Z těchto hodnot se můžeme domnívat, že největší IMC vrstva je u vzorků 0,16 °C/s. U těchto vzorků můžeme očekávat při stříhovém testu, že síla potřebná k odtržení BGA4 pouzder bude nejmenší z důvodu nejširší vrstvy IMC, která tvoří nejkřehčí místo v celém objemu pájky.

Tab. 2: Tabulka naměřených hodnot úbytku napětí

Konektor	Propojení	OSP						Ni - Au							
		2,00 °C/s [mV]	6,80 °C/s [mV]	6,80 °C/s [mV]	0,16 °C/s [mV]	0,16 °C/s [mV]	2,00 °C/s [mV]	2,00 °C/s [mV]	6,80 °C/s [mV]	6,80 °C/s [mV]	6,80 °C/s [mV]	0,16 °C/s [mV]	0,16 °C/s [mV]		
1	1	1,0656	1,0482	1,0931	1,0965	-	1,0908	-	-	1,1365	1,1120	1,1088	-	1,1063	-
	2	1,0943	1,0854	1,0676	1,0661	-	1,1030	-	-	1,1000	1,1346	1,0919	-	1,1170	-
	3	1,0649	1,0996	1,0892	1,0752	-	1,1063	1,0782	1,1172	1,0986	1,1165	1,1263	-	1,1159	1,2611
	4	1,0883	1,0629	1,0766	1,0712	-	1,1042	1,0864	1,0805	1,0958	1,1183	1,1026	-	1,1212	1,1180
	5	1,0713	1,0866	1,1427	1,1438	-	1,1208	1,1420	1,1997	1,1559	1,1512	1,1670	1,1554	1,1373	1,1634
	6	1,0460	1,0262	1,0675	1,0189	-	1,0673	1,0244	1,0292	1,0329	1,0821	1,0386	1,0533	1,0604	1,0561
2	1	1,0656	1,0908	1,0634	1,0525	-	1,0624	-	1,1199	1,0902	1,0959	1,1206	1,0997	1,1079	-
	2	1,0920	1,0902	1,0629	1,0867	-	1,1072	-	1,0773	1,0928	1,1165	1,1004	1,1249	1,0966	-
	3	1,0746	1,1017	1,0995	1,0840	-	1,0820	1,0883	1,0921	1,1100	1,1105	1,1251	1,0927	1,1110	1,1329
	4	1,0930	1,0826	1,0913	1,0916	-	1,1107	1,0812	1,0880	1,1155	1,1399	1,1111	1,1048	1,1151	1,1065
	5	1,0854	1,0884	1,0643	1,0772	1,0612	1,0842	1,0638	1,1261	1,1105	1,0985	1,1338	-	1,0895	1,1054
	6	1,0773	1,0913	1,0812	1,0896	1,0720	1,1019	1,1056	1,0969	1,1046	1,1112	1,0947	-	1,1222	1,1182
3	1	1,0986	1,0730	1,0867	1,0789	-	1,1100	0,8601	1,1122	1,1166	1,1059	1,1029	-	1,1084	1,1115
	2	1,0871	1,0774	1,1000	1,0849	-	1,1109	1,1910	1,1032	1,1052	1,1223	1,0919	-	1,1208	1,1010
	3	1,0817	1,0762	1,0960	1,0762	1,0816	1,1053	1,0712	1,1085	1,1143	1,1430	1,1308	-	1,1075	1,0970
	4	1,0928	1,0922	1,1049	1,0801	1,1204	1,1190	1,0829	1,0959	1,0963	1,1232	1,1032	-	1,1052	1,0914
	5	1,0902	1,0821	1,0806	1,0728	1,0732	1,0687	1,0842	1,1204	1,1001	1,1150	1,1258	-	1,1030	1,1171
	6	1,0745	1,0838	1,1020	1,0921	1,0962	1,0858	1,0932	1,0920	1,1069	1,1224	1,1152	-	1,1102	1,0953
4	1	1,0912	1,0772	1,0884	1,0670	1,0895	1,0835	1,0950	1,1042	1,0996	1,1085	1,1462	-	1,1072	1,1033
	2	1,0930	1,1082	1,0945	1,1017	1,0730	1,1030	1,0974	1,0961	1,1025	1,1372	1,1041	-	1,1034	1,1069
	3	1,0942	-	1,1228	1,0939	1,0893	1,0642	1,1364	1,1180	1,1181	1,0891	1,1224	-	1,1009	1,1048
	4	1,0996	-	1,0834	1,0739	1,0792	1,0935	1,1030	1,0929	1,1153	1,1127	1,1070	-	1,1151	1,0888
	5	1,0686	1,0922	1,0772	1,0836	-	1,0625	1,0650	1,1089	1,1113	1,0899	1,1308	-	1,1135	1,1211
	6	1,0989	1,0998	1,0810	1,0745	-	1,0786	1,0912	1,0971	1,1166	1,1199	1,1113	-	1,1599	1,1204
Ø		1,0827		1,0841		1,0874		1,1048		1,1113			1,1133		
Rozptyl		0,0002		0,0004		0,0019		0,0006		0,0005			0,0009		

Poznámky k tabulce 2 :

- ... Nezměřeno z důvodu nezapájení BGA4 pouzdra

Měření bylo prováděno na rozdílných DPS vyrobených při stejném gradientu chlazení, neboť některé BGA4 na DPS se nepodařilo připájet a nebylo by tak u daného gradientu chlazení získáno dostatečný počet výsledků.



## 5.4 Výsledky stříhového testu na stroji DAGE PC 2400 a diskuze dosažených výsledků

Pro testování byl zvolen běžný nízkorychlostní stříh, nastavené parametry jsou uvedeny v tabulce 3 níže. Naměřené hodnoty stříhového zatížení, které vedlo k selhání spojů, resp. BGA4, jsou uvedeny pro sady vzorků v tabulce 4 níže.

