



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 SPOJE

LEAD FREE SOLDER JOINT QUALITY BASED ON HEATING FACTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

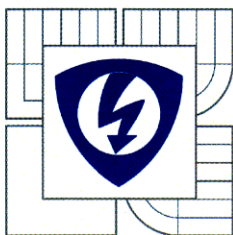
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILAN DOSEDLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Milan Dosedla
Ročník: 3

ID: 133125
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

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

Navrhněte desku s plošnými spoji pro pole rezistorů velikosti 0805, včetně nepájivé masky a šablony. Nastavte a proměřte teplotní profily pro 4 rozdílné integrály teploty a času pájení v mezích tolerance hodnot stanovených výrobcem pájecí pasty. Osadte DPS rezistory do pájecí pasty a zapájejte nastavenými profily.

Vyhodnoťte vzhled spoje, mikrovýbrus spoje (opticky a pomocí SEM), určete tloušťku IMC vrstvy a pevnost spoje.

Výsledky graficky zpracujte a diskutujte vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 6.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem integrálu teploty a času pájení na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje se zaměřením na využití pájecího procesu přetavením. V teoretické části jsou zde shrnuty základní poznatky a požadavky na pájený spoj, rozebrány teplotní profily pájecího procesu a sumarizovány některé výsledky dosud publikované v zahraničních pramenech. Cílem praktické části je pomocí řady vzorků spojů zapájených definovanou velikostí integrálu teploty a času zjistit a vyhodnotit vliv tohoto integrálu na pevnost a vzhled výsledného pájeného spoje a na strukturu a tloušťku intermetalických vrstev.

Abstract:

This bachelor's thesis deals with influence of the heating factor on the quality of lead-free solder joints in the reflow soldering process. It summarizes the basic knowledge and some requirements for soldered joints, analyses reflow profiles and presents some of the results published in the literature. Aim of the practical part is by samples soldered with different size of the heating factor determine and evaluate the impact of this factor to the strength and appearance of the final solder joint and the structure and thickness of the intermetallic layers.

Klíčová slova:

Integrál teploty a času pájení, pájení přetavením, spolehlivost pájeného spoje, zkouška stříhem, teplotní profil.

Keywords:

Heating factor, reflow soldering, reflow profile, solder joint, shear test.

Bibliografická citace díla:

DOSEDLA, M. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného bezolovnatého spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2013. 59 s., Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného bezolovnatého spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou, materiální a odbornou pomoc a další cenné rady a náměty při zpracování projektu. Dále děkuji firmě Honeywell za materiálovou podporu a zvláště Ing. Zdeňku Jurčíkovi za odbornou výpomoc při realizaci praktické části projektu. Na závěr bych chtěl poděkovat firmě FEI ČR a mým kolegům za časovou a expertní podporu a umožnění využití nejmodernějších elektronových mikroskopů při realizaci této práce.

V Brně dne 5. června 2013

.....
podpis autora

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Rozložení mezivrstev v olovnatém pájeném spoji [9].	14
Obr. 1.2: Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje [3].	15
Obr. 1.3: Znázornění vzniku a zvětšování trhlin v IMC pájeného spoje vlivem stárnutí [11].	17
Obr. 1.4: Znázornění působení síly na testovanou SMT součástku při zkoušce stříhem.	18
Obr. 1.5: Možná místa odtržení při zkoušce stříhem [13].	19
Obr. 2.1: Příklad doporučeného podélného teplotního profilu pro bezolovnaté pájecí pasty.	21
Obr. 2.2: Podélný teplotní profil typu RSS (Ramp Soak Spike) [11].	22
Obr. 2.3: Podélný teplotní profil typu RTS (Ramp To Spike) [11].	23
Obr. 3.1: Příklad teplotního profilu s vyznačenou oblastí Q_{η} .	26
Obr. 3.2: Grafická závislost vztahu Q_{η} jako funkce tloušťky IMC vrstvy δ [6].	27
Obr. 3.3: Mikrostruktura IMC vrstvy pájeného spoje pro různé hodnoty Q_{η} [7].	27
Obr. 3.4: Grafická závislost střední doby poruchy pájeného spoje v závislosti na Q_{η} podle [7].	28
Obr. 3.5: Grafická závislost střední doby poruchy pájeného spoje v závislosti na Q_{η} podle [6].	29
Obr. 4.1: Doporučené velikosti ploch pro součástku velikosti 0805 pro pájení přetavením [14].	30
Obr. 4.2: Detail a rozložení nově navržených ploch pro součástku 0805 na testovací DPS.	31
Obr. 4.3: Výsledný obrazec spojů (vlevo) a nepájivé masky (vpravo) navržené testovací DPS.	31
Obr. 4.4: Měření teplotních profilů - umístění termočlánků na profilovací DPS.	32
Obr. 4.5: Podélný teplotní profil - detailní pohled na oblast nad liquidem pro všechny hodnoty Q_{η} .	34
Obr. 4.6: Zařízení DAGE PC2400 (vlevo) a ukázka z testu stříhu (vpravo).	35
Obr. 4.7: Označení rezistorů, na kterých bylo provedeno testování pevnosti spojů – červená oblast.	35
Obr. 4.8: Ukázky utržených součástek (nahore) a detailní pohled na místa odtržení (dole).	36
Obr. 4.9: Graf změřené závislosti pevnosti spoje v závislosti na Q_{η} při použití zkoušky stříhem.	37
Obr. 4.10: Procentuální podíl výskytu daného typu místa odtržení součástky při testu stříhem.	38
Obr. 4.11: Vzhled mikrovýbrusů spojů získaných pomocí optického mikroskopu.	39
Obr. 4.12: Souhrnný přehled struktury a tloušťky IMC na rozhraní měď-pájka zjištěné p. ESEM.	40
Obr. 4.13: Graf změřené závislosti tloušťky IMC na Q_{η} pro pájku SAC305.	41
Obr. 4.14: Ukázka struktury a rozložení vrstev na rozhraní ploška součástky-pájka.	42
Obr. 4.15: Struktura povrchu spoje (měď-pájka) po vyleštění iontovým svazkem – $Q_{\eta} = 490$ s.K.	43
Obr. 4.16: Základní princip vakuového pájení přetavením [17].	45

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Velikosti aktivační energie Q pro rozhraní DPS/pájka a vývod součástky/pájka	13
Tabulka 1.2: Možné intermetalické sloučeniny bezolovnatých pájecích slitin [8].	14
Tabulka 4.1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivé profilovací termočlánky.	33
Tabulka 4.2: Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů a místo jejich odtržení.	37
Tabulka 4.3: Výsledky měření průměrné tloušťky IMC vrstvy (na rozhraní měď-pájka).	41
Tabulka 4.4: Výsledky EDS analýzy zkoumaných oblastí.	43

Obsah

Úvod	10
1 Pájený spoj	11
1.1 Obecné požadavky na pájený spoj.....	11
1.2 Intermetalická vrstva (IMC).....	12
1.3 Spolehlivost pájeného spoje	15
1.3.1 Jakost pájeného spoje	16
1.3.2 Životnost pájeného spoje	17
1.4 Mechanické zkoušky pájeného spoje	18
1.4.1 Zkouška stříhem	18
2 Teplotní profil	20
2.1 Pájení přetavením	20
2.2 Příčný teplotní profil.....	20
2.3 Podélný teplotní profil	21
2.3.1 Podélný teplotní profil sedlového typu - RSS	22
2.3.2 Podélný teplotní profil s lineárním nárůstem teploty – RTS	23
2.4 Nastavení a optimalizace teplotního profilu.....	24
3 Integrál teploty a času pájení („Heating factor“)	25
3.1 Definice „Heating factor“	25
3.2 Vliv „Heating factor“ na tloušťku IMC vrstvy.....	26
3.3 Vliv „Heating factor“ na spolehlivost a střední dobu poruchy.....	28
4 Praktická část	30
4.1 Zkušební testovací obrazec DPS	30
4.2 Osazení a zapájení testovacích DPS.....	32
4.2.1 Tisk pájecí pasty a osazení DPS rezistory	32
4.2.2 Profilování a zapájení testovacích DPS.....	32
4.3 Testování pevnosti pájených spojů.....	34
4.4 Vyhodnocení vzhledu spoje pomocí optického mikroskopu.....	38
4.5 Vyhodnocení spoje pomocí elektronového mikroskopu	40
4.6 Diskuze dosažených výsledků a jejich využití v praxi	44
5 Závěr	47
Seznam použitých zkratk	50

A	Přílohy	51
A.1	Podélný teplotní profil pro $Q_{\eta} = 178$ s.K.....	52
A.2	Podélný teplotní profil pro $Q_{\eta} = 342$ s.K.....	53
A.3	Podélný teplotní profil pro $Q_{\eta} = 490$ s.K.....	54
A.4	Podélný teplotní profil pro $Q_{\eta} = 684$ s.K.....	55
A.5	Podélný teplotní profil pro $Q_{\eta} = 781$ s.K.....	56
A.6	Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů testovaných na střih.....	57
A.7	Měření tloušťky IMC vrstev na rozhraní měď-pájka.....	59

ÚVOD

Spolehlivost pájeného spoje je jeden z nejvíce kritických problémů v oblasti technologie povrchové montáže. Její míra může být ovlivněna mnoha faktory. Jedním z nich je i množství dodané energie v pájecím procesu při dnes velmi často používaném typu pájení přetavením. Doposud byl tento problém řešen hlavně sledováním příslušných časů, teplot a gradientů v doporučeném teplotním profilu. Teprve nedávno byl zaveden nový procesní parametr, tzv. „Heating factor“, který reprezentuje kombinovaný účinek teploty přetavení pájecí pasty a času nad teplotou liquidu během pájecího procesu.

Hlavním úkolem této bakalářské práce je sledování vlivu a závislosti velikosti integrálu teploty a času pájení (heating factor) na pevnost a vzhled výsledného pájeného spoje a na strukturu a tloušťku intermetalických vrstev.

Cílem teoretické části je shrnout dostupné poznatky mající vliv na spolehlivost pájeného spoje, typech a významu pájecích profilů. Dále budou diskutovány některé dostupné informace nalezené zejména v zahraničních pramenech okolo vlivu integrálu teploty a času pájení na různé aspekty pájeného spoje.

V praktické části je navržen testovací obrazec jednostranné desky plošných spojů složený z pole SMD rezistorů o velikosti 0805. Tento je dále použit pro výrobu série testovacích DPS, které jsou osazeny a zapájeny pomocí různých definovaných velikostí integrálu teploty a času pájení. Následně je na takto získaných vzorcích provedeno zkoumání z hlediska pevnosti spoje pomocí mechanické zkoušky stříhem a provedeno vyhodnocení vzhledu a mikrovýbrusu spoje z hlediska tloušťky a struktury intermetalické vrstvy. Takto získané výsledky jsou na závěr přehledně zpracovány a diskutovány.

Tato bakalářská práce byla z části realizována ve spolupráci s firmou Honeywell, která používá moderní a profesionální technologická zařízení a navíc projevila v průběhu realizace zájem o získané poznatky a data z tohoto aplikačního výzkumu.

1 PÁJENÝ SPOJ

Pájení je definováno jako způsob metalurgického spojování dvou kovů za pomoci třetího roztaveného kovu nebo slitinou kovů. Povrchové atomy spojovaných materiálu se dostávají do styku s atomy roztavené pájky na takovou vzdálenost, že se vytvoří podmínky pro účinky adhezních (přilnavých) a kohezních (soudržných) sil. Současně dochází k rozpouštění a difuzi části prvků spojovaných materiálů. Vzniká tak mezifázové rozhraní mezi pevným a tekutým kovem, tzv. intermetalická oblast se specifickými vlastnostmi. Ve většině případů vznikají přechodové oblasti o určité tloušťce, které mají jiné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti nežli původní spojované materiály.

Podle teploty tavení pájky lze rozdělit pájení na měkké a tvrdé. Při teplotách tavení pájky větších než 450°C se jedná o pájení tvrdé. Pájení elektronických součástek patří do kategorie měkkého pájení s pracovními teplotami do 450°C. Tyto pájky jsou nečastěji založeny na slitině cínu a jiného kovu. V minulosti často používána olovnatá pájka Sn63Pb37 je postupně nahrazovaná bezolovnatými slitinami, nejčastěji s přídavkem prvků mědi, stříbra, antimonu a jejich kombinací (Sn96,5Ag3Cu0,5, SN100C, Sn99,3Cu0,7, Sn95Sb5 a další).

1.1 Obecné požadavky na pájený spoj

- Mechanická integrita spoje
 - Správný konstrukční návrh spoje
 - Správná volba pájecí slitiny
 - Správný tvar menisků spoje a spoj s minimem dutin
 - Odpovídající pevnost a tažnost spoje

- Tepelné a elektrické vlastnosti spoje
 - Odpovídající elektrický kontakt
 - Odpovídající tepelný kontakt

- Metalurgická stabilita
 - Reakční mechanismy mezi spojovanými kovy a pájkou
 - Sledování reakčních mechanismů v samotné pájce během provozních podmínek

- Environmentální trvanlivost
 - Odolnost vůči korozi
 - Odolnost vůči oxidaci spoje

- Kompatibilita se statutárními požadavky

- Estetické požadavky [10].

