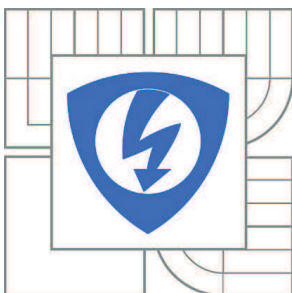


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

VLIV INTEGRÁLU TEPLOTY A ČASU PÁJENÍ NA KVALITU PÁJENÉHO SPOJE

SOLDER JOINT QUALITY BASED ON HEATING FACTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

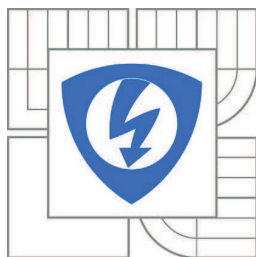
Bc. VLADIMÍR JEŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Vladimír Ježek

ID: 120784

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu z oblasti pájení přetavením. Podrobněji se zaměřte na vliv integrálu teploty a času pájení na pájený spoj.

Navrhnete desku s plošnými spoji pro QFN pouzdra a rezistory velikosti 0805 s testovacími i měřicími body pro měření změn odporu propojení. Návrh realizujte včetně nepájivé masky, šablony i testovacích obrazců pro měření vlastností pájecí pasty.

Nastavte a proměřte teplotní profily pro 4 rozdílné integrály teploty a času pájení v mezích tolerance hodnot stanovených výrobcem pájecí pasty. Osadte DPS součástkami do pájecí pasty a zapájejte nastavenými profily. Polovinu zkušebních DPS vystavte i 2. průchodu v přetavovací peci.

Vyhodnoťte vzhled spoje, mikrovýbrus spoje (opticky a pomocí SEM), určete tloušťku IMC vrstvy a pevnost spoje. Dle časových možností proveďte měření před a po zrychleném stárnutí.

Na části vzorků po dohodě se zadavatelem diplomové práce odzkoušejte pájecí pastu s deklarovaným menším výskytem dutin (voidů).

Výsledky graficky zpracujte a soustřeďte se na zjištění závislosti jednotlivých integrálů teploty a času při jedno a dvounásobném průchodu DPS přetavovací pecí. Diskutujte vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu, na elektrické a mechanické vlastnosti pájených spojů při různých hodnotách Q

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce se zabývá vlivem integrálu teploty a času nad teplotou tavení pájky na kvalitu pájených spojů u bezolovnatého pájení pájkou SAC305. V teoretické části se zabývá pájením přetavením, intermetalickými sloučeninami, integrálem teploty a času nad teplotou tavení pájky a jeho vliv na spolehlivost a vlastnosti pájeného spoje. Cílem praktické části bylo navrhnout testovací DPS, kterou jsme zapájeli pomocí předem nastavených přetavovacích profilů. Na testovacích deskách byly provedeny testy s cílem určit vliv integrálu na pevnost pájeného spoje, elektrické propojení, množství dutin ve spoji a jiné parametry. Testování bylo provedeno i pro izotermicky stárnuté vzorky.

Abstract

This thesis deals with the influence of the integral temperature and time above the melting point of the solder on the quality of solder joints for lead-free soldering with solder SAC305. The theoretical part deals with reflow soldering, intermetallic compounds, the integral time and temperature above the melting point of the solder and its impact on the reliability and features of the solder joint. In the practical part we designed a test PCB, which we soldered by prepared reflow profile. We performed tests on testing PCB's to determine the effect of integral on strength, electrical connections, voids in solder point and another parameters. Tests was performed on isothermal aging samples too.

Klíčové slova

Pájení přetavením, intermetalická sloučenina, teplotní profily, heating factor, mikrovýbrus, kontrola rentgenovým zářením, izotermické stárnutí, zkouška stříhem, roztékavost

Key words

Reflow soldering, intermetallic compound, reflow profile, heating factor, cross-section, X-ray control, isothermal aging, shear test, spreadability.

JEŽEK, V. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně, dne 25. 5. 2015

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za metodické a cílené orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracování diplomové práce. Dále děkuji Ing. Zdeňku Jurčíkovi ze společnosti Honeywell za odborné rady a připomínky a Ing. Pavlu Čudkovi za pomoc při zkoumání vzorků pomocí elektronové mikroskopie.

Obsah

Úvod	11
1. Pájení přetavením	12
1.1 Druhy přenosu tepla	12
1.1.1 Přestup tepla vedením (kondukce)	12
1.1.2 Přenos tepla prouděním (konvekce)	12
1.1.3 Přenos tepla zářením (radiací)	13
1.2 Druhy pájení přetavením	13
1.2.1 Konvekční pájení	13
1.2.2 Pájení infračerveným zářením	13
1.2.3 Laserové pájení	13
1.2.4 Pájení v parách	14
1.3 Pájecí pasta	14
1.3.1 Složky pájecí pasty	14
1.3.2 Aplikace pájecí pasty	15
1.4 Teplotní profil	20
1.4.1 Podélný teplotní profil	20
1.4.2 Příčný teplotní profil	22
2. Intermetalická sloučenina	22
2.1 Tvorba pájeného spoje	22
2.2 Intermetalické sloučeniny mědi a cínu	24
2.3 Intermetalické sloučeniny u pájek obsahujících stříbro	25
2.4 Intermetalické vrstvy u ENIG	26
3. Integrál teploty a času Q_η	26
3.1 Vliv Q_η na intermetalické vrstvy	27
3.2 Vliv Q_η na spolehlivost pájeného spoje	27
3.3 Optimalizace přetavovacího profilu	28
3.4 Realizace optimálního Q_η	29
4. Praktická část	30
4.1 Mikrovýbrus	30
4.1.1 Postup přípravy mikrovýbrusu	30
4.2 Kontrola rentgenovým zářením (X-ray)	31
4.3 Test roztékavosti	32
4.4 Návrh testovací DPS	32
4.5 Pájecí pasta	34

4.6	Měření teplotních profilů	35
4.7	Montáž SMD	38
4.8	Kontrola a testování	41
5.	Vyhodnocení naměřených výsledků	42
5.1	Vyhodnocení IMC vrstvy a mikrovýbrusů	42
5.2	Vyhodnocení kvality pájených spojů RTG zářením.....	47
5.3	Vyhodnocení zkoušek stříhem.....	50
5.4	Vyhodnocení izotermického stárnutí.....	52
5.5	Vyhodnocení testu roztékavosti.....	54
5.6	Defekty na DPS	55
	Závěr.....	56
	Použitá literatura	58
	Seznam zkratk a symbolů	60
	Přílohy	61

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schéma rozdělení metod pájení přetavením [17]	13
Obr. 2 - Složení pájecí pasty	14
Obr. 3 - Princip sítotisku [19].....	16
Obr. 4 - Znázornění parametrů síta [17].....	16
Obr. 5 - Princip šablonového tisku [20]	17
Obr. 6 - Parametry působící při tisku [17]	17
Obr. 7 - Znázornění apertury s rozměry [17]	18
Obr. 8 - Schéma rozdělení dispenzů [17][19]	18
Obr. 9 - Dispenzer tlak/čas [19]	19
Obr. 10 - Dispenzer se šnekovým motorem [19]	19
Obr. 11 - Lineární dispenzer [19].....	20
Obr. 12 - Příklad teplotního profilu [19]	20
Obr. 13 - RTS teplotní profil [30]	22
Obr. 14 - Schéma pájeného spoje s IMC vrstvou [10]	22
Obr. 15 - Závislost růstu IMC v závislosti na čase pro různé teploty [16]	23
Obr. 16 - Intermetalické sloučeniny mědi a cínu [7].....	24
Obr. 17 - Kosočtverečná a šesterečná krystalická struktura [31]	24
Obr. 18 - Tloušťka a pevnost intermetalické vrstvy [7]	25
Obr. 19 - Destičky Ag ₃ Sn [14]	26
Obr. 20 - Příklad přetavovacího profilu s vyznačením oblasti Q _η [2].....	26
Obr. 21 - Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na Q _η [7]	27
Obr. 22 - Střední doba do poruchy v závislosti na Q _η pro teplotní cyklování [7].....	28
Obr. 23 - Střední doba do poruchy v závislosti na Q _η pro vibrační zkoušku [2]	28
Obr. 24 - Princip rentgenového zařízení	31
Obr. 25 - Příklad rentgenového snímku pouzdra BGA	32
Obr. 26 - Test roztékavosti [32]	32
Obr. 27 - Vytvořená testovací DPS	33
Obr. 28 - Rozměry padů	33

Obr. 29 - Propojení vývodů QFN pouzdra a doporučené propojení na DPS [24]	34
Obr. 30 - Příklad krátkého a dlouhého profilu [31].....	35
Obr. 31 - Testovací DPS pro měření profilů s rozmístěnými termočlánky.....	36
Obr. 32 - Změřené přetavovací profily pro R31 a IO1(měřeno v pájených spojích)	37
Obr. 33 - SPI (vlevo) a šablonový tisk (vpravo)	38
Obr. 34 - Poměr četnosti výskytu relativního množství pájky	39
Obr. 35 - Závislost pro SP 1 rozdělenou na R a IO	39
Obr. 36 - Siemens Siplace X4	39
Obr. 37 - Přetavovací pec	40
Obr. 38 - Schéma rozvržení pájení.....	40
Obr. 39 - Schéma zkoušek stříhu a odebírání vzorků pro mikrovýbrusy	41
Obr. 40 - Závislost IMC na integrálu teploty a času	42
Obr. 41 - Obrázky elektronové mikroskopie vzorků DPS x.1 (1 průchod)	43
Obr. 42 - Graf závislosti tloušťky IMC na přetavovacím profilu	44
Obr. 43 - Obrázky elektronové mikroskopie vzorků DPS x.4 (2 průchody)	45
Obr. 44 - Materiálový obraz vzorku DPS 1.1	46
Obr. 45 - Energiově disperzní rentgenová analýza složení	46
Obr. 46 - Množství dutin pro standardní pastu a jeden průchod	47
Obr. 47 - Množství dutin pro standardní pastu SP 1 a dva průchody	48
Obr. 48 - Množství dutin pro pastu s nižším výskytem dutin SP 2.....	48
Obr. 49 - Záběry dutin pod pouzdry QFN (DPS x.1).....	49
Obr. 50 - DAGE 2400	50
Obr. 51 - Závislost síly stříhu pro DPS x.1 a x.3	50
Obr. 52 - Závislost síly stříhu pro DPS x.1 a stárnutí	51
Obr. 53 - Průběh odporu zapojení během stárnutí.....	52
Obr. 54 - Závislost odporu propojení na čase stárnutí při teplotě okolí.....	53
Obr. 55 - Závislost rychlosti růstu odporu na profilu.....	53
Obr. 56 - Schéma testu roztékavosti.....	54
Obr. 57 - Závislost roztékavosti na teplotním profilu přetavovací pece	54
Obr. 58 - Snímky defektu cesty získané pomocí RTG záření a optické mikroskopie	55
Obr. 59 - Schéma zapojení testovací DPS.....	61
Obr. 60 - Teplotní profily.....	62
Obr. 61 - Přetavovací profil P1	64
Obr. 62 - Přetavovací profil P2	65
Obr. 63 - Přetavovací profil P3	66
Obr. 64 - Přetavovací profil P4	67
Obr. 65 - Závislost odporu DPS na čase stárnutí (DPS - 1 průchod).....	69
Obr. 66 - Závislost odporu DPS na čase stárnutí (DPS - 2 průchody).....	70

Seznam tabulek

Tab. 1 - Typy pájecích past dle velikosti zrn [17].....	15
Tab. 2 - Pájecí slitiny a jejich IMC [13].....	23
Tab. 3 - Vlastnosti vybraných intermetalických sloučenin [15]	25
Tab. 4 - Důležité vlastnosti pasty [31]	34
Tab. 5 - Přetavovací profily pro pájecí pastu SAC305 [34].....	35
Tab. 6 - Rozmístění termočlánků na testovací DPS.....	35
Tab. 7 - Tabulka důležitých hodnot naměřených přetavovacích profilů.....	37
Tab. 8 - Tabulka výsledků SPI.....	38

Tab. 9 - DPS v použitém pořadí	41
Tab. 10 - Naměřené tloušťky IMC vrstev	42
Tab. 11 - Tabulka tlouštěk IMC pro 2 průchody.....	44
Tab. 12 - Hodnoty IMC vrstvy před a po stárnutí	44
Tab. 13 - Výsledky materiálové analýzy IMC vrstvy	46
Tab. 14 - Hodnoty množství dutin chladicí ploše.....	47
Tab. 15 - Průměrné hodnoty síly stříhu a rozdílů	51
Tab. 16 - Průměrné hodnoty síly stříhu v časech stárnutí	51
Tab. 17 - Změřené hodnoty odporů při teplotě okolí	52
Tab. 18 - Rychlosti růstu odporu při stárnutí.....	53
Tab. 19 - Naměřené hodnoty roztékavosti	54
Tab. 20 - Naměřené množství dutin pro všechny testovací desky	62
Tab. 21 - Tabulka naměřených hodnot tlouštěk IMC (1 průchod).....	62
Tab. 22 - Tabulka naměřených hodnot tlouštěk IMC (2 průchody).....	63
Tab. 23 - Tabulka naměřených hodnot tlouštěk IMC (po stárnutí).....	63
Tab. 24 - Tabulka naměřených hodnot roztékavosti	68
Tab. 25 - Výsledky zkoušky stříhem před izotermickým stárnutím (0 h).....	70
Tab. 26 - Výsledky zkoušky stříhem při izotermickém stárnutí (70 h).....	71
Tab. 27 - Výsledky zkoušky stříhem při izotermickém stárnutí (140 h).....	71
Tab. 28 - Výsledky zkoušek stříhem po izotermickém stárnutí (209 h)	71

Úvod

Spolehlivost pájeného spoje je velmi důležitým parametrem v procesu povrchové montáže. Tato spolehlivost může být ovlivněna mnoha vlivy. Jeden z nejdůležitějších je integrál teploty a času nad teplotou tavení pájky.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo prostudovat odbornou literaturu v oblasti pájení přetavením, intermetalických sloučenin a podrobně se zaměřit na vliv integrálu teploty a času.

V praktické části bylo za úkol navrhnout testovací DPS s pouzdry QFN a rezistory SMT velikosti 0805, spolu s návrhem nepájivé masky, šablony a testovacích obrazců. Tyto navržené desky byly osazeny v produkčních podmínkách společnosti Honeywell a byly zapájeny nastavenými a odměřenými přetavovacími profily, které byly předem připraveny. Polovina testovacích desek byla vystavena i druhému průchodu přetavovací peci. Následuje vyhodnocení mikrovýbrusů pomocí elektronové mikroskopie a určení tloušťky IMC vrstvy. Dále jsme určili pevnost spoje pomocí zkoušek stříhem. Na části vzorků byla odzkoušena pájecí pasta s deklarovaným nižším výskytem dutin. Bylo provedeno i zrychlené stárnutí a měření vlastností před a po stárnutí. Zjištěné výsledky jsou graficky zpracované a soustředíme se na závislosti vlastností u jednotlivých integrálů při jedno a dvounásobném přetavení.

1. Pájení přetavením

Pájení přetavením patří k jedné z metod hromadného pájení. Při tomto pájení dochází k osazení součástek do natisknuté pájecí pasty, která je následně vystavena působením tepla v přetavovací peci. Teplota v peci by měla být vždy vyšší než je teplota tavení pájecí slitiny. Při procesu přetavení jsou osazené součástky vycentrovány vlivem povrchového napětí roztavené pájky. Lze pájet montážní celky osazené jednostrannou i oboustrannou povrchovou montáží a dokonce i kombinovanou montáží. Hlavní výhodou pájení přetavením je nanesení definovaného množství pájecí pasty a tím i tavidla na pájený spoj [17].

1.1 Druhy přenosu tepla

Pro pájení přetavením lze využít všechny způsoby přenosu tepla. Způsoby přenosu tepla jsou: [17]

- Vedení (kondukce)
- Proudění (konvekce)
- Záření (radiace)

1.1.1 Přestup tepla vedením (kondukce)

K vedení tepla dochází vlivem tepelného pohybu částic. U kondukce nedochází k pohybu materiálu. Při kontaktu dvou látek o různých teplotách předávají částice teplejší látky část své kinetické energie částicím v chladnější látce. Množství tepla, které projde plochou S za určitý časový interval, se označuje jako tepelný tok q . Tepelný tok lze určit ze vztahu:

$$q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

kde q je tepelný tok (W), λ je tepelná vodivost materiálu ($Wm^{-1}K^{-1}$), S je plocha procházení tepla (m^2) a $\frac{\Delta T}{L}$ je teplotní gradient (Km^{-1}) [17][18].

Přestup tepla vedení se nejvíce využívá při kontaktním pájení. Kontaktní pájení je vhodné pro materiály s dobrou tepelnou vodivostí, například keramické substráty či vícevrstvé DPS s kovovým jádrem [17].

1.1.2 Přenos tepla prouděním (konvekce)

Přenos tepla prouděním se vyskytuje zejména u látek v kapalném a plynném skupenství. Ke konvekci nad horkým povrchem dochází vlivem rozdílné hustoty teplého a studeného média, například v případě kapalin, kdy teplejší kapalina stoupá k hladině. Tímto mechanismem dochází k přenosu materiálu a tím i tepla. Šíření tepla pomocí konvekce je mnohem intenzivnější, než u kondukce. U přenosu tepla konvekcí je část tepla předávána pomocí kondukce. Konvekce může být přirozená nebo nucená. Nucenou konvekci pomocí ventilátorů či čerpadel používáme, chceme-li dosáhnout většího přenosu tepla. Přenos tepla pomocí konvekce q^c lze vyjádřit:

$$q^c = h^c \cdot S \cdot (t_s - t_a) \quad (2)$$

kde q^c je přenos tepla z povrchu do okolí (W), h^c je koeficient přenosu tepla při konvekci ($Wm^{-2}K^{-1}$), S je plocha (m^2) a $(t_s - t_a)$ je rozdíl teplot mezi povrchovou teplotou t_s a teplotou okolí t_a [17][18].

1.1.3 Přenos tepla zářením (radiací)

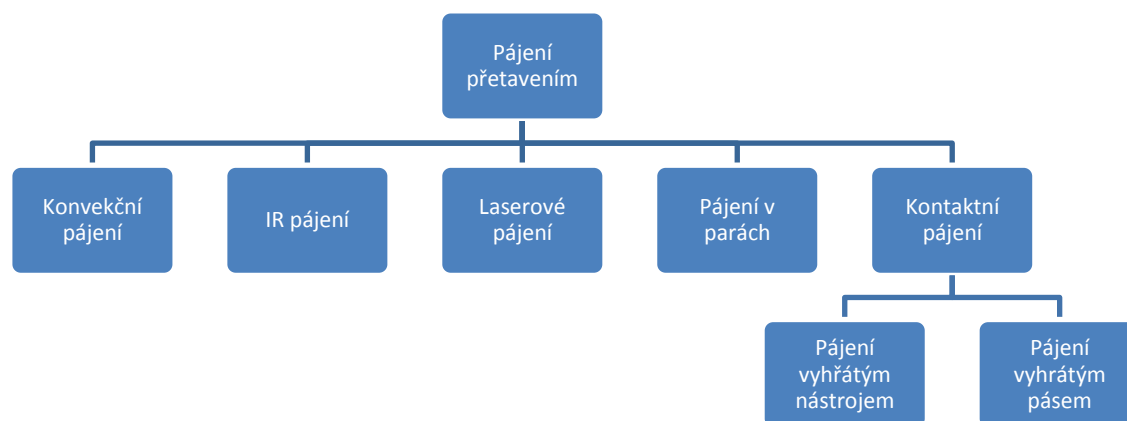
K přenosu energie u radiace dochází vlivem elektromagnetického vlnění, které vyzařuje těleso. Toto záření je v infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Množství tepelné energie přenesené mezi dvěma tělesy o teplotách T_1 a T_2 pomocí radiace lze vyjádřit:

$$q^r = \varepsilon \cdot k \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

kde q^r je množství energie přenesené pomocí radiace (W), ε je koeficient radiace (-) a k je Stefan - Boltzmannova konstanta ($k = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) [17].

1.2 Druhy pájení přetavením

Pájení přetavením lze rozdělit podle použité technologie viz Obr. 1.



Obr. 1 - Schéma rozdělení metod pájení přetavením [17]

1.2.1 Konvekční pájení

Konvekční pájení využívá přenosu tepla pomocí ohřátého plynného média, které je přiváděno z jedné nebo obou stran PDS. Plynným médiem může být vzduch, dusík nebo vodík. Zařízení pro konvekční pájení jsou konstruována jako průběžná s dopravníkem. Lze měnit směr proudění, průtok a teplotu média. Zařízení mívají menší účinnost, vyšší energetické nároky a při použití vzduchu jako média i vyšší míru oxidace [17].

1.2.2 Pájení infračerveným zářením

Energie potřebná pro přetavení se získává z infračerveného záření IR zářičů. Množství absorbované energie je závislé zejména na barvě povrchu a na vlnové délce záření. Barva povrchu má významný vliv, jelikož tmavší oblasti absorbují více energie než světlejší oblasti. Tento jev má za následek nerovnoměrné rozložení teploty na povrchu sestavy, což může vést ke snížení kvality pájených spojů. Přetavení probíhá v průběžných pecích vybavených IR zářiči na horní i dolní straně. IR zářiče jsou umístěny v jednotlivých zónách, které se dají regulovat pro nastavení vhodného teplotního profilu. Pro malosériové výroby existují i pece vsazkové. Tyto pece se vyznačují vysokou účinností [17].

1.2.3 Laserové pájení

K přetavení pájecí pasty dochází vlivem tepla získaného z laserového paprsku. Používáním laserového paprsku lze docílit precizní lokalizace a optimálního dávkování tepla. Mezi výhody laserového pájení patří minimální ovlivnění součástek, lze používat vysoké teploty pájení a dále velká flexibilita procesu. Největší nevýhodou jsou velmi vysoké

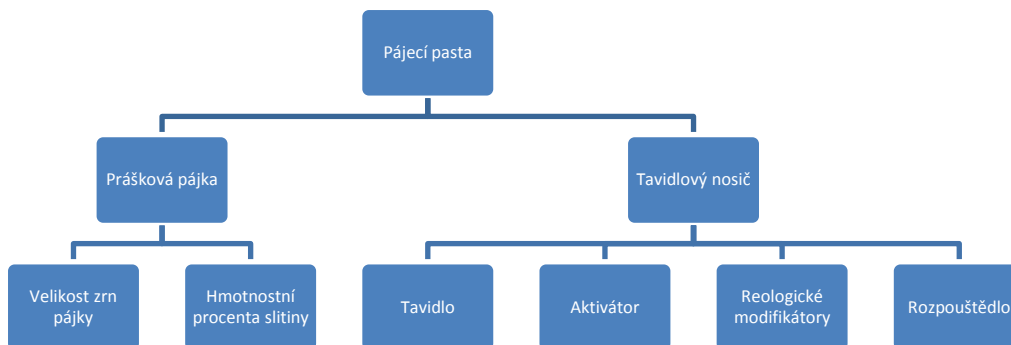
pořizovací náklady a nemožnost pájet pouzdra s vývody na spodní straně, například BGA [17].

1.2.4 Pájení v parách

Osazená sestava se vloží do nasycených par, například fluorovaných uhlovodíků. Tyto páry kondenzují na chladnějším povrchu sestavy, kde předávají energii skupenského tepla a tím dochází k ohřevu. Nejvyšší teplota jaké lze dosáhnout je rovna teplotě varu média. Výhodou pájení v parách je, že nemůže dojít k přehřátí sestavy, pájení probíhá bez přítomnosti vzdušného kyslíku, což omezuje oxidaci a lze tak použít tavidla s nízkou aktivitou. Nevýhodou je vyšší cena procesu a neekologičnost [17].

1.3 Pájecí pasta

Pájecí pasta je homogenní směs mající pastovitou konzistenci. Skládá se ze dvou hlavních složek, první složkou je práškovitá pájka (až 96 % hmotnostních) a tavidlového nosiče obsahujícího tavidlo, aktivátory, rozpouštědlo a reologické modifikátory. Mezi hlavní vlastnosti pájecích past patří jejich viskozita a tixotropnost. Viskozita je velmi závislá na teplotě, změnou teploty o 1 °C se změní viskozita pasty až o 5 % [17][19].



Obr. 2 - Složení pájecí pasty

1.3.1 Složky pájecí pasty

Prášková pájka

Prášková pájka je charakterizována velikostí částic, jejich tvarem a v neposlední řadě typem slitiny. Pasta má významný vliv na kvalitu tisku, roztékavost, smáčecí charakteristiku a zejména na teplotu tavení. Pájecí pasta musí splňovat některé vlastnosti, jako jsou rovnoměrnost a malý rozptyl průměru zrn. Se zmenšujícím se průměrem zrn roste náchylnost pájecí pasty k oxidaci, to je dáno větším povrchem práškové pájky, který může oxidovat. Takto vytvořené oxidy mají výrazně vyšší teplotu tavení oproti teplotě tavení pájecí slitiny, například SnO_2 má teplotu tavení 1930 °C a PbO 890 °C. Z toho důvodu musíme dodržet podmínky skladování a nevystavovat pájecí pastu vzdušné atmosféře. Pájecí pasty dělíme na jednotlivé typy dle velikosti zrn, viz Tab. 1 [17][19].

Tab. 1 - Typy pájecích past dle velikosti zrn [17]

Typ	80 % částic	Maximálně 10 % částic	Žádná větší než
1	(150 – 75) μm	< 20 μm	160
2	(75 – 45) μm	< 20 μm	80
3	(45 – 25) μm	< 20 μm	50
4	(38 – 20) μm	< 20 μm	40
5	(25 – 15) μm	< 15 μm	30
6	(15 – 5) μm	< 5 μm	20

Vhodná velikost práškové pájky je vybírána dle nejmenší apertury v šabloně či sítu. Velmi často se používá pravidlo 3D, které uvádí, že do nejmenší apertury by se měly vejít tři kuličky práškové pájky na šířku i na výšku [17].

Tavidlo

Další složkou pájecí pasty je tavidlo. Tavidlo hraje důležitou roli při procesu přetavení, jelikož zlepšuje smáčivost, zlepšuje přenos tepla, odstraňuje oxidy z pájeného spoje a tím přispívá k vytvoření spolehlivého spoje. Pro pájecí pasty se používají pastovitá tavidla na bázi přírodní pryskyřice (RO), syntetické pryskyřice (RE), či organických kyselin (OR). Gelovité tavidlo obsahuje 60 – 70 % pryskyřic s aktivátory a 40 – 30 % rozpouštědel. Tavidlo v pájecích pastách musí vykazovat velmi dobré smáčecí charakteristiky s minimální závislostí na teplotě a době prodlevy před procesem přetavení [17].