Tab. 3: Parametry nastavené na zařízení DAGE PC 2400 při testování vzorků

parametr	hodnota	jednotka
Stříhová rychlost	310	μm/s
Testovací výška	100	μm
Maximální zatížení	10	Kg
Stroj byl nastaven na destruktivní test - vždy testované BGA4 pouzdro utrhnul		

Tab. 4: Tabulka naměřených hodnot stříhových sil

Číslo BGA4	OSP			Ni - Au		
	6,80 °C/s [N]	2,00 °C/s [N]	0,16 °C/s [N]	6,80 °C/s [N]	2,00 °C/s [N]	0,16 °C/s [N]
1.	51,65	49,13	44,21	65,34	58,60	56,38
2.	45,32	56,51	50,93	65,43	61,17	56,29
3.	49,95	50,38	48,60	60,51	63,47	56,73
4.	47,35	54,47	48,47	65,04	64,84	55,04
5.	50,48	58,62	46,46	63,04	68,75	61,74
6.	49,80	62,68	49,28	53,25	73,43	60,07
7.	53,66	53,29	58,38	52,90	61,82	61,44
8.	54,78	51,56	51,30	59,78	60,03	50,78
9.	57,37	56,48	50,51	63,22	71,43	63,17
10.	50,07	48,14	49,69	60,77	69,44	59,00
11.	50,89	59,12	55,10	58,33	65,43	57,02
12.	52,22	51,63	54,28	59,92	57,90	49,30
13.	53,56	58,69	48,14	66,75	68,81	55,99
14.	50,23	56,10	52,13	66,24	62,67	62,66
15.	43,86	51,33	49,13	49,77	68,16	61,29
16.	54,53	57,59	46,16	51,46	60,65	58,51
17.	44,25	55,10	50,76	61,70	64,70	55,45
18.	50,86	61,50	48,58	55,49	51,34	61,35
19.	55,87	48,76	52,53	59,95	63,65	66,85
20.	54,67	54,49	55,89	58,39	61,20	61,64
21.	55,41	52,79	56,32	59,45	63,50	61,52
Ø	51,28	54,68	50,80	59,84	63,86	58,68
Rozptyl	13,53	16,29	12,47	23,36	24,58	16,74



Příklad výpočtu síly působící na BGA4 pro první řádek tabulky:

$$F_{OSP\ 6,80\ ^\circ C/s} = m \cdot g = 5,265 \cdot 9,81 = 51,65\ N$$

$$F_{OSP\ 2,00\ ^\circ C/s} = m \cdot g = 5,008 \cdot 9,81 = 49,13\ N$$

$$F_{OSP\ 0,16\ ^\circ C/s} = m \cdot g = 4,507 \cdot 9,81 = 44,21\ N$$

$$F_{Ni-Au\ 6,80\ ^\circ C/s} = m \cdot g = 6,661 \cdot 9,81 = 65,34\ N$$

$$F_{Ni-Au\ 2,00\ ^\circ C/s} = m \cdot g = 5,974 \cdot 9,81 = 58,60\ N$$

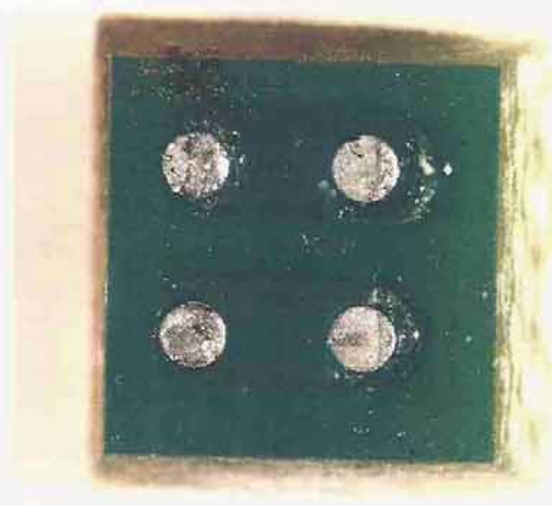
$$F_{Ni-Au\ 0,16\ ^\circ C/s} = m \cdot g = 5,747 \cdot 9,81 = 56,38\ N,$$

kde  $F$  [N] je stříhová síla,  $m$  [kg] je hmotnost a  $g$  [ $ms^{-2}$ ] tíhové zrychlení.

Z tabulky 4 vidíme, že nejpevnější spoj byl na DPS, která měla ideální průběh v zóně chlazení, a nejhůře dopadla součástka 0,16 °C/s. Tyto výsledky byly totožné pro obě povrchové úpravy. Můžeme se domnívat, že důvodem proč DPS 0,16 °C/s byla nejkřehčí, byla velikost IMC vrstvy. U úpravy Ni – Au vidíme, že BGA4 vydržel o jednotky síly více.



Obr. 25: Vývody na DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au



Obr. 26: Vývody na BGA4 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au



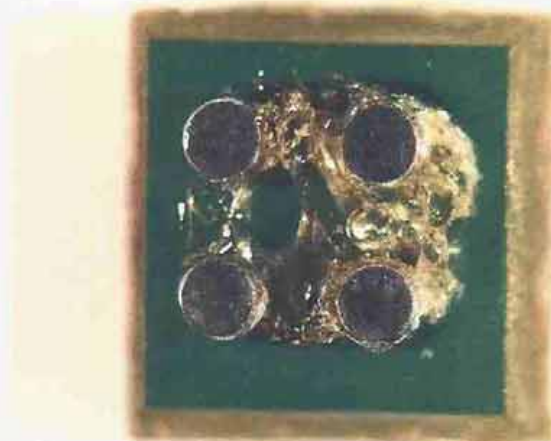
Obr. 27: Hrana BGA4 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au

Na obrázcích 25 a 26 vidíme snímky BGA4 a DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au. Ze snímků je patrné, že u všech došlo k selhání v IMC vrstvách na rozhraní kulový

vývod s padem BGA4. Na obrázku 27 vidíme snímek hrany BGA4, na kterou působil testovací hrot zařízení DAGE PC 2400. Hrana vznikla při frézování BGA4 kvůli jednoduššímu oddělování součástek. Ze snímku je patrné, že tato hrana není kolmá a mohla by vnášet do měření chybu.