1.2 Intermetalická vrstva (IMC)

Během procesu smáčení a následného roztékání pájky po povrchu, je mezikovové rozhraní nahrazováno více či méně spojitou přechodovou tzv. intermetalickou zónou (IMC). Tato vrstva může mít podstatný vliv na spolehlivost a životnost výsledného pájeného spoje. Ke vzniku intermetalické oblasti dochází procesy rozpouštění i difúze.

Samotná difúzní zóna se začíná utvářet v okamžiku začátku smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou. Difúzní tok tekuté pájky, která difunduje přes objem po určitou dobu ze strany s vyšší koncentrací do strany s nižší koncentrací, je úměrný koncentračnímu gradientu. Difúze vždy zahrnuje transport hmoty.

Pro tloušťku vytvořené difúzní vrstvy Z_0 po době pájení t platí z II. Fickova zákona [15]:

$$Z_0 = \sqrt{D \cdot t} \quad (1.1)$$

kde Z_0 je tloušťka IMC [m],
 D je součinitel difúze [m^2s^{-1}],
 t je čas (doba pájení) [s].

Difúzní rychlost i tloušťka vytvořené difúzní vrstvy je dána pájecím procesem i volbou spojovaných a spojujících materiálů. Výsledkem difúzního procesu z termodynamického pohledu je i dosažení minimální volné entalpie [10].

Ze základních rovnic difúze byla empiricky stanovena Arrheniova rovnice pro výpočet součinitele difúze D [15]:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (1.2)$$

kde D_0 je difúzní koeficient [m^2s^{-1}],
 Q je aktivační energie růstu IMC [Jmol^{-1}], přibližné hodnoty viz tabulka 1.1,
 R je plynová konstanta 8,314 [$\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$],
 T je absolutní teplota [K].

Součinitel difúze D se zvyšuje exponenciálně se zvyšující se teplotou. Nadměrný růst Z_0 je během pájení způsoben vyšší teplotou i delší dobou pájení. Uvedená rovnice platí pro

difúzi v čistých kovech. U vícesložkových pájek, kdy jednotlivé prvky mohou vytvářet tuhé roztoky, eutektické směsi a intermetalické sloučeniny, probíhá difúze v několika fázích a rovnice může být modifikována. Vzhledem k tomu, že součinitele difúze mají v různých podmínkách různou hodnotu, určuje se zpravidla hloubka difúzní vrstvy, která se tak používá pro hodnocení charakteru a rychlosti difúze [10].

Rychlost růstu IMC v závislosti na teplotě je dána základní rovnicí [15]:

$$w(t) = w + A \cdot t^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (1.3)$$

kde $w(t)$ je celková tloušťka IMC vrstvy za dobu t [m],

w je počáteční tloušťka [m],

A je konstanta [ms^{-1}],

t je čas [s],

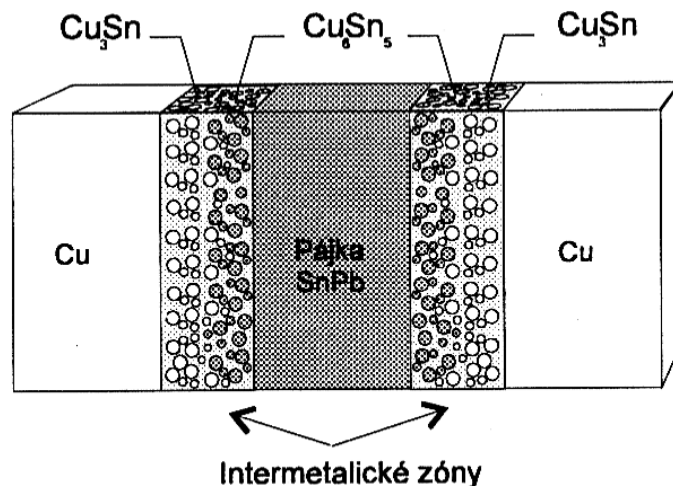
n je časový exponent rychlosti růstu [-],

Q , R , T viz vzorce výše popsané.

Tabulka 1.1: Velikosti aktivační energie Q pro rozhraní DPS/pájka a vývod součástky/pájka dle [16].

Pájecí slitina	Povrchová úprava vývodu	Rozhraní:	
		DPS/pájecí slitina Q [kJmol^{-1}]	Vývod/ pájecí slitina Q [kJmol^{-1}]
SnPb	SnPb	65	68
SAC	Sn	68	69
SAC	SnBi	97	137
SAC	SnCu	79	109

V olovnatém pájeném spoji SnPb vznikají během přetavení pájky mezivrstvy Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Fáze Cu_6Sn_5 vzniká při teplotě 186°C a má formu krystalů, které vytvářejí souvislý po vlak. Tato fáze je na rozdíl od Cu_3Sn nepájivá a je zdrojem obtíží se smáčivostí povrchu. Pokud tato fáze vznikne, má tendenci se zvětšovat i za pokojové teploty a může podstatně zhoršit pájitelnost. Pokud je pájený spoj vystaven při provozu vyšším teplotám, rychlost růstu této intermetalické fáze se také zvyšuje. Opatřením může být zvětšení vrstvy pájky na tloušťku minimálně $3 \mu\text{m}$, aby vrstva nepronikla na povrch. Pájitelností rozumíme schopnost materiálu být smáčen při určité teplotě a za určitou dobu roztavenou pájkou. Na obrázku 1.1 je znázorněna tvorba intermetalických sloučenin Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 na rozhraní mědi a olovnaté pájky [8,9].



Obr. 1.1: Rozložení mezivrstev v olovnatém pájeném spoji [9].

V **bezolovnatém** pájecím procesu dochází k vytvoření silnější IMC vrstvy ve srovnání s pájkou SnPbAg. Je to dáno větším obsahem cínu ve slitině SAC, vyšší pájecí teplotou a případně i delší dobou pájení. Rychlost růstu IMC vrstvy u slitiny SAC je vyšší než u Sn63Pb37. Tloušťka IMC vrstvy u SnPbAg pájky je okolo 1,4 μm , zatímco u SAC slitiny je vrstva IMC v rozsahu 1,7 – 2,9 μm . To představuje zvýšení tloušťky IMC od 20 % do 100 % [10].

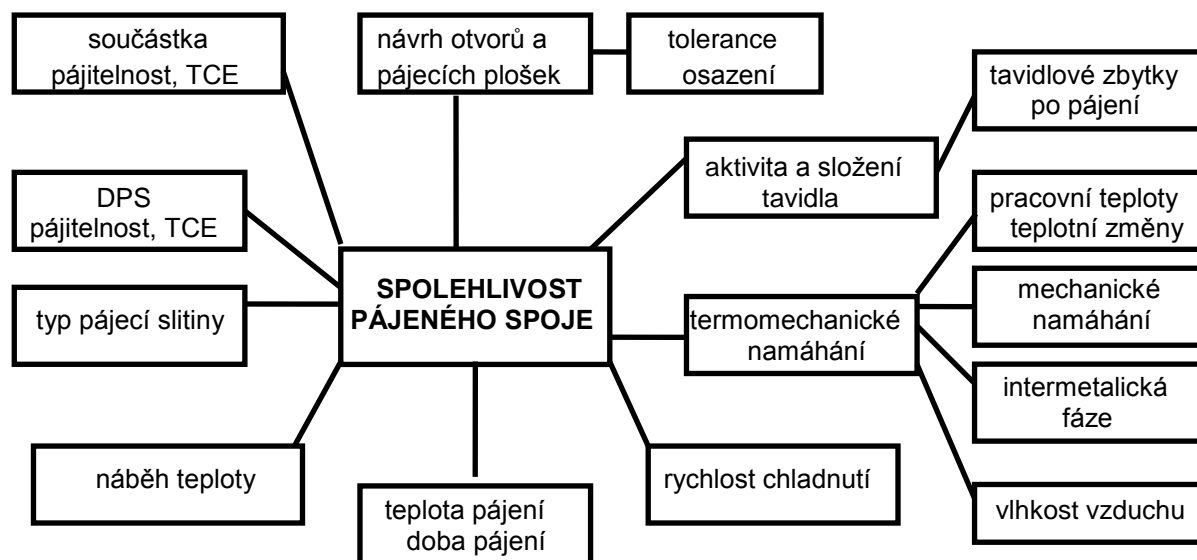
Tabulka 1.2: Možné intermetalické sloučeniny bezolovnatých pájecích slitin [8].

Slitina pájky	IMC v pájce	IMC na měděném podkladu
Sn-3,5Ag	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3,4Ag-0,8Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-1Bi-0,5Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-3Bi	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-0,7Cu	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	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 , $Cu - In - Sn$

1.3 Spolehlivost pájeného spoje

Základním požadavkem v elektronické výrobě je spolehlivý pájený spoj. Ideální pájený spoj je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky s dokonale smočeným vývodem součástky i pájecí ploškou/pájecím mezikružím DPS. Takto vizuálně charakterizovaný pájecí spoj má i dostatečnou pevnost, která odpovídá úrovni pájecího procesu.

Spolehlivost je dána kompatibilitou pájených i pájecích materiálů i pájecím procesem. Základním předpokladem pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje je dobrá pájitelnost všech pájených částí, přívodů součástek a plošného spoje. Pájitelnost je také podmíněna dobrou smáčivostí všech pájených ploch. Nedostatečné smáčení, nevytvoření odpovídajícího menisku s odpovídajícím množstvím pájky i nehomogenita pájeného spoje (vměstky, nečistoty) vedou ke snížení spolehlivosti. Spolehlivost pájeného spoje závisí na mnoha faktorech, které jsou znázorněny na obrázku 1.2 [3].



Obr. 1.2: Faktory ovlivňující spolehlivost pájeného spoje [3].

1.3.1 Jakost pájeného spoje

Je možno nalézt mnoho aspektů, podle kterých může být posuzována jakost pájených spojů. Z funkčního hlediska je ve většině případů rozhodujícím parametrem životnost pájeného spoje. Jedná se o čas, po který je zaručena spolehlivá funkce, nejčastěji vodivost spoje. To může být ovlivněno řadou faktorů, které se vzájemně kombinují, mezi ty nejzákladnější patří:

Stárnutí materiálů

Největší podíl na stárnutí materiálů má vliv okolního prostředí a chemické změny probíhající v samotném spoji. Stárnutí pájených spojů je zásadním způsobem ovlivněno tvorbou difúzní vrstvy vytvořené na rozhraní cínu a mědi, která na jedné straně potvrzuje, že došlo k vytvoření pájeného spoje, ale na druhé straně působí negativně na zhoršení jeho vlastností. To se projeví zvyšováním odporu spoje nebo s postupem času dokonce jeho mechanickým přerušением. Difúzní vrstva je tvořena intermetalickými slitinami, které mají tu vlastnost, že časem narůstají a zvětšují svoji tloušťku, což může být navíc výrazně urychleno působením zvýšených teplot. Běžné tloušťky difúzní vrstvy se pohybují řádově v mikrometrech, avšak mohou narůstat až na několik desítek mikrometrů. Následně pájený spoj ztrácí své mechanické a elektrické vlastnosti, a v určitém okamžiku přestává plnit požadovanou funkci [11].

Mechanické namáhání

Rozlišujeme dva typy mechanického namáhání:

- externí (síly na pájený spoj působí zvenčí, například vibrace nebo otřesy)
- interní (spoj je namáhán v důsledku vnitřních změn, např. tepelným namáháním)

Mechanické namáhání způsobuje únavu materiálu spoje, která se následně projevuje zhoršením mechanických vlastností a následným pozdějším mechanickým narušením. Pájený spoj může být také vystaven mechanickému namáhání (v tahu i ve smyku) i díky rozdílným koeficientům tepelné roztažnosti (CTE) obou spojovaných materiálů vystavených změnám teploty, například v důsledku výkonového zatížení součástky [11].

Tepelné namáhání

Příčinou tepelné namáhání je působení tepla na pájený spoj. To může být způsobeno vlivem okolí (např. umístěním sestavy ve venkovních podmínkách, v topných elektrospotřebičích apod.), nebo vzniká v samotném obvodu jako vedlejší produkt v důsledku vyzařovaného ztrátového výkonu. Tento aspekt se stává s rostoucí integrací a miniaturizací obvodů stále dominantnější a vyžaduje stále větší pozornost při návrhu obvodů. Působení tepla následně vyvolává jevy, které jsou buď nevratné (stárnutí materiálu v důsledku změny

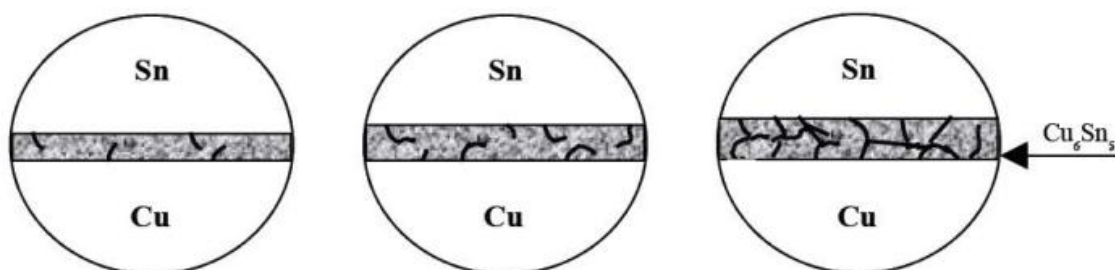
struktury, difúze apod.), nebo vratné (změny rozměrů, průhyby materiálu apod.) [11].