Reologické modifikátory

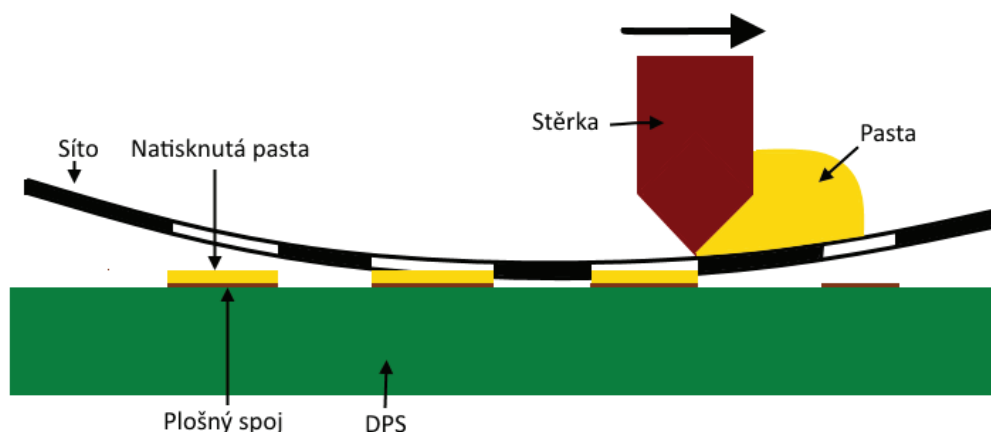
Tyto modifikátory ovlivňují reologické chování pájecí pasty během tisku. Mezi reologické vlastnosti patří tečení a deformace vlivem působících faktorů při tisku, jako je například tlak, rychlost pohybu stěrky, teplota atd. Tyto vlastnosti ovlivňuje složení pájecí pasty, tvar a velikost částic, struktura tavidlového pojiva a fyzikálně chemické působení mezi složkami pájecí pasty [17].

1.3.2 Aplikace pájecí pasty

Pájecí pastu lze nanášet třemi základními způsoby, sítotiskem, šablonovým tiskem a dispenzerem. Vhodnou metodu vybíráme podle vhodných parametrů, jako je velikost série, technologie, pořizovací náklady, údržba apod.

Sítotisk

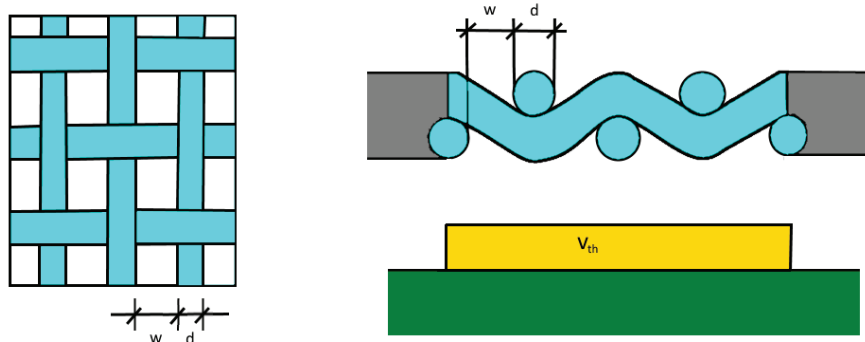
Princip sítotisku spočívá v protlačování pájecí pasty či lepidla skrz vyleptané motivy v sítu, které je upevněno v rámu. Síto je umístěno ve vzdálenosti 0,8 až 1 mm nad deskou plošného spoje (odtrh) a musí být sesouhlasen motiv síta s požadovaným motivem na DPS. Po sítu se pohybuje stěrka, která přitlačuje síto na DPS a protlačuje pájecí pastu skrz motiv. Jakmile se stěrka vzdálí, dojde k nadzvedávání síta od DPS a pájecí pasta zůstává natisknuta na DPS. Tloušťka nanesené vrstvy je dána především na tloušťce síta, která se z pravidla pohybuje v rozmezí 100 – 300 μm [17][19].



Obr. 3 - Princip sítotisku [19]

Sítovina se vůči rámu napíná pod úhlem $7 - 45^\circ$ z důvodu rozložení působících sil při tisku a z důvodu reprodukovatelnosti tenkých motivů. Pro výrobu sítoviny se používá polyester (PES), polyamid (nylon) nebo nerez ocel. Polyester se používá, z důvodů příznivé ceny, ale nevýhodou je menší napnutí síta, což vede k horšímu soutisku. Výhodou sít z nerez oceli je jejich mechanická odolnost [17][19].

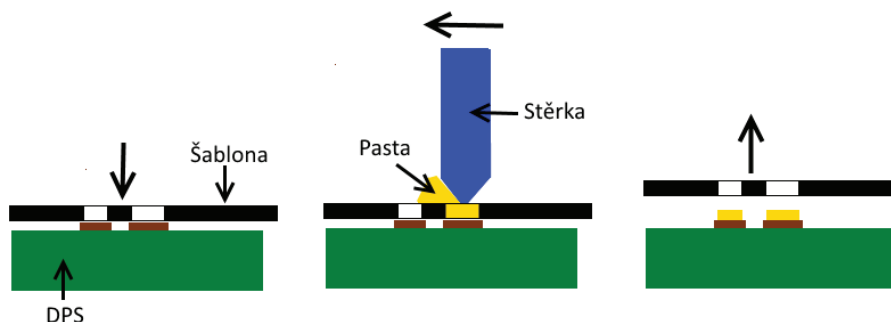
Mezi nejdůležitější parametry síta patří světlost oka (w), průměr vlákna (d), otevřená plocha sítoviny (a_0), tloušťka sítoviny (D), teoretický objem nanesené pasty (V_{th}) a hustota ok (mesh) viz Obr. 4 [17][19].



Obr. 4 - Znázornění parametrů síta [17]

Šablonový tisk

Ve své podstatě se jedná o princip sítotisku s tím rozdílem, že se místo síta používá šablona. Šablona je vytvořena z pevného materiálu nejčastěji z kovu (ocel, bronz) či plastu. Tloušťka natisknuté vrstvy odpovídá tloušťce šablony. Na rozdíl od sítotisku, kdy je síto umístěno v určité vzdálenosti od DPS je šablona umístěna přímo na povrchu DPS. To má zejména vliv na dobrý soutisk. Základní tři kroky šablonového tisku jsou znázorněny na Obr. 5. V prvním kroku dochází k přiložení šablony na DPS, zde je velmi důležité sesouhlasení. Druhým krokem je protlačení pájecí pasty skrz šablonu, čehož se dosahuje pomocí vhodné těrky. V posledním kroku dojde k nadzvednutí šablony od DPS, na které zůstane nanesená pájecí pasta, rychlost nadzvednutí by měla být přibližně 10 mm/s [17][20].

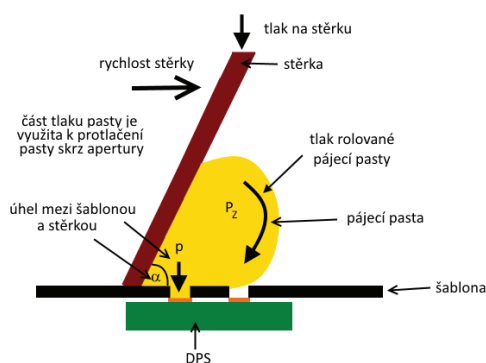


Obr. 5 - Princip šablonového tisku [20]

Faktory působící při šablonovém tisku bere na zřetel Navier – Stokesův vzorec, ten udává velikost hydrodynamického tlaku, který je generován pohybem stěrky, viz Vzorec (4). Hydrodynamický tlak je přímo úměrný pohybu stěrky, viskozitě pájecí pasty a množství odrolované pasty a nepřímo úměrná sklonu těrky.

$$P_Z = \frac{\mu \cdot s \cdot V^2}{(\sin \alpha)^2} \quad (4)$$

kde P_Z je hydrodynamický tlak (Pa), μ je viskozita pájecí pasty ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), V je množství pájecí pasty (m^3) a α je úhel mezi těrkou a DPS. Tyto veličiny jsou znázorněny na Obr. 6 [17].



Obr. 6 - Parametry působící při tisku [17]

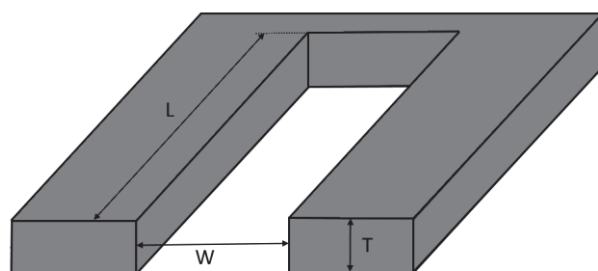
Pro úspěšný tisk pájecí pasty musí být dodrženy následující podmínky, které se týkají rozměrů apertury a tloušťky šablony.

- Poměr šířky apertury a tloušťky šablony musí být větší jak 1,5.

$$\frac{W}{T} > 1,5 \quad (5)$$

- Poměr plochy apertury a plochy stěn musí být větší jak 0,66

$$\frac{L \cdot W}{2 \cdot (L + W) \cdot T} > 0,66 \quad (6)$$

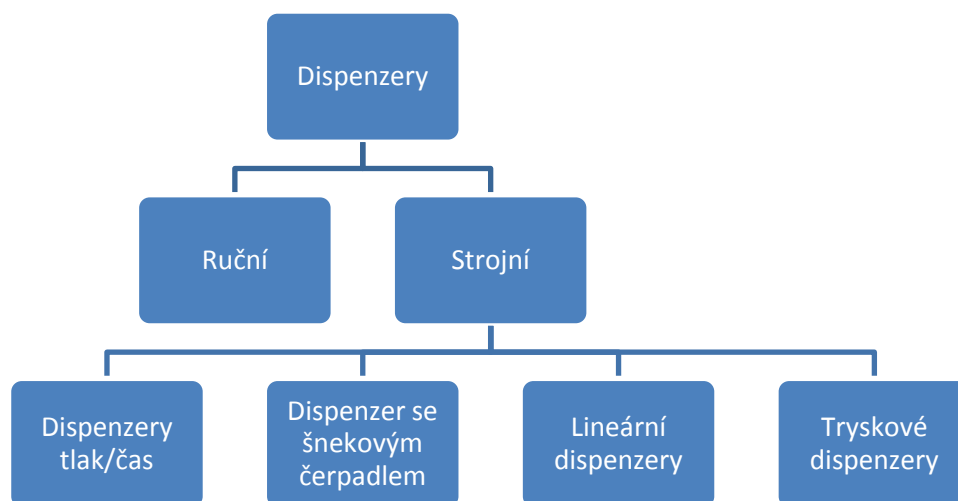


Obr. 7 - Znárodnění apertury s rozměry [17]

Dispenze

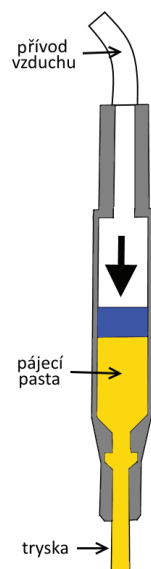
Dispenze je metoda nanášení pájecí pasty pomocí dávkování. Výhodou je přesné dávkování pájecí pasty tam, kde je zapotřebí. Pájecí pasta či lepidlo ze zásobníku se dostává do dávkovací jehly a následně na požadované místo. Lze využít ručního nebo strojního dávkování.

Ruční dávkování je zejména vhodné pro velmi malé série a opravy. Strojní dávkování lze použít jako náhradu klasických metod. Je vhodná tam, kde se vyrábí malé série a různé sestavy a výroba šablon či sít by byla ekonomicky náročná. Mezi základní metody strojního dávkování patří dispenzery tlak/čas, se šnekovým čerpadlem, lineární a tryskové. Viz Obr. 8 [17][19].



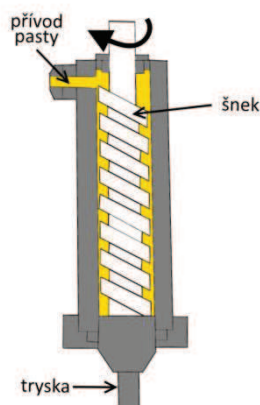
Obr. 8 - Schéma rozdělení dispenzů [17][19]

U dispenzeru tlak/čas je jako hnací médium použit stlačený vzduch, tento způsob je nejrozšířenější. Množství pájecí pasty závisí na tlaku hnacího média a době, po kterou působí. Tato metoda je vhodnější pro dávkování lepidla, u pájecích past dochází k separaci složek pasty [17][19].



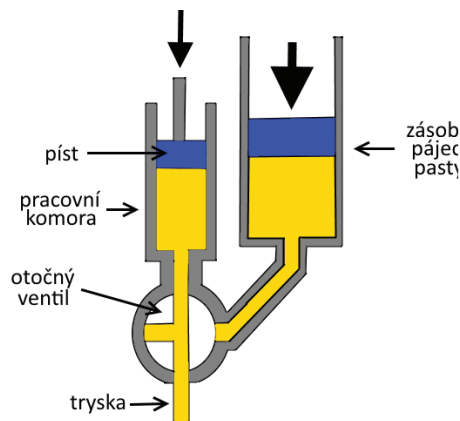
Obr. 9 - Dispenzer tlak/čas [19]

Dispenzery se šnekovým čerpadlem využívají šroubovice, která vytlačí pastu, tento způsob je kvalitnější. Množství pasty je závislé pouze na otáčkách šroubovice. Lze použít i vyhřívané kartuše s pájecí pastou, to zajišťuje konstantní viskozitu pájecí pasty v celém objemu kartuše [17][19].



Obr. 10 - Dispenzer se šnekovým motorem [19]

U lineárních dispenzerů dochází nejprve k naplnění temperované komory, ze které je pasta vytlačena pomocí pístu, jehož pohon je řízen programem. Hlavní součástí je ventil, který se natáčí v jednotlivých fázích. Maximální opakovatelnost je $\pm 1\%$ a rychlost dávkování až 50000 kapek za hodinu [17][19].



Obr. 11 - Lineární dispenzer [19]

Hlavní výhodou tryskového nanášení je fakt, že nedochází ke kontaktu s DPS a tudíž odpadá pohyb v ose Z, což vede ke zrychlení procesu. Rychlost dávkování je až 150 bodů za sekundu. Lze využít pro nanášení bodů i linek. Umožňuje řízení teploty materiálu a tím i viskozity [21].

1.4 Teplotní profil

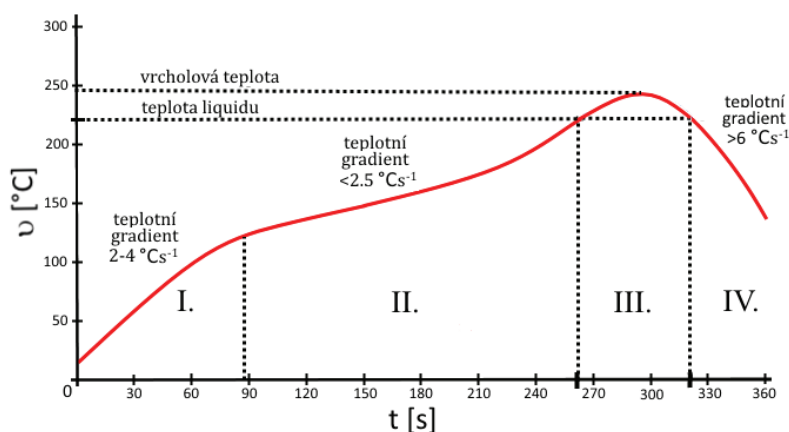
Pro formování spolehlivého pájeného spoje je předpokladem správné nastavení charakteristiky závislosti teploty na čase, označované jako teplotní profil. Teplotní profil musí být nastaven adekvátním způsobem dle použité pájecí pasty, součástek, vybavení, tepelné kapacity DPS, součástek a podobně. Nastavený teplotní profil musí být v souladu s doporučením výrobce pájecí pasty [17].

Rozeznáváme dva typy teplotních profilů:

- Podélný teplotní profil
- Příčný teplotní profil

1.4.1 Podélný teplotní profil

Udává závislost teploty na čase při průchodu sestavy přetavovací pecí. Podélný teplotní profil lze rozdělit na 4 části, z nichž každá hraje důležitou roli během procesu pájení přetavením.



Obr. 12 - Příklad teplotního profilu [19]

- I. Oblast přehřevu** - teplota do 150 °C. Růst teploty zapříčiňuje odpaření rozpouštědel z pájecí pasty. Při teplotě přibližně 100 °C začíná tavidlo a ostatní látky měknout. Při příliš rychlém nárůstu teploty nemusí dojít k dostatečnému odpaření rozpouštědla, tím se stane pájecí pasta vodnatá, což může zapříčinit vznik defektů.
- II. Oblast vyrovnání** - teplota 150 °C až 217 °C. Dochází k úplnému odpaření rozpouštědla a k distribuci tepla po celé DPS. Tavidlo se stává tekutým a obaluje částice pájky a celý pájený bod, tím zabraňuje oxidaci. Další zvýšení teploty uvádí v činnost aktivátory a pryskyřice, což vede k odstranění oxidů z povrchu částíček pájky a povrchu kontaktní plošky.
- III. Oblast přetavení** - teplota nad teplotou tavení pájky, tj. nad 217 °C. Dochází k odstranění oxidů, tavení částíček pájky a vytváření vazeb.
- IV. Oblast chlazení** - teplota 217 °C až teplota okolí. Při chlazení dochází k tuhnutí pájky a ochlazování celé sestavy. Gradient teploty chladnutí by měl mít co největší hodnotu, maximálně však 6 °C/s a to z důvodu kontroly velikosti zrn pájky. Při malých hodnotách teplotního gradientu dochází k tvorbě velkých zrn pájky, což má za následek snížení spolehlivosti [22].

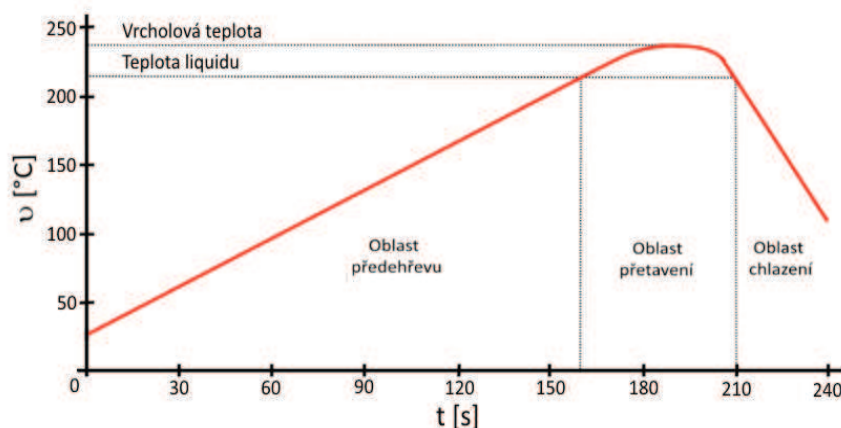
V současné době se používají dva typy podélných teplotních profilů, profil sedlového typu a profil s lineárním nárůstem teploty.

Teplotní profil sedlového typu - RSS

RSS (Ramp Soak Spike) profil lze použít s mírně aktivovanými nebo bezoplachovými tavidly. Nedoporučuje se pro použití vodou ředitelných tavidel. Dochází zde k předčasné aktivaci tavidel, což následně vede k menší smáčivosti během přetavení. Výhodou je odstranění teplotních šoků pro sestavu během procesu. Typický RSS profil je vidět na Obr. 12 [30].

Teplotní profil s lineárním nárůstem teploty - RTS

Jinak nazývaný RTS (Ramp To Spike), u kterého dochází k lineárnímu nárůstu teploty až na hodnotu maximální teploty, viz Obr. 13. RTS je vhodný pro vodou rozpustné pájecí pasty a pro obtížné pájecí slitiny. RTS má několik výhod oproti RSS. Profil RTS obvykle vede k lesklejším pájeným spojům a generuje méně problémů týkajících se pájitelnosti. K tomu dochází vlivem obsahu tavidla v pájecí pastě po celou dobu přehřevu, což vede ke zlepšení smáčivosti. Proto je vhodný pro méně smáčitelné slitiny a součástky. Díky lineárnímu řízení nárůstu teploty ubývá problémů způsobených teplotním šokem vlivem vysoké hodnoty nárůstu teploty během přehřevu. Výhodou je i ekonomičtější provoz a to vlivem snížením potřebné energie v první polovině přetavovací pece [30].



Obr. 13 - RTS teplotní profil [30]

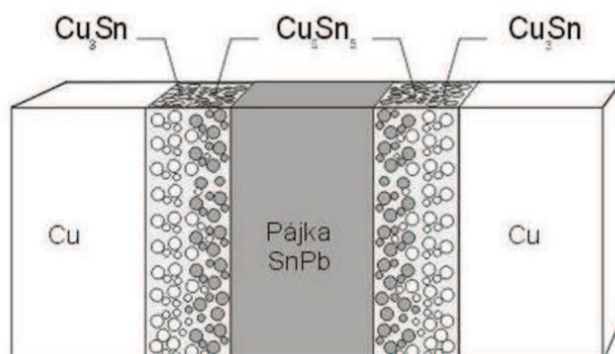
1.4.2 Příčný teplotní profil

Udává nerovnoměrné rozložení teploty v příčném směru. Je dán konstrukcí přetavovací pece a zástavbovou hustotou DPS. Doporučuje se sledovat v náročnějších aplikacích a zvolit optimální orientaci montážní sestavy během průchodu přetavovací pecí. U kvalitních přetavovacích pecí se dosahuje přesnosti $\pm 2^\circ\text{C}$ [17].

2. Intermetalická sloučenina

2.1 Tvorba pájeného spoje

Ke spojování mezi pájkou a pájeným spojem dochází především vlivem metalurgické reakce. To znamená, že aktivní prvek pájky, především cín, reaguje s materiálem pájecí plošky a tím se vytváří tenká spojovací vrstva. Roztavená bezolovnatá pájecí slitina reaguje s pájecí ploškou na základním materiálu. Reakcí mezi roztavenou pájecí slitinou a pájecí ploškou (UBM) dojde ke smáčení a adhezi k povrchově upravené měděné plošce, následně dojde k vytvoření intermetalické vrstvy. Tloušťka IMC a morfologie je silně ovlivněna přetavovacím teplotním profilem. Doba a teplota strávená v oblasti roztavené pájky jsou důležitými parametry pro vytvoření spolehlivého spoje [4][6].



Obr. 14 - Schéma pájeného spoje s IMC vrstvou [10]

Když roztok tuhne, slitiny kovů, které mají omezenou rozpustnost, mohou vzájemně vytvořit v určitých poměrech nové fáze. Tyto nové fáze mají krystalickou strukturu a nazývají

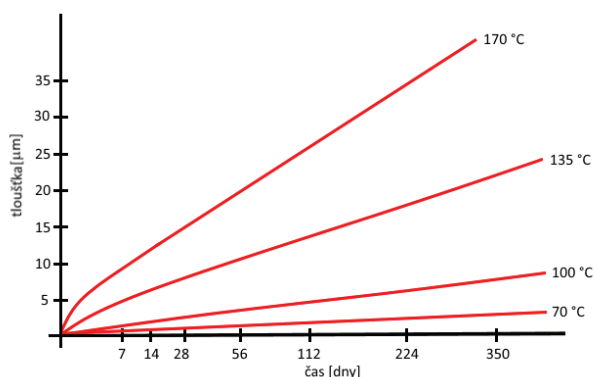
se intermetalické sloučeniny (IMC). Po ztuhnutí pájky se zastaví vytváření intermetalické vrstvy mechanismem rozpouštění a pokračuje mechanismem difuze v pevné fázi, kdy difuze je výrazně rychlejší při zvýšených teplotách.

V Tab. 2 jsou uvedeny vybrané pájecí slitiny a jejich intermetalické sloučeniny, které tvoří v kombinaci s podkladem [7].

Tab. 2 - Pájecí slitiny a jejich IMC [13]

Pájecí slitina	Intermetalické sloučeniny
Sn-3,5Ag	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3,4Ag-0,8Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-1Bi-0,5Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-3Bi	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-0,7Cu	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-9Zn	$CuZn$, Cu_5Zn_8 , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-8Zn-3Bi	$CuZn$, Cu_5Zn_8 , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Bi-43Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , $Cu - Sn - Bi$
Bi-42Sn-0,5Ag	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , $Cu - Sn - Bi$
Sn-5Sb	Sb_2Sn_3 , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
In-48Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , $Cu - Sn - In$

Vytvoření intermetalické vrstvy je předpokladem pro spolehlivý pájený spoj. Na druhou stranu příliš silná vrstva může způsobit zhoršení mechanické pevnosti. Q_η má vliv nejenom na tloušťku intermetalickou vrstvu, ale i na její morfologii [4].



Obr. 15 - Závislost růstu IMC v závislosti na čase pro různé teploty [16]

Tloušťka intermetalické vrstvy není po celou dobu života konstantní, ale roste s časem. Rychlost růstu IMC je velmi závislá na teplotě a k růstu dochází i při pokojové teplotě. Rychlost růstu intermetalických vrstev vyjadřuje vztah:

$$\delta = 10^3 \cdot e^{\frac{-5000}{T}} \cdot \sqrt{t} \quad (7)$$

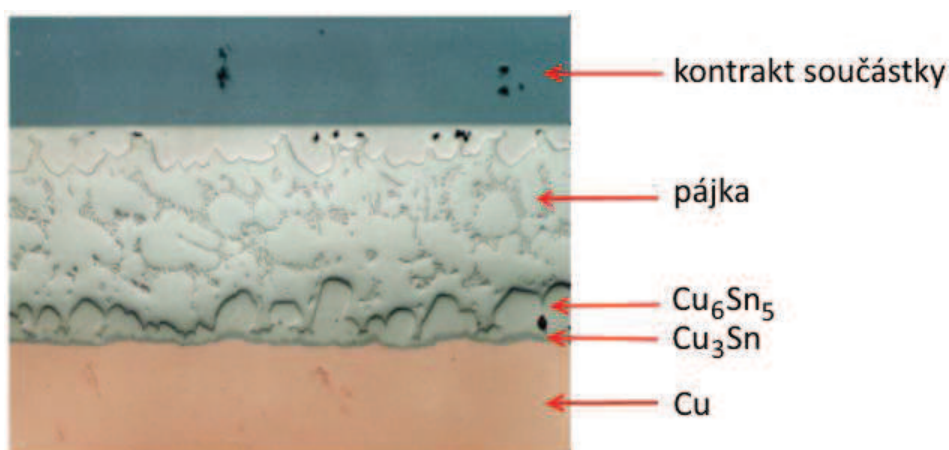
kde δ je tloušťka intermetalické vrstvy v μm , T je teplota v K a t čas v sekundách [16].

Závislost růstu IMC na čase je zobrazena na Obr. 15. Na něm je vidět, že nárůst teploty razantně zvyšuje růst intermetalické vrstvy, z toho důvodu je dobré vyvarovat se vystavení pájených spojů vyšším teplotám. Pokud je vrstva pájky dostatečně slabá, může dojít k tomu, že jí intermetalické sloučeniny zcela nahradí a vlastnosti vrstvy se mohou velmi změnit.

Například u vývodu součástky, který je pokryt vrstvou pájky z důvodů lepší smáčitelnosti, tato vrstva intermetalických sloučenin zapříčiňuje snížení smáčivosti a má větší teplotu tavení. Povrch u takovéto vrstvy bude matný, a tudíž bude mít změněnou reflexivitu, což může způsobit problémy při optické kontrole [8].