**Obr. 28:** Vývody na DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au



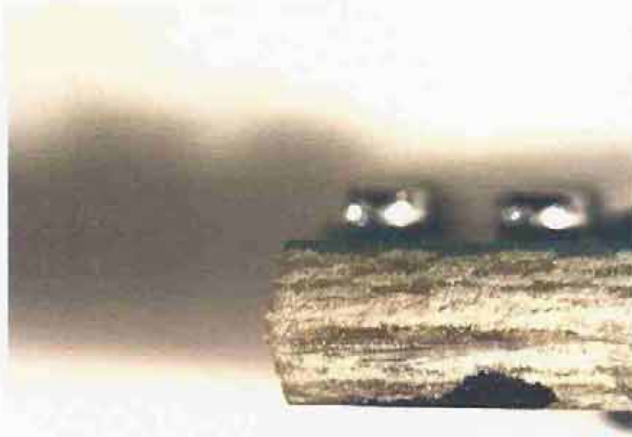
**Obr. 29:** Vývody na BGA4 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au



**Obr. 30:** Hrana BGA4 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au

Na obrázcích 28 a 29 vidíme snímky BGA4 a DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au. Ze snímku je patrné, že u většiny došlo k selhání v IMC vrstvách na rozhraní kulový vývod s padem DPS. Dále vidíme zbytky od tavidla, které ve větší míře zůstaly na BGA4. Na obrázku 30 je vyobrazena hrana BGA4. Zde pozorujeme větší hranu než v předchozím případě.



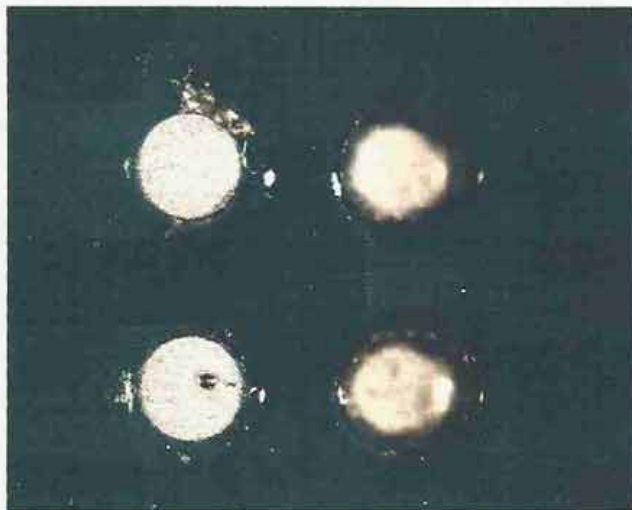


**Obr. 31:** Hrana BGA4 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au



**Obr. 32:** Vývody na BGA4 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au

Na obrázcích 31 a 32 vidíme snímky BGA4 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au. Z obrázku 31 je patná velikost úhlu hrany. Tento úhel hrany byl nejmenší z pozorovaných vzorků. U těchto vzorků byla pozorována nahodilá selhání IMC vrstvy.



**Obr. 33:** Vývody na DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP



**Obr. 34:** Vývody na BGA4 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP



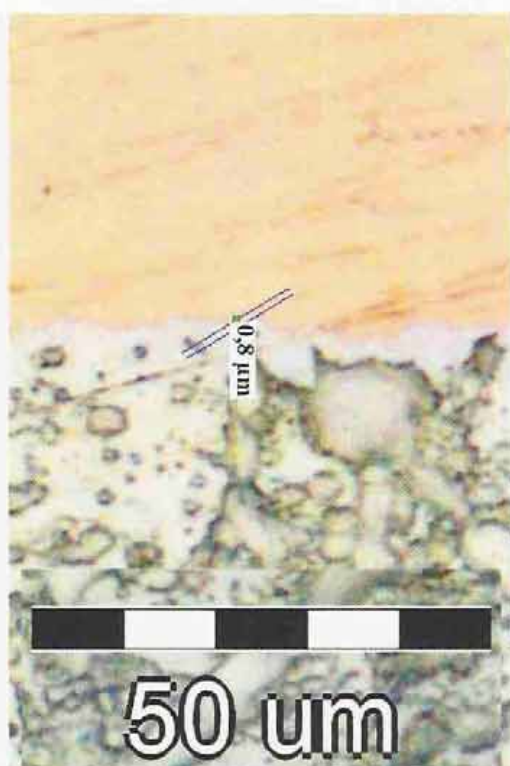
**Obr. 35:** Vývod na DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP



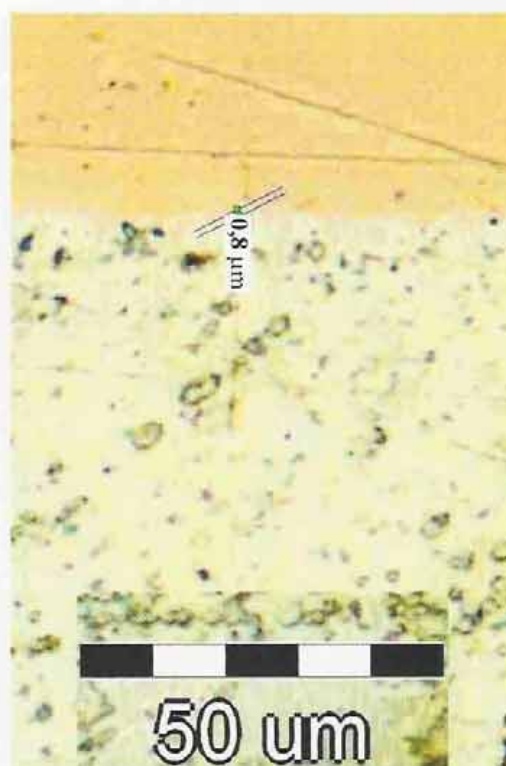
Na obrázcích 33 a 34 vidíme snímky BGA4 a DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP. Ze snímku je patrné, že u všech testovaných vzorků došlo k selhání v IMC vrstvách ve dvou případech vývodů bez ohledu na to, zda se jednalo o rozhraní kulový vývod s padem BGA4 nebo kulový vývod s padem DPS. Z obrázku je patrné, že kulové vývody zůstaly na DPS u testovacího hrotu. Naopak kulové vývody na druhé straně BGA4, kde přímo testovací hrot nepůsobil, vývody selhaly. Na obrázku 35, vidíme snímek kulového vývodu s voidem. Void byl pozorován pouze u jednoho kulového vývodu v celé práci. Je široký 112  $\mu\text{m}$ .