1.3.2 Životnost pájeného spoje

Životnost výrobků je obecně definována jako doba, za kterou se výrobek opotřebuje natolik, že nemůže plnit svoji funkci. Jelikož životnost většiny výrobků se pohybuje v rozsahu let, již v minulosti se u klasických součástek zjišťovala s pomocí tzv. zrychlených zkoušek. Zrychlené testy urychlují stárnutí, dochází k simulaci vnitřních jevů v pájených spojích a součástkách nastávajícím za běžného provozu, a je urychlována i jejich degradace. Jedná se především o fyzikální procesy difúze a elektrochemický proces koroze, která mění vlastnosti spoje, především narušuje homogenitu, zhoršuje adhezi a rovněž vede k jeho destrukci [11].

Nejnoveji se pro zjištění životnosti využívá tzv. HALT testů (HALT - Highly Accelerated Life Test). Jedná se o unikátní testovací metodu, která slouží k objevení defektu produktu a následně k jeho odstranění ještě před tím, než by se mohl stát nákladnou záležitostí. Jde o simulaci pracovního režimu za zvýšené teploty resp. v režimu cyklického střídání záporných a kladných teplot, zvýšené relativní vlhkosti a případně i za působení vibrací. Zkušenosti ukazují, že nejefektivnější se jeví kombinované namáhání testovaného výrobku nebo jeho části.

Pro stanovení poměrů a analýzy stárnutí spojů se také využívají fázové diagramy, diagramy difúzních rychlostí mezi kovy (Au/Ni, Sn/Cu apod). Pozitivním důsledkem difúzního jevu je zajištění pájitelnosti a zvláště smáčivosti pájených materiálů. Negativním důsledkem je, že zapřičiňuje růst intermetalické vrstvy, nejvíce struktury Cu_6Sn_5 . Tato vrstva tvoří bariéru mezi čistým cínem a kovem kontaktní plošky. Difúzní vrstva narůstá především do cínu a tím dochází k úbytku pájeného spoje. Účinky stárnutí a namáhání způsobují růst intermetalické vrstvy a trhlin, které mohou způsobit až nefunkčnost pájeného spoje, viz také obrázek 1.3 [11].



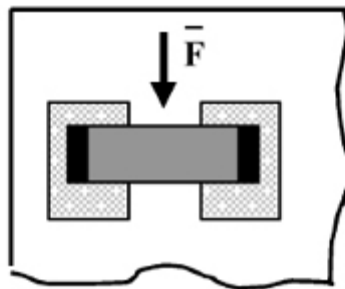
Obr. 1.3: Znázornění vzniku a zvětšování trhlin v IMC pájeného spoje vlivem stárnutí [11].

1.4 Mechanické zkoušky pájeného spoje

Mechanické zkoušky se používají pro znázornění deformace pájky v závislosti na čase, při působení vnějších zatěžovacích sil. Testování se provádí vibracemi, stříhem tahem, krutem, ohybem atd. Pájené spoje jsou mechanicky omezené na rozhraní mezi substrátem a pájkou, protože substrát se doformuje pružně na rozdíl od pájky, která se deformuje nepružně [12].

1.4.1 Zkouška stříhem

Tato metoda je popsána v normě ČSN EN 60749 – 19 jako zkouška pevnosti čipu stříhem nebo v normě ČSN EN 62137 – 1 – 2 jako zkouška pevnosti ve smyku. Zkouška stříhem je destruktivní metoda pro hodnocení stupně trhlin a poškození pájeného spoje, ale i pevnosti spoje. Lze ji použít pro součástky a konektory pro povrchovou montáž, ale není použitelná pro mnoha vývodové součástky a pro vývody typu gull wing (racího křídla). Dále není použitelná pro pájecí plošky o ploše 10 mm² a více, pro pouzdra pájená flip-chip technologií a pro flexibilní substráty. Při této zkoušce se zkoumá síla, která je potřebná k utrnutí součástky v pájeném spoji. Tato síla je odlišná pro různé typy pájek a je závislá na množství a velikosti trhlin, které se vytvoří po přetavení pájeného spoje [12].

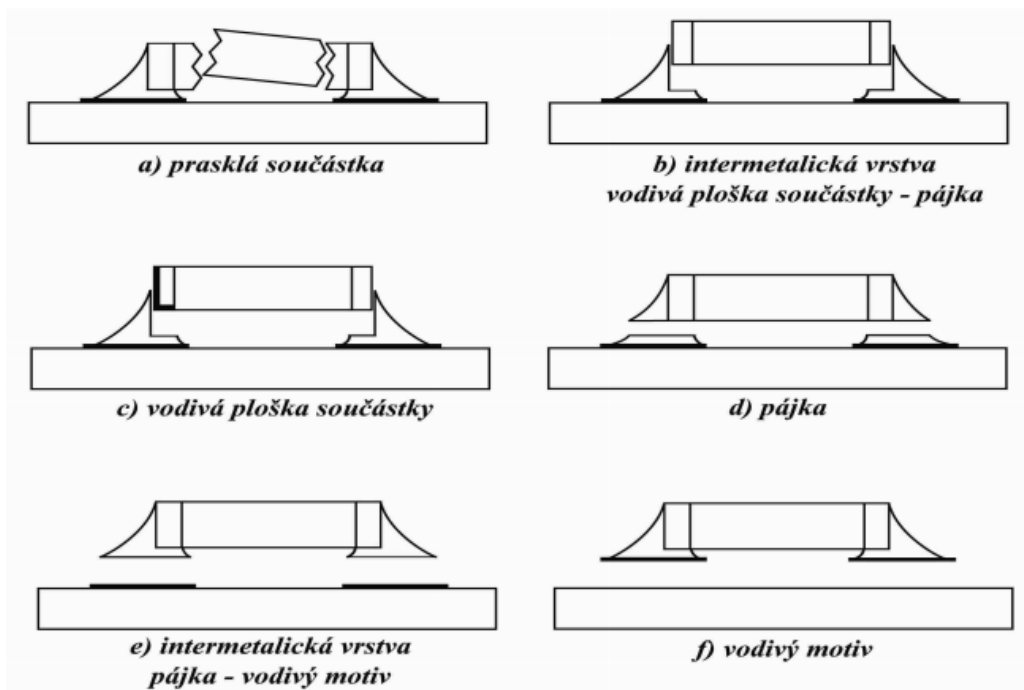


Obr. 1.4: Znázornění působení síly na testovanou SMT součástku při zkoušce stříhem.

Testování je obvykle prováděno při pokojové teplotě, ale může se provádět i při zvýšených teplotách nebo po teplotním cyklování. Při nastavování stříhové hlavy je potřeba správně nastavit rovnoběžnost stříhové hlavy s testovanou součástkou. Nesprávné nastavení způsobuje předčasné popraskání pájeného spoje, což vede k nesprávným naměřeným hodnotám.

Podle normy se musí nastavit také výška stříhové hlavy, která musí tlačit minimálně do $\frac{3}{4}$ výšky testované součástky. Stříhová hlava musí rovněž tlačit do co největší boční plochy součástky, ale přitom nesmí být příliš nízko, aby nejela po desce. Další nastavovaný

parametr je rychlost posuvu hlavy. Doporučená hodnota je od 0,5 po 9 mm/min. Dále je potřeba upevnit desu tak, aby se během testu neposunula. Po nastavení stříhové hlavy před součástku je spuštěn test. Působící síla se zvyšuje, dokud nedojde k utržení součástky. Tato síla se po utržení součástky zaznamená [12].



Obr. 1.5: Možná místa odtržení při zkoušce stříhem [13].

2 TEPLOTNÍ PROFIL

2.1 Pájení přetavením

Pájení přetavením je v dnešní době významným typem pájení, většina desek s vyšší technologickou úrovní je dnes zpracovávána právě touto metodou. Princip je opačný než u pájení vlnou nebo ručním pájením pomocí kontaktního nástroje, kdy se roztavený materiál přivádí na pájené místo. Zde se nejprve nanese pájecí materiál (pájecí pasta), poté se osadí součástky a následně se působí tepelnou energií, která způsobí přetavení pájecí pasty za vzniku pájeného spoje.

Přenos tepla na pájené spoje při pájení přetavením může být proveden následujícími způsoby:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekcí)
- zářením (radiací)

Podle způsobu ohřevu resp. zdroje tepla se rozlišují následující metody pájení přetavením:

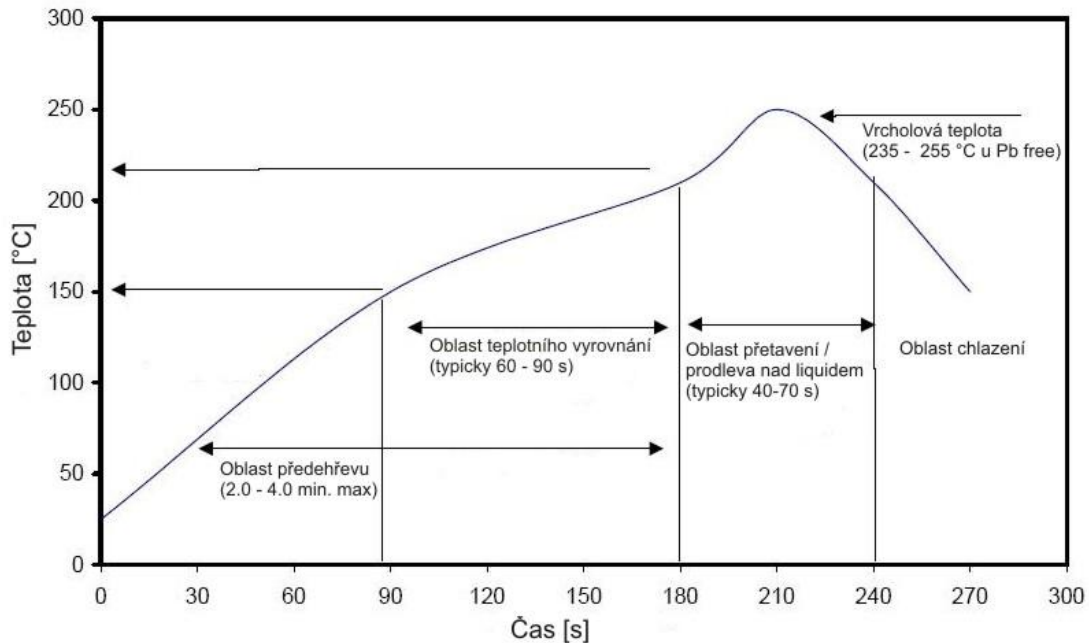
- pájení infračerveným zářením
- pájení horkým vzduchem nebo plynem (konvenční ohřev)
- pájení v kondenzačních parách
- pájení laserem
- pájení vyhříváním nástrojem (tzv. pájení impulzní)
- pájení na horké desce nebo pásu

2.2 Příčný teplotní profil

Příčný teplotní profil je ovlivněn zejména konstrukcí přetavovací pece a také hustotou osazení DPS. Příčný teplotní profil znázorňuje nehomogenitu přetavovacího tunelu v příčném směru během pájení přetavením. V současné době dosahují kvalitní přetavovací pece u příčného profilu rozdílu teplot $\pm 2^{\circ}\text{C}$ [3].

2.3 Podélný teplotní profil

Podélný teplotní profil je teplotní závislost na čase měřená na montážním celku při průchodu tunelem. Měření se využívá pro optimalizaci procesu nových typů DPS a pro kontrolu a dokladování nastavení procesu dle norem řady ISO 9000 [3].



Obr. 2.1: Příklad doporučeného podélného teplotního profilu pro bezolovnaté pájecí pasty.