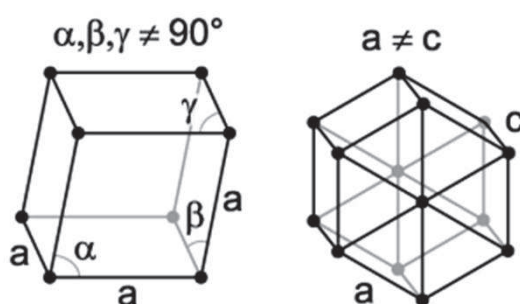
2.2 Intermetalické sloučeniny mědi a cínu

Například, měď ve styku s cínem v roztavené pájce tvoří dvě odlišné intermetalické sloučeniny. Na povrchu mědi se vytváří tenká sloučenina Cu_3Sn (ϵ fáze) na kterou navazuje vrstva Cu_6Sn_5 (η fáze), která je obvykle silnější. Tyto vrstvy jsou znázorněny na Obr. 16. Cín z roztavené pájky je spotřebováván ke tvorbě intermetalických sloučenin, z toho důvodu v pájce vzniká oblast bohatá na olovo [7].



Obr. 16 - Intermetalické sloučeniny mědi a cínu [7]

Ve srovnání s dílčími složkami mají intermetalické sloučeniny odlišnou mřížkovou strukturu. Fáze Cu_6Sn_5 krystalizuje v šesterečné (hexagonální) soustavě a fáze Cu_3Sn v kosočtverečné (ortorombické) soustavě [7].



Obr. 17 - Kosočtverečná a šesterečná krystalická struktura [31]

Zatím co se fáze Cu_3Sn obvykle nachází na povrchu mědi, krystaly Cu_6Sn_5 mají tendence odlupovat se z povrchu do taveniny, kde se vyskytují jako jehličky dlouhé až 12 μm . To je důvod, proč se intermetalické krystaly nalézají i ve větších vzdálenostech od míst, kde se vytvořily [7].

Tloušťka intermetalických vrstev závisí na teplotě a času. K růstu intermetalických vrstev dochází hlavně při formování pájeného spoje, nicméně následně pokračuje růst vrstvy

vlivem difuze. Tento růst je zanedbatelný po celou životnost pájeného spoje, problém nastává při zvýšené teplotě blížíící se teplotě tavení pájky [7].

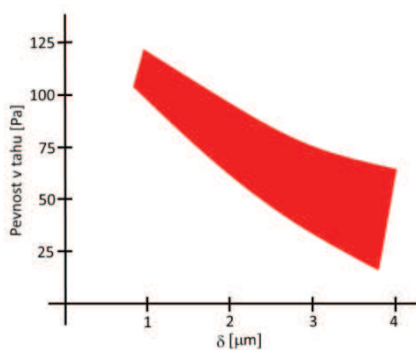
Přestože jsou intermetalické vrstvy nutné pro formování pájeného spoje, větší tloušťky intermetalických vrstev mohou měnit vzhled a celistvost pájeného spoje. Intermetalické sloučeniny mají vyšší teplotu tavení oproti pájce, teplota tavení pro Cu_6Sn_5 je 415 °C a pro Cu_3Sn je dokonce 670 °C. Z elektrického hlediska mají intermetalické sloučeniny menší vodivost než pájka. Mimo to jsou intermetalické sloučeniny výrazně křehčí, mají menší hustotu a mají rozdílný teplotní součinitel délkové roztažnosti oproti pájce, což může způsobit vnitřní namáhání ve spoji. Další negativní vlastností je nesmáčivost a to zejména v případě Cu_3Sn [7][8][12].

V Tab. 3 jsou uvedeny vlastnosti některých intermetalických sloučenin. Za povšimnutí stojí hodnoty tvrdosti a rezistivity intermetalických sloučenin oproti mědi. Tvrdost IMC je přibližně 20 krát větší a rezistivita přibližně 10 krát větší než je tomu u mědi.

Tab. 3 - Vlastnosti vybraných intermetalických sloučenin [15]

Vlastnost	Jednotka	Cu_6Sn_5	Cu_3Sn	Ni_3Sn_4	Cu
Tvrdost	Kg·mm ²	378 (± 55)	343 (± 47)	365 (± 7)	50
Teplotní roztažnost	ppm·K	16,3	19,0	13,7	16,0
Tepelná vodivost	W·mK ⁻¹	34,1	70,4	19,6	385,0
Rezistivita	μΩ·cm	17,5	8,9	28,5	1,7

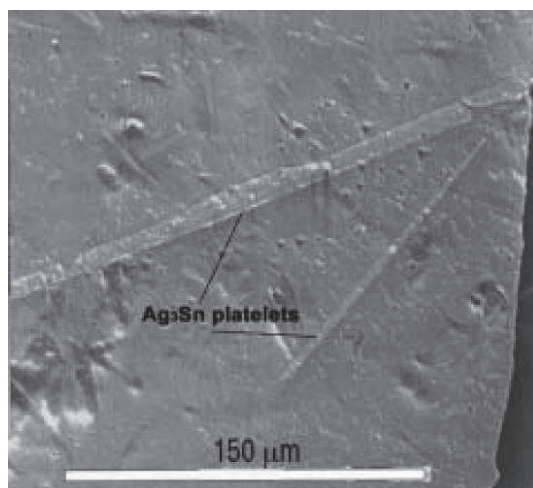
Intermetalické vrstvy jsou podstatně slabší, než podkladní vrstva mědi u pájeného spoje, což vede k lomu při nízkých zatíženích tahem. Pevnost spoje může být snížena nadbytkem intermetalických sloučenin ve spoji, viz Obr. 18 a růst IMC na rozhraní vede ke snížení únavové životnosti [7].



Obr. 18 - Tloušťka a pevnost intermetalické vrstvy [7]

2.3 Intermetalické sloučeniny u pájek obsahujících stříbro

U eutektických pájecích slitin, které obsahují stříbro, například SAC305 se kromě intermetalických sloučenin Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 tvoří i sloučenina Ag_3Sn . Sloučenina Ag_3Sn se vyskytuje ve formě destiček a může mít neblahý vliv na mechanickou celistvost pájeného spoje, kdy může dojít ke tvorbě mikrotrhlin při mechanickém a teplotním namáhání. Destičky intermetalické sloučeniny Ag_3Sn se mohou vyskytovat v celém prostoru pájeného spoje. Do vzdálenosti 2 - 3 μm od těchto destiček se nalézá oblast, která je podstatně měkčí, než ve vzdálenějších oblastech [14].



Obr. 19 - Destičky Ag_3Sn [14]

2.4 Intermetalické vrstvy u ENIG

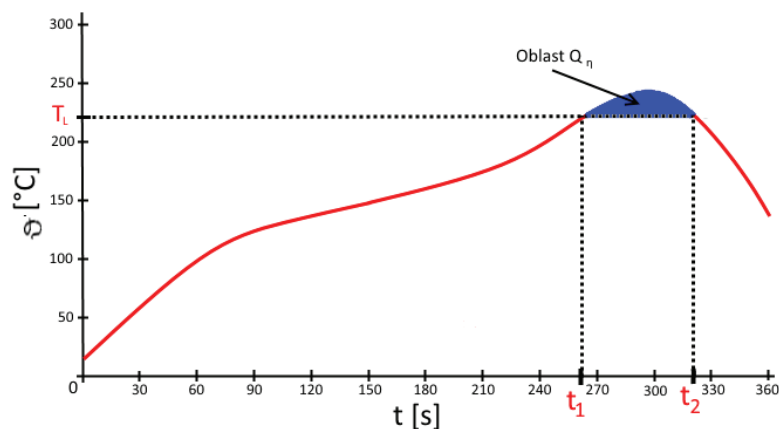
Mnoho součástek a desek plošných spojů má na povrchu povrchovou úpravu ENIG. ENIG je tvořena galvanicky nanesenou vrstvou niklu, na které je tenká vrstvička zlata. Tato vrstva se nerozpouští v pájce ve stejném rozsahu jako měď, z toho důvodu je vazba vytvořena hlavně mezi niklem a cínem. Nikl společně s cínem tvoří intermetalickou sloučeninu Ni_3Sn_4 , která má nižší pevnost než intermetalické sloučeniny mědi a cínu [7].

3. Integrál teploty a času Q_η

Integrál teploty a času, neboli „Heating factor“ lze vyjádřit jako integrál měřené teploty $T(t)$ nad teplotou tavení pájky T_L a dobou, kterou pájka setrvává v kapalném stavu t_2-t_1 . Integrál teploty a času se označuje jako Q_η a lze matematicky definovat: [1]

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_L) dt \quad (8)$$

Jednotkou Q_η je dle matematické definice $\text{s} \cdot \text{K}$, popřípadě $\text{s} \cdot ^\circ\text{C}$. Příklad přetavovacího profilu se znázorněním oblasti Q_η a zakreslenými důležitými údaji je na Obr. 20 [2].



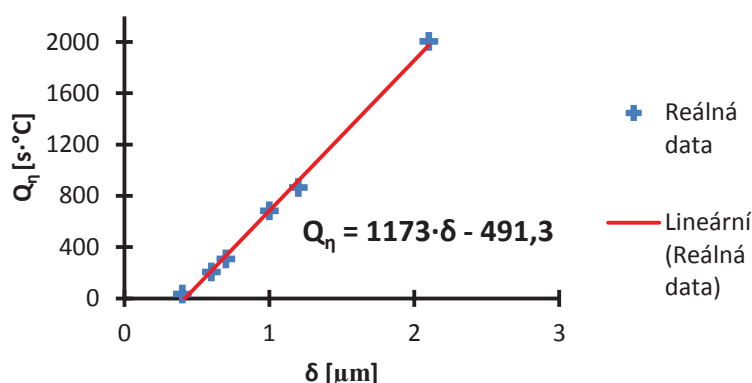
Obr. 20 - Příklad přetavovacího profilu s vyznačením oblasti Q_η [2]

3.1 Vliv Q_η na intermetalické vrstvy

Integrál teploty a času má významný vliv na tvorbu intermetalické vrstvy a na její morfologii. Spolehlivý pájený spoj nemůže být vytvořen, pokud je hodnota Q_η příliš malá, i při dodržení vysoké teploty nebo doby trvání pájky v kapalném stavu. Bylo experimentálně zjištěno, že tloušťka intermetalické vrstvy se téměř lineárně zvyšuje s přírůstkem Q_η až do dosažení saturační hodnoty. Experimentálně bylo zjištěno, že tato hodnota se pohybuje okolo $3\text{ }\mu\text{m}$ při použití pájky Sn63Pb37 na měděné pájecí plošce. Na základě experimentu byla stanovena přibližná rovnice závislosti tloušťky intermetalické vrstvy na velikosti Q_η pro pájku Sn63Pb37, tato rovnice je uvedena níže. Tato závislost je zobrazena na Obr. 21 [4][7].

$$Q_\eta = 1174 \cdot \delta - 491,3 \quad (9)$$

kde δ je střední hodnota tloušťky intermetalické vrstvy v μm .



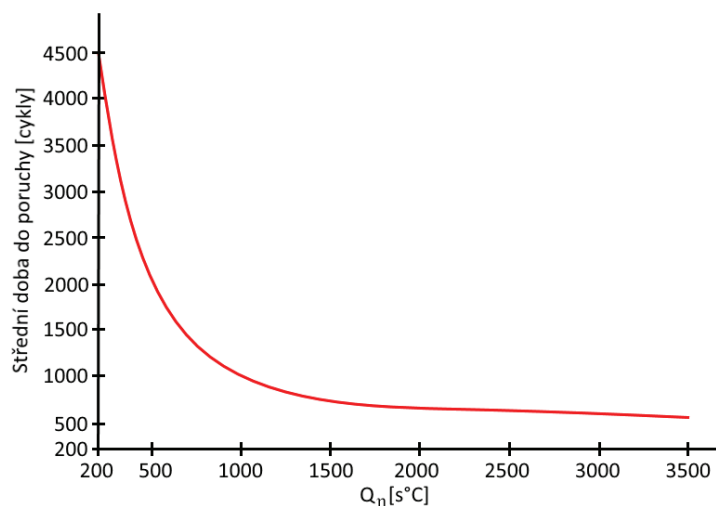
Obr. 21 - Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na Q_η [7]

Lineární růst naznačuje, že tvorbu IMC vrstvy lze poměrně jednoduše řídit. Vhodným zvolením parametru Q_η lze zajistit ideální tloušťku IMC vrstvy, což se pozitivně projeví ve spolehlivosti pájeného spoje [2][7].

3.2 Vliv Q_η na spolehlivost pájeného spoje

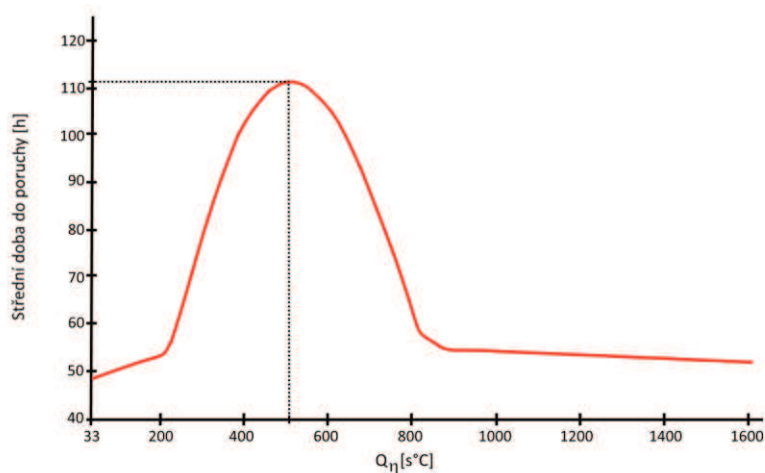
Bylo zjištěno, že životnost pájených spojů postupně degraduje v důsledku přírůstku intermetalické fáze. Měření tloušťky intermetalické fáze je poměrně složité, jelikož se často používá destruktivní metoda mikrovýbrusu a vyhodnocení pomocí elektronové a optické mikroskopie. Z toho důvodu je zatím nemožné získat informace o tloušťce IMC vrstvy v in-line procesu [7].

Pro pájený bod pájený eutektickou pájkou Sn63Pb37 a využití teplotního cyklování bylo dokázáno, že závislost střední doby do poruchy je závislá pouze na Q_η . Výsledky této analýzy jsou zobrazeny na Obr. 22. Z grafu lze vyčíst, že střední doba do poruchy s přibývajícím Q_η prudce klesá a asymptoticky se blíží ke konstantní hodnotě střední doby do poruchy, která je pravděpodobně způsobena limitní hodnotou intermetalické vrstvy dané materiálové kombinací. Když je hodnota Q_η vyšší než $1500\text{ s}\cdot^\circ\text{C}$, je pokles střední doby do poruchy nevýrazný a pro hodnoty Q_η vyšší jak $3000\text{ s}\cdot^\circ\text{C}$ je změna střední doby do poruchy zanedbatelná s relativním rozdílem 5 % na intervalu $500\text{ s}\cdot^\circ\text{C}$. Z těchto výsledků vyplývá, že pro dosažení nejlepší hodnoty střední doby do poruchy měla by být hodnota Q_η řízena během přetavení na nízké úrovni [7].



Obr. 22 - Střední doba do poruchy v závislosti na Q_η pro teplotní cyklování [7]

Zde však dochází ke střetu s další spolehlivostní analýzou, viz Obr. 23. Ze které vyplývá, že střední doba do poruchy (MTTF) nejprve roste a pak klesá s růstem Q_η . A to tak, že do hodnoty přibližně 200 s·°C pozvolna stoupá, od této hodnoty významně roste s maximem přibližně v hodnotě 500 s·°C, od které opět výrazně klesá a od hodnoty přibližně 850 s·°C pozvolně klesá. Z toho lze vyvodit závěr, že při testování pomocí vibrační zkoušky se dosahuje nejlepších hodnot spolehlivosti u pájených spojů přetavených při hodnotách od 600 s·°C do 900 s·°C [2].



Obr. 23 - Střední doba do poruchy v závislosti na Q_η pro vibrační zkoušku [2]

Dle [2] se optimální rozsah hodnot Q_η se nachází v rozmezí 300 a 750 s·°C. Nejlepší životnosti pájeného spoje pak nastává při hodnotě Q_η okolo 500 s·°C [2].

3.3 Optimalizace přetavovacího profilu

Optimalizace a řízení přetavovacího profilu je klíčovým měřítkem úspěchu při pájení přetavením. Na desce plošných spojů mohou být tisíce pájených spojů, u kterých je nutné dodržet stejný přetavovací profil, aby bylo dosaženo spolehlivosti pájeného spoje. Je velmi obtížné nastavit jednotlivé zóny ohřevu, aby byl tento parametr dodržen. Při aplikace

bezolovnatých pájecích past je situace ještě složitější díky vyšší teplotě tavení a tím i užším procesním oknům, než je tomu u olovnatých past. Optimalizace pájecího procesu vyžaduje, aby tvar skutečného přetavovacího profilu byl v mezích doporučeného přetavovacího profilu používané pájecí pasty. V současné době se používají tři prognostické metody, které slouží k usnadnění realizace a řízení přetavovacího profilu. Tyto metody jsou:

1. Simulační metody, které používají pro analýzu modelu desky plošného spoje s montáží, přetavovací pece a okrajové podmínky procesu. Simulace se provádí až do získání odpovídajícího přetavovaného profilu, který lze aplikovat pro nastavení přetavovací pece.
2. Statistická kontrola procesu, kde lze uplatnit znalosti získané z experimentů, pro vývoj softwarového algoritmu prognózy přetavovacího profilu pece.
3. Metoda umělé inteligence, využívající speciálně navrženého systému, který získává relevantní informace o faktorech ovlivňujících proces přetavení. Z takto získaných informací upravuje nastavení pece pro dosažení požadovaného přetavovacího profilu [5].

Tyto tři metody mohou pomoci při dosahování požadovaného přetavovacího profilu, avšak z důvodů složitosti montáže nelze dosáhnout ideálního profilu pro všechny spoje. Z tohoto důvodu se mohou vyskytnout vady pájených spojů. Ideálním parametrem pro optimalizaci přetavovacího profilu je integrál teploty a času. Bylo dokázáno, že Q_η poskytuje kvantitativní měřítko vzniku metalurgické vazby mezi pájecí slitinou a pájecím bodem pomocí intermetalických sloučenin, vytvořených na jejich rozhraní. Tloušťku intermetalické vrstvy a tím pádem i spolehlivost lze ovlivňovat pomocí Q_η . Avšak Q_η bude mít vždy odchylky díky nerovnoměrnému rozložení distribuce tepla u všech pájených spojů, z toho důvodu je nutné stanovit horní a dolní mez Q_η [5].

Optimální hodnota Q_η je závislá nejen na pájecí slitině, ale i na materiálu pájecí plošky. Například pro tvorbu pájeného spoje u pájky Sn63Pb37 (teplota tání 183 °C) a poniklované pájecí plošky je doporučená hodnota Q_η v rozmezí 200 až 700 s·°C. Vzhledem k tomu, že mechanismus vytvoření intermetalické vrstvy u Sn-Ag-Cu pájecí pasty je stejný jako u Sn63Pb37 pájky, lze také použít optimalizaci dle hodnoty Q_η . A předpokládá se, že ideální hodnota Q_η je stejná jako v případě pájky Sn63Pb37 a tudíž 200 až 700 s·°C. Očekává se, že použitím optimální hodnoty Q_η pro jednotlivé pájecí slitiny a materiály pájecích plošek lze dosáhnout vysoké spolehlivosti pájených spojů, při procesu pájení přetavením [5].

3.4 Realizace optimálního Q_η

Nejprve musí být stanovena spodní hranice Q_η^L a horní hranice Q_η^H optimálního rozsahu Q_η . Spodní hranice je definována jako minimální hodnota Q_η , při které se pájený spoj dokáže ještě dostatečně spolehlivě vytvořit. Naopak horní hranice je definována jako maximální hodnota Q_η [5].

Předpokládá se, že pájený bod s nejnižší hodnotou Q_η , tzv. studený bod, bude umístěn vždy v centru spodní části součástky, která má největší tepelnou kapacitu na DPS. Teplota tohoto pájeného bodu je tedy nejnižší při fázi ohřevu. Horký bod se nachází na součástce s nejnižší tepelnou kapacitou. Pro názornost označíme hodnoty Q_η u pájených bodů jako Q_η^{max} a Q_η^{min} . Rozdíl mezi těmito hodnotami je označován jako ΔQ_η [5].

Za předpokladu, že hodnota ΔQ_η je větší než hodnota optimálního rozsahu $Q_\eta^H - Q_\eta^L$, lze hodnotu Q_η u všech pájených spojů řídit v optimálním rozsahu. Proto rozhodnutí, zda se

Q_{η}^{min} musí nacházet v blízkosti Q_{η}^L , nebo Q_{η}^{max} v blízkosti Q_{η}^H musí být pečlivě zváženo pro kontrolu optimálního rozsahu vzhledem k ΔQ_{η} [5].

Sledování studeného bodu je výhodnější než teplého bodu ze dvou důvodů. Prvním důvodem je, že lze snadno určit jeho polohu ve srovnání s horkým bodem. Druhým důvodem je, že hodnota Q_{η}^{min} by neměla být mnohem nižší než hodnota Q_{η}^L , což může způsobit výrazné snížení spolehlivosti. Zatímco mírné zvětšení hodnoty Q_{η}^{max} oproti hodnotě Q_{η}^H jen nepatrně ovlivní spolehlivost pájeného spoje [5].

Z toho důvodu zahrnuje optimalizace Q_{η} tyto dva parametry:

1. Hodnota ΔQ_{η} by měla být řízena v optimálním rozmezí
2. Hodnota Q_{η}^{min} by měla být řízena tak, aby se nacházela v blízkosti Q_{η}^L

4. Praktická část

4.1 Mikrovýbrus

Patří do skupiny testování, při které je vzorek zničen, tzv. destruktivní metoda, z toho důvodu se analýza pomocí mikrovýbrusu používá až mezi posledními. Mikrovýbrus (Cross - Section) umožňuje sledovat řez strukturou vzorku.

4.1.1 Postup přípravy mikrovýbrusu

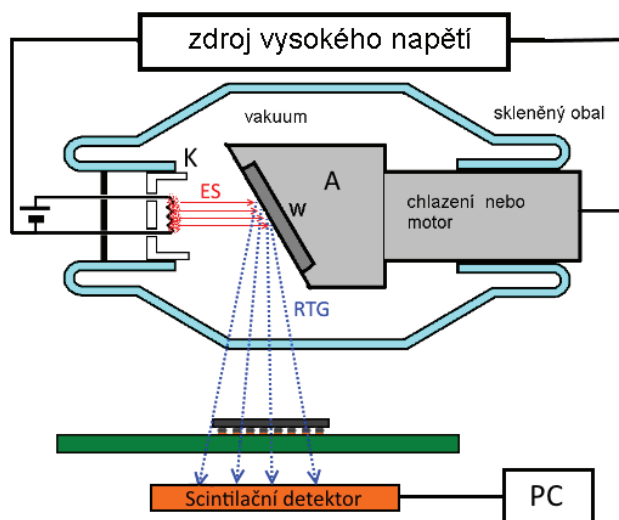
Příprava vzorků mikrovýbrusu se skládá z několika operací, které jsou popsány níže:

1. Oddělení zkoumané oblasti od zbytku sestavy. Oddělení se provádí pomocí pákových nůžek, listové pilky či pomocí frézky.
2. Aplikace separátoru na stěny formy, který zabrání styku zalévací hmoty s formou a umožní snadné vyjmutí vzorku z formy po ztuhnutí zalévací směsi.
3. Do formy umístíme zkoumaný vzorek a upevníme ho dostatečným způsobem, aby nemohlo dojít k jeho pohybu během zalévání a tuhnutí směsi. Vzorek musí být umístěn kolmo ke dnu formy, aby nedocházelo ke zkreslení při zkoumání.
4. Příprava zalévací směsi. Jako zalévací směs se používá Dentacryl, jedná se o metylmetakrylátovou pryskyřici. Zalévací směs připravíme smícháním jednotlivých složek Dentacrylu v poměru 100 objemových dílů prášku na 45 – 55 objemových dílů kapaliny [25].
5. Formu s umístěným vzorkem zalijeme rozmíchaným Dentacrylem. Při zalévání se vyvarujeme vzniku velkých vzduchových bublin. Pro odstranění vzduchových bublinek můžeme vzorek umístit do vakua, či působení ultrazvuku.
6. Formy umístíme v pokojové teplotě. Doba tuhnutí je 20 až 50 minut v závislosti zejména na množství odlévané směsi [25].
7. Po vytvrzení směsi vyjmeme vzorek z formy a očistíme od zbytků separátoru, lze použít i ultrazvukové čištění.
8. Vzorek umístíme do platformy. Samotné broušení spočívá v obrušování materiálu vzorku až na požadovanou hodnotu. Začínáme s hrubozrnnými brusnými papíry a postupujeme až k jemnozrnným papírům v kombinaci s proudem vody. Po broušení lze vzorek vyleštit pomocí leštícího kotouče a leštících past.

9. Mikrolept směsí kyseliny dusičné (5 %) a metanolu (95 %).
10. Mikrovýbrus lze pozorovat optickým nebo elektronovým mikroskopem.

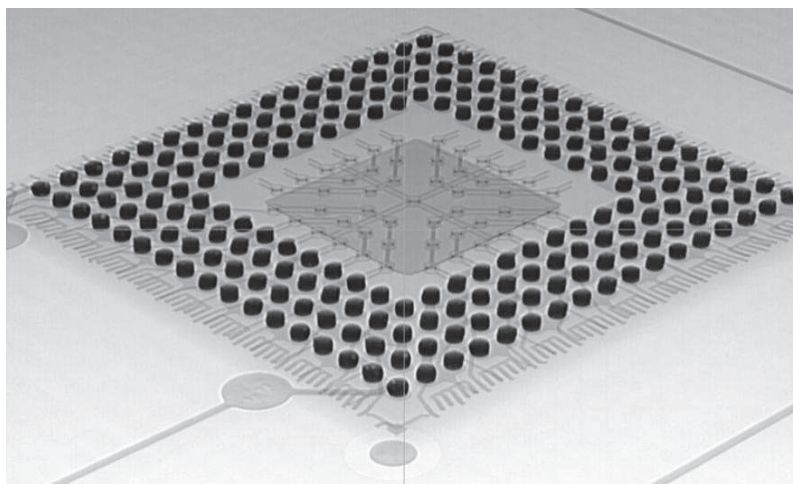
4.2 Kontrola rentgenovým zářením (X-ray)

Na rozdíl od mikrovýbrusu se jedná o nedestruktivní metodu, kterou lze využít pro místa, kam běžné optické metody nemají přístup a lze tak sledovat vnitřní vady. Zkoumaný vzorek není nutné před zkoumáním upravovat. Metoda spočívá ve schopnosti rentgenového záření pronikat zkoumanými materiály. Dle materiálu a jeho tloušťky dochází ke změně intenzity procházeného záření, které je následně indikováno a programově zpracováno. Kontrolu rentgenovým zářením lze využít ve 2D a 3D zobrazení [26].