## 5.5 Optická kontrola velikosti IMC vrstvy a diskuze dosažených výsledků

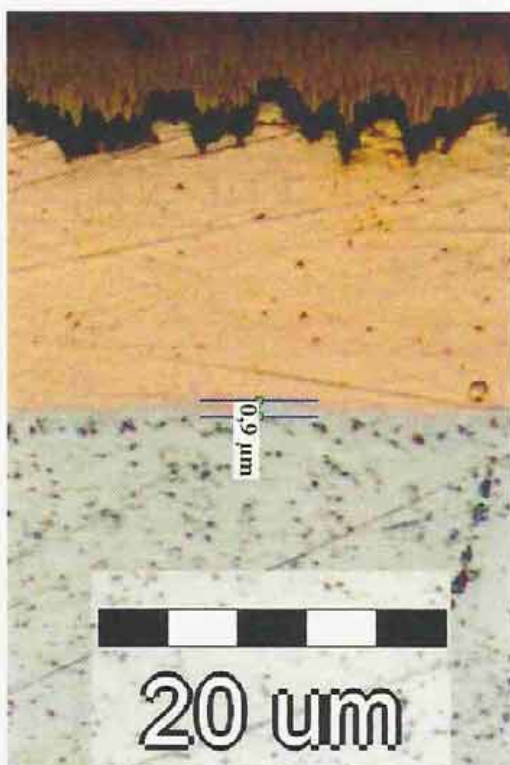
Pro vzorky zalité v dentacrylu jsem použil optickou kontrolu pomocí mikroskopu OLYMPUS GX 51, kde se podařilo dosáhnout u většiny vzorků 1000x zvětšení.



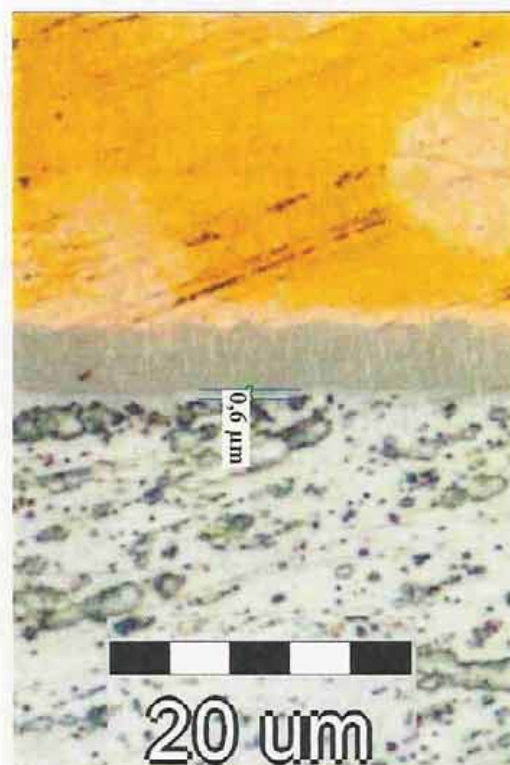
Obr. 36: DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou OSP – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,8  $\mu\text{m}$



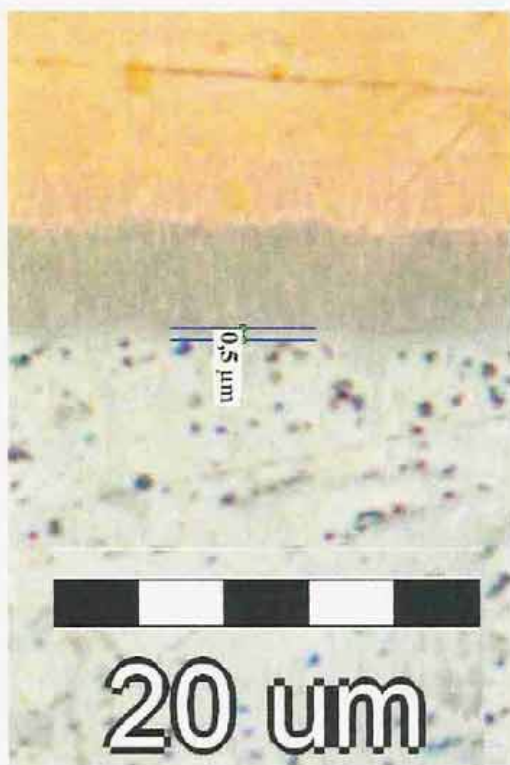
Obr. 37: DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP s pozlacením 0,54  $\mu\text{m}$  – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,8  $\mu\text{m}$



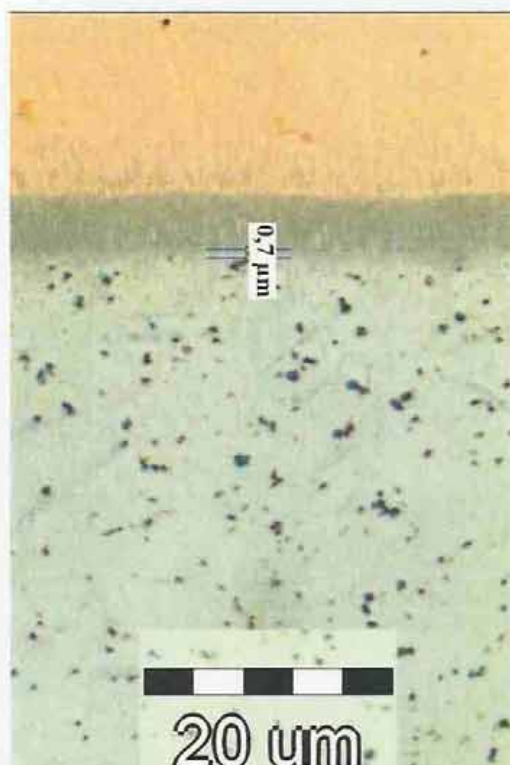
Obr. 38: DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou OSP – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,9  $\mu\text{m}$



Obr. 39: DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,6  $\mu\text{m}$



Obr. 40: DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,5  $\mu\text{m}$



Obr. 41: DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au – změřená tloušťka IMC vrstvy je 0,7  $\mu\text{m}$

Pomocí optického mikroskopu jsem změřil velikost IMC vrstvy na vzorcích zalitých v dentacrylu. Na obrázcích 36, 37, 38, 39, 40 a 41 vidíme, že nejmenší vrstva vznikla stejně u obou povrchových úprav s ideálním gradientem chladnutí 2,00 °C/s. Z měření vyplývá, že za stejných podmínek vzniká menší IMC vrstva na povrchové úpravě Ni – Au.