Na obrázku 2.1 je uveden typický průběh podélného teplotního profilu pro bezolovnatou pájecí pastu (např. SAC305), který se dělí na čtyři hlavní oblasti a ve kterém probíhají následující děje [6]:

- **oblast předehřevu** (pokojová teplota až 150°C) – vzestupem teploty dochází k odpařování rozpouštědel použitých v pájecí pastě, tavidla a tixotropní látky začínají měknout. Obecně platí, že bod měknutí pájecí pasty je kolem 100 °C. Při příliš rychlém nárůstu teploty ale nemusí dojít k dostatečnému odpaření rozpouštědla před změknutím tavidla, pájecí pasta se stane příliš vodnatá a může zapříčinit vznik pájecích můstků či jiných nežádoucích defektů.
- **oblast teplotního vyrovnání** (150 – 217°C) – během této fáze dochází k úplnému odpaření rozpouštědel a teplo se začíná distribuovat rovnoměrně po celé ploše DPS. Tavidlo se dostává do tekutého stavu a rovnoměrně obaluje částice pájky. Také dochází k jeho rozprostření přes celou pájenou plochu, která je tak i chráněna před

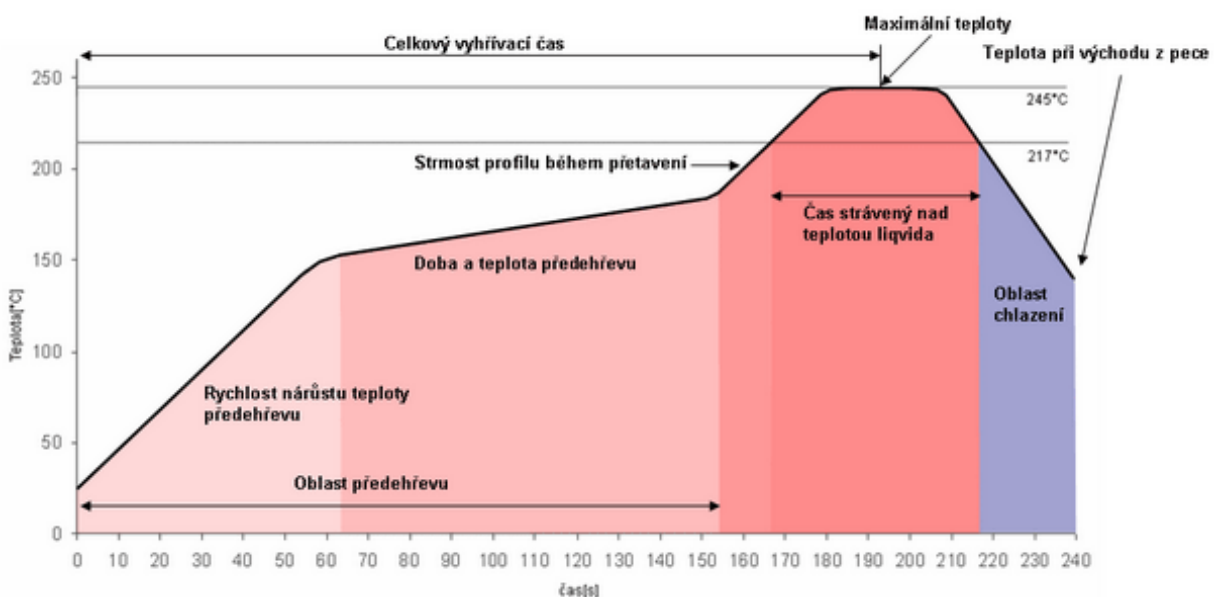
další oxidací. Zvýšená teplota následně zapříčiní aktivaci aktivátorů a pryskyřic a pomocí nich dochází k odstranění filmu kyslíčků vytvořených na každé částici pájky a na pájené ploše DPS.

- **oblast přetavení - TAL (Time above liquidus) (nad 217°C)** - částice pájky dosáhnou bodu tání, za pomoci tavidel dochází k odstranění oxidů a k vytvoření tekutého pájeného spoje. Důvodem k časové prodlevě nad liquidem (např. 40-70 s) je zajištění kompletního roztavení pájky a dosažení potřebného času smáčení i u komponent s vysokou tepelnou kapacitou.
- **oblast chlazení (217°C až pokojová teplota)** – dochází k tuhnutí pájky a chladnutí celé pájené sestavy, rychlost poklesu teploty by měla být co nejrychlejší za účelem kontroly velikosti zrna, ale neměla by překročit 6°C/s. Při pomalém chlazení se vytváří větší zrna, která snižují spolehlivost spoje.

V současné době se používají dva základní podélné teplotní profily, sedlový a lineární.

2.3.1 Podélný teplotní profil sedlového typu - RSS (Ramp Soak Spike)

Tento profil byl ovlivněn specifikacemi výrobců pájecích past, které vyžadovaly poměrně dlouhou dobu pro aktivaci tavidlové složky v pájecí pastě. Výhodou je více času k vyrovnání teplot rozdílných tepelných kapacit součástí na pájené DPS. Nevýhodou může být například dlouhá doba vystavení dané DPS v oblasti nad teplotou skelného přechodu (T_g) a tím větší možnost degradace materiálu.



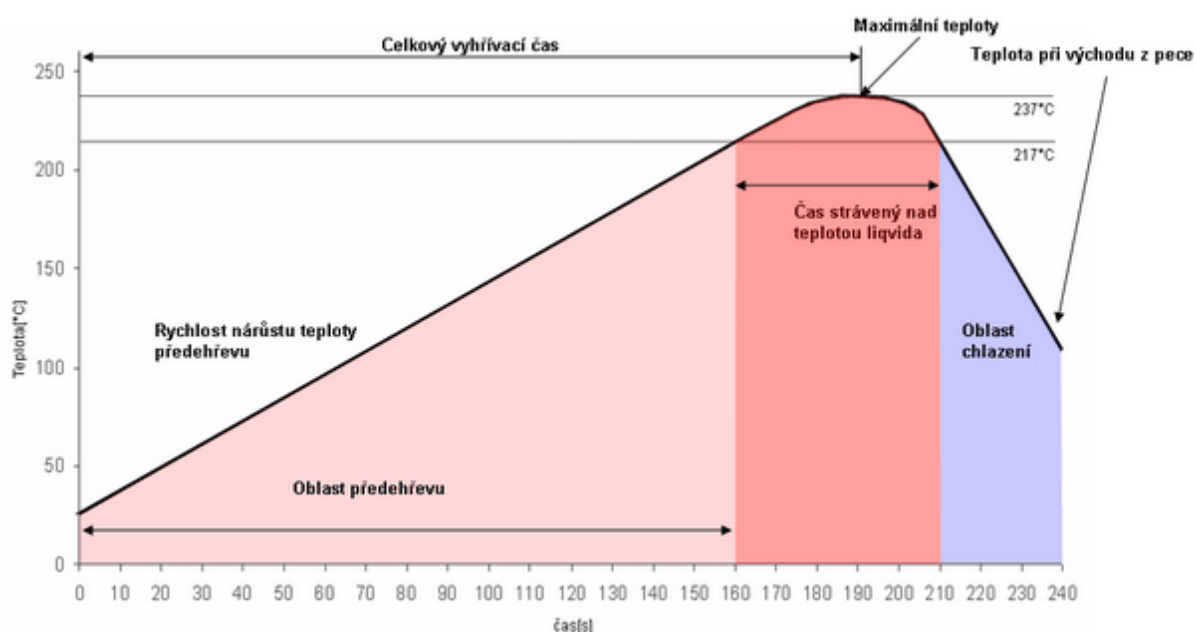
Obr. 2.2: Podélný teplotní profil typu RSS (Ramp Soak Spike) [11].

2.3.2 Podélný teplotní profil s lineárním nárůstem teploty – RTS (Ramp To Spike)

U tohoto teplotního profilu dochází k pozvolnému nárůstu teploty v oblasti předehřevu.

Díky vývoji nových tavidel, která nepotřebují tolik času pro vysušení, a aktivaci v oblasti předehřevu je umožněno použití pozvolného nárůstu teploty.

Profil RTS má několik výhod oproti profilu RSS. Použití profilu RTS obecně bude mít za následek jasnější a lesklejší pájené spoje a méně problémů týkajících se pájitelnosti, protože pájecí pasta v tomto profilu bude stále obsahovat jisté množství tavidla v celém procesu předehřevu. Tím je podporována lepší smáčivost pájky a proto RTS profil by se měl používat na hůře smáčitelné slitiny a části. Díky lepšímu řízení nárůstu teploty (ramp rate) ubývá také problému ohledně množství pájecích vad nebo tepelného šoku vyplývajícího z příliš vysokého nárůstu gradientu teploty v oblasti předehřívání. Profil RTS je také ekonomičtější v důsledku snížení potřebné tepelné energie využívané v první polovině pece [2].



Obr. 2.3: Podélný teplotní profil typu RTS (Ramp To Spike) [11].

2.4 Nastavení a optimalizace teplotního profilu

Pájecí proces se správně nastavenou procesní charakteristikou v teplotně časové ose je důležitým předpokladem formování spolehlivého pájeného spoje. Procesní charakteristiky musí být nastaveny adekvátním způsobem pro použitý materiálový systém, velikosti součástek a typy pouzder, pro odpovídající zástavbovou hustotu, tepelnou kapacitu DPS i pro environmentální systém [4]. Každá deska plošného spoje může například obsahovat tisíce pájených spojů, které v ideálním případě vyžadují podobný teplotní profil, aby se dosáhlo dobré kvality pájených spojů. Zásadní problém tvoří nastavení jednotlivých pájecích zón přetavovací pece tak, aby výsledný teplotní profil vyhovoval pro všechny pájené spoje. Zavedením bezolovnatých pájecích past se tento problém ještě více ztížil a to z důvodu jejich vyšší teploty přetavení a tím užšího procesního okna oproti pájecím pastám obsahujícím olovo [1].

V současné době se nejvíce používají pro usnadnění realizace a kontroly tvaru teplotního profilu následující tři prognostické metody [1]:

1. **Metody simulační**, které vytvoří počítačový model dané pájené DPS a používané přetavovací pece včetně okrajových podmínek. Pomocí iteračních simulací se upravují jednotlivé procesní parametry, dokud výsledek simulace neodpovídá cílovému profilu. Tento výsledek je pak použit pro nastavení dané přetavovací pece.
2. **Metody statistického řízení procesu (SPC)**, kde využitím výsledků a znalosti z různých experimentů z oblasti pájení přetavením je sestaven softwarový předpovědní algoritmus, na jehož základě jak získáno požadované nastavení přetavovací pece.
3. **Metody využívající umělé inteligence (AI)**, kde speciálně zkonstruovaný expertní systém získává a analyzuje informace od příslušných činitelů ovlivňujících pájecí proces a vyvozuje z nich optimální nastavení pro dosažení požadovaného teplotního profilu.

3 INTEGRÁL TEPLOTY A ČASU PÁJENÍ („HEATING FACTOR“)

Poruchy pájených spojů vyvolané tepelnou únavou se běžně objevují v oblasti SMT a to například z důvodu rozdílného koeficientu tepelné roztažnosti (TCE) mezi SMD komponenty a DPS. Existuje více příčin, proč může dojít k takovému poškození pájeného spoje. Jedním z častých důvodů selhání může být zapříčiněno intermetalickou vrstvou (IMC) mezi pájkou a měděnou ploškou. V historii bylo řešení tohoto problému zaměřeno na zkoumání tloušťky IMC mezivrstvy Cu-Sn a její mikrostrukturální analýzy. O významu tloušťky IMC na poruchovost pájeného spoje pojednává i řada publikací (odkazy 1-11 v [6]). Bylo zjištěno, že životnost pájených spojů degraduje postupně v důsledku přírůstku tloušťky IMC.

Měření tloušťky IMC je však v praxi velice obtížné a obvykle vyžaduje použití elektronového mikroskopu (SEM), případně energiově disperzní analýzy (EDX), spolu s výbrusem řezu pájeného spoje. Je proto evidentní, že pro on-line měření a kontrolu kvality pájených spojů během procesu přetavení jsou tyto metody nevhodné.

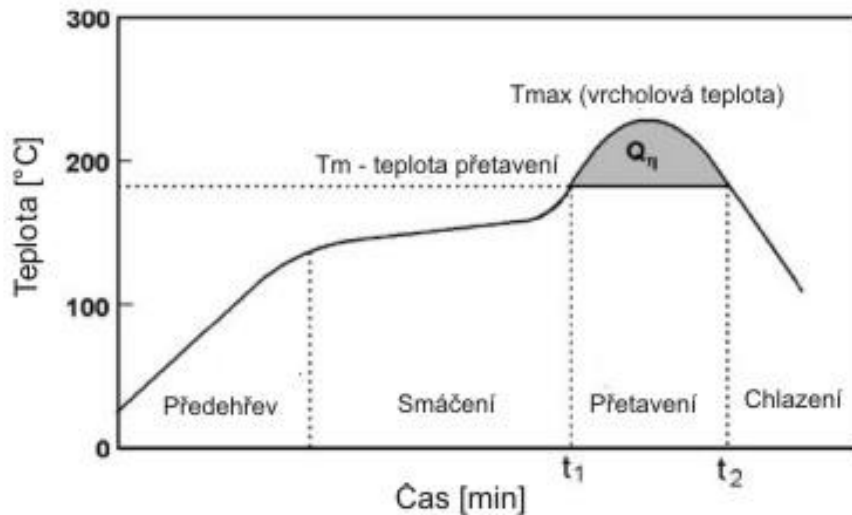
Z tohoto důvodu byl nedávno zaveden nový parametr při procesu přetavení, v anglické odborné literatuře označovaný jako tzv. „Heating factor“ Q_η , který reprezentuje kombinovaný účinek teploty přetavení a času nad teplotou liquidu během pájecího procesu.