Obr. 24 - Princip rentgenového zařízení

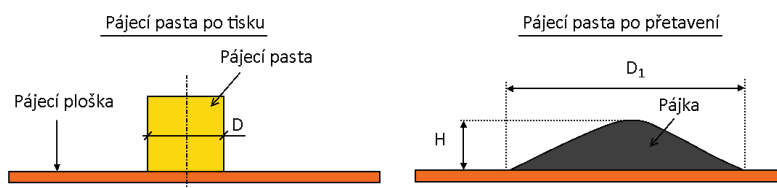
Kontrola vzorků bude prováděna na Phoenix X-ray Micromex DXR-HD, umístěném na Ústavu telekomunikací. U tohoto zařízení je rentgenové záření získáváno při interakci elektronového svazku s materiálem terče, v tomto případě vyrobeného ze syntetického diamantu. Toto RTG záření prochází skrz zkoumaný předmět, kde dochází k jeho utlumení a je detekováno pomocí scintilačního detektoru DXR250RT.



Obr. 25 - Příklad rentgenového snímku pouzdra BGA

4.3 Test roztékavosti

Testem roztékavosti lze kontrolovat aktivitu tavidla nebo roztékavost pájecí pasty. Princip testu roztékavosti spočívá v nanesení definovaného množství pájecí pasty na definovaný povrch a zapájení procesem přetavení. Roztékavost pájky nebo aktivity tavidla se hodnotí dle plochy rozteklé pájky nebo výšky pájky, viz Obr. 26. Výsledný faktor roztékavosti je dán podílem výšky rozteklé pájky a výšky pájky při ideálním nesmáčení, kdy se vytvoří ideální kulička pájky, nebo plochou do které se pájka rozteče [32].

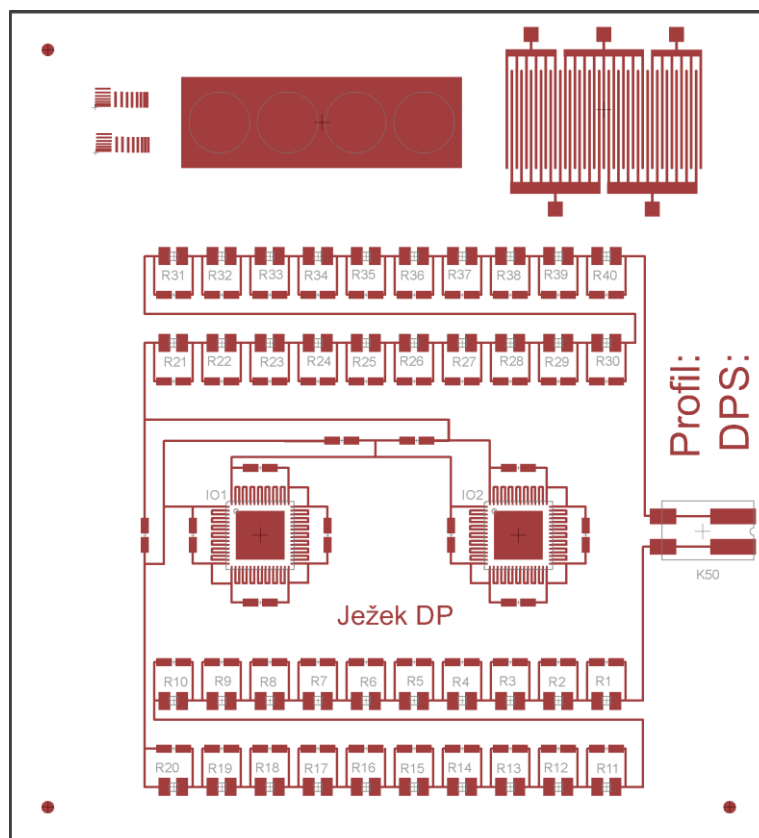


Obr. 26 - Test roztékavosti [32]Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.

4.4 Návrh testovací DPS

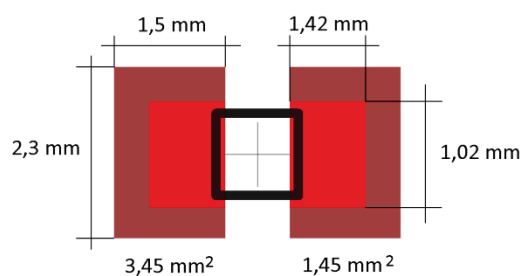
Pro naše účely bylo nutné navrhnout novou testovací DPS, jelikož stará deska pro naše potřeby již nevyhovuje. Návrh testovací desky probíhal v návrhovém programu Eagle 6.4, pomocí kterého bylo vytvořeno schéma a následně i DPS. Navržené schéma DPS je umístěno v příloze Obr. 59. Vytvořený návrh DPS je na Obr. 27.

Navržená DPS obsahuje dvě pouzdra QFN a dvě série rezistorů velikosti 0805, celkem 40 kusů rezistorů a SMT konektor WAGO. QFN pouzdra jsou DUMMY pouzdra, která jsou uvnitř propojena a společně s motivem na DPS jsou vývody zapojeny do série. Rezistory 0805 mají hodnotu $0\ \Omega$. Ke každému rezistoru jsou připojeny zkratovací plošky, aby v případě poruchy pájeného spoje nebo rezistoru bylo možné dané místo překlenout. Z toho stejného důvodu jsou u pouzdra QFN umístěny zkratovací plošky, vždy na každé straně pouzdra. Testovací deska umožňuje zkratovat pouzdra QFN a použít na desce pouze rezistory.



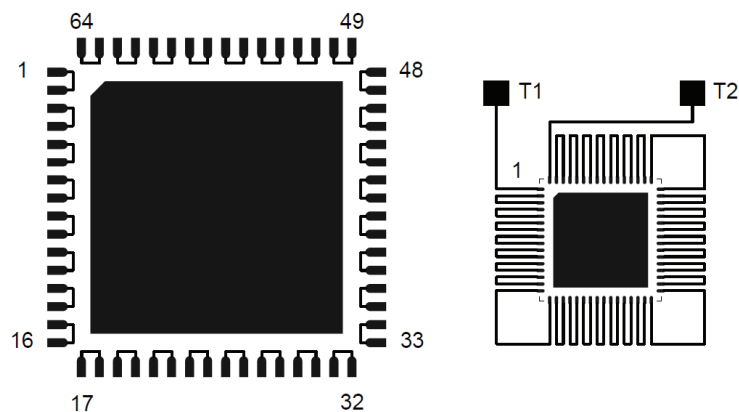
Obr. 27 - Vytvořená testovací DPS

Z důvodu provádění zkoušek stříhem byl návrh DPS upraven tak, že pájecí ploška u rezistorů je typu SMDP, kdy je pájecí ploška definována nepájkivou maskou a část pájecí plošky je skryta pod nepájkivou maskou. Tento návrh by měl zajistit, že se součástka odtrhne v pájeném spoji a nedojde k delaminaci pájecí plošky od základního materiálu. Původní pájecí ploška o rozměrech 1,42 x 1,02 mm (plocha 1,45 mm²) byla zvětšena na rozměry 2,3 x 1,5 mm (plocha 3,45 mm²). Celková pájecí plocha tak byla zvětšena 2,38 krát.



Obr. 28 - Rozměry padů

Pouzdro QFN má 64 vývodů, které jsou umístěny na každé straně po 16 vývodech. Propojení uvnitř pouzdra a doporučené propojení na DPS je znázorněno na Obr. 29 [24].



Obr. 29 - Propojení vývodů QFN pouzdra a doporučené propojení na DPS [24]

Na desce jsou navrženy i motivy pro měření roztékavosti pájky, SLUMP test a měření povrchového izolačního odporu (SIR). Pro výrobu testovacích desek byl vybrán jednostranně plátovaný základní materiál FR4, konkrétně IS400 s teplotou skelného přechodu T_G 150 °C a tloušťkou 1,55 mm. Tento základní materiál jsme zvolili, jelikož vzorky budou vystaveny izotermickému stárnutí a tento materiál měl nejvyšší hodnotu skelného přechodu. Tloušťka použité mědi je 18 μm . Navržena byla i nepájivá maska zelené barvy a servisní potisk. Navržena byla i šablona pro tisk pájecí pasty, tloušťka šablony byla zvolena 130 μm . Jako povrchová úprava mědi je použita vrstva Ni/Au.

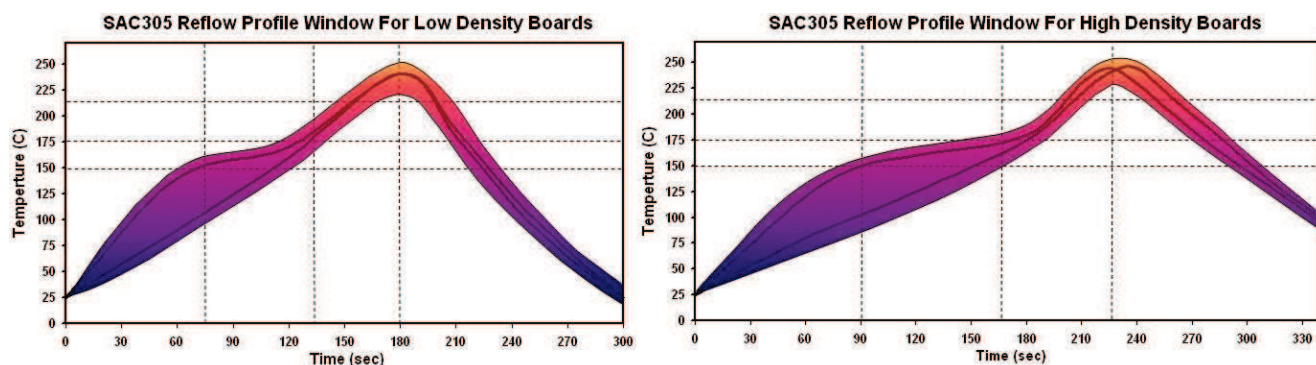
4.5 Pájecí pasta

U většiny testovacích desek byla použita pájecí pasta NC257-2 (SP 1). Jedná se o bezoplachovou pájecí pastu SAC 305 o složení 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Tato pasta dosahuje velmi dobrých smáčecích charakteristik, což se pozitivně projevuje na pájených spojích, které jsou hladké a lesklé. Další výhodou této pájecí pasty je malé množství zbytků po pájení, které nevyžadují čištění. Důležité parametry a doporučení pro tisk pájecí pasty NC257-2 jsou uvedeny v Tab. 4. [31]

Tab. 4 - Důležité vlastnosti pasty [31]

Parametr	Hodnota
Teplota tavení	217 - 218 °C
Obsah pájky	88,3 % hm.
Přítlak těrky	0,1 – 0,3 kg/cm
Rychlost tisku	12 – 150 mm/s

Příklady provedení teplotního profilu přetavovací pece pro krátký a dlouhý profil jsou uvedeny na Obr. 30. Výběr krátkého či dlouhého přetavovacího profilu záleží na hustotě montáže DPS. Typické hodnoty trvání jednotlivých částí přetavovacího profilu jsou uvedeny v Tab. 5. Důležité je dodržet teplotní gradienty ohřevu a chlazení, pro ohřev je maximální hodnota 2 °C/s a pro chlazení 4 °C/s [31].



Obr. 30 - Příklad krátkého a dlouhého profilu [31].

U části testovací desek je použita pájecí pasta M8 (SP 2). Jedná se opět o bezoplachovou pastu SAC 305. Tato pájecí pasta je určena pro sestavy s velmi vysokou hustotou montáže, UFP aplikace a pouzdra μ BGA. Hlavní výhodou této pasty je snížená tvorba dutin, snížená u pouzder BGA o 5 % a u BTC dokonce o 10 %. U obou past je použito tavídko ROL0 [33].

Tab. 5 - Přetavovací profily pro pájecí pastu SAC305 [34].

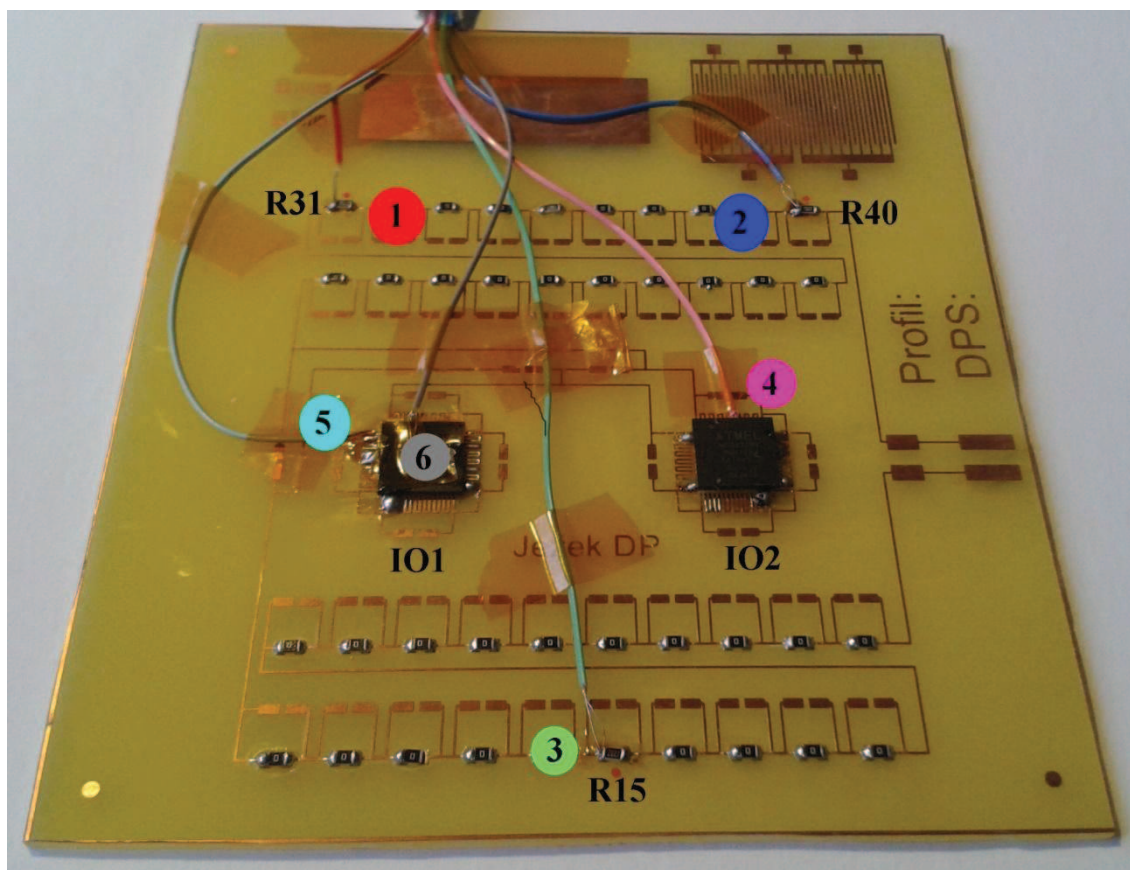
Profil	Přehřev (do 150 °C)	Vyrovnání (150 – 175 °C)	Čas do max. teploty (230 – 245°C)	TAL ($\geq 217^\circ\text{C}$)	Chlazení	Délka profilu
Krátký	≤ 75 s	30 – 60 s	45 – 75 s	30 – 60 s	45 ± 15 s	165 – 210 s
Dlouhý	≤ 90 s	60 – 90 s	45 – 75 s	60 – 90 s	45 ± 15 s	270 – 300 s

4.6 Měření teplotních profilů

Pro ověření teplotních profilů jsme vyrobili 3 kusy testovacích DPS v laboratorních prostorech Ústavu elektrotechnologie. Tyto DPS jsme aplikovali olovenou přetavovací pastu pomocí dispenzeru, do které jsme následně osadili součástky a zapájeli pomocí přetavovací pece DIMA SMRO 0180. Na DPS jsme umístili celkem šest termočlánků typu K. Tři termočlánky se nachází v pájených spojích rezistorů, jeden k vývodu pouzdra GFN a po jednom termočlánku jsou umístěny pod a na pouzdru GFN. Umístění jednotlivých termočlánků je v Tab. 6. Připájení je realizováno pájkou s teplotou tavení 300°C , díky čemuž nemůže dojít k roztavení pájky a případnému uvolnění termočlánku. Rozmístění a připevnění termočlánku je vidět na Obr. 31.

Tab. 6 - Rozmístění termočlánků na testovací DPS

Termočlánek	Součástka	Typ	Popis
T1	R31	0805	spoj
T2	R40	0805	spoj
T3	R15	0805	spoj
T4	IO2	QFN64	pod
T5	IO1	QFN64	spoj
T6	IO1	QFN64	nad



Obr. 31 - Testovací DPS pro měření profilů s rozmístěnými termočlánky

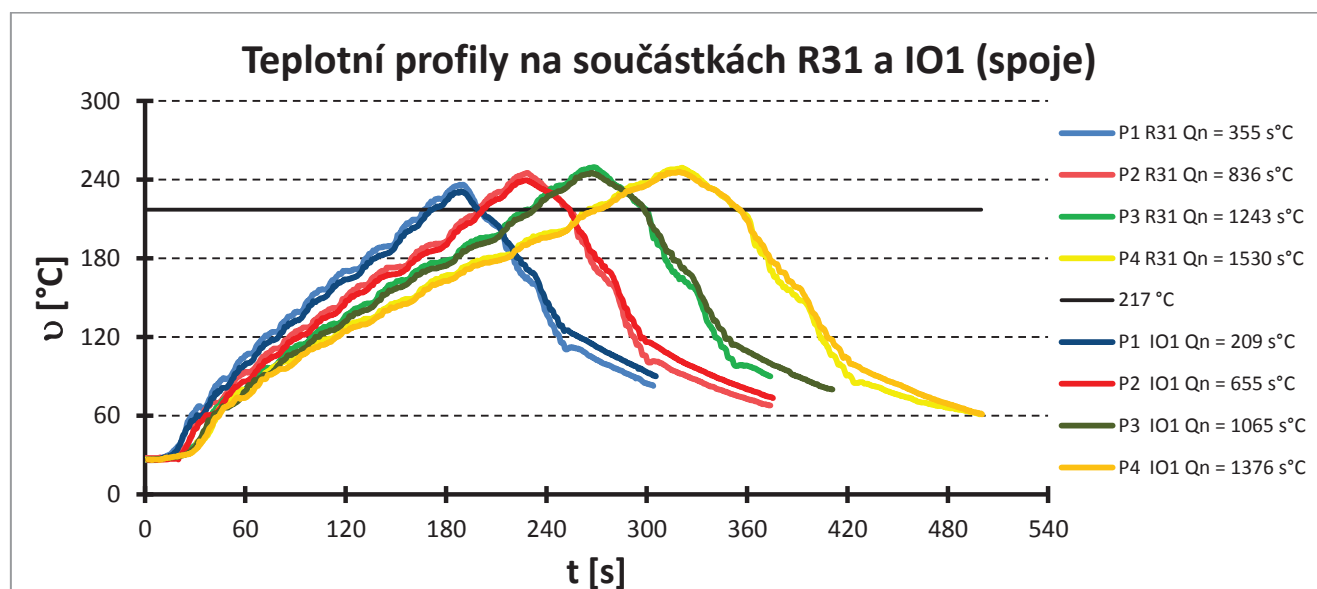
Měření teplotních profilů probíhalo pomocí profiloměru SuperM.O.L.E.® Gold 2. Tento profiloměr má 6 kanálů na které se připojují termočlánky typu K (NiCr-Ni). Lze měřit teploty od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1271\text{ }^{\circ}\text{C}$ v intervalech od 0,1 s až do 24 hodin. Přesnost profiloměru je $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pomocí testovací DPS jsme nastavili 4 teplotní profily pro pájení testovacích desek. Přetavovací profily jsou typu RTS. Data naměřená profiloměrem jsou uvedena v příloze. Tyto profily jsou znázorněny na Obr. 32. V Tab. 7 jsou uvedeny vrcholové teploty, čas nad liquidem pájky a integrál teploty a času nad teplotou tavení pro všechny termočlánky umístěné na desce. Hodnoty Q_{η} byly ověřeny pomocí numerické metody (lichoběžníková metoda), kdy je průběh nad teplotou tavení rozdělen na jednotlivé intervaly, vypočítán obsah a jednotlivé integrály sečteny. Údaj uvedený profiloměrem se neliší od námi vypočítaných hodnot Q_{η} .

Při hodnocení teplotních profilů bylo zjištěno, že dosažené integrály na součástkách na desce jsou velmi rozdílné. Například pro profil P1 má integrál pro odpor R31 hodnotu $355\text{ s}\cdot^{\circ}\text{C}$, pro odpor R40 je to $298\text{ s}\cdot^{\circ}\text{C}$ a pro odpor R15 $249\text{ s}\cdot^{\circ}\text{C}$. Tento rozdíl je způsoben rozdílnou distribucí tepla na DPS. Tento rozdíl je patrný i u pouzdra QFN, kde se měřila teplota na pouzdrě, pod pouzdrém a na pájeném spoji, kdy tento rozdíl je způsoben tepelnou kapacitou pouzdra QFN. Při srovnání tohoto rozdílu mezi profily jsme došli k závěru, že čím je nastavení rychlost dopravníku pomalejší, tím má sestava více času na přijmutí tepla, což se promítá v menších rozdílech integrálů a dalších parametrech. Ještě lepších výsledků by bylo dosaženo použitím přetavovacích profilů typu RSS s oblastí vyrovnání, ve které by došlo k zrovnoměnění teploty na DPS.

Tab. 7 - Tabulka důležitých hodnot naměřených přetavovacích profilů

Profil	Termočlánek	Q _n [s·°C]	TAL [s]	PEAK [°C]	v [cm/min]	Detail
P1	T1	355	33	236,1	100	886
	T2	298	32	235		
	T3	249	29	232,8		
	T4	161	24	228,9		
	T5	206	28	231,1		
	T6	196	27	131,7		
P2	T1	836	55	245	85	884
	T2	825	53	245		
	T3	745	54	242,2		
	T4	573	48	237,8		
	T5	655	52	23,4		
	T6	671	51	241,7		
P3	T1	1243	71	249,4	73	898
	T2	1206	68	248,9		
	T3	1116	67	246,7		
	T4	996	64	244,4		
	T5	1065	66	245		
	T6	1041	67	246,1		
P4	T1	1530	90	248,9	60	887
	T2	1542	90	249,4		
	T3	1439	87	247,2		
	T4	1340	81	246,1		
	T5	1376	87	246,1		
	T6	1356	84	246,7		



Obr. 32 - Změřené přetavovací profily pro R31 a IO1(měřeno v pájených spojích)

4.7 Montáž SMD

Montáž SMD probíhala ve společnosti Honeywell v její brněnské pobočce. Tisk pájecí pasty probíhal na zařízení MPM AccuFlex Obr. 33. Šablona byla zvolena o tloušťce 130 μm . Jako první bylo natisknuto 24 desek standardní pastou SAC 305 (SP 1) a následně 4 desky pastou s avizovaným nižším výskytem dutin (SP 2). Nastavené hodnoty tisku:

- Přítlak těrky: UTAJENO
- Rychlost tisku: UTAJENO
- Rychlost odtrhu: UTAJENO

Natisknuté desky byly zkontrolovány pomocí zařízení Koh Young KY 8030-3 Obr. 33, které zkontrolovalo všechny pájené body s natisknutou pájecí pastou. Celkem zkontroloval 5936 testovaných bodů (212 bodů/DPS, 28 ks DPS). Výsledky SPI pro obě pasty jsou uvedeny v Tab. 8.



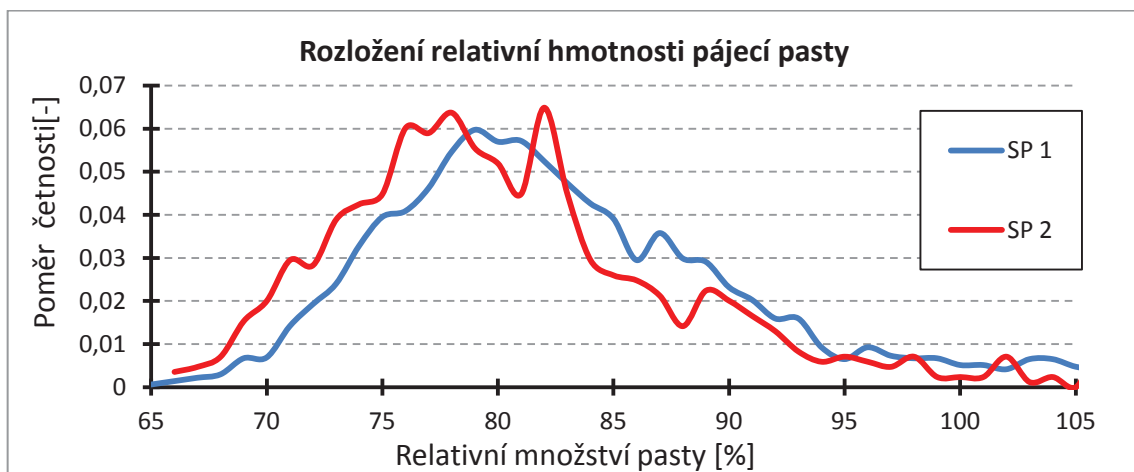
Obr. 33 - SPI (vlevo) a šablonový tisk (vpravo)

Po pájení přetavením nebyla zaznamenána žádná vada pájeného spoje. Z těchto výsledků SPI lze usuzovat, že procesní okno u tisku pájecí pasty je velmi široké.

Tab. 8 - Tabulka výsledků SPI

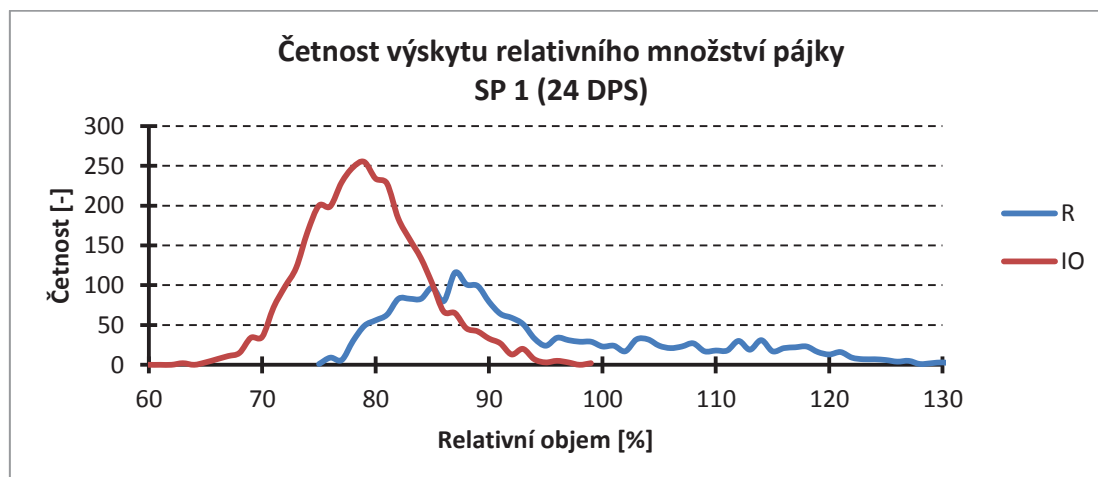
Parametr [%]	Celkem	SP 1	SP 2
Směrodatná odchylka	11,3	11,2	11,8
Maximum	137,2	132,9	137,2
Minimum	57,8	57,8	65,5
Průměr	84,7	84,9	83,0

Na Obr. 34 je vynesena graf závislosti poměru četností k celkovému počtu na relativním množství pájecí pasty pro obě pasty. Poměr četností je vypočítán k celkovému počtu bodů pro každou pastu. Ze závislostí v grafu je vidět posun mezi SP 1 a SP 2, který indikuje, že u SP 2 docházelo k horším výsledkům tisku.