Při odečítání IMC vrstvy vzniká chyba, protože tato vrstva není po celé ploše pájeného spoje homogenní.

## 5.6 Krystalická struktura a diskuze dosažených výsledků

Pro krystalickou strukturu jsem použil stejné vzorky zalité v dentacrylu, které byly použity pro optickou kontrolu velikosti IMC vrstvy.

Příprava vzorků pro toto měření probíhala tak, že jsem vzorky čistil po dobu 10 minut v ultrazvukové čističce s deionizovanou vodou a následně 5 sekund leptal v 95 % metanolu a 5 % kyselině dusičné. Po leptání jsem opět 10 minut čistil v ultrazvukové čističce.

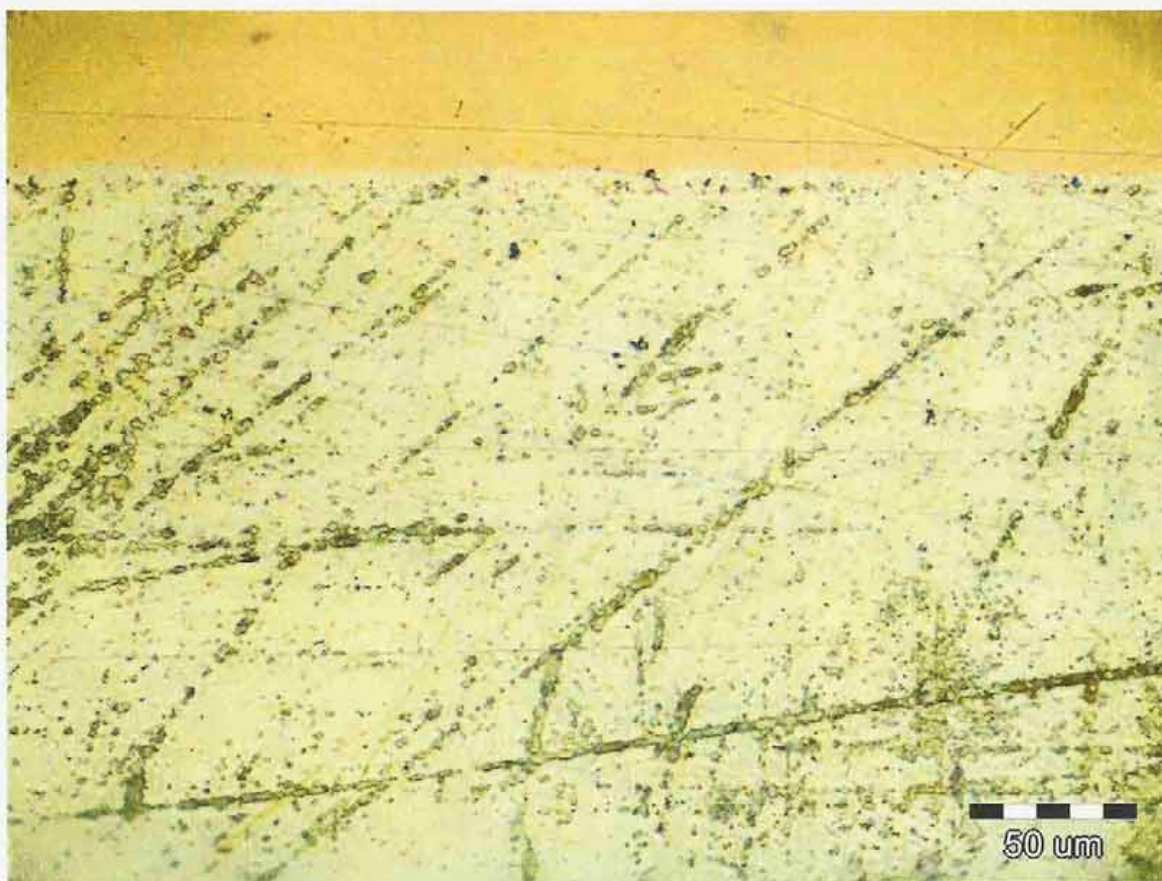
Tuto přípravu jsem udělal k naleptání hranic zrn a tím ke zvýšení kontrastu struktury. Pořízené fotografie pak vypadají lépe.

Krystalickou strukturu jsem sledoval pod optickým mikroskopem OLYMPUS GX 51, který byl schopný vzorek zvětšit 1000x.