3.1 Definice „Heating factor“

Za předpokladu, že bod tání eutektické pájecí pasty používané při pájení je definovaný jako teplota liquidu T_m , pak „Heating factor“, označovaný jako Q_η , může být definován jako integrál měřené teploty $T(t)$ nad teplotou liquidu s ohledem na dobu prodlevy $t_2 - t_1$, matematicky formulovaný jako:

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt \quad (3.1)$$

Rozměrem veličiny Q_η je sekunda \times Kelvin (s.K), případně sekunda \times stupeň ($s^\circ\text{C}$) [6]. Grafické znázornění dané oblasti v teplotním profilu je možno vidět na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Příklad teplotního profilu s vyznačenou oblastí Q_{η} .

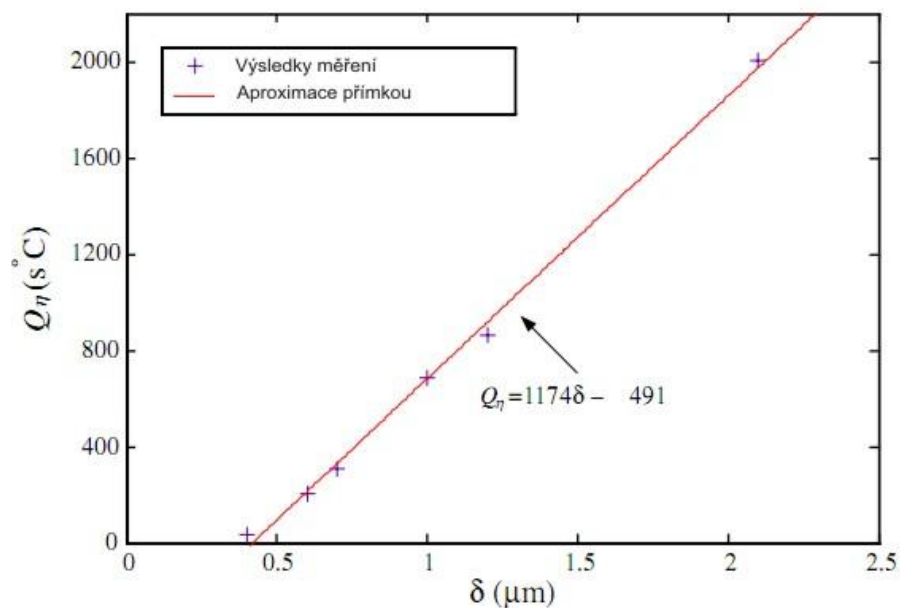
Bylo pokusně zjištěno, že jestliže je například hodnota Q_{η} příliš malá, nedojde k vytvoření spolehlivého pájeného spoje a to i když dojde k přetavení pájky za vysoké teploty nebo za použití dlouhých časů pro přetavení [6]. Viz také kapitola 3.3.

3.2 Vliv „Heating factor“ na tloušťku IMC vrstvy

Experimentálně bylo zjištěno, že průměrná tloušťka IMC vrstvy roste lineárně s přírůstkem Q_{η} a to až do dosažení jisté saturační hodnoty. Například při použití pájky Sn63Pb37 a tloušťky měděné plošky 150 μm je tato saturační hodnota okolo 3 μm , pak už se závislost stává nelineární. Na základě výsledků experimentu [6] a měření tloušťky IMC vrstvy byla stanovena přibližná rovnice její závislosti na velikosti Q_{η} (3.2) pro výše uvedenou olovnatou pájku:

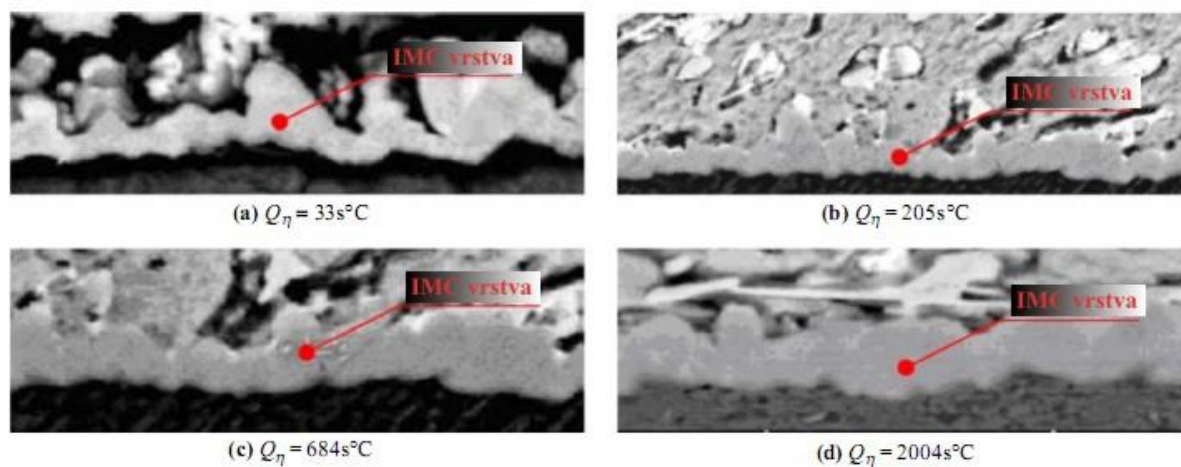
$$Q_{\eta} = 1174 \cdot \delta - 491,3 \quad (3.2)$$

kde δ reprezentuje tloušťku IMC vrstvy Cu-Sn v μm . Grafickou závislost této rovnice ukazuje následující obrázek sestavený na základě naměřených hodnot a jejich aproximace přímkou [6].



Obr. 3.2: Grafická závislost vztahu Q_η jako funkce tloušťky IMC vrstvy δ [6].

Následující obrázek 3.3 zobrazuje tloušťku a strukturu IMC vrstvy výbrusu pájeného olovnatého spoje pro čtyři různé hodnoty Q_η . Při nízkých hodnotách $Q_\eta = 33 \text{ s.K}$ je zformovaná IMC vrstva velmi tenká a nesouvislá (viz. a)). Takový spoj nepovede k jeho dlouhé životnosti. Se zvětšujícím se množstvím Q_η začíná být IMC vrstva tlustší a souvislejší a rozhraní mezi pájkou a IMC vrstvou je velmi nerovné. Čím větší hodnota Q_η je dodána, tím hrubší IMC vrstva je zformována. Na jednu stranu nerovný povrch zlepšuje mechanickou odolnost spoje (například ve střihu), ale na druhou stranu příliš tenká vrstva je velmi křehká a zvětšuje se pravděpodobnost selhání spoje v prostředí mechanického (vibračního) namáhání [7].

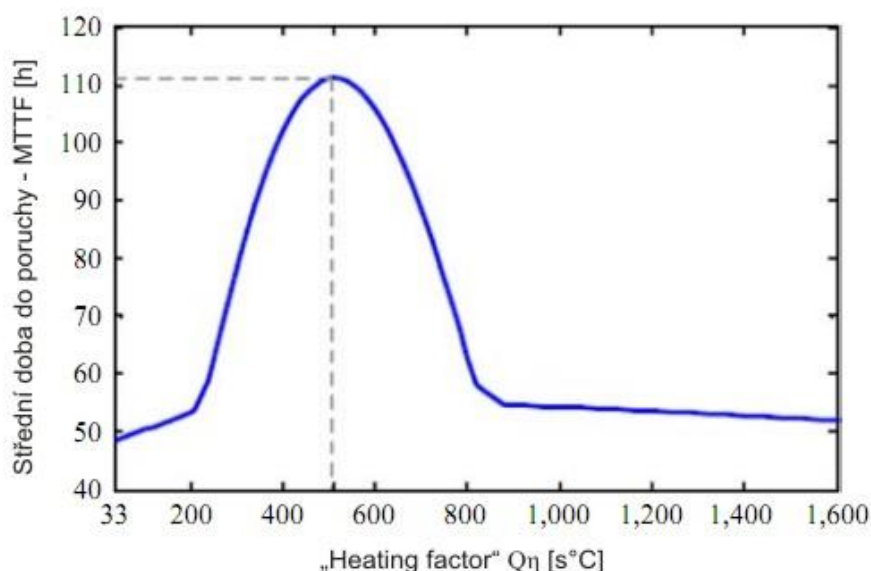


Obr. 3.3: Mikrostruktura IMC vrstvy pájeného spoje pro různé hodnoty Q_η [7].

„Heating factor“ má tedy dominantní vliv na formování tloušťky IMC vrstvy během pájecího procesu a jeho správnou volbou a kontrolou během pájení můžeme dosáhnout požadované vlastnosti a spolehlivého pájeného spoje.

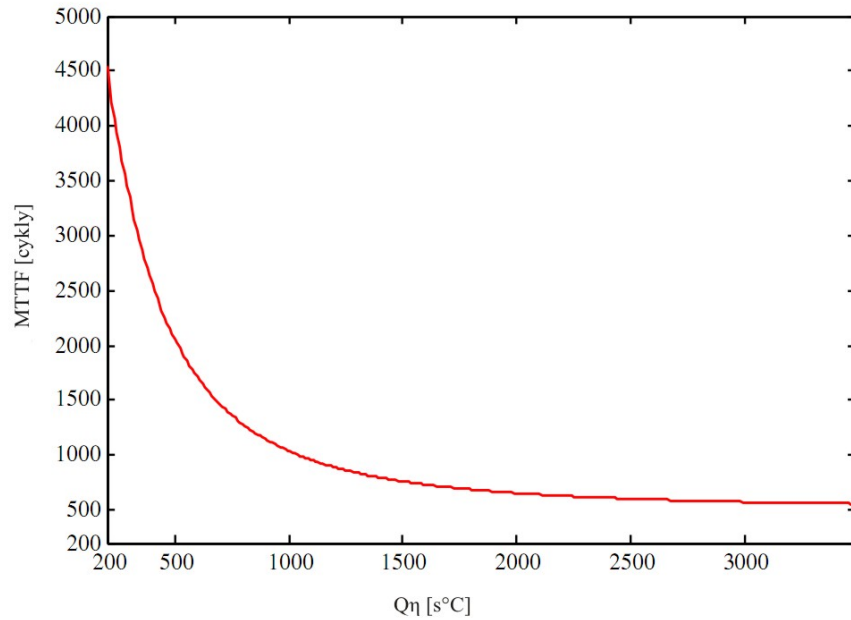
3.3 Vliv „Heating factor“ na spolehlivost a střední dobu poruchy

Na základě různých statistických metod (např. pomocí Weibullový distribuční funkce) lze odvodit vliv $Q\eta$ na střední dobu poruchy (MTTF - Mean Time to Failure) pájeného spoje. Byly provedeny různé experimenty zabývající se touto závislostí [6,7]. Na obrázku 3.4 je pro znázornění uveden výsledek mechanického vibračního testu spolehlivosti μ BGA pouzder zapájených pomocí eutektické pájecí pasty 63SnPb37 při různých hodnotách $Q\eta$. Z grafu plyne, že hodnota MTTF nejdříve stoupá a následně klesá se zvětšující se hodnotou $Q\eta$. Největší hodnota MTTF se pohybuje okolo $Q\eta = 510$ s.K. Je také vidět, že MTTF roste pomalu při $Q\eta < 200$ s.K a následně ostře roste až do $Q\eta = 510$ s.K, potom následně MTTF zase rychle klesá. Při hodnotách $Q\eta > 1000$ s.K je pokles MTTF už nevýrazný. Optimální hodnota $Q\eta$ pro pájení μ BGA pouzder je proto v rozmezí 300 – 700 s.K a měla by být udržována v těchto mezích během procesu pájení [7].



Obr. 3.4: Grafická závislost střední doby poruchy pájeného spoje v závislosti na $Q\eta$ podle [7].

Při použití jiné metodiky testování, například testu spolehlivosti využívající teplotního cyklování [6], lze nalézt trochu odlišnou závislost MTTF na Q_{η} , kdy MTTF monotónně klesá se zvětšujícím se Q_{η} , viz Obrázek 3.5. To je pravděpodobně proto, že nedokonalá IMC vrstva pájeného spoje vytvořená za nízkého Q_{η} může dále růst během tepelného cyklování, což má pak má za následek delší a lepší hodnoty MTTF [6].



Obr. 3.5: Grafická závislost střední doby poruchy pájeného spoje v závislosti na Q_{η} podle [6].