Obr. 34 - Poměr četnosti výskytu relativního množství pájky

Na Obr. 35 je vidět závislost četnosti na relativním množství pájecí pasty pro SP 1. V grafu jsou zobrazeny hodnoty SPI pro odpory a pouzdra QFN. Z grafu lze vyčíst, že pasta natisknutá pro odpory dosahuje mnohem lepších výsledků. To je způsobeno rozdílnými velikostmi apertur v šabloně pro pouzdra odporů a pouzder QFN. U pouzder QFN, kde je apertura menší než u odporů dochází k horšímu tisku vlivem adheze pájecí pasty ke stěnám apertury. Tento jev je u větších apertur zanedbatelný.



Obr. 35 - Závislost pro SP 1 rozdělenou na R a IO



Obr. 36 - Siemens Siplace X4

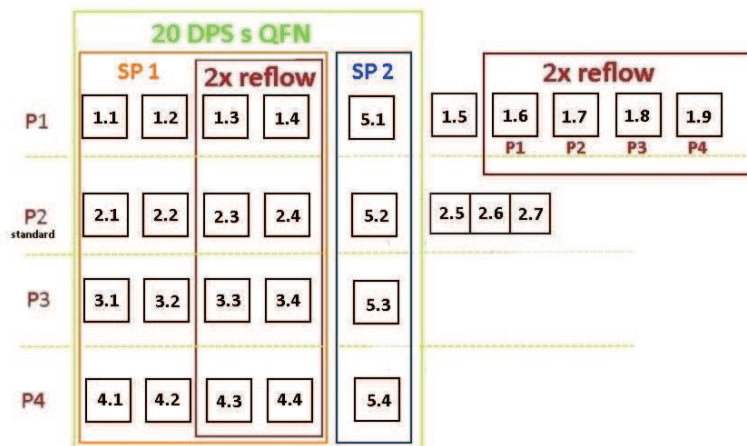
Osazování součástek probíhalo na osazovacím automatu Siemens Siplace X4 Obr. 36. Toto zařízení má teoretickou rychlostí osazování 112500 součástek za hodinu a umožňuje osazovat součástky až do velikosti 01005.

Přetavení probíhalo v peci Heller 1812EXL Obr. 37. Heller 1812EXL je 12 zónová horkovzdušná pec s nucenou konvekcí vybavená dopravníkem.



Obr. 37 - Přetavovací pec

Schéma podle kterého probíhalo pájení je znázorněno na Obr. 38. Jako první se natiskla SP 1 (standardní přetavovací pasta) na 24 DPS, 16 DPS bylo plně osazeno součástkami a na 8 pouze rezistory. Následovala změna pájecí pasty za SP 2 (s nižším výskytem dutin), kterou byly natisknuty 4 DPS a plně osazeny. Značení desek probíhalo po výstupu z osazovacího stroje a uložení do zásobníku, z kterého byly následně posílány do nastavených přetavovacích profilů.



Obr. 38 - Schéma rozvržení pájení

Na přetavovací peci Heller 1812EXL byl nastaven profil P1, kterým byly zapájeny všechny DPS č. 1.x a 5.1. Následně byly DPS č. 1.3, 1.4 a 1.6 vystaveny druhému průchodu přetavovací peci. Profilem P2, který je standardně používaný byly zapájeny DPS č. 2.x, 5.2 a 1.7. DPS č. 2.3 a 2.4 byly vystaveny druhému přetavení. Profilem P3 byly zapájeny DPS č. 3.x, 5.3 a 1.8. DPS č. 3.3 a 3.4 byly vystaveny druhému průchodu. Profilem P4 byly zapájeny

DPS č. 4.x, 5.4 a 1.9. DPS č. 4.3 a 4.4 byly vystaveny druhému přetavení. Pořadí přetavovacích profilů a DPS v nich je uveden v Tab. 9.

Tab. 9 - DPS v použitém pořadí

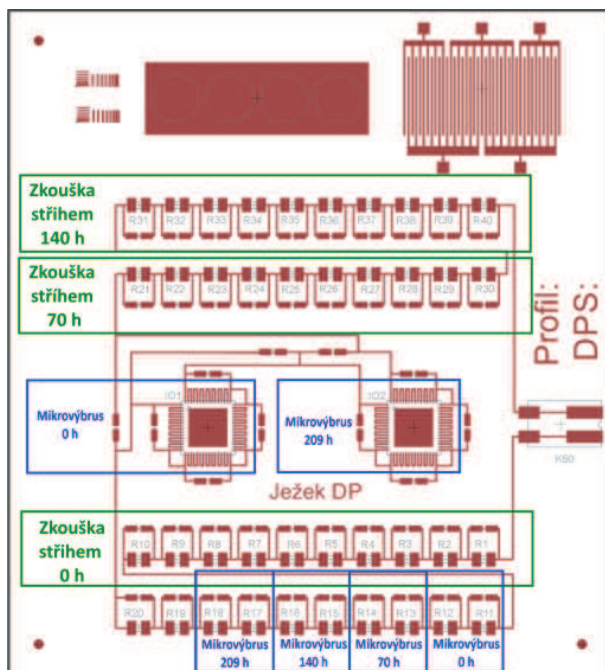
Profil	DPS č.
P1	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 5.1, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.3, 1.4, 1.6
P2	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 5.2, 2.6, 2.7, 2.3, 2.4, 1.7
P3	3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 5.3, 1.8
P4	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 5.4, 1.9

4.8 Kontrola a testování

Osazené a zapájené testovací desky byly zkontrolovány pomocí rentgenového záření a vyhodnoceno množství dutin v pájených spojkách pro jednotlivé přetavovací profily a pájecí pasty.

Testovací desky č. x.2 a x.3 byly umístěny do izotermické komory, kde byly vystaveny teplotě 125 °C po dobu 209 hodin, což odpovídá provozu 2,25 roku při teplotě 60 °C. Po celou dobu stárnutí byl měřen odpor jednotlivých DPS. Změna hodnoty odporu propojení indikovala výskyt selhání či růst IMC vrstvy. [34]

Do izotermické komory jsme umístili i desky x.1 a x.4 z kterých jsme odebírali vzorky pro mikrovýbrusy a byly provedeny zkoušky stříhem a to v časech 0,70,140 a 209 hodin. Zkouška stříhem pro čas 209 hodin byla provedena na deskách č. x.2 a x.3. Provedené zkoušky stříhem a odebrání vzorků pro mikrovýbrus je znázorněno na obrázku Obr. 39.



Obr. 39 - Schéma zkoušek stříhu a odebrání vzorků pro mikrovýbrusy

5. Vyhodnocení naměřených výsledků

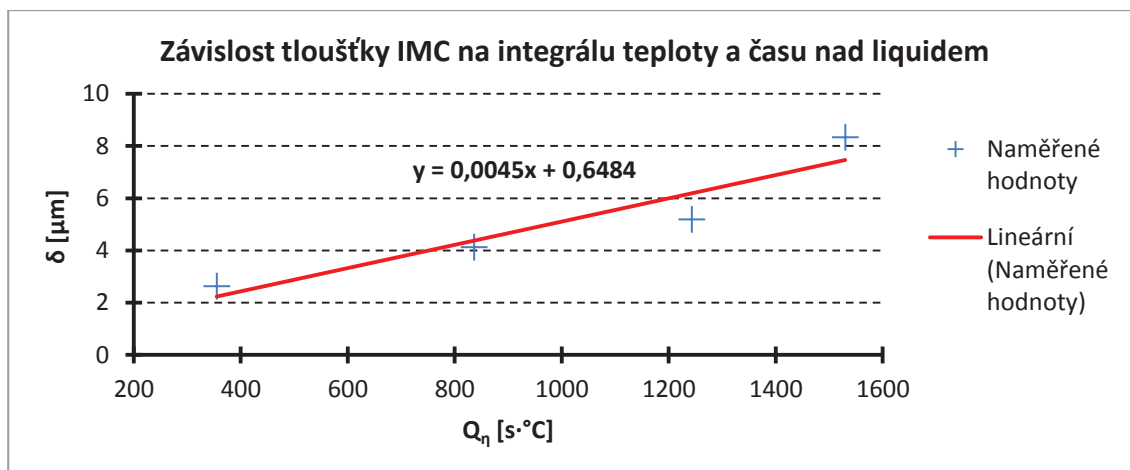
5.1 Vyhodnocení IMC vrstvy a mikrovýbrusů

Diagnostika vzorků mikrovýbrusů DPS byla provedena metodami environmentální rastrovací elektronové mikroskopie na mikroskopu VEGA3XMU u kterého je zdrojem elektronů katoda tvořená z LaB_6 (Lanthan hexaborid). Pozorování bylo realizováno v nízkém vakuu při tlaku 50 - 200 Pa vodních par v komoře vzorku mikroskopu. Pozorování vzorků nemohlo být realizováno ve vakuu z důvodu nabíjení nevodivých vzorků. Vzorky byly pozorovány v obraze zpětně odražených elektronů přenášejících materiálovou informaci, což umožnilo snazší určení šířky intermetalické vrstvy. Měření dané vrstvy probíhalo v programovém vybavení mikroskopu programu VegaTC. U vybraných vzorků byla provedena kontrolní energiově disperzní rentgenová mikroanalýza stanovující podíl a zastoupení jednotlivých prvků, případně mapování rozložení prvků na povrchu vzorku. Výsledky prvkové mikroanalýzy mohly být ovlivněny tlakem plynu v komoře vzorku způsobujícím rozptyl primárního svazku.

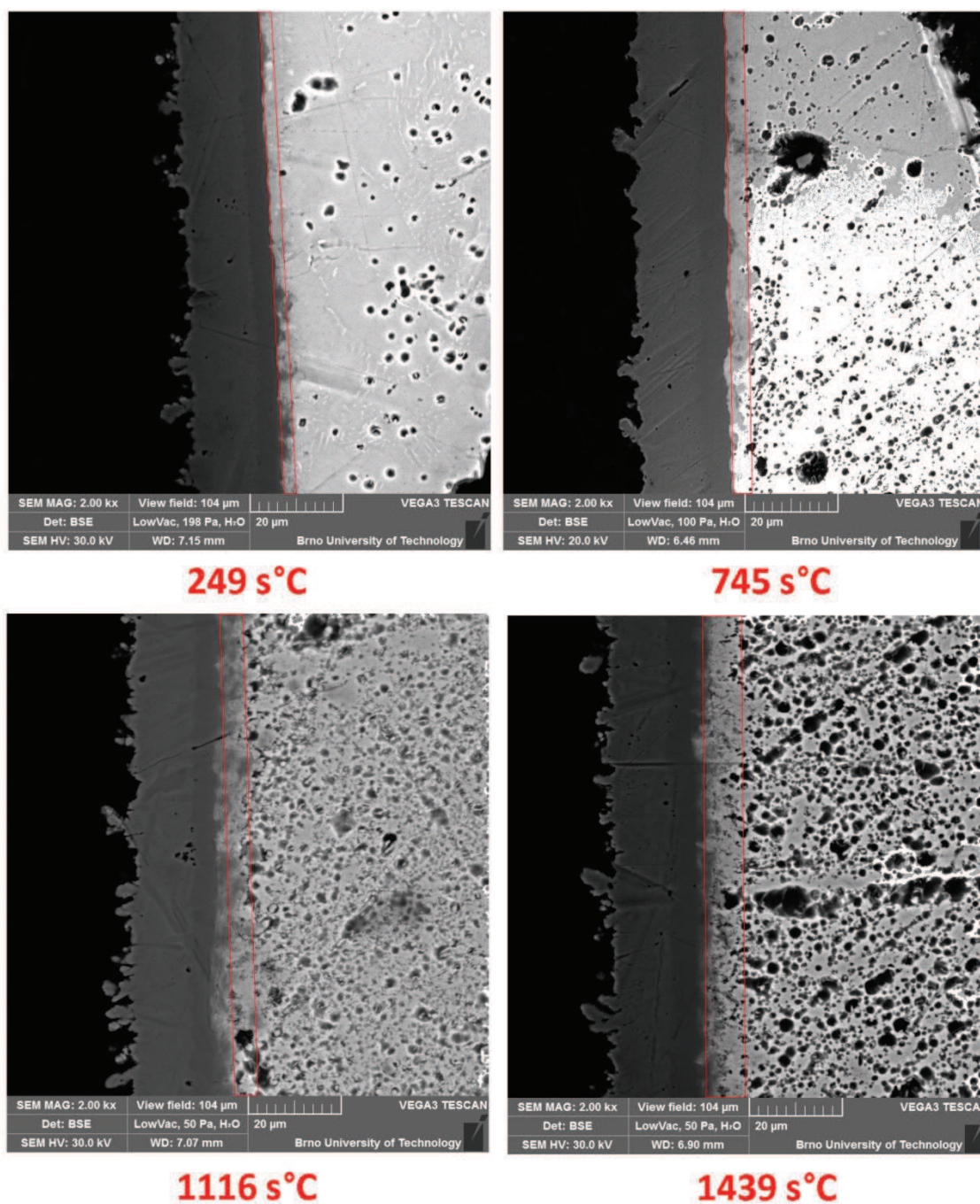
Tab. 10 - Naměřené tloušťky IMC vrstev

Profil	Q_η [s·°C]	δ [μm]
P1	249	2,63
P2	745	4,12
P3	1116	5,18
P4	1439	8,33

Na Obr. 41 je vidět, že s rostoucím integrálem dochází k intenzivnějšímu rozpouštění niklu, jehož rozhraní s pájkou se stává členitější.



Obr. 40 - Závislost IMC na integrálu teploty a času



Obr. 41 - Obrázky elektronové mikroskopie vzorků DPS x.1 (1 průřeh)

Naměřené tloušťky intermetalických vrstev jsou uvedeny v Tab. 21 umístěné v příloze. Získané hodnoty jsou získané z měření hodnot integrálů a následných výbrusů odporu a pouzdra QFN. Pro přehlednost jsou v Tab. 10 uvedeny průměrné hodnoty a následně vyneseny do grafu na Obr. 40. Z této závislosti jasně vyplývá, že tloušťka IMC vrstvy lineárně roste se zvětšujícím se integrálem teploty a času nad teplotou tavení pájky.

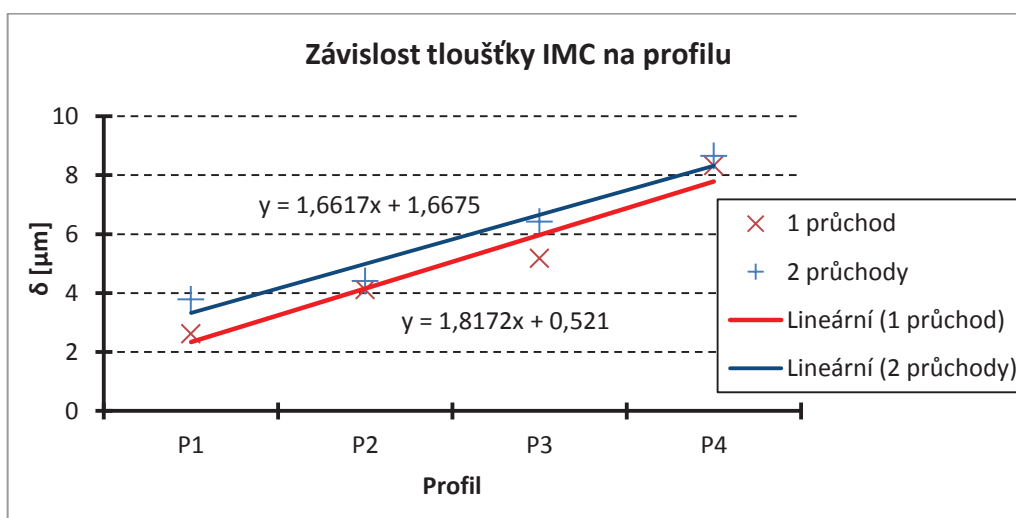
Pokud tyto naměřené hodnoty tloušťek IMC vrstev vyneseme do grafu (Obr. 42) společně s naměřenými hodnotami pro desky vystavené druhému průchodu zjistíme, že tloušťka neodpovídá sečtení obou integrálů a tedy nelze aplikovat sčítání integrálů. Výsledná tloušťka IMC vrstvy je průměrně o 15 % větší než je tomu u jednoho průchodu.

Nárůst tloušťky může být způsoben dvěma mechanismy. V prvním případě může docházet k částečnému rozpuštění IMC vrstvy a tvorbě nové vrstvy tlustší o přibližně 15 %. V druhém případě nedochází během druhého přetavení k rozpuštění IMC vrstvy, ale k růstu IMC vrstvy skrz původní vrstvu o 15 %.

Pravděpodobnější je druhá možnost, jelikož IMC sloučeniny mají vyšší teplotu tavení a nemělo by tedy docházet k rozpuštění vrstvy v pájce. Významný bude pravděpodobně mechanismus difuze a velký vliv bude mít i morfologie IMC sloučeniny. Studium tohoto mechanismu by mohlo být námětem dalších prací.

Tab. 11 - Tabulka tloušťek IMC pro 2 průchody

Profil	δ [μm]
P1	3,79
P2	4,41
P3	6,43
P4	8,66

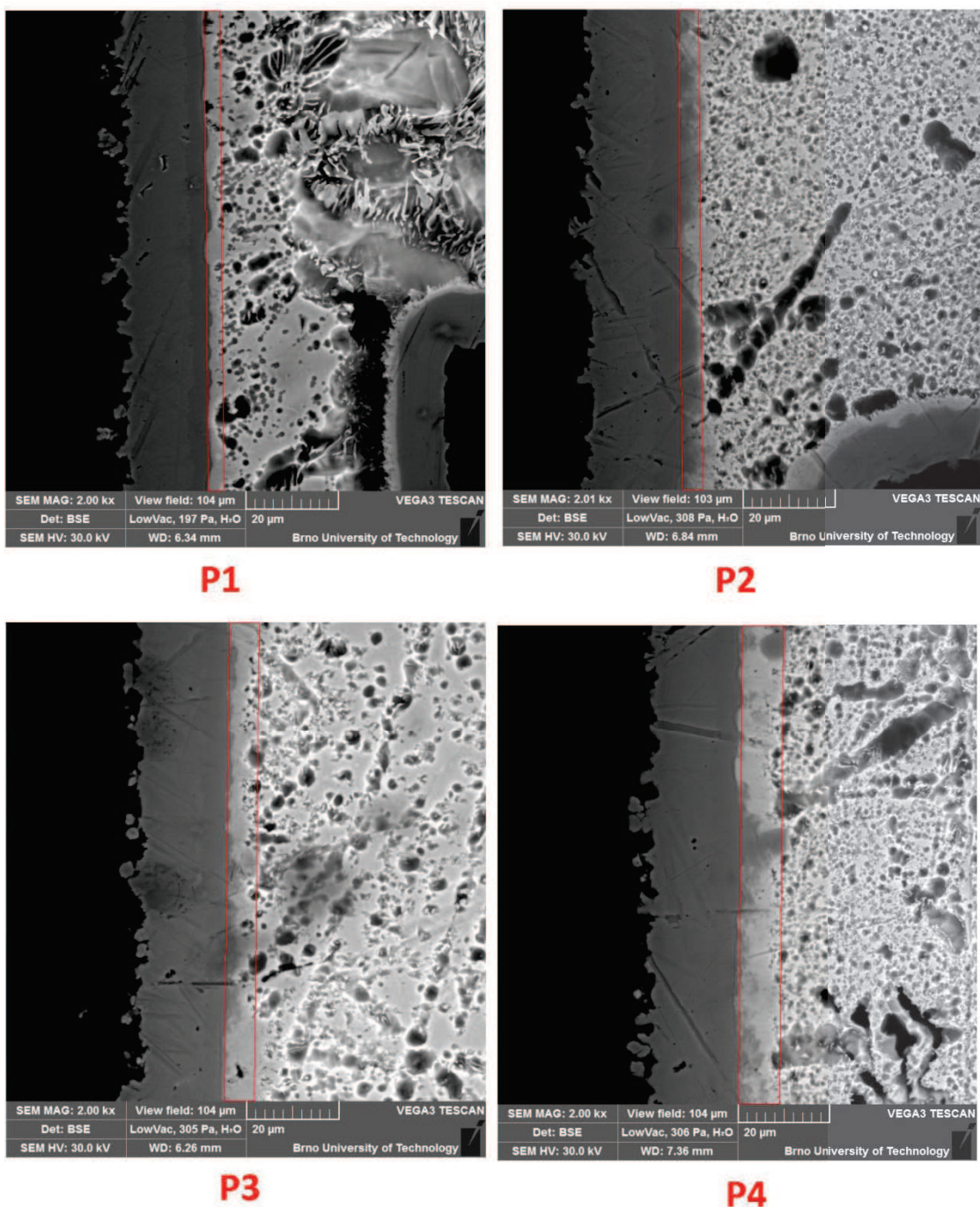


Obr. 42 - Graf závislosti tloušťky IMC na přetavovacím profilu

Zkoumáním vzorků vystavených izotermickému stárnutí jsme zjistili přírůstek IMC vrstvy. Rozdíl mezi stárnutými a nestárnutými deskami je uveden v Tab. 12.

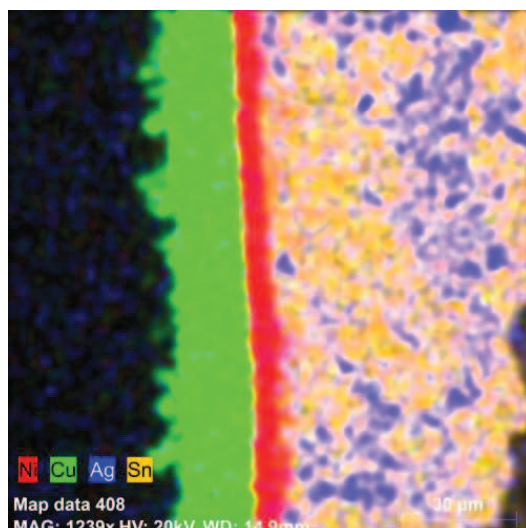
Tab. 12 - Hodnoty IMC vrstvy před a po stárnutí

Stárnutí [h]	δ [μm]	
	DPS 1.2	DPS 2.2
0	2,63	4,12
209	4,45	5,84



Obr. 43 - Obrázky elektronové mikroskopie vzorků DPS x.4 (2 průchody)

Pomocí rentgenového záření vznikajícího při dopadu elektronového svazku jsme provedli zkoumání materiálového složení vybraného vzorku, viz Obr. 44. Na tomto snímku můžeme vidět vrstvu mědi, na které je nanesena vrstva niklu, na kterou navazuje pájka. Jelikož pájení probíhalo pájkou SAC305 je v oblasti pájky, která je tvořena hlavně cínem vidět rozpuštěné stříbro. Na vrstvě niklu je nanesena tenká vrstva zlata, která se během pájení velmi rychle rozpustila v pájce. Obsah zlata je tak malý, že jsme ho nebyli schopni při analýze zaznamenat.

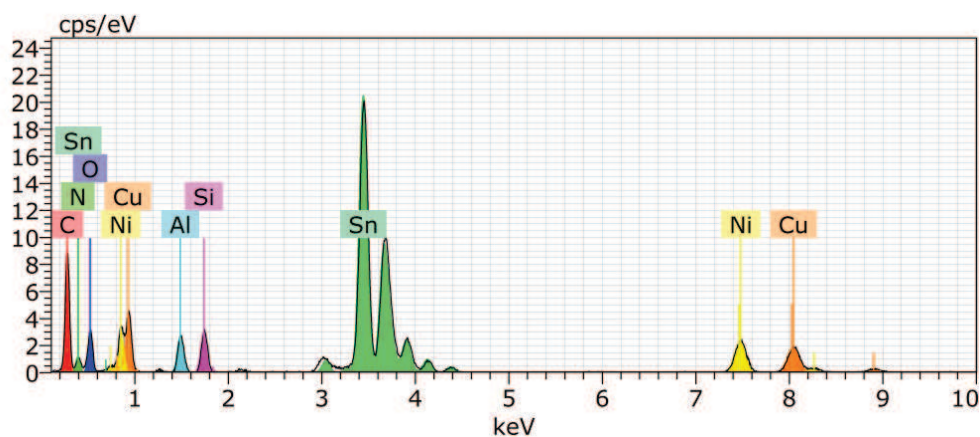


Obr. 44 - Materiálový obraz vzorku DPS 1.1

Dále byla provedena materiálová analýza IMC vrstvy. Výsledky této analýzy jsou uvedeny v Tab. 13. Z výsledků této analýzy je patrný poměr mezi niklem a cínem, který neodpovídá žádné známé intermetalické sloučenině niklu a cínu ($(Cu, Ni)_6Sn_5$, $(Cu, Ni)_3Sn_4$). Tento výsledek přináší domněnku, že námi sledovaná vrstva nemusí být intermetalická sloučenina, byť její růst a vlastnosti odpovídají IMC vrstvám. Tyto výsledky mohou být zatíženy velkou chybou, jelikož docházelo k rozptylování elektronového svazku ve vodních parách.

Tab. 13 - Výsledky materiálové analýzy IMC vrstvy

Prvek	Objem [%]
Cín	38,58
Uhlík	27,21
Kyslík	9,97
Měď	7,35
Dusík	6,94
Nikl	6,86
Hliník	1,7
Křemík	1,39



Obr. 45 - Energiově disperzní rentgenová analýza složení

5.2 Vyhodnocení kvality pájených spojů RTG zářením

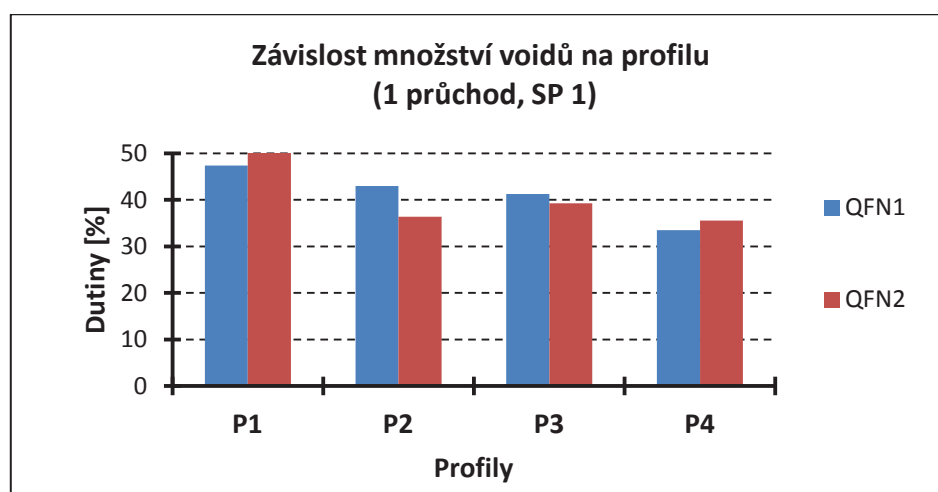
Kontrola vzorků byla prováděna na zařízení Phoenix X-ray Micromex DXR-HD, umístěném na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně. Při kontrole pomocí RTG záření jsme se zaměřili na pouzdra QFN, konkrétně na jejich chladicí plošky umístěné pod pouzdry.