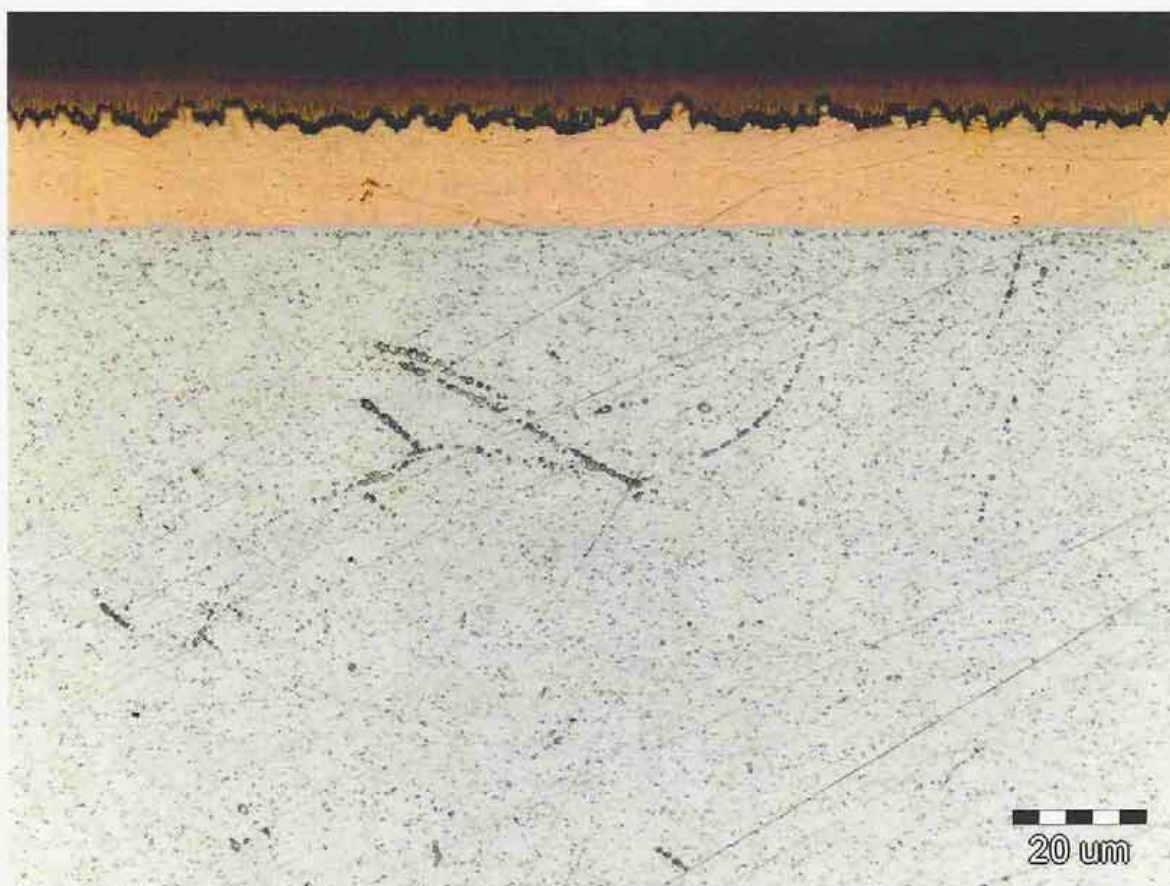


Obr. 42: DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou OSP





Obr. 43: DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou OSP s pozlacením 0,54 μm