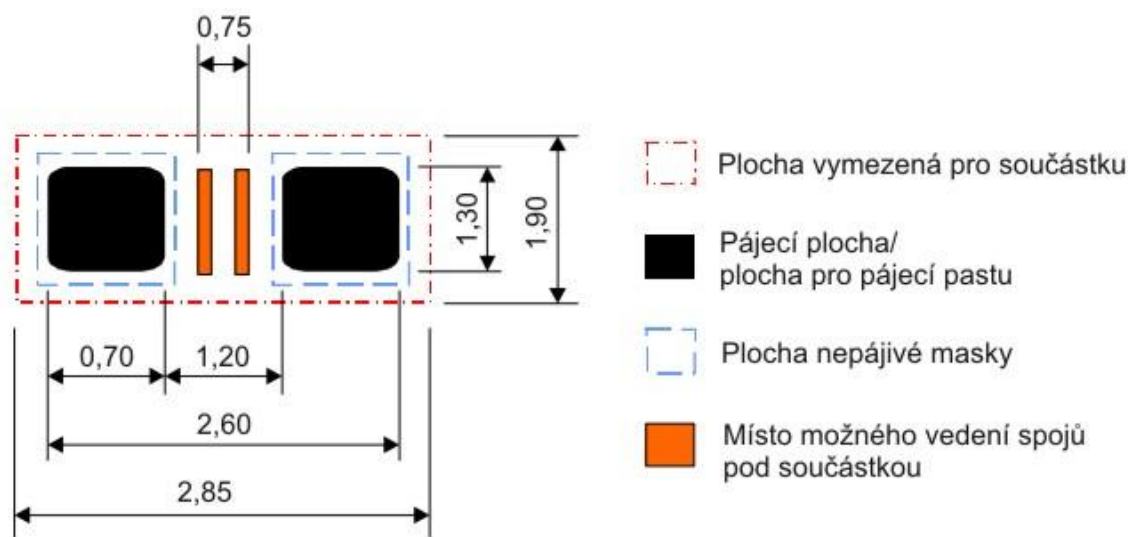
4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Zkušební testovací obrazec DPS

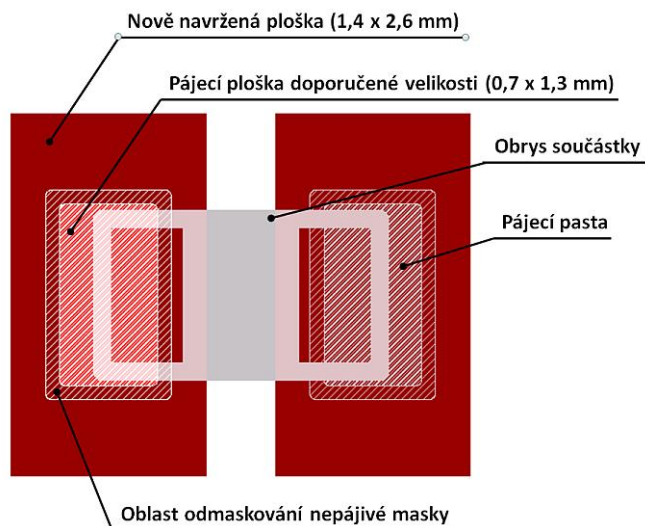
Základním požadavkem na testovací obrazec bylo vytvoření sítě rezistorů o velikosti 0805, která bude vhodná pro mechanické testování kvality spoje pomocí zkoušky stříhem. DPS by také měla být navržena pro bezproblémové zapájení pomocí pájení přetavením v běžně používaných pájecích pecích.

Dle tohoto zadání byl v programu Eagle v4.16 vytvořen jednostranný testovací obrazec plošných spojů, který se skládá ze sítě 100 ks rezistorů na jedné DPS. Všechny rezistory jsou zapojeny v sérii z důvodu budoucího možného využití pro elektrické testování vodivosti pájeného spoje (není součástí této práce). Z toho důvodu byla deska opatřena i ploškami pro snadné zapojení do konektoru typu SLOT62 a doplněna odbočkami pro možné čtyřbodové měření vodivosti.

Velikost doporučených pájecích plošek pro rezistory velikosti 0805 (obrázek 4.1) byla zvětšena na dvojnásobnou velikost (1,4 x 2,6 mm, viz obrázek 4.2) z důvodu větší odolnosti proti odtržení měděné fólie od základního materiálu při mechanické zkoušce. Následně navržená nepájivá maska zmenšuje jejich velikost zpět na doporučené rozměry pro pájení přetavením. Tento návrh se později ukázal jako úspěšný, při testování pevnosti spoje nedošlo k žádnému odtržení této pájecí plošky u všech testovaných spojů.

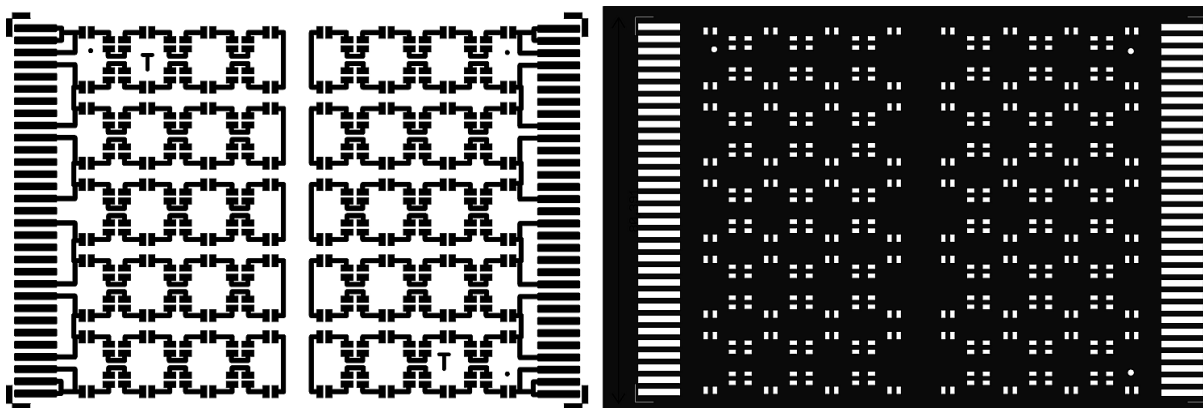


Obr. 4.1: Doporučené velikosti ploch pro součástku velikosti 0805 pro pájení přetavením [14].



Obr. 4.2: Detail a rozložení nově navržených ploch pro součástku 0805 na testovací DPS.

V přípravné fázi se později ukázalo, z důvodu snadnějšího uchycení na dopravníku v přetavovací peci, jako výhodnější umístit dva testovací obrazce na jednu DPS a zvětšit tak její celkovou velikost DPS z velikosti 80 x 60 mm na konečný dvojnásobný rozměr, tj. 120 x 80 mm. Rozhraní obou obrazců bylo doplněno „v“ drážkou pro možné snadné oddělení obou motivů. Výsledná podoba vodivého obrazce a nepájecí masky je na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Výsledný obrazec spojů (vlevo) a nepájecí masky (vpravo) navržené testovací DPS.

Pro testovací účely bylo vyrobeno na zakázku ve firmě ČeMeBo Blansko 30ks jednostranných DPS dle předchozího návrhu. Jako základní materiál byl zvolen FR4 s tloušťkou mědi 35 μm a povrchovou úpravou OSP (transparentní organická vrstva nanesená na místa, která nejsou zakryta nepájecí maskou, tloušťka vrstvy je přibližně od 0,1 do 0,6 μm).

4.2 Osazení a zapájení testovacích DPS

4.2.1 Tisk pájecí pasty a osazení DPS rezistory

Tato a následující část projektu probíhala ve spolupráci s brněnskou pobočkou firmy Honeywell. Nejprve byla na DPS pomocí automatického šablonového tisku nanášena bezolovnatá pájecí pasta AIM NC 257-2 (slitina SAC305, teplota liquidu 217°C). Tloušťka předem připravené šablony byla 150 μm . Následně byla u každé DPS provedena inspekce tisku pájecí pasty (SPI – Solde Paste Inspection). Stručné výsledky tohoto testu jsou v následujícím přehledu:

- Počet testovaných plošek: 11600 (400/DPS, tj. 29ks DPS)
- Zjištěný minimální / maximální objem pasty: 85,4% / 126,9% (od nominální hodnoty)
- Průměrný objem pasty: 105,5 % (od nominální hodnoty) ; 0,144 mm^3 (0,137 mm^3)
- Směrodatná odchylka: 4,5 %

V další fázi bylo na osazovacím automatu provedeno osazení celé DPS rezistory velikosti 0805 nulové hodnoty (výrobce YAGEO, typ RC0805JR, vývody z materiálu nikl/cín, souhrnná plocha (spodní + boční strana) jednoho vývodu cca 1,17 mm^2 [18]).

4.2.2 Profilování a zapájení testovacích DPS

Pro zapájení testovacích desek byla použita konvekční přetavovací pec Heller 1812 EXL. Tato pec obsahuje 12 topných a 2 chladicí zóny, ochranná atmosféra nebyla použita. Pro proměření příčného a podélného teplotního profilu byl využit profiloměr ECD SuperM.O.L.E.® Gold a tři termočlánky připájené na pájecí plošky DPS pomocí vysokoteplotní pájky. Jejich umístění ilustruje obrázek 4.4, dva články byly umístěny po stranách a jeden uprostřed DPS. Pro rychlé vyhodnocení naměřených dat a zjištění hodnot Q_{η} sloužil originální software M.O.L.E.® v.3.10.



Obr. 4.4: Měření teplotních profilů - umístění termočlánků na profilovací DPS.

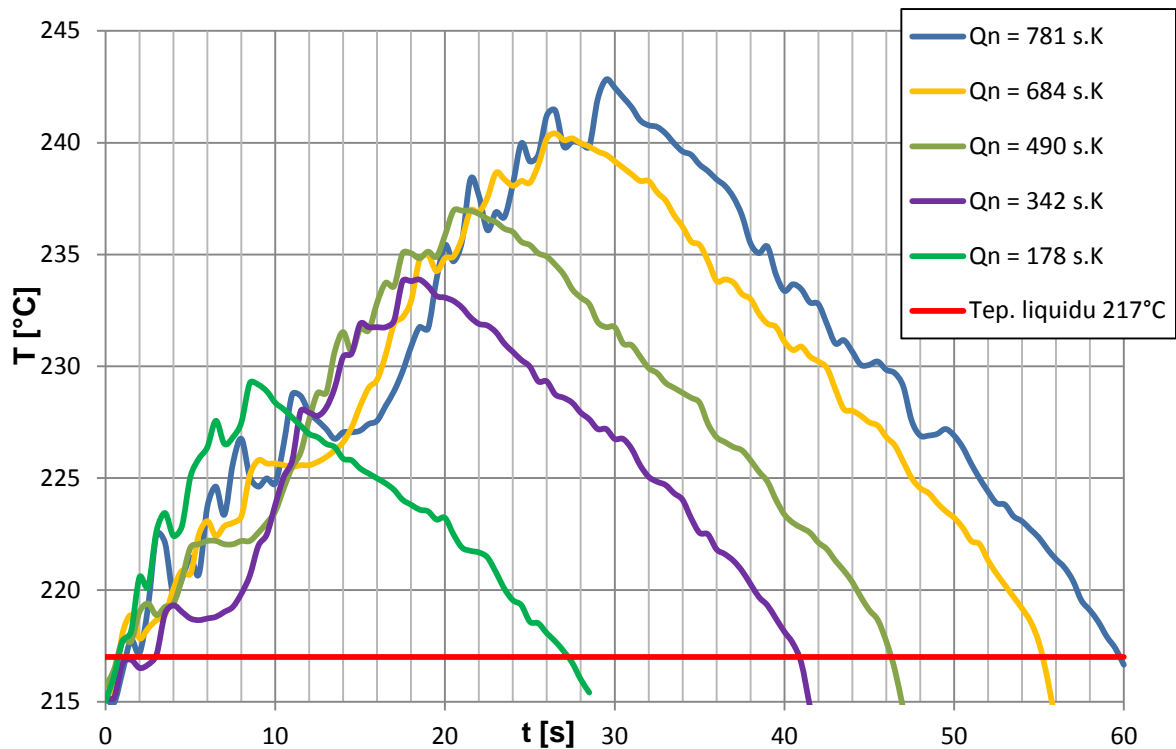
Z naměřených dat vyplynulo, že příčný teplotní profil vykazuje určitou teplotní nehomogenitu, krajní teploty byly vyšší než teplota uprostřed DPS. To bylo pravděpodobně způsobeno CBS (Central Board Support). Je to podpěra, která zabraňuje prohnutí rozměrnějších a těžších DPS během průchodu pájecím tunelem. CBS je součástí pájecí pece a nelze ji jednoduchým způsobem odstranit.

Jako referenční byl zvolen termočlánek umístěný uprostřed DPS (modrý). Od jeho hodnot byly odvozeny hodnoty Q_n a výsledná podoba podélného teplotního profilu. Požadované velikosti Q_n byly realizovány různou rychlostí posuvu DPS na dopravníku, teploty v jednotlivých zónách pece zůstaly konstantní. Celkem bylo zvoleno 5 rychlostí posuvu a i tím 5 různých integrálů teploty a času, všechny v mezích doporučených výrobcem pájecí pasty. Výsledné podélné teplotní profily jsou v přílohách A1-5, dosažené hodnoty Q_n v tabulce 4.1 a detailní pohled na oblast přetavení zobrazuje sumarizační graf na obrázku 4.5.