Pomocí programu dodaného k zařízení bylo vypočteno množství dutin, neměřené hodnoty jsou obsaženy v Tab. 20 umístěné v příloze. Tyto hodnoty jsou rozděleny pro standardní pájecí pastu (SP 1) při jednom a dvou průchodech přetavovací pecí a pro pastu s definovaným nižším výskytem dutin (SP 2), viz Tab. 14.

Tab. 14 - Hodnoty množství dutin chladicí plošce

Profil	Q_{η} [s·°C]	SP 1	SP 1	SP 2
		1 průchod	2 průchody	1 průchod
		Množství dutin [%]		
P1	161	48,8	46,5	45,7
P2	573	39,7	38,7	39,8
P3	996	40,3	32,2	36
P4	1340	34,5	30,3	35,9

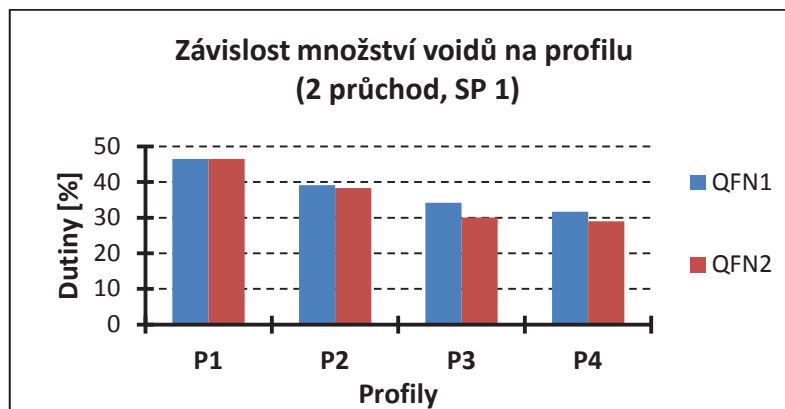
Hodnoty uvedené výše jsou vyneseny do následujících grafů. Na Obr. 46 je vynesena závislost množství dutin pro jednotlivé přetavovací profily pro standardní pastu (SP 1) a jeden průchod přetavovací pecí. Na Obr. 47 je vynesena stejná závislost, ale pro dva průchody přetavovací pecí. Na Obr. 48 je závislost pro pájecí pastu s předpokládaným nižším výskytem dutin (SP 2).



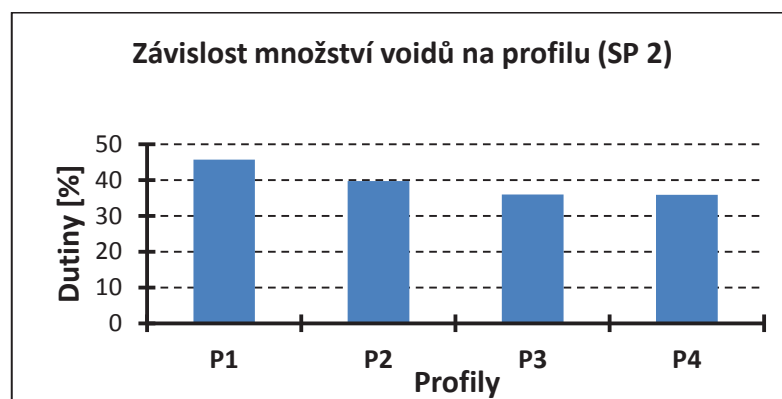
Obr. 46 - Množství dutin pro standardní pastu SP 1 a jeden průchod

Z naměřených hodnot jasně vyplývá, že čím je delší prodleva nad teplotou tavení pájky, tím pájený spoj obsahuje menší množství dutin. To je způsobeno zřejmě tím, že plyny uvolňující se během procesu přetavení mají při delší prodlevě na teplotou tavení delší dobu na to, aby se dostaly z pájeného spoje k povrchu. Naopak při krátké prodlevě nad liquidem se nestihnou dostat z pájeného spoje. Na Obr. 49 jsou znázorněny záběry dutin vždy u první DPS v každém profilu (x.1). Za povšimnutí stojí záběry DPS 1.1, kdy je v pájeném spoji velké množství malých dutin, které se nestihly během krátké doby nad teplotou tavení pájky spojit

ve větší dutiny. Při druhém průchodu této DPS přetavovací pecí již množství malých dutin není tak velké, protože dutiny měly více času na spojení.



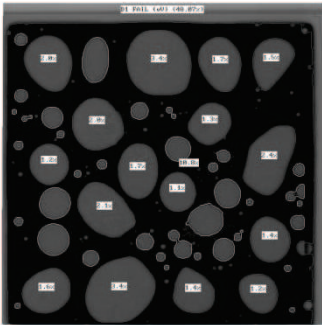
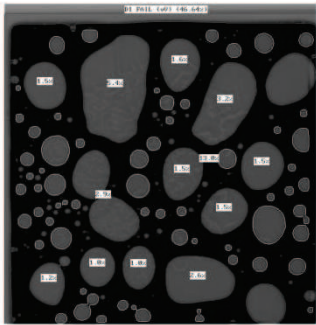
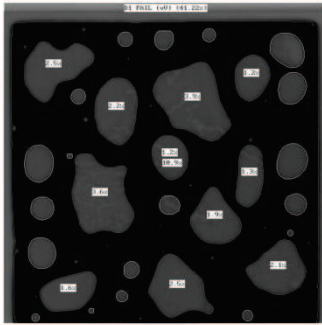
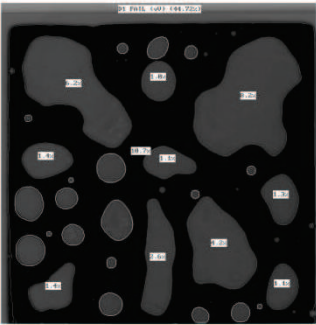
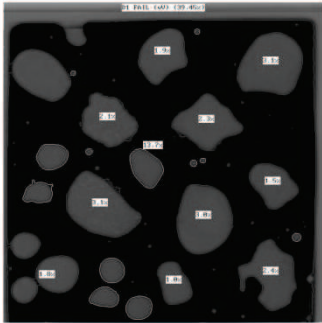
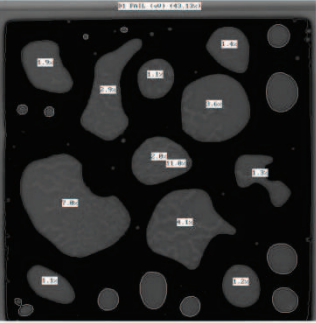
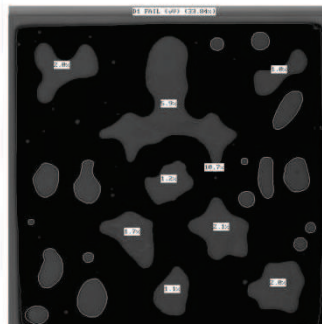
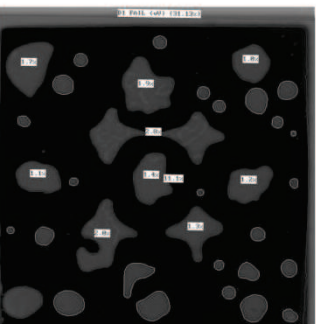
Obr. 47 - Množství dutin pro standardní pastu SP 1 a dva průchody



Obr. 48 - Množství dutin pro pastu s nižším výskytem dutin SP 2

Při použití pasty odolnější na tvorbu dutin jsme očekávali nižší výskyt dutin. Při srovnání jsme ovšem zjistili, že obě pasty dosahují při prvním a druhém profilu (P1, P2) srovnatelných výsledků. U třetího a čtvrtého profilu (P3, P4) dokonce pasta s deklarovaným nižším výskytem dutin obsahuje více dutin než standardní pasta, viz Tab. 14. Při podrobném zkoumání past jsme zjistili, že u SP 2 je definován nižší výskyt dutin oproti předcházející generaci past, ovšem SP 1 nepochází z této generace a tudíž porovnání není možné. Všechny odměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 20 umístěné v příloze.

Množství dutin v chladicí plošce pod pouzdem QFN lze ovlivnit mnoha vlivy. Z našich poznatků výše lze množství dutin ovlivnit přetavovacím profilem. Důležitým parametrem jsou vlastnosti pájecí pasty, která může být při dlouhém vystavení vzduchu znehodnocena vzdušnou vlhkostí. V neposlední řadě lze výskyt dutin ovlivnit návrhem DPS a šablony pro tisk pájecí pasty. Například lze rozdělit pájecí plochu pomocí nepájecí masky na více částí, do kterých natiskneme pájecí pastu. Lze použít i otvory skrz DPS, pomocí kterých uniknou vzniklé plyny při přetavení.

DPS	IO1	IO2
1.1	 48,08 %	 46,64 %
2.1	 41,22 %	 44,72 %
3.1	 39,45 %	 43,13 %
4.1	 33,84 %	 31,13 %

Obr. 49 - Záběry dutin pod pouzdry QFN (DPS x.1)

5.3 Vyhodnocení zkoušek stříhem

Zkoušky stříhem probíhaly na zařízení DAGE 2400 (Obr. 50). Střih součástky probíhá pomocí speciálního trnu, který umístíte do blízkosti pouzdra. Po spuštění se trn dotkne DPS a vyjede do definované výšky. Následně se pohybuje definovanou rychlostí k součástce, do které začne tlačit až do odtržení součástky. Zařízení zaznamená maximální sílu stříhu.

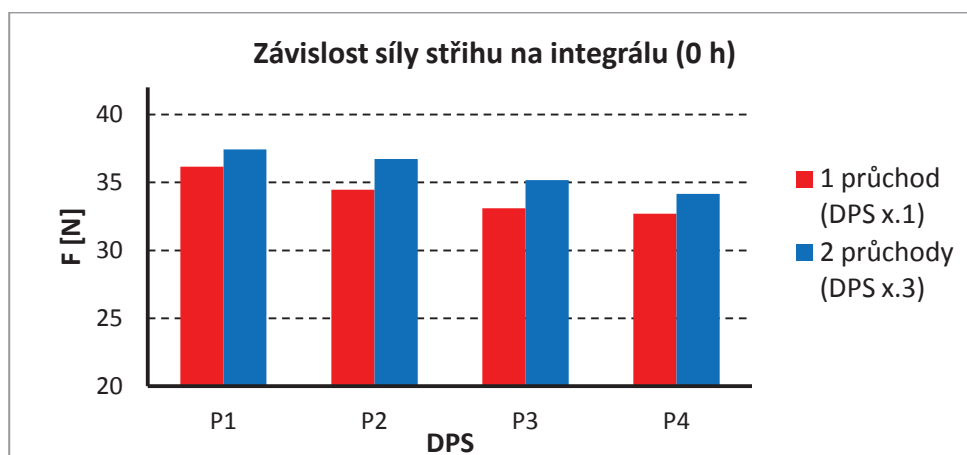
Nastavení parametrů stříhu:

- Rychlost stříhu: 17 $\mu\text{m/s}$
- Výška stříhu: 150 μm
- Rozsah: 100 N



Obr. 50 - DAGE 2400

Všechny součástky byly odtrženy mezi pájeným spojem a součástkou. K delaminaci pájecí plošky od základního materiálu ani v jednom případě nedošlo, a došlo tak k potvrzení našeho předpokladu při návrhu pájecích bodů. Tabulky naměřených hodnot zkoušek stříhem jsou umístěny v příloze.



Obr. 51 - Závislost síly stříhu pro DPS x.1 a x.3

Na Obr. 51 je vynesena závislost síly stříhu pro nestárnuté testovací desky. Z obrázku je vidět, že síla stříhu se zmenšuje s hodnotou dodaného integrálu pro desky zapájené jedním průchodem, ale i dvěma průchody. Na Obr. 51 je také vidět rozdíl mezi testovacími deskami zapájenými jedním a dvěma průchody přetavovací pecí, kdy desky zapájené dvěma průchody

dosahují větší pevnosti a to o 3 až 6,5 %, viz Tab. 15. Tento rozdíl může být způsoben tím, že při druhém přetavení sice dojde k růstu IMC vrstvy, ale zároveň pravděpodobně dochází ke změnám ve struktuře a tím ke zvýšení pevnosti spoje.

Tab. 15 - Průměrné hodnoty síly stříhu a rozdíly

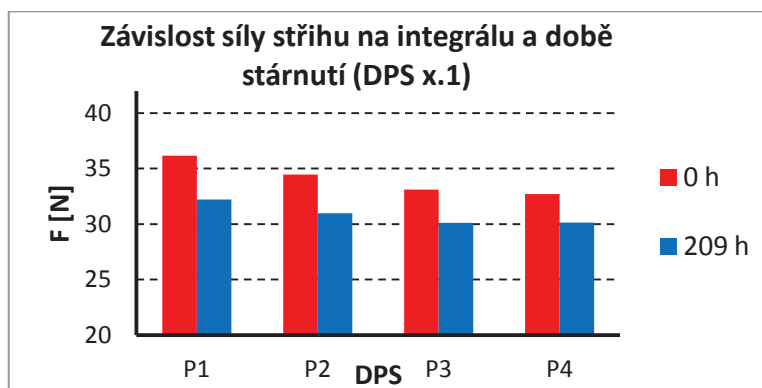
	F_1 [N]	F_2 [N]	ΔF [N]	ΔF [%]
P1	36,17	37,43	1,26	3,5
P2	34,47	36,72	2,25	6,5
P3	33,10	35,18	2,08	6,3
P4	32,71	34,16	1,45	4,4

Tab. 16 - Průměrné hodnoty síly stříhu v časech stárnutí

	F_0 [N]	F_{70} [N]	F_{140} [N]	F_{209} [N]	$F_0 - F_{209}$ [N]	ΔF [%]
P1	36,17	39,50	40,34	32,23	3,94	12,2
P2	34,47	35,97	44,67	30,98	3,49	11,3
P3	33,10	39,84	44,53	30,12	2,98	9,9
P4	32,71	36,48	46,41	30,14	2,57	8,5

V následujícím grafu na Obr. 52 jsou vyneseny výsledky pro nestárnuté (0 hodin) a stárnuté vzorky po skončení stárnutí (209 hodin). V tomto grafu jsou záměrně vynechány hodnoty v časech stárnutí 70 a 140 hodin, jelikož jsou umístěny v jiné části testovací desky, a při měření teplotních profilů jsme zjistili, že tyto odpory dosahovaly větších hodnot integrálu a porovnání by tak nebylo možné z důvodů vytvoření odlišné tloušťky IMC vrstvy. Z výsledků vyplývá, že během stárnutí simulující 2,25 roku při teplotě 60 °C došlo k degradaci pájených bodů, která se projevila snížením pevnosti spoje v rozmezí 8,5 až 12,2 %.

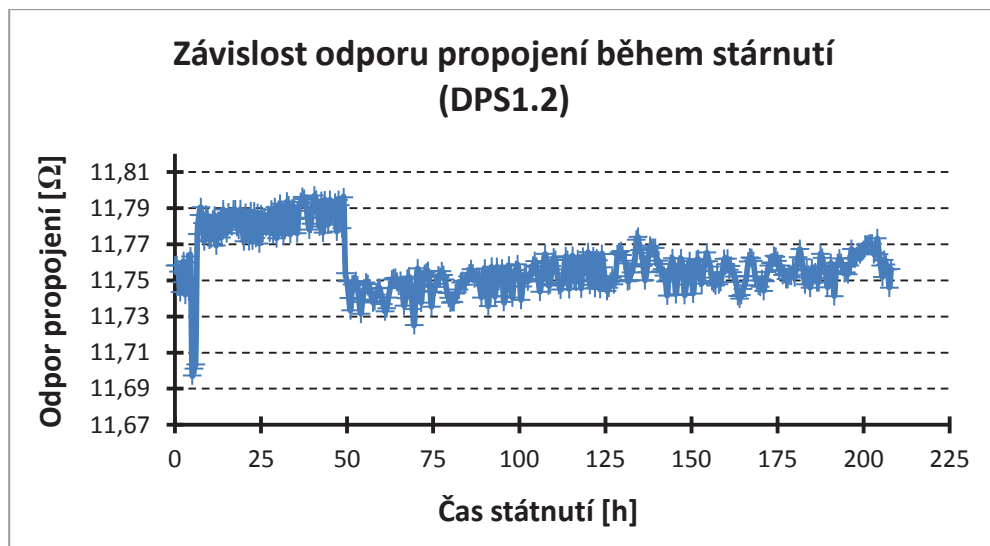
Zajímavé je porovnání poklesu pevnosti u jednotlivých přetavovacích profilů u stárnutých DPS, které naznačuje, že s rostoucím integrálem dodané energie, tedy i tloušťkou IMC vrstvy dochází k menšímu poklesu pevnosti. Tento rozdíl je způsoben přírůstkem IMC vrstvy během izotermického stárnutí, kdy u silnějších vrstev IMC je přírůstek vrstvy pomalejší. Viz Obr. 52.



Obr. 52 - Závislost síly stříhu pro DPS x.1 a stárnutí

5.4 Vyhodnocení izotermického stárnutí

Pomocí konektoru WAGO umístěného na testovací desce byly připojeny desky k měřicímu přístroji Agilent 34972A s 20 kanálovou kartou. Tímto přístrojem jsme měřili teplotu v izotermické komoře a odpor zapojených pouzder dvoubodovou metodou. Měření probíhalo každých 30 minut. Izotermické stárnutí probíhalo za teploty 125 °C po dobu 209 hodin v komoře CHIRANA HS 61A.



Obr. 53 - Průběh odporu zapojení během stárnutí

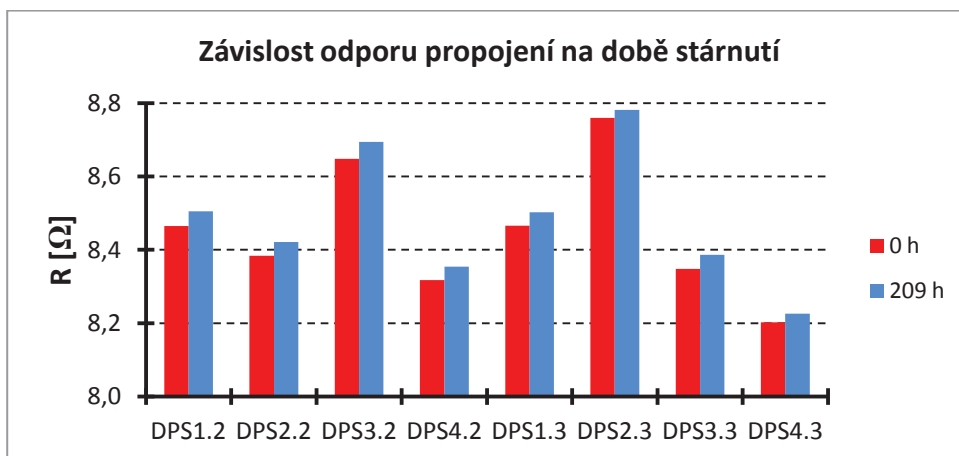
Na Obr. 65 umístěném v příloze jsou vyneseny naměřené hodnoty odporu pro desky, které prošly přetavením jednou. Více detailů je vidět, pokud zobrazíme pouze jeden průběh, viz Obr. 53. Pomineme-li oblast od začátku měření až do hodnoty 50 hodin, kdy docházelo ke korekci teploty, můžeme vidět, že odpor zapojení lineárně roste s časem.

Před začátkem stárnutí (0 hodin), v čase 70 hodin, 140 hodin a po skončení stárnutí (209 hodin) byl změřen odpor desek při teplotě okolí. U každé desky byl změřen odpor 20 krát. Naměřené hodnoty byly zprůměrovány a jsou uvedeny v Tab. 17 a vyneseny do grafu na Obr. 54.

Tab. 17 - Změřené hodnoty odporů při teplotě okolí

Čas [h]	T [°C]	DPS1.2	DPS2.2	DPS3.2	DPS4.2	DPS1.3	DPS2.3	DPS3.3	DPS4.3
0	19,66	8,465	8,384	8,648	8,317	8,465	8,759	8,348	8,202
70	22,96	8,618	8,529	8,801	8,460	8,601	8,904	8,484	8,340
140	23,32	8,637	8,541	8,815	8,475	8,621	8,911	8,499	8,355
209	19,70	8,505	8,421	8,694	8,354	8,502	8,781	8,386	8,226
$R_{209}-R_0$ [Ω]		0,041	0,037	0,046	0,037	0,037	0,022	0,038	0,024

V tomto případě se vyplatilo spolu s hodnotami odporů měřit teplotu, při které probíhalo měření. Při pohledu do Tab. 17 vidíme, že měření v čase 70 hodin probíhalo při teplotě větší o 2,3 °C a při 140 hodinách dokonce o 2,6 °C. Tento rozdíl způsobil, že hodnoty odporů těchto měření jsou podstatně větší oproti ostatním hodnotám. Z Obr. 54 je patrný růst odporu zapojení během stárnutí mimo měření po skončení stárnutí, kdy je odpor nepatrně vyšší než při prvním měření. Změna odporu před a po stárnutí je v řádu desetin Ω. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 17.



Obr. 54 - Závislost odporu propojení na čase stárnutí při teplotě okolí

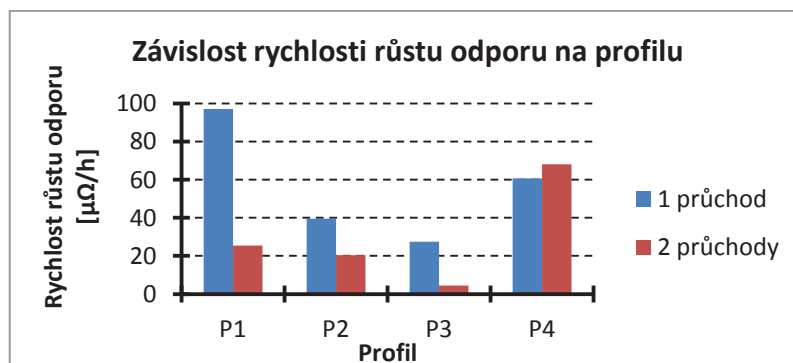
Z Obr. 53 je patrné, že růst odporu zapojení po celou dobu izotermického stárnutí lineárně roste. V Tab. 18 jsou uvedeny rychlosti růstu odporu jednotlivých desek. Tyto hodnoty byly získány z průběhu od hodnoty 50 hodin.

Tab. 18 - Rychlosti růstu odporu při stárnutí

DPS	1.2	2.2	3.2	4.2	1.3	2.3	3.3	4.3
Rychlost růstu odporu [$\mu\Omega/h$]	97,1	39,5	27,5	60,7	25,4	20,4	4,53	68

Hodnoty z Tab. 18 jsou vyneseny do grafu na Obr. 55, ze kterého je patrné, že hodnota rychlosti růstu odporu klesá s rostoucím integrálem teploty a času. To je způsobeno tím, že při vyšších hodnotách integrálu se vytvoří silnější vrstva intermetalické sloučeniny (viz Obr. 40), která zpomaluje další růst IMC vrstvy a tím i růst odporu.

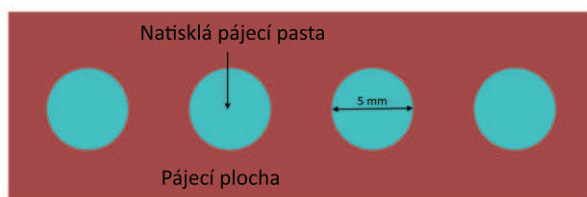
Pro desky, které byly vystaveny druhému průchodu přetavovací pecí, je rychlost růstu menší než u desek, které prošly přetavením jenom jednou. To je způsobeno přírůstkem IMC vrstvy během druhého přetavení. Tyto závěry neplatí pro hodnoty měřené na deskách pájené největším integrálem. Tato anomálie se nám nepovedla objasnit a bylo by vhodné podrobně analyzovat příčinu, eventuálně měření zopakovat.



Obr. 55 - Závislost rychlosti růstu odporu na profilu

5.5 Vyhodnocení testu roztékavosti

Testování roztékavosti pájky probíhalo na navrhnuté testovací desce. Na pájecí plochu, byly natisknuty přes šablonu čtyři kruhové motivy o průměru 5 mm. Následně byly testovací DPS zapájeny dle připravených profilů.



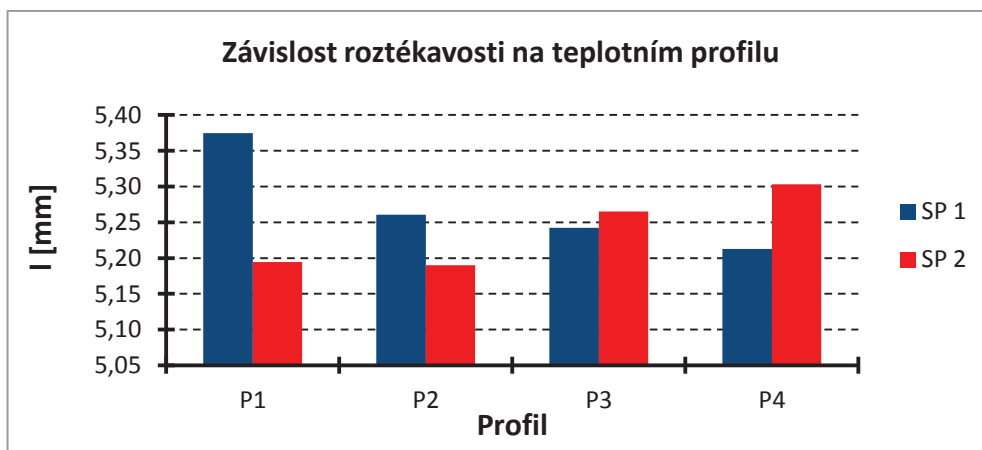
Obr. 56 - Schéma testu roztékavosti

Měření probíhalo pomocí optického mikroskopu OLYMPUS SZ61 a programového vybavení, pomocí kterého byly změřeny rozměry rozteklé pájky (bez prstence). Každý motiv na testovací ploše byl změřen 4 krát, viz Tab. 24 a zprůměrován dle teplotních profilů a desek. Tyto výsledky jsou uvedeny v Tab. 19 a vyneseny do závislosti na teplotních profilech, Obr. 57.