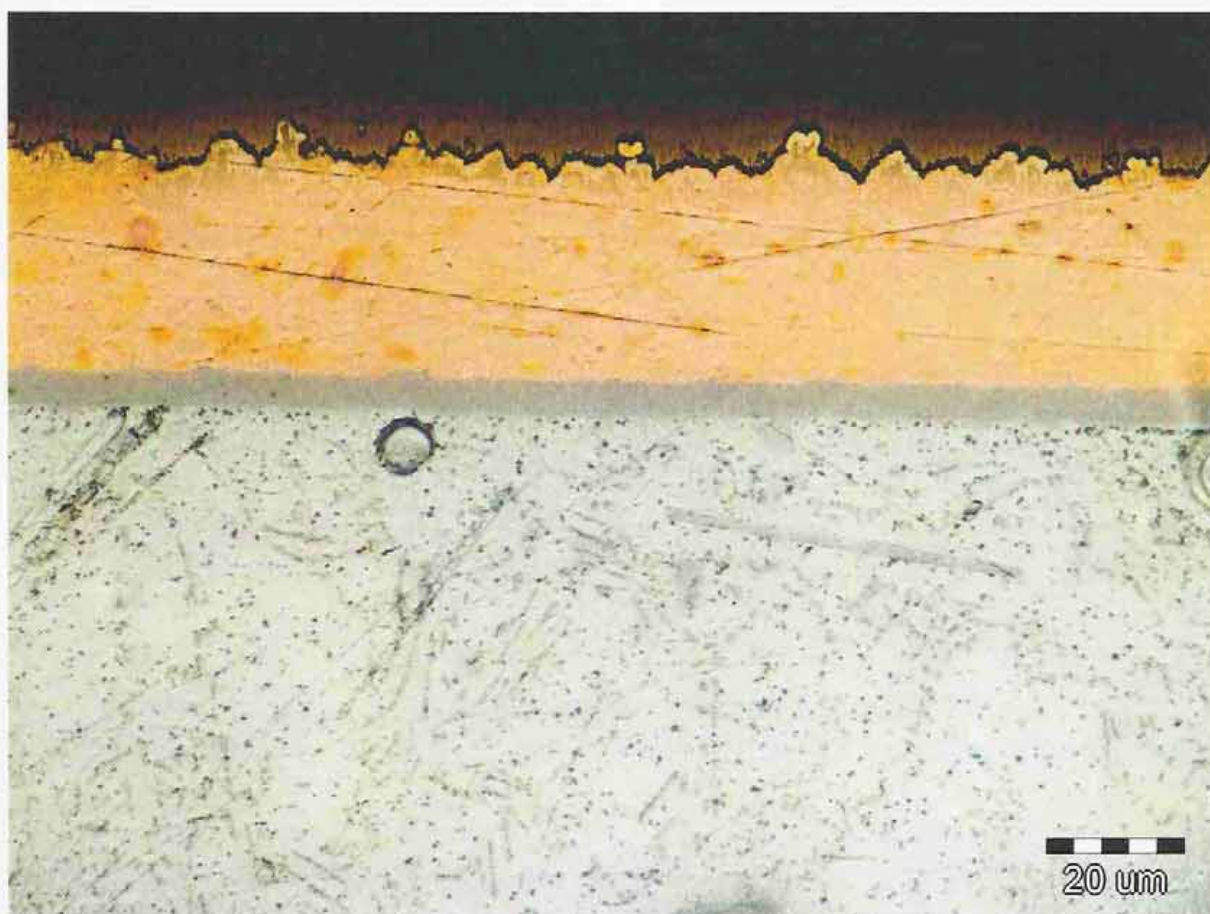


Obr. 44: DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou OSP



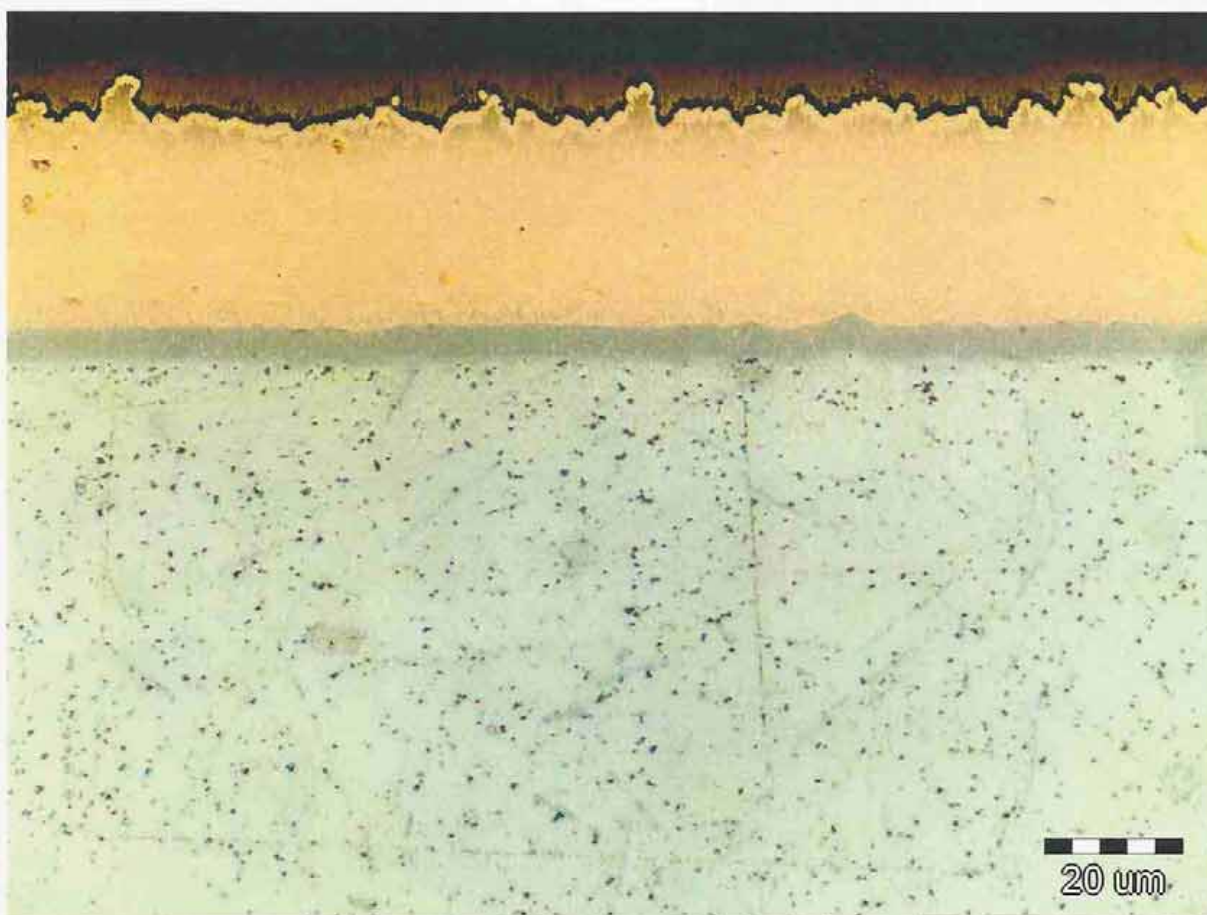


Obr. 45: DPS 6,80 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au



Obr. 46: DPS 2,00 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au





Obr. 47: DPS 0,16 °C/s s povrchovou úpravou Ni – Au

Na uvedených obrázcích jsou snímky z optického mikroskopu, které zobrazují povrchovou úpravu spoje při různých gradientech chladnutí. Z obrázků je zřejmé, že rychlost ochlazování má vliv na růst dendritů. Dendrity představují útvary, které se mohou utvářet v celé struktuře kovů a slitin, místo monokrystalických vláken. Růst dendritů je způsoben nerovnoměrným tuhnutím materiálu. Z obrázků je zřejmé, že při rychlém ochlazování vzniká velké množství dendritů. Jejich množství se snižuje při snižování rychlosti ochlazování. Při rychlém ochlazování tedy dochází k nerovnoměrnějšímu tuhnutí materiálu a tím většímu vzniku dendritů. Na tento jev nemá vliv povrchová úprava materiálu. Je nutné uvést, že koroze a oxidace probíhají přednostně po hranicích dendritů.



## 6 Závěr

Tato práce se zaměřila na proměření vlivu různých gradientů chladnutí a struktury vzorků vyrobených pomocí odlišné metodiky chlazení. Povedlo se naměřit gradient chladnutí pomalý  $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , ideální  $2,00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  a extrémní  $6,80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ .

Pro DPS i součástky s povrchovou úpravou OSP a Ni – Au jsem pro tyto gradienty provedl měření úbytku napětí pomocí čtyřbodové metody. Z tabulky číslo 2 je patrné, že nejmenší úbytek napětí pro obě povrchové úpravy jsou s gradientem chladnutí  $2,00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  a největší s gradientem chladnutí  $6,80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Dále bylo zjištěno, že celkově úbytky napětí jsou menší u povrchové úpravy OSP. Tyto úbytky napětí nejspíše vytvářejí IMC vrstvy na přechodech kulový vývod a pad. Z hodnot přechodového napětí můžeme usoudit, že pokud dojde u všech pouzder k selhání v IMC vrstvách, tak u stříhové zkoušky dopadnou nejhůře součástky  $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$  bez ohledu na povrchovou úpravu.

Zkouška stříhu byla prováděna na stroji DAGE PC 2400. Síla, která byla potřebná k odtržení součástky, je zapsána v tabulce 4. Z této tabulky vidíme, že podle předpokladu nejpevnější spoj byl na DPS, která měla ideální průběh v zóně chlazení, a nejhůře dopadla součástka  $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Tyto výsledky byly totožné pro obě povrchové úpravy. U úpravy Ni – Au vidíme, že BGA4 vydržel o jednotky síly více. Na obrázků 25, 28 a 33 vidíme, že u všech pouzder došlo k selhání v IMC vrstvách. Na obrázku 25 vidíme, jak všechny čtyři kulové vývody zůstaly na DPS. To bylo nejspíše způsobeno tím, že BGA4 prošel dvěma teplotními cykly, a tudíž vznikla širší IMC vrstva oproti tloušťce IMC vrstvy na rozhraní kulový vývod s padem DPS. Při optické kontrole bylo zjištěno, že nebylo ideální kvůli nerovnoměrnému rozpození sil působící testovacím hrotem na zařízení DAGE PC 2400 pro test stříhem nechávat vyfrézovat drážky pro jednodušší oddělení součástek. Na obrázku 29 vidíme tavidlové zbytky po zkoušce pevnosti. Tyto zbytky by bylo dobré u testovacích vzorků očistit pomocí ultrazvuku před zkouškou stříhu. Tyto zbytky mohou vést ke zkreslení pevnosti a většímu rozptylu hodnot. Ze souboru kulových vývodů, vytvořených pro tuto práci, měl jeden vývod void velikosti  $112\text{ }\mu\text{m}$ , který je vidět na obrázku 35.