Přesné hodnoty Q_n byly získány výše zmíněním profilovacím softwarem a následně i ověřeny dodatečně pomocí výpočtu integrálu z naměřených dat a to za použití lichoběžníkové numerické metody. Ve výsledku a následném dalším zpracování jsou zanedbány možné chyby měření teplot ($\pm 0.1\% + 1^\circ\text{C}$ u použitého profiloměru) a případná nehomogenita podélného profilu na jednotlivých částech DPS.

Tabulka 4.1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro jednotlivé profilovací termočláanky.

Rychlost dopravníku [cm/min]	Qn [s.K] pro termočlánek			Tmax [°C]		
	Červený	Modrý (ref.)	Zelený	Červený	Modrý (ref.)	Zelený
80	868	781	882	243,6	242,8	244,1
85	787	684	774	242,7	240,4	242,7
95	578	490	580	239,5	237,0	239,8
105	409	342	430	235,9	233,9	236,9
120	234	178	261	231,5	229,3	232,6



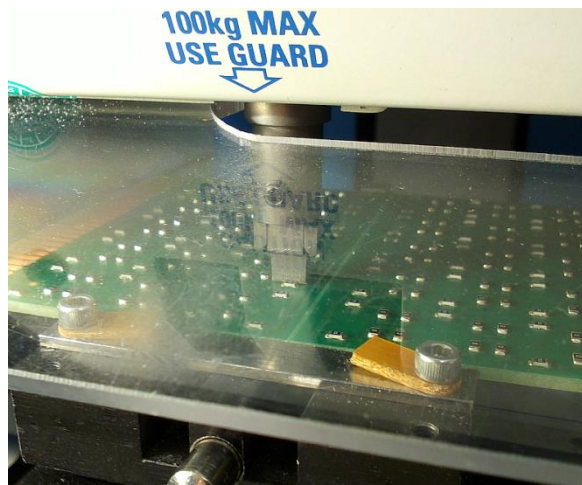
Obr. 4.5: Podélný teplotní profil - detailní pohled na oblast nad liquidem pro všechny hodnoty Q_{η} .

Na závěr bylo provedeno zapájení všech předem osazených DPS podle výše uvedených pěti profilů, a to v poměru 6 DPS na jednu hodnotu Q_{η} . Následně vždy 3 DPS/ Q_{η} prošly pájecím tunel ještě jednou. Tímto způsobem měly být získány dvojnásobné hodnoty Q_{η} a tím i větší škála vzorku. Pozdější výzkum ale ukázal, že hodnoty integrálu teploty a času nelze lineárně sčítat. Získání závislosti a poměrů sčítání hodnot Q_{η} z jednotlivých průchodů by vyžadovalo další rozsáhlý výzkum. Z tohoto důvodu jsou dále zpracovány jen vzorky získané jedním průchodem přetavovací pecí. Jedná se vždy o 3 ks DPS na každou z pěti hodnot Q_{η} .

4.3 Testování pevnosti pájených spojů

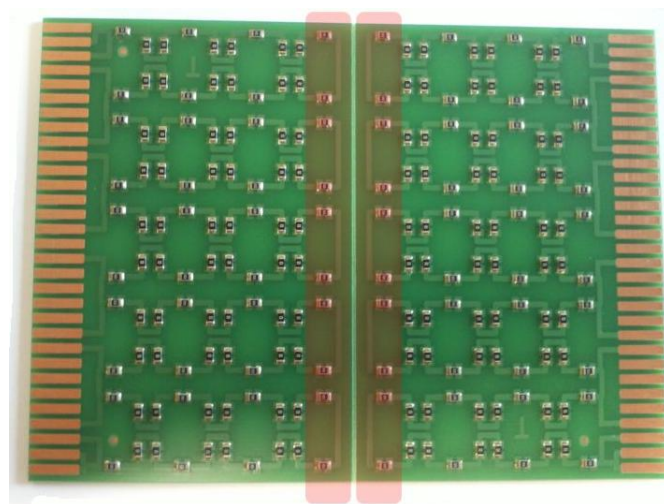
Měření mechanické pevnosti pájených spojů na stříh bylo provedeno ve školní laboratoři na zařízení DAGE PC2400 (viz obrázek 4.4), na kterém byly nastaveny následující parametry:

- Rychlost posuvu testovacího hrotu: 300 $\mu\text{m/s}$
- Výška hrotu od substrátu při testu: 150 μm
- Rozsah zatížení: 10 kg
- Vzdálenost, kterou ujede hrot po utrhnutí součástky: 500 μm
- Destruktivní test

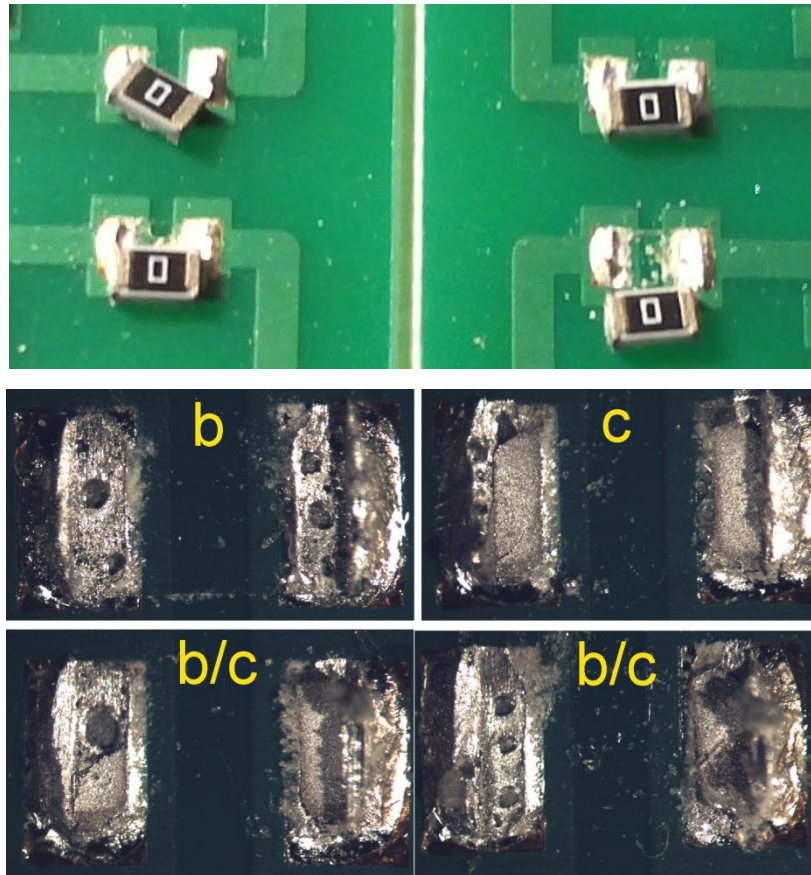


Obr. 4.6: Zařízení DAGE PC2400 (vlevo) a ukázka z testu stříhu (vpravo).

Testování pevnosti pájených spojů bylo provedeno vždy na dvaceti kusech rezistorů ze střední oblasti DPS (viz obrázek 4.7), celkově tedy bylo získáno 60 hodnot / Q_n . K utržení součástky docházelo pouze na straně spoje pájka-součástka a to nejčastěji ve dvou místech. Buď v IMC vrstvě na rozhraní nikl-pájka (tj. rozhraní vodivá ploška součástky-pájka, viz obr. 1.5 b)), nebo došlo k odtržení plošky součástky (viz obr. 1.5 c)). Velmi častá byla také kombinace obou zmíněných případů (b/c) a to v různém poměru. Výskyt prasklých součástek byl minimální a je dále zanedbán, ostatní typy odtržení nebyly zjištěny. Ukázky odtržených součástek a detailní pohled na nejčastějších typy odtržení pájených spojů jsou zobrazeny na obr. 4.8 (označení typů odtržení vychází pro přehlednost z označení na obrázku 1.5). Při vyhodnocování byly brány v úvahu pouze místa na spodní straně součástky, jelikož místa na bočních stěnách nelze spolehlivě vyhodnotit. Na pájených spojích je možno také pozorovat značný výskyt dutin (voidů), které vzhledem ke své velikosti mohou mít velký vliv na výslednou pevnost spoje. Tato problematika je více rozebrána v závěrečné diskuzi, kap. 4.6.



Obr. 4.7: Označení rezistorů, na kterých bylo provedeno testování pevnosti spojů – červená oblast.



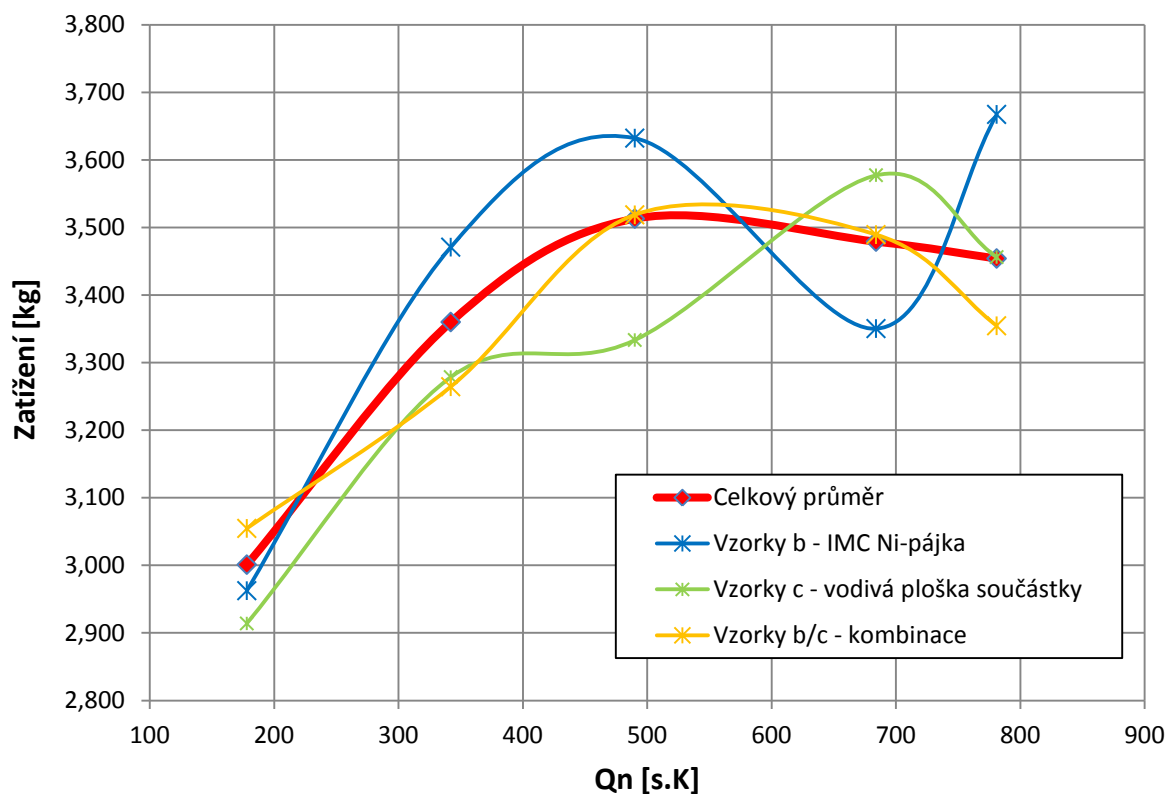
Obr. 4.8: Ukázky utržených součástek (nahore) a detailní pohled na místa odtržení (dole).

Podrobné výsledky všech testovaných spojů, včetně místa jejich odtržení, jsou uvedeny v příloze A6 a zkrácené v následující tabulce 4.2. Závislost pevnosti spoje ve stříhu na velikosti $Q\eta$ ukazuje graf na obrázku 4.9. Z výsledků plyne, že největší celkové pevnosti dosahují spoje okolo hodnot $Q\eta = 500$ s.K, při vyšších hodnotách pevnost opět mírně klesá. Význam celkové závislosti je ovšem sporný, jelikož na výslednou hodnotu mají vliv všechny tři typy odtržení součástky a to v různém poměru. Zejména hodnoty obsahující odtržení pájecích plošek (c, b/c) mohou být značně limitovány provedením a pevností (konstrukcí) vývodu součástky. Významnější se proto jeví závislosti výskytu způsobu odtržení (viz. obr. 4.10), kdy se vzrůstající hodnotou $Q\eta$ klesá podíl spojů odtržených v IMC vrstvě a roste podíl spojů odtržených v místě plošky součástky, pájený spoj se tak stává mechanicky pevnějším. Pevnost IMC vrstvy (obr. 4.9 – b) dosahuje nejvyšší pevnosti okolo hodnot $Q\eta = 500$ a 800 s.K, naopak při hodnotách okolo 650 s.K dochází k zřetelnému poklesu. Výsledky ale mohou být ovlivněny nerovnoměrným rozložením počtu vzorků v jednotlivých hodnotách $Q\eta$, případně nepřesným individuálním vyhodnocením způsobu odtržení každého pájeného spoje.