Tab. 19 - Naměřené hodnoty roztékavosti

Profil	Roztékavost [mm]		
	SP 1 (1 průchod)	SP 1 (2 průchody)	SP 2 (1 průchod)
P1	5,37	5,31	5,19
P2	5,26	5,26	5,19
P3	5,24	5,29	5,27
P4	5,21	5,30	5,30

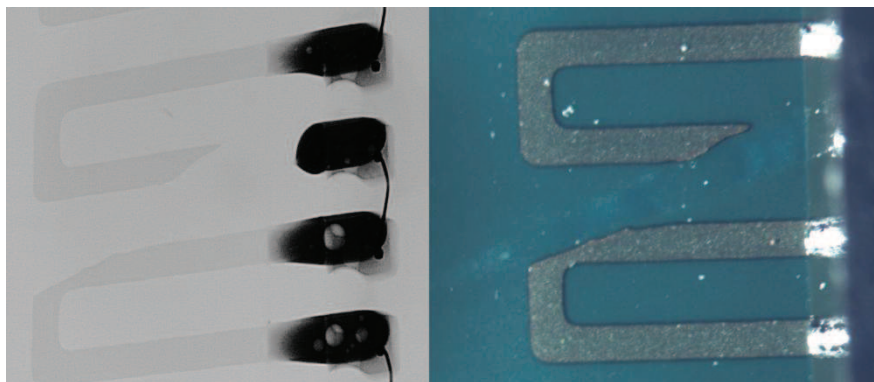
Ze závislostí na Obr. 57 jsou patrné rozdíly v roztékavosti použitých past. SP 1 (standardní) vykazuje nejlepší roztékavost při teplotním profilu P1 (nejmenší Q_{η}). S dalším zvětšováním integrálů klesala roztékavost pájky. Naopak u SP 2 vykazovala pájka při teplotním profilu P1 nejmenší roztékavost. Při zvětšování integrálu docházelo ke zlepšování roztékavosti. Tento rozdíl v roztékavosti je způsoben rozdílnou aktivitou použitých tavidel v pájecí pastě, konkrétně rozdílným obsahem halidů.



Obr. 57 - Závislost roztékavosti na teplotním profilu přetavovací pece

5.6 Defekty na DPS

Na zapájených testovacích deskách se nevyskytl kromě dutin, žádný defekt pájených spojů. Ovšem na testovací desce DPS 3.1 se vyskytl problém u pouzdra IO1 (QFN), které nebylo propojené. Podrobným zkoumáním jsme objevili chybu v podobě přerušené cesty v blízkosti pájeného spoje. Tento defekt je zobrazen na Obr. 58. S největší pravděpodobností byl způsoben během výroby DPS při litografickém procesu, kdy na masce zůstaly nečistoty, které byly přeneseny na DPS.



Obr. 58 - Snímky defektu cesty získané pomocí RTG záření a optické mikroskopie

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala vlivy integrálu teploty a času nad teplotou tavení pájky na vlastnosti a kvalitu pájených spojů. Měření vlastností pájených spojů probíhalo pomocí mikrovýbrusů a elektronové mikroskopie, zkoušek stříhem, izotermické stárnutí a optické mikroskopie.

Teoretický úvod diplomové práce se zabývá popisem technologie pájení přetavením, intermetalickými sloučeninami, integrálem teploty a času nad teplotou tavení pájky, vlivem integrálu na intermetalické vrstvy a spolehlivost pájeného spoje, dále optimalizací přetavovacího profilu s ohledem na integrál a realizací optimálního integrálu.

V praktické části jsme vytvořili návrh testovací desky obsahující dvě pouzdra QFN, 40 odporů velikosti 0805 a konektor. V dalším kroku jsme pomocí DPS vytvořené v laboratorních podmínkách nastavili 4 přetavovací profily, které sloužily pro zapájení jednotlivých desek a jejich kombinací, dle naplánovaného schématu. Další kapitola popisuje podrobně technologický postup osazování testovacích desek ve výrobních podmínkách společnosti Honeywell. Součástí této části je i vyhodnocení výsledků SPI získaných během výroby, z kterých vyplývá, že SP 2 dosahuje nepatrně horších výsledků při tisku. Velký rozdíl v tisku pájecí pasty je vidět při srovnání výsledků SPI pro odpory a pouzdra QFN. Tento rozdíl je způsoben velikostí apertur v šabloně pro pouzdra odporů a pouzder QFN. U pouzder QFN, kde je apertura menší než u odporů, dochází k horšímu tisku vlivem adheze pájecí pasty ke stěnám apertury. Tento jev je u větších apertur zanedbatelný.

Při zkoumání IMC vrstvy bylo zjištěno, že tloušťka IMC vrstvy lineárně roste s rostoucím integrálem pro jeden i pro dva průchody. Při druhém přetavení tloušťka IMC vrstvy vzroste přibližně o 15 %. Tento jev může být způsoben dvěma principy, které jsou zmíněny v této práci. Byla provedena i materiálová analýza IMC vrstvy, kde bylo zjištěno, že složení této vrstvy neodpovídá žádné známé intermetalické sloučenině niklu a cínu. Tento výsledek přináší domněnku, že námi sledovaná vrstva není intermetalická sloučenina, byť její růst a vlastnosti odpovídají IMC vrstvám.

U vybraných vzorků jsme provedli zkoušky stříhem odporů 0805. Při pokusech se potvrdil předpoklad, že při zvětšení plošky mědi jsme zabránili delaminaci pájecí plošky ze základního materiálu. Z výsledků pokusu bylo zjištěno, že s rostoucím integrálem teploty a času nad teplotou tavení pájky (tím i rostoucí vrstva IMC) klesá pevnost pájených spojů. Dále byl zjištěn fakt, že u desek, které prošly dvojnásobným přetavením neklesá pevnost, jak by se dalo usuzovat z přírůstku IMC vrstvy, ale pevnost pájených spojů je větší. To je pravděpodobně způsobeno tím, že během druhého přetavení se spolu s přírůstkem mění struktura, což má pozitivní vliv na pevnost pájeného spoje.

Míru roztékavosti pájky jsme určili dle průměru, do kterého se pájka roztékla. Z naměřených výsledků jsme zjistili, že SP 1 dosahuje s rostoucím integrálem horší roztékavosti. Naopak je tomu u SP 2, která s rostoucím integrálem dosahuje lepší roztékavosti. Tento rozdíl u použitých pájek může být způsoben rozdílnou aktivitou tavidel.

Množství dutin v pájeném spoji jsme vyhodnocovali pomocí rentgenového záření u chladičské plošky pouzdra QFN. Ze zjištěných dat je patrná závislost množství dutin na integrálu, která udává, že čím je větší integrál, tím méně dutin pájený spoj obsahuje. Tento fakt platí pro obě pájecí pasty. Při srovnání desek, které byly vystaveny dvojnásobnému přetavení jsme zjistili menší výskyt dutin, který je s největší pravděpodobností způsoben delší prodlevou pájky v roztaveném stavu, kdy mají plyny možnost uniknout z pájeného spoje. U SP 2 s deklarovaným nižším výskytem dutin nebyl zaznamenán rozdíl oproti SP 1. Při

zkoumání past jsme zjistili, že u SP 2 je definován nižší výskyt dutin oproti předcházející generaci past, ovšem SP 1 nepochází z této generace a tudíž porovnání není možné.

U části vzorků jsme provedli izotermické stárnutí při teplotě 125 °C po dobu 209 hodin. Toto stárnutí simuluje podmínky při teplotě 60 °C po dobu 2,25 roku. Z výsledků stárnutí jsme zjistili, že odpor pájených spojů se během stárnutí lineárně zvětšoval, což je způsobeno přírůstkem IMC vrstvy během stárnutí. Tento přírůstek máme i podložen mikrovýbrusy stárnutých vzorků. Pomocí zkoušek stříhem jsme zjistili, že tento přírůstek IMC vrstvy zhoršuje mechanické vlastnosti pájeného spoje.

Z poznatků získaných během diplomové práce vyplývá několik doporučení pro výrobu elektroniky. Pro danou materiálovou kombinaci doporučujeme držet hodnotu integrálu teploty a času nad teplotou tavení pájky na co nejnižší hodnotě. Při malé hodnotě se vytvoří optimální IMC vrstva, která má nejlepší mechanické i elektrické vlastnosti. Tyto vlastnosti mohou být degradovány vlivy, které jsme potvrdili v této práci. Konkrétně se jedná o dvojnásobné přetavení a stárnutí při zvýšené teplotě.

V další práci by bylo vhodné se zaměřit na oblast nízkých integrálů a zjistit nejnižší možnou hodnotu, při které se vytvoří dostatečně spolehlivý pájený spoj a popřípadě i studiu vlivu morfologie a růstu IMC vrstvy.

Použitá literatura

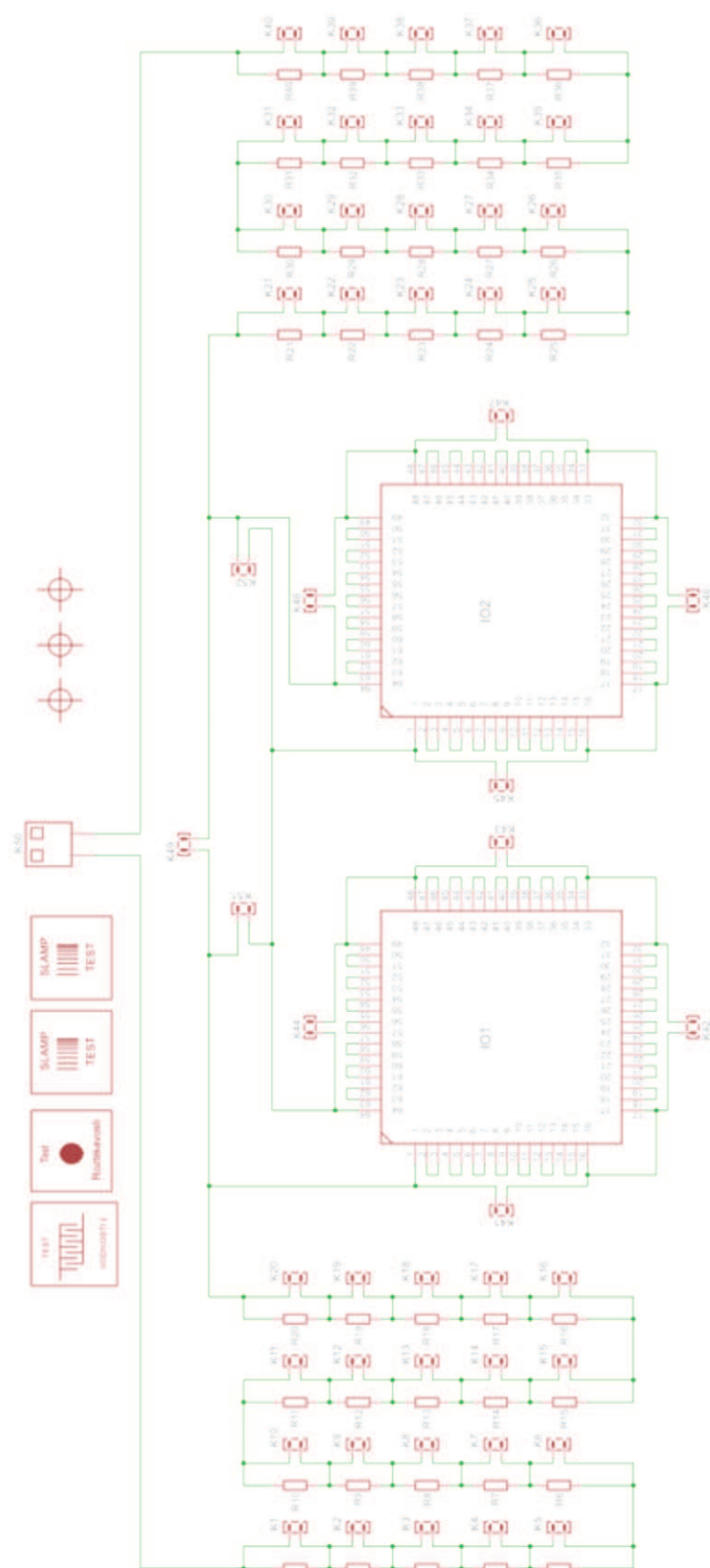
- [1] SHENG, X. J., Han DING, Y.H. YIN a Y.P. WU. A reflow soldering retro-design systém for rework station based on Q-factor. IEEE Xplore: Digital Library [online]. s. 8 [cit. 2014-09-26]. DOI: 0-7803-8806. Dostupné z: Databáze IEEE
- [2] BO, Tao, Yin ZHOUPING, Ding HAN a Wu YIPING. Mechanical Reliability Estimation for μ BGA Solder Joints Based on Heating factor $Q\eta$ [online]. National Key Laboratory of Digital Equipment and Technology, 2008 [cit. 2014-09-26]. ISBN 978-1-4244-2740. Dostupné z: Databáze IEEE. Huazhong University of Science and Technology.
- [3] DAU, Jin Gang, Yi Ping WU, Han DING, Nian Hong WAN. Thermal profiling: a reflow process based on the kation factor [online]. [cit. 2014-09-30]. 0954-0911. Dostupné z: databáze Emerald Group Publishing Limited
- [4] FENGSHUN, Wu, Chen LI, Wu BOYI a Wu YIOING. Effects of heating factors on the geometry size of unrestricted lead-free joints. [online]. [cit. 2014-10-01]. DOI: 0-7803-8203-X. Dostupné z: Databáze IEEE
- [5] GAO, Jin Gang, Yi Ping WU a Han DING. Optimization of a reflow soldering processbased on the heating factor. [online]. [cit. 2014-10-03]. DOI: 10.1108/1108/09540910710748131. Dostupné z: Database IEEE
- [6] HWANG, Jennie S. *Modern solder technology for competitive electronics manufacturing*. New York: McGraw-Hill, 1996, xlv, 622 p. ISBN 00-703-1749-6.
- [7] TARR, Martin. Intermetallics. *University of Bolton: Online Postgraduate Courses for the Electronics Industry* [online]. [cit. 2014-10-07]. Dostupné z: http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0156_intm/
- [8] PODZEMSKÝ, Jiří. *STRUKTURA SPOJŮ PÁJENÝCH PÁJKAMI BEZ OLOVA A JEJÍ VLIV NA VNĚJŠÍ VZHLED SPOJE* [online]. ČVUT; [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/podzemsky.pdf>
- [9] TAO, Bo, Yiping WU, Han Ding DING a Y. L. Xiong XIONG. *A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor Qg* [online]. Huazhong University of Science and Technology, 2005 [cit. 2014-10-18]. Microelectronics Reliability 46 (2006) 864–872. Dostupné z: Databáze IEEE. School of Mechanical Engineering.
- [10] Nebezpečí vyplývající ze znečištění pájecí slitiny. ABE.TEC, s.r.o. *SMT centrum* [online]. 2010. vyd. 2010 [cit. 2014-10-19]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/nebezpeci-vyplyvajici-ze-znecisteni-pajeci-slitiny/>
- [11] BO, Tao, Yin ZHOUPING, Ding HAN a Wu YIPING. Reflow profile optimizationof μ BGA solder joints considering reflow temperature and time coupling. *Soldering* [online]. 2009, vol. 21, issue 4, s. 38-44 [cit. 2014-10-26]. DOI:10.1108/09540910910989420 Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/>
- [12] FREAR D.R., JANG J.W., LIN J.K., ZHANG C. *Pb-Free Soldersfor Flip-Chip Interconnects*. [online]. 2001. Dostupné z: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0106/Frear-0106.html>
- [13] SUGANUMA, K. *Lead-free soldering in electronics*. 1th printing, 2004. ISBN 0-8247-4102-1.
- [14] LUCAS, J.P. a H. RHEE. Mechanical Properties of Intermetallic Compounds Associated with Pb-Free Solder Joints Using Nanoindentation. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS* [online]. 2003, roč. 12, č. 32 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://guofuedu.org/data/upload/LucasHREE-IMC_ZEEOk2.pdf
- [15] MACH, L. Vliv množství pájky a izotermálního stárnutí na vodivost pájeného spoje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2012. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý Ph.D..
- [16] Mach, Pavel; Skočil, Vlastimil; Urbánek, Jan. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3. [cit 18. 3. 2014]
- [17] J. Starý, P. Kahle, *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 208 stran.

- [18] Heat Conduction. In: *Hyperphysics* [online]. [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatra.html>
- [19] ABEL, Martin. *SMT: Technologie povrchové montáže*. 1. vyd. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000, 246 s. ISBN 80-902-7331-9.
- [20] Virtuální laboratoř: Depozice materiálů šablonovým tiskem. *Multimediální výukový systém* [online]. Brno VUT FEKT [cit. 2014-11-05]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/virtualni-laborator/sablonovy-tisk/technologie/>
- [21] Tryskové dávkovací systémy. WWW.EFD-INC.COM. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010. vyd. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tryskove-davkovaci-systemy.html>
- [22] DOSEDLA, Milan. *Vliv integrálu teploty a času na kvalitu pájeného spoje* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace>. Bakalářská práce. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [23] TOPLINE. *BGA208T.8-DC170* [online]. TopLine, 2006, 2 s., 06/2006. Dostupné z: <http://www.topline.tv/drawings/pdf/BGA%200.8mm%20pitch/BGA208T.8-DC170D.pdf>
- [24] TOPLINE. *64L QFN DAISY CHAIN* [online]. TopLine. Dostupné z: http://www.topline.tv/drawings/pdf/QFN_Daisy_Chain/QFN64_Daisy_Chain.pdf
- [25] Dentacryl technický: metylmetakrylátová licí pryskyřice pro technické použití. In: Elchemco: dodáváme materiály pro elektroniku, elektrotechniku, strojírenství, pro modeláře, výtvarníky a designery, kutily, vynálezce. [online]. [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://web.elchemco.cz>
- [26] MARTYKÁNOVÁ, Eva. *Rtg záření, jeho vlastnosti a využití* [online]. Brno, 2007 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/84466/pedf_m/rtg_zareni_diplomka.pdf. Diplomová práce. MU Brno. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
- [27] IPC-SM-785. Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments. Northbrook, Illinois: IPC, 1992.
- [28] YANG, G., *Lifecycle reliability engineering*. JohnWiley&Sons, Inc., ISBN-10: 0-471-71529-8
- [29] IPC – 9701. Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments. Northbrook, Illinois: IPC, 2002.
- [30] David Suraski, *Reflow Profiling – The Benefits of Implementing a Ramp-to-Spike Profile*, [Citováno 2012-11-01], Dostupné z WWW: [http://www.smtnet.com/library/files/upload/374_RSS_vs_RTS_revised_12-99_\(no_pics\).doc](http://www.smtnet.com/library/files/upload/374_RSS_vs_RTS_revised_12-99_(no_pics).doc)
- [31] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: „Noli tangere circulos meos!“* [online]. 2006 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/624-krystalograficke-soustavy>
- [32] ABEL, Martin. 2005. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. 1. vyd. Pardubice: ABE.TEC, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.
- [33] AIM. *NC257-2 SAC305: Lead-Free No Clean Solder Paste*. 06/2012. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/nc257-2_sac305_solder_paste_rev_21.pdf
- [34] AIM. *M8 NO CLEAN SOLDER PASTE*. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/m8_solder_paste_rev_8.pdf
- [35] SILK, Julie, Jianbiao PAN a Mike POWERS. The Morphology Evolution and Voiding of Solder Joints on QFN Central Pads with a Ni/Au Finish. [online]. [cit. 2015-04-19].

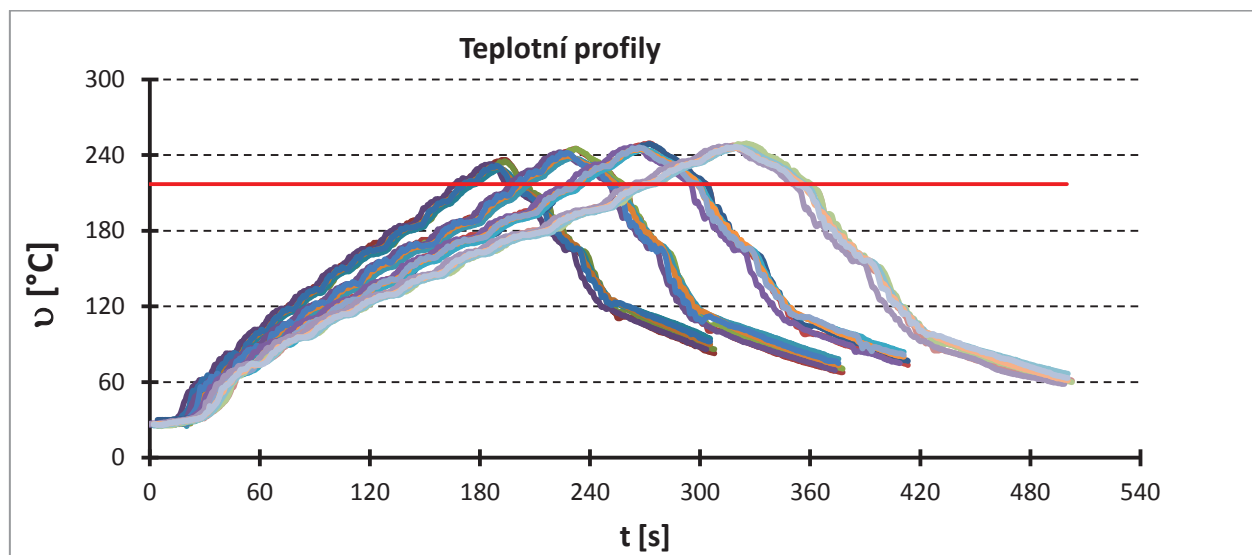
Seznam zkratek a symbolů

q	tepelný tok (W)
λ	tepelná vodivost materiálu ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
$\frac{\Delta T}{L}$	teplotní gradient ($K \cdot m^{-1}$)
DPS	deska plošného spoje
h^c	koeficient přenosu tepla při konvekci ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
k	Stefan - Boltzmannova konstanta ($k = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)
PES	polyester
P_z	hydrodynamický tlak (Pa)
μ	viskozita pájecí pasty ($Pa \cdot s$)
α	úhel mezi těrkou a DPS (°)
δ	tloušťka intermetalické vrstvy (μm)
Q_η	integrál teploty a času ($s \cdot ^\circ C$)
MTTF	střední doba do poruchy (hod, cykly)
TCE	součinitel tepelné roztažnosti ($mm \cdot K^{-1}$)
T_g	teplota skelného přechodu ($^\circ C$, K)
t_D	doba prodlevy (min)
TAL	čas nad teplotou tavení (Time Above Liquidus)
SMDP	Solder Mask Define Pad
SPI	Solder Paste Inspection
BTC	Bottom Terminations Components
SP	Solder Paste

Přílohy



Obr. 59 - Schéma zapojení testovací DPS



Obr. 60 - Teplotní profily

Tab. 20 - Naměřené množství dutin pro všechny testovací desky

DPS	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2
IO1	48,07	48,83	45,97	47,36	41,22	36,16	31,91	39,08	39,45	39,40
IO2	46,64	51,58	46,99	45,54	44,72	36,64	46,40	37,47	43,13	39,18
Průměr	47,36	50,21	46,48	46,45	42,97	36,40	39,16	38,28	41,29	39,29
DPS	4.1	4.2	4.3	4.4	5.1	5.2	5.3	5.4	3.3	3.4
IO1	33,84	36,19	33,15	26,85	45,92	36,26	35,59	36,35	35,65	30,11
IO2	33,13	34,90	30,23	31,14	45,51	43,27	36,41	35,47	32,78	30,07
Průměr	33,49	35,55	31,69	29,00	45,72	39,77	36,00	35,91	34,22	30,09

Tab. 21 - Tabulka naměřených hodnot tloušťek IMC (1 průchod)

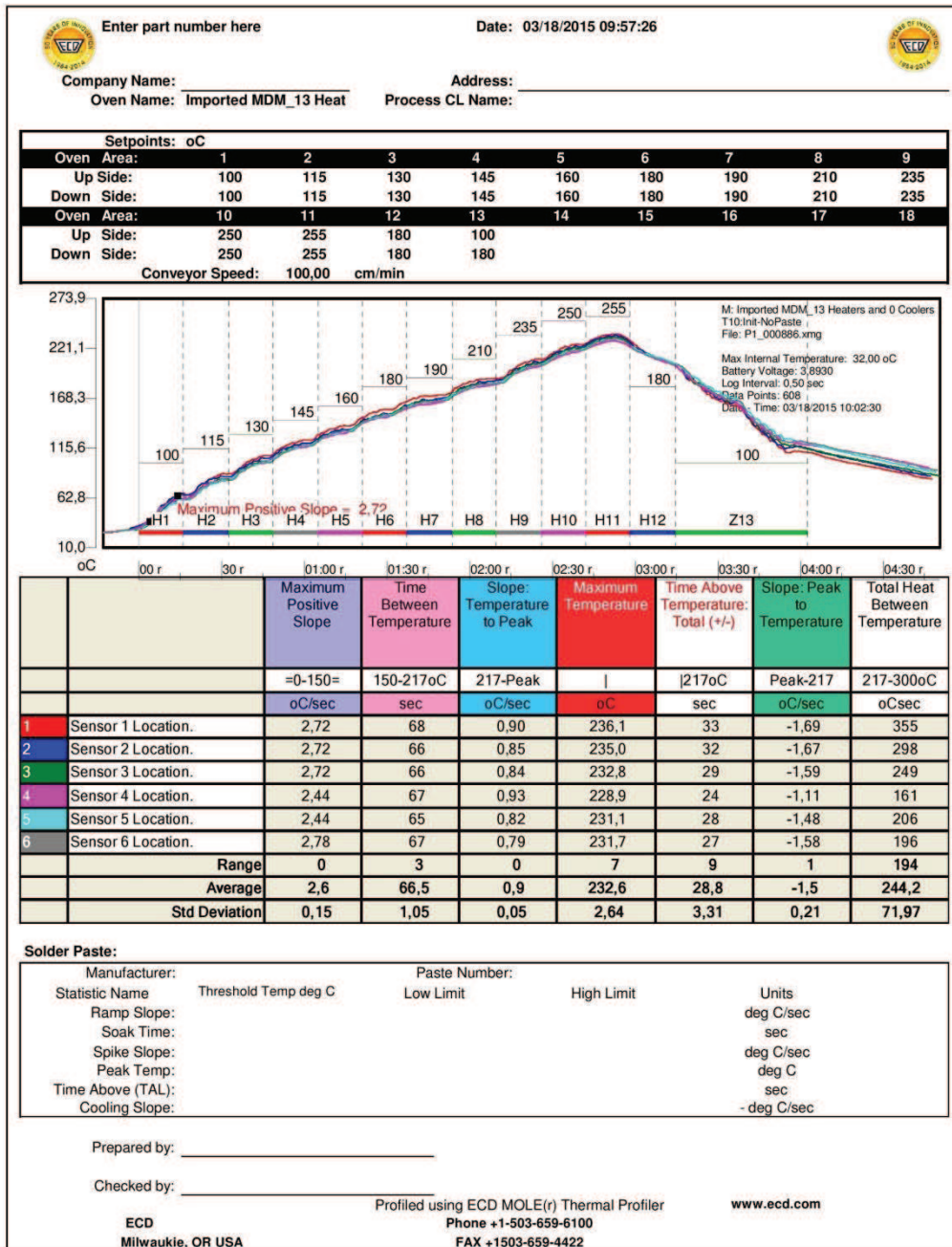
Č. m.	1.1	2.1	3.1	4.1
	$\delta[\mu\text{m}]$			
1	2,31	4,05	3,65	7,64
2	4,01	3,24	7,57	9,33
3	2,38	3,24	5,00	9,66
4	1,81	3,92	8,29	7,78
5	2,26	6,22	5,68	7,23
6	2,98	5,27	5,73	
7		3,78	4,25	
8		3,24	3,65	
9			4,14	
10			3,87	
Průměr	2,63	4,12	5,18	8,33

Tab. 22 - Tabulka naměřených hodnot tloušťek IMC (2 průchody)