Pomocí optického mikroskopu jsem změřil velikost IMC vrstvy na vzorcích zalitých v dentacrylu. Na obrázcích 36, 37, 38, 39, 40 a 41 vidíme, že nejmenší vrstva vznikla stejně u obou povrchových úprav s ideálním gradientem chladnutí  $2,00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Z měření vyplývá, že za stejných podmínek vzniká menší IMC vrstva na povrchové úpravě Ni – Au.

Krystalickou strukturu jsem zkoumal po leptání. Vzorky byly leptány z důvodu zvýšení kontrastu struktury. Vzorky po leptání vidíme na obrázcích 42, 43, 44, 45, 46 a 47. Na obrázcích 42 a 45 je patrné, že rychlost chladnutí má zásadní vliv na strukturu. Struktura při agresivním chlazení je hrubozrnnější (nehomogenní) oproti obrázkům 44 a 47, kde struktura je viditelně homogenní. Můžeme se domnívat, že na obrázcích 42 a 45 vidíme dendrity, které se mohou utvářet v celé struktuře kovů a slitin, místo monokrystalických vláken. Růst dendritů je způsoben nerovnoměrným tuhnutím materiálu. Pro ujištění, že se jedná opravdu o dendrity, by se měla na vzorcích provést prvková analýza.

Tato práce je zajímavá výzva. Doporučil bych v práci pokračovat a vzorky zalité v dentacrylu podrobit zkoumání pod elektronovým mikroskopem, kde by se dosáhlo většího přiblížení než u optického mikroskopu. Dále bych rozšířil testované vzorky o jiné průměry kuliček pájky. V rámci takto vyrobených vzorků by bylo vhodné změřit výšku mezi DPS a BGA4 a tak zkoumat vliv tohoto faktoru na pevnost spoje. Také je možné podrobit obdobnému zkoumání i pájky jiného složení, případně v kombinaci s odlišnou povrchovou úpravou DPS a BGA4. Při porovnání dosažených výsledků by pak bylo možné zjistit optimální kombinaci pájky a povrchu z hlediska pevnosti spoje.

## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Vytváření tlustovrstvé pasivní sítě* [online]. 2011 [cit. 2011-11-30]. Dostupné z WWW: <[http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/06\\_propojovani\\_v\\_elektronice.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/06_propojovani_v_elektronice.pdf)>.
- [2] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronické montážní technologie*. 1997. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1997. 237 s. ISBN 80-214-0901-0.
- [3] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. 2006. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006. 377 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [4] SZENDIUCH, Ivan. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. 2005 [cit. 2011-11-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>>.
- [5] *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. 2005 [cit. 2011-11-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.marpos.cz/leadfree.htm>>.
- [6] FILÁKOVÁ, Denisa. *Technologie přetavením*. Fakulta aplikované informatiky, 2010. 80 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [7] *Pájení v elektrotechnice* [online]. 2005 [cit. 2011-11-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice>>.
- [8] RŮŽIČKA, Miroslav. *Smáčení a roztékání roztavené pájky po kovovém povrchu*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 31 s. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] FALDYNA, Martin. *Vliv intenzity chlazení na růst intermetalických vrstev v bezolovnatém pájeném spoji*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 47 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. 1999 [cit. 2011-11-30]. Dostupné z WWW: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=25509](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=25509)>.
- [11] PODZEMSKÝ, Jiří. *Struktura spojů pájených pájkami bez olova a její vliv na vnější vzhled spoje* [online]. 2008 [cit. 2011-11-30]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/podzemsky.pdf>>.
- [12] *Sondae* [online]. 2011 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z WWW: <[http://sk.xn--sondae-tpb.cz/\\_y/pajeny\\_spoj/bo111.jpg](http://sk.xn--sondae-tpb.cz/_y/pajeny_spoj/bo111.jpg)>.
- [13] STARÝ, Jiří. *Teorie pájení* [online]. 1999 [cit. 2011-11-30]. Dostupné z WWW: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=23497](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=23497)>.
- [14] LIBICH, Jiří. *Termomechanické namáhání bezolovnatého pájeného spoje*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] LAČNÝ, Radek. *Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] MELIŠ, Josef. *Mechanické vlastnosti pájeného spoje*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [17] SKÁLOVÁ, Jana. *Náuka o materiálech*. 2000. Plzeň : Západočeská Univerzita v Plzni, 2000. 232 s. ISBN 80-7082-677-0.
- [18] STARÝ, Jiří. *Teorie pájení 61118* [online]. 1999 [cit. 2012-4-25]. Dostupné z WWW: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=23497](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=23497)>

## 8 Seznam použitých zkratek

- DPS Deska plošného spoje (Printed Circuit Board)
- PCB Printed Circuit Board (deska plošného spoje)
- TCE Teplotní koeficient délkové roztažnosti (Temperature Coefficient of Expansion)
- SMT Technologie povrchové montáže (Surface Mount Technology)
- IMC Intermetalická sloučenina (Intermetallic Compound)
- SAC Pájecí slitina na bázi cínu (Sn) s obsahem stříbra (Ag) a mědi (Cu)
- BGA Typ pouzdra součástky (Ball Grid Array)
- FC Typ pouzdra součástky (Flip Chip)
- OSP Organická povrchová úprava mědi (Organic Solder Preservatives)
- ROL0 Typ tavidla na bázi přírodní pryskyřice, s malým množstvím aktivátorů, bez halogenidů