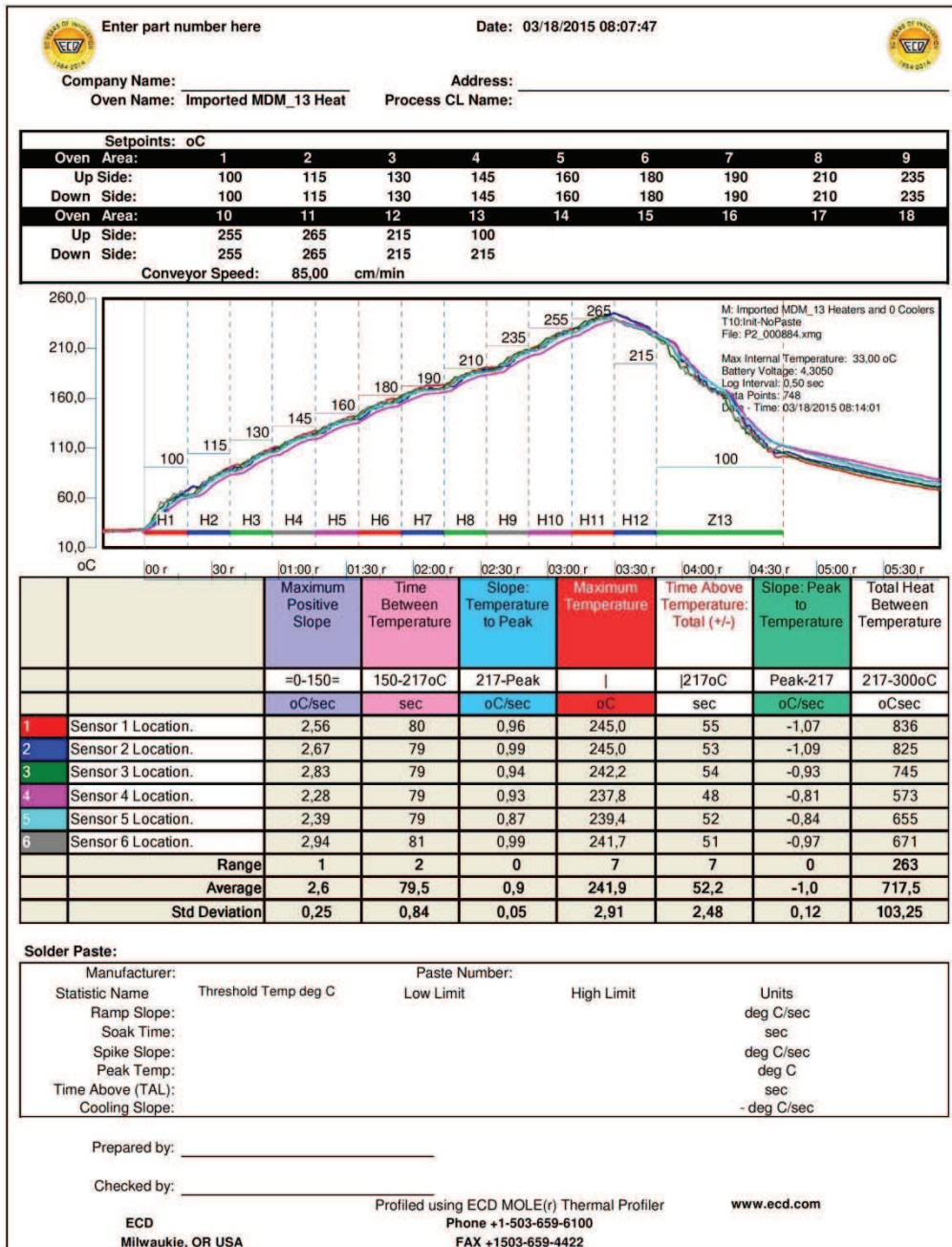
Č. m.	1.4	2.4	3.4	4.4
	$\delta[\mu\text{m}]$			
1	6,07	4,17	8,52	10,47
2	4,99	3,90	6,06	8,72
3	2,70	3,50	6,99	8,37
4	5,36	3,35	5,00	7,56
5	3,51	6,93	4,33	10,00
6	2,70	4,25	3,93	7,71
7	1,89	4,79	6,30	8,52
8	3,10		7,65	7,97
9			9,06	8,60
Průměr	3,79	4,41	6,43	8,66

Tab. 23 - Tabulka naměřených hodnot tloušťek IMC (po stárnutí)

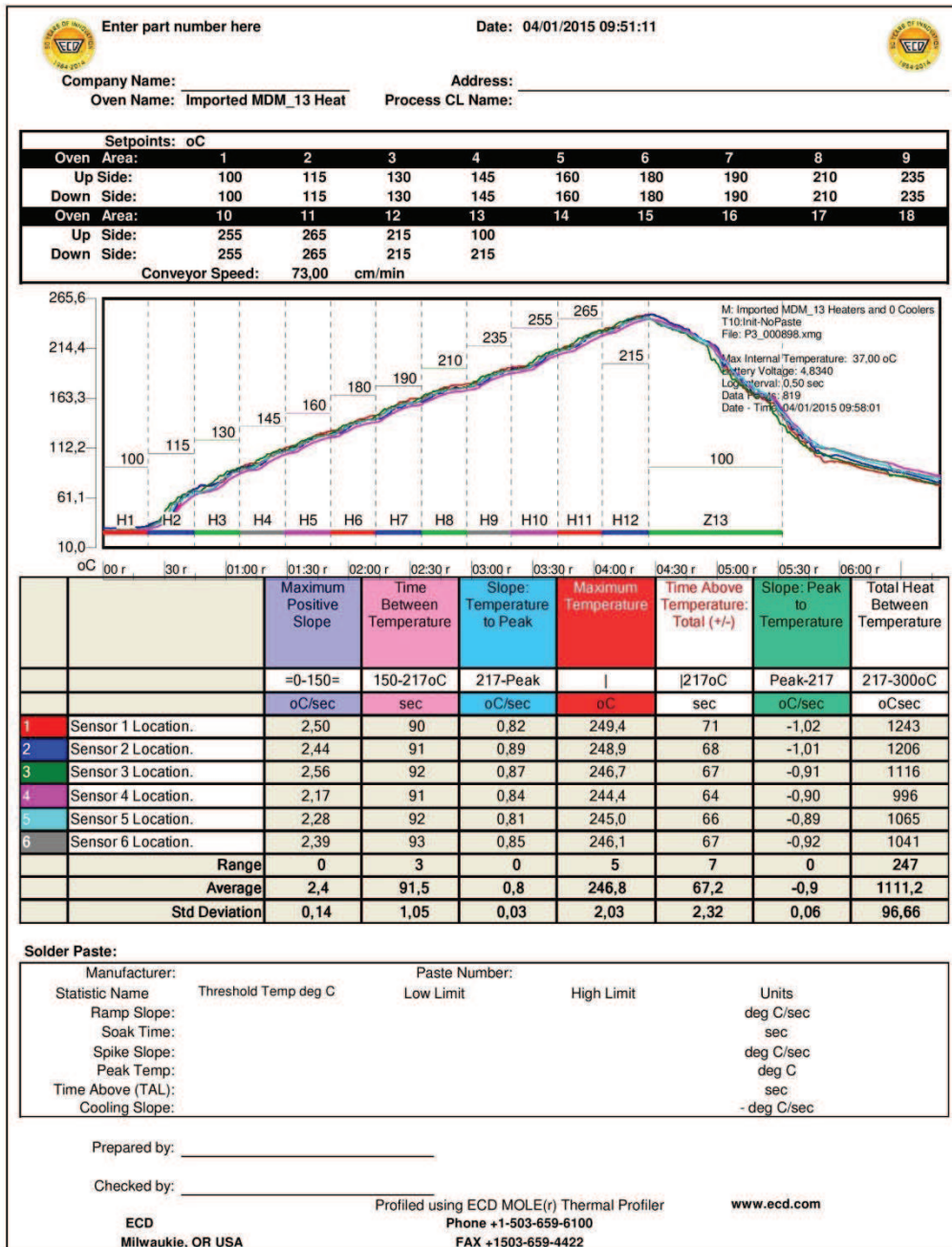
Č. m.	1.2	2.2
	$\delta[\mu\text{m}]$	
1	3,94	4,73
2	7,47	7,84
3	6,7	4,66
4	5,23	5,03
5	3,91	5,87
6	3,93	6,19
7	3,17	5,58
8	2,7	8,84
9	2,97	5,4
10		4,27
Průměr	4,45	5,84



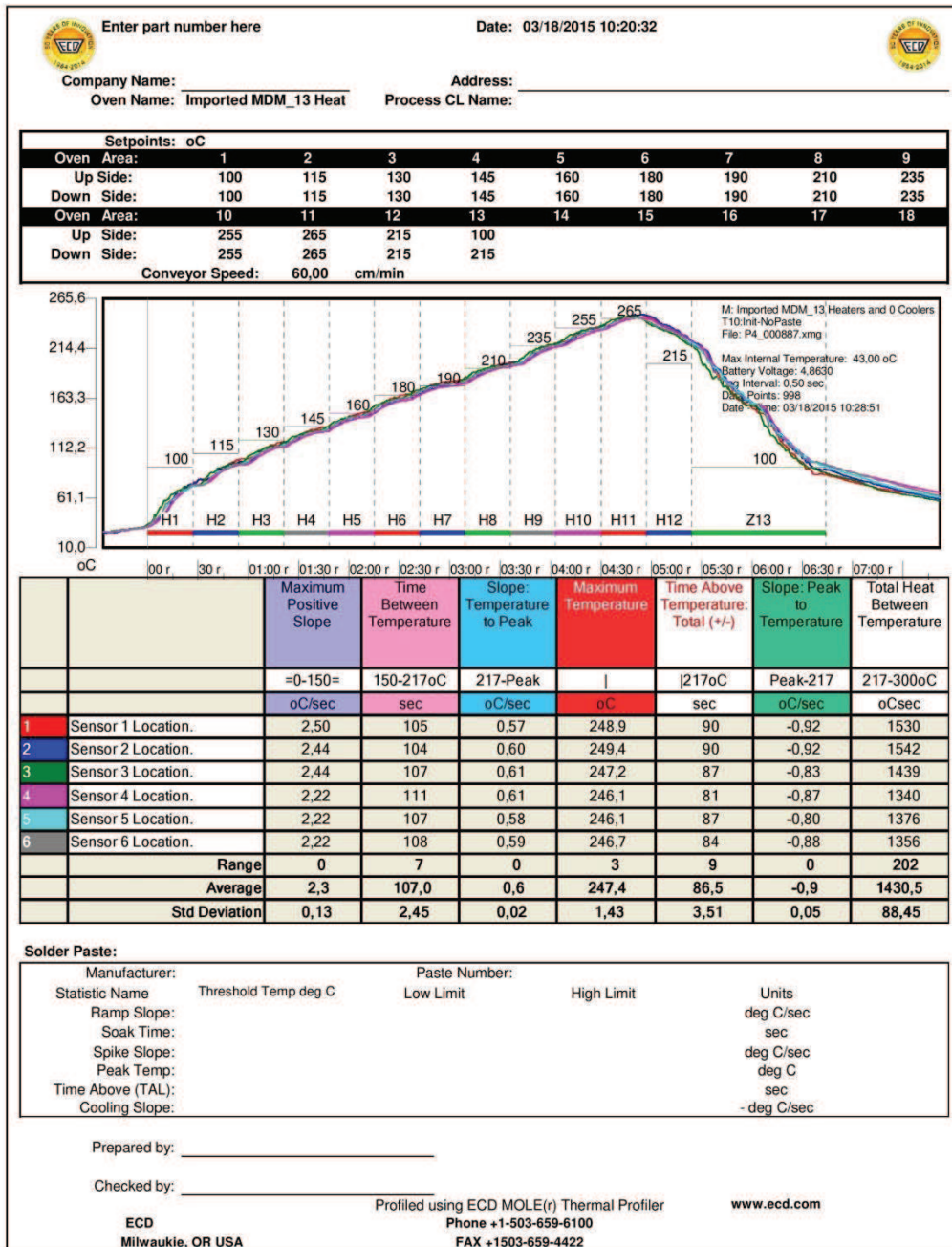
Obr. 61 - Přetavovací profil P1



Obr. 62 - Přetavovací profil P2



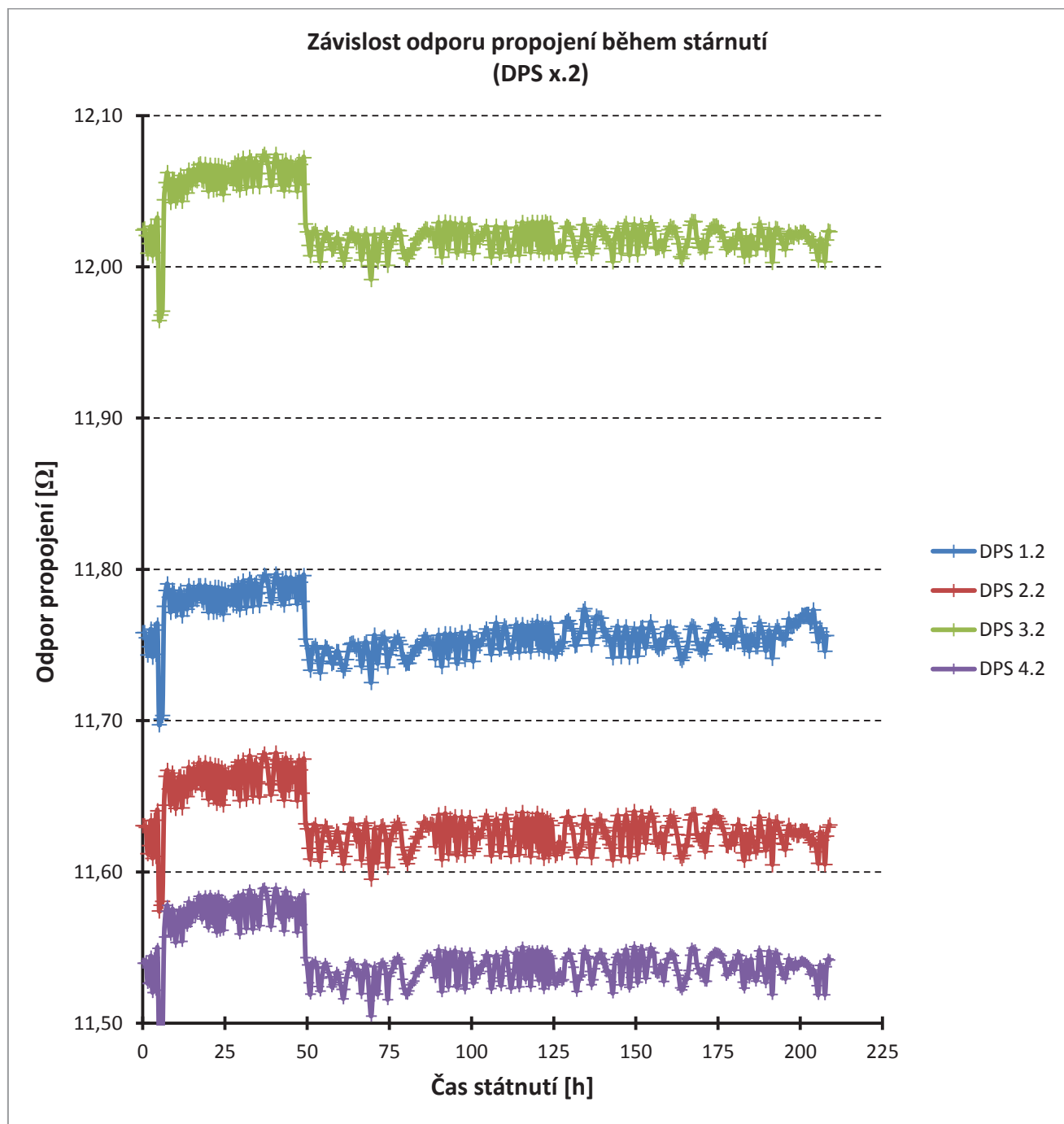
Obr. 63 - Přetavovací profil P3



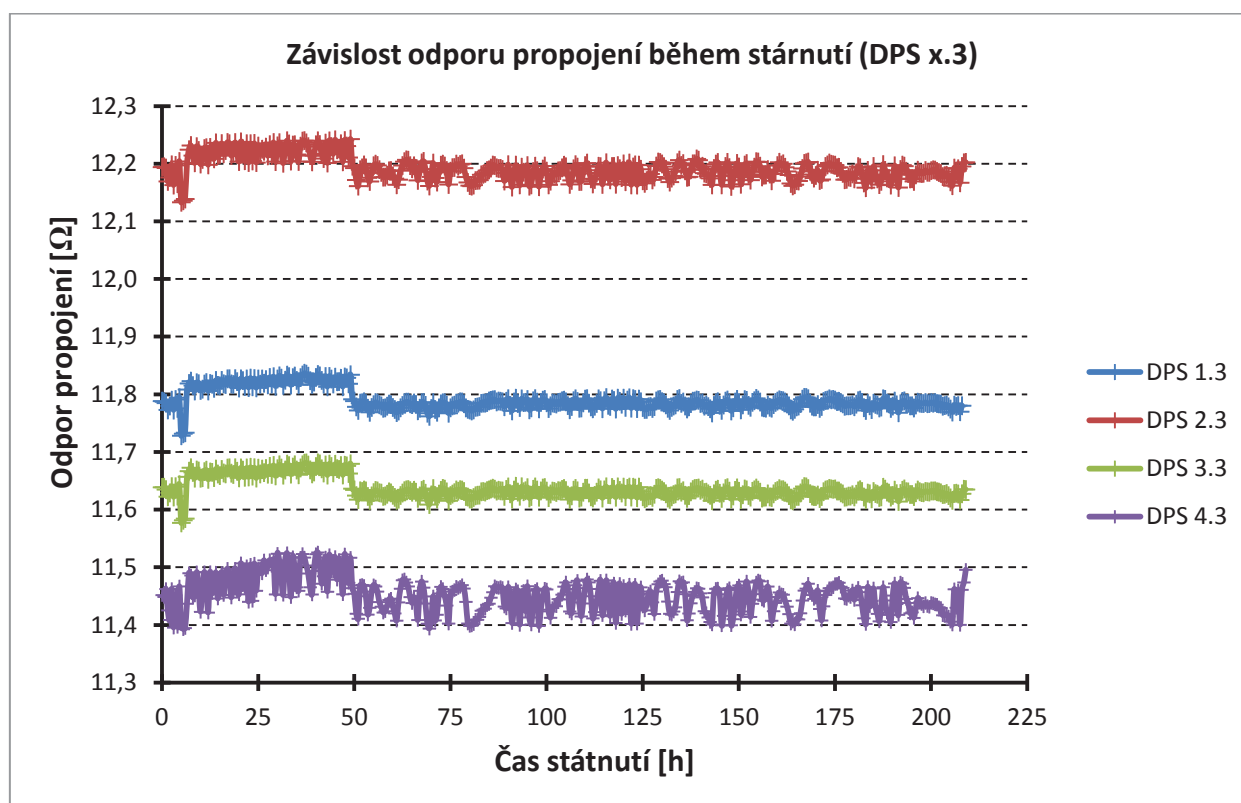
Obr. 64 - Přetavovací profil P4

Tab. 24 - Tabulka naměřených hodnot roztékavosti

DPS	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2
1.	5,36	5,28	5,33	5,24	5,23	5,27	5,25	5,22	5,34	5,28
	5,44	5,31	5,35	5,21	5,30	5,27	5,26	5,21	5,34	5,27
	5,34	5,36	5,21	5,24	5,25	5,23	5,34	5,21	5,31	5,16
	5,40	5,24	5,34	5,20	5,22	5,28	5,27	5,19	5,37	5,18
2.	5,57	5,27	5,34	5,21	5,28	5,23	5,29	5,23	5,29	5,20
	5,30	5,29	5,41	5,17	5,29	5,22	5,27	5,22	5,29	5,21
	5,48	5,30	5,33	5,27	5,24	5,23	5,33	5,25	5,35	5,13
	5,39	5,38	5,23	5,23	5,28	5,29	5,27	5,28	5,31	5,17
3.	5,30	5,30	5,48	5,26	5,29	5,25	5,27	5,24	5,30	5,26
	5,34	5,40	5,31	5,31	5,28	5,23	5,28	5,26	5,33	5,20
	5,38	5,37	5,33	5,27	5,30	5,25	5,31	5,23	5,29	5,13
	5,46	5,23	5,32	5,29	5,29	5,28	5,28	5,26	5,31	5,16
4.	5,36	5,40	5,30	5,23	5,27	5,22	5,27	5,21	5,27	5,16
	5,56	5,44	5,52	5,41	5,25	5,24	5,27	5,28	5,17	5,21
	5,43	5,33	5,43	5,53	5,26	5,29	5,33	5,14	5,27	5,10
	5,43	5,57	5,38	5,23	5,27	5,28	5,29	5,21	5,26	5,17
Průměr [mm]	5,41	5,34	5,35	5,27	5,27	5,25	5,29	5,23	5,30	5,19
DPS	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	5.1	5.2	5.3	5.4
1.	5,30	5,28	5,23	5,20	5,26	5,22	5,24	5,15	5,29	5,22
	5,29	5,25	5,19	5,20	5,27	5,24	5,30	5,03	5,20	5,19
	5,29	5,29	5,17	5,19	5,31	5,25	5,20	4,88	5,17	5,30
	5,34	5,32	5,23	5,29	5,27	5,25	5,32	5,14	5,27	5,28
2.	5,24	5,29	5,22	5,20	5,27	5,21	5,20	5,20	5,44	5,27
	5,42	5,33	5,15	5,20	5,28	5,26	5,18	5,10	5,16	5,21
	5,53	5,24	5,12	5,18	5,30	5,23	5,24	5,06	5,26	5,31
	5,27	5,35	5,20	5,16	5,26	5,27	5,17	5,16	5,28	5,39
3.	5,31	5,29	5,21	5,24	5,33	5,28	5,24	5,23	5,21	5,23
	5,34	5,35	5,23	5,29	5,31	5,35	5,27	5,20	5,15	5,27
	5,27	5,26	5,20	5,27	5,34	5,37	5,20	5,20	5,18	5,32
	5,32	5,29	5,24	5,26	5,34	5,25	5,24	5,22	5,26	5,35
4.	5,21	5,25	5,22	5,20	5,43	5,36	5,28	5,22	5,16	5,28
	5,27	5,24	5,23	5,29	5,38	5,28	5,21	5,21	5,20	5,32
	5,20	5,32	5,14	5,18	5,36	5,35	5,25	5,22	5,25	5,60
	5,17	5,19	5,23	5,26	5,42	5,34	5,24	5,25	5,16	5,32
Průměr [mm]	5,30	5,28	5,20	5,22	5,32	5,28	5,24	5,15	5,23	5,30



Obr. 65 - Závislost odporu DPS na čase stárnutí (DPS - 1 průchod)



Obr. 66 - Závislost odporu DPS na čase stárnutí (DPS - 2 průchody)

Tab. 25 - Výsledky zkoušky stříhem před izotermickým stárnutím (0 h)

DPS	1.1	2.1	3.1	4.1	1.4	2.6	3.4	4.4
R2	36,19	34,43	32,17	32,46	40,54	32,72	44,55	38,08
R3	42,76	36,60	28,45	34,61	38,07	42,90	36,25	40,07
R4	40,43	36,09	25,81	28,58	39,64	46,43	32,00	26,67
R5	34,90	32,91	46,74	34,79	39,69	39,66	26,16	29,44
R6	35,75	32,95	27,47	32,42	48,04	33,26	36,19	29,66
R7	36,51	41,31	36,37	33,62	36,15	42,37	32,88	37,11
R8	32,12	31,52	37,81	32,03	30,17	40,98	34,23	38,24
R9	36,60	32,26	29,97	33,88	32,98	36,13	38,02	33,95
R10	30,25	32,18	33,10	32,01	31,54	44,57	36,30	34,20
Průměr [N]	36,17	34,47	33,10	32,71	37,43	39,89	35,18	34,16
Profil	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4

Tab. 26 - Výsledky zkoušky stříhem při izotermickém stárnutí (70 h)

DPS	1.1	2.1	3.1	4.1	1.4	2.4	3.4	4.4
R21	55,09	40,70	55,97	49,06	38,96	55,38	39,34	46,08
R22	54,29	35,93	52,03	47,52	41,04	49,62	51,69	37,53
R23	44,15	41,93	29,55	39,50	26,05	37,66	39,44	41,16
R24	30,77	38,04	40,43	34,16	38,15	29,90	36,36	30,89
R25	46,07	40,96	44,02	29,49	37,14	35,06	49,93	30,40
R26	46,47	34,33	34,73	42,10	42,24	36,92	36,97	32,54
R27	35,16	33,16	43,43	34,18	33,58	40,95	38,06	34,98
R28	38,49	30,14	43,90	31,20	34,91	38,25	31,70	38,32
R29	40,46	33,41	38,65	41,17	47,99	32,73	32,09	34,55
R30	34,46	35,78	43,97	40,01	44,91	31,29	31,53	36,50
Průměr [N]	39,50	35,97	39,84	36,48	38,12	35,35	37,01	34,92
Profil	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4

Tab. 27 - Výsledky zkoušky stříhem při izotermickém stárnutí (140 h)

DPS	1.1	2.1	3.1	4.1	1.4	2.4	3.4	4.4
R39	36,90	41,29	36,23	49,84	29,22	40,68	42,02	36,72
R38	41,74	49,10	49,32	60,25	30,61	34,04	48,33	48,24
R37	43,97	44,92	49,42	36,28	36,16	38,88	47,98	45,90
R36	40,75	35,43	56,03	50,14	32,55	50,99	54,22	52,24
R35	31,80	38,73	38,37	49,86	34,53	42,52	47,84	54,74
R34	45,54	55,31	42,31	46,06	34,69	40,74	56,96	43,90
R33	43,95	47,02	40,69	40,31	37,17	35,69	63,43	40,32
R32	34,48	50,94	50,04	39,03	30,83	45,44	49,99	36,46
R31	43,94	39,26	38,40	45,89	41,75	34,64	53,89	43,31
Průměr [N]	40,34	44,67	44,53	46,41	34,17	40,40	51,63	44,65
Profil	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4

Tab. 28 - Výsledky zkoušek stříhem po izotermickém stárnutí (209 h)

DPS	1.2	2.2	3.2	4.2	1.3	2.3	3.3	4.3
R3	35,37	36,06	30,93	28,73	30,01	40,82	34,99	32,85
R4	30,87	26,04	30,47	27,60	28,91	24,24	33,35	30,97
R5	41,83	32,22	32,33	33,23	34,28	36,71	30,11	33,51
R6	29,90	32,81	23,24	27,73	28,41	28,54	34,77	28,63
R7	31,99	33,92	35,44	28,21	30,20	35,88	37,00	35,60
R8	30,27	31,83	27,88	32,64	29,26	34,65	28,04	32,00
R9	30,35	25,24	28,00	34,19	20,82	34,11	28,21	29,05
R10	27,24	29,73	32,69	28,78	23,79	35,41	25,94	24,42
R11					29,19	31,48	28,27	28,76
Průměr [N]	32,23	30,98	30,12	30,14	28,32	32,63	31,19	30,64
Profil	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4