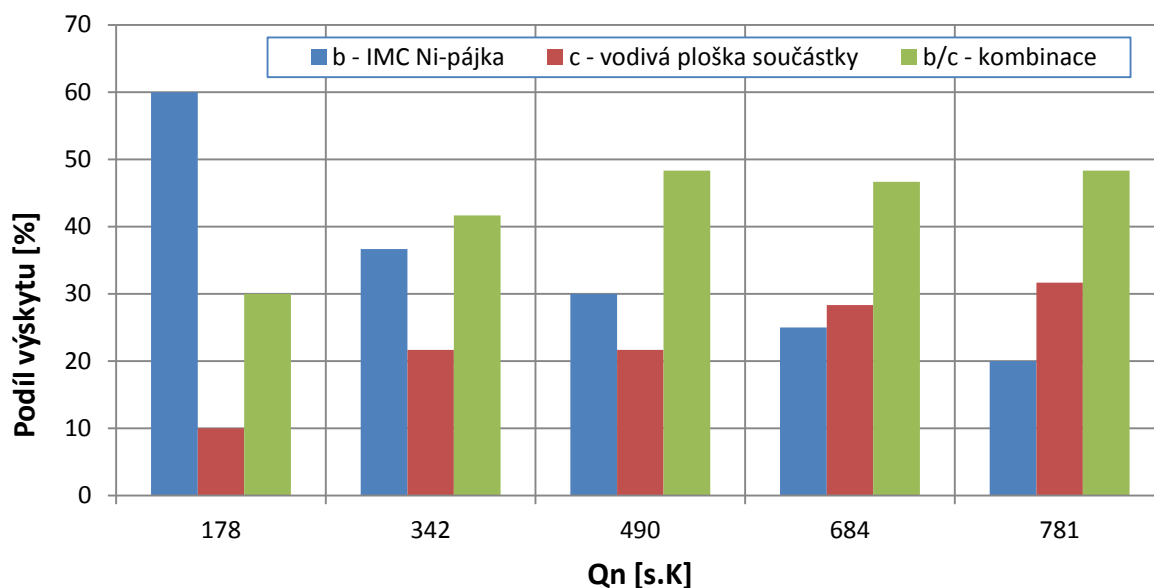
Tabulka 4.2: Průměrné hodnoty pevnosti pájených spojů a místo jejich odtržení.

Pevnost ve stříhu:	Qn [s.K]				
	178	342	490	684	781
Průměr [kg]	3,001	3,360	3,513	3,479	3,454
Směr. odchylka [kg]	0,370	0,393	0,482	0,536	0,460
Místo odtržení [ks]:					
b - IMC Ni-pájka	36 (60%)	22 (37%)	18 (30%)	15 (25%)	12 (20%)
c - vodivá ploška součástky	6 (10%)	13 (22%)	13 (22%)	17 (28%)	19 (32%)
b/c - kombinace	18 (30%)	25 (42%)	29 (48%)	28 (47%)	29 (48%)
Průměrná pevnost dle místa odtrhu [kg]:					
b - IMC Ni-pájka	2,962	3,471	3,632	3,350	3,667
c - vodivá ploška součástky	2,914	3,279	3,333	3,577	3,456
b/c - kombinace	3,055	3,264	3,519	3,489	3,354

Poznámka: označení místa odtrhu b,c,b/c odpovídá značení na obrázku 1.5



Obr. 4.9: Graf změřené závislosti pevnosti spoje v závislosti na Q_n při použití zkoušky stříhem.

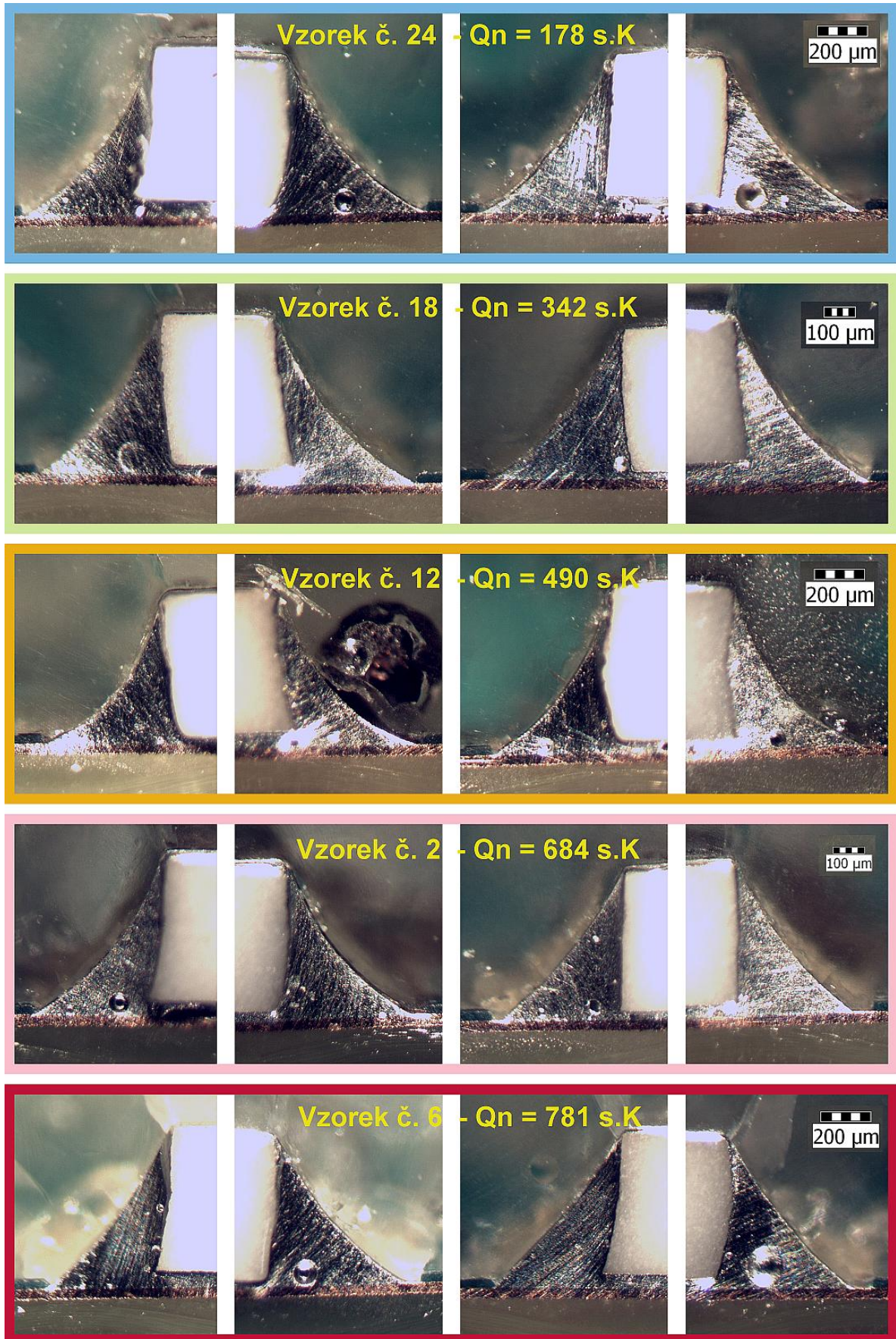


Obr. 4.10: Procentuální podíl výskytu daného typu místa odtržení součástky při testu stříhem.

4.4 Vyhodnocení vzhledu spoje pomocí optického mikroskopu

Pro vyhodnocení vzhledu spoje a zkoumání tloušťek IMC vrstev na optickém a elektronovém mikroskopu byl nejprve proveden mikrovýbrus spoje. Pro zkoumání byla vybrána na každé referenční DPS vždy oblast dvou rezistorů, která byla vyříznuta a zalita do technického Dentacrylu. Následně bylo provedeno na zařízení Metasinex, za pomoci smirkových papírů různé zrnitosti a brusné diamantové pasty, postupné odbrušování a závěrečné leštění zkoumaných spojů. Snahou bylo vyhodnocovat řez spoje nacházející se v rovině uprostřed šířky součástky.

Souhrnný přehled obrázků všech spojů získaných pomocí optického mikroskopu je znázorněn na obrázku 4.11. Na řadě míst pájeného spoje je možno ve slitině pájky zjistit výskyt dutin (voidů). Jejich výskyt je patrný při všech hodnotách Q_n a lze se tedy domnívat, že hodnota Q_n nemá na jejich tvorbu podstatný vliv. Porovnáním spojů je možné dále vypořadovat, že při vyšších hodnotách Q_n vykazují vnější hrany pájeného spoje lineárnější průběh. Tento jev a jeho závislost by bylo možno dále zkoumat, například při použití většího množství vzorků spojů a nejlépe i při větším rozsahu Q_n .

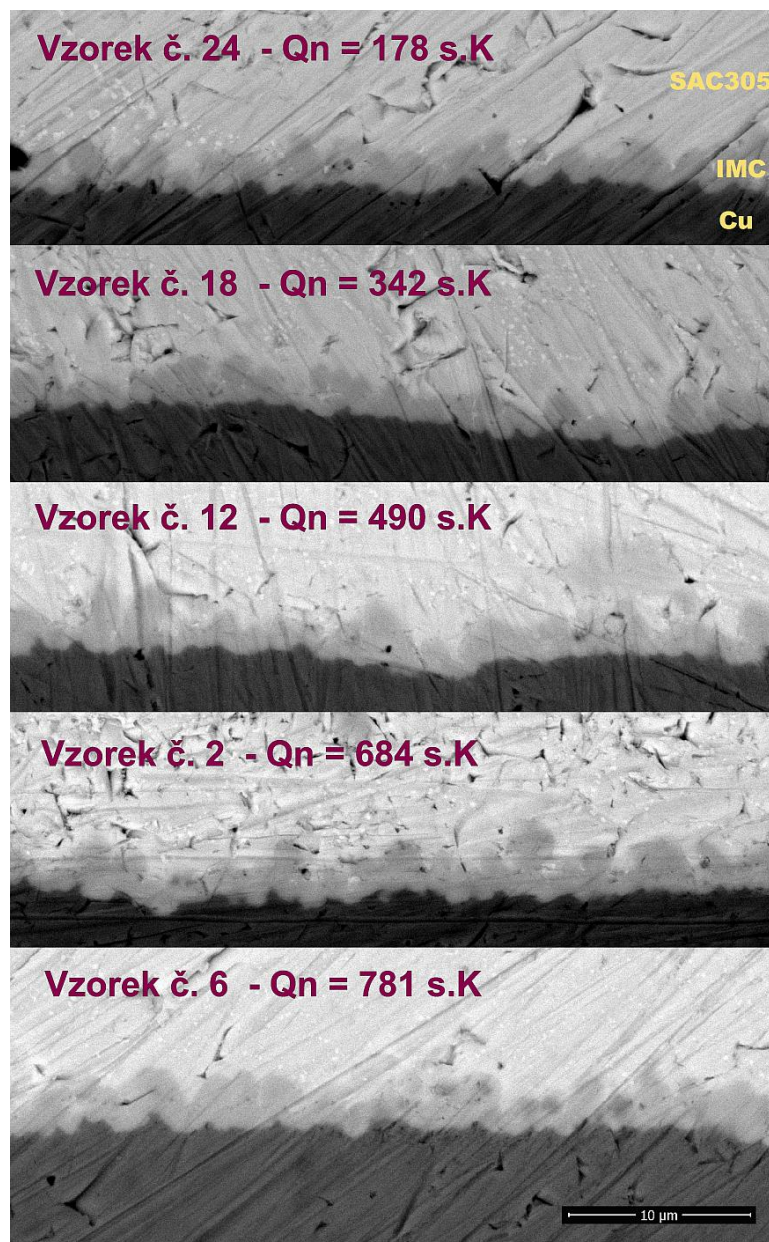


Obr. 4.11: Vzhled mikrovýbrusů spojů získaných pomocí optického mikroskopu.

4.5 Vyhodnocení spoje pomocí elektronového mikroskopu

Pro zkoumání struktury a tloušťek IMC vrstvy je vyžadováno použití elektronového mikroskopu, pomocí kterého lze dosáhnout mnohem větších rozlišení oproti optickému mikroskopu a případně i provádět různé typy prvkových analýz.

Nejprve byla pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) zkoumána struktura IMC vrstev pájených spojů na definovaném rozhraní měď-pájka. Přehledné výsledky jsou shrnuty na obrázku 4.12. I když není na získaných snímcích IMC vrstva příliš kontrastní, je z nich patrné, že při nízké hodnotě $Q\eta = 178$ s.K je zformovaná IMC vrstva tenčí a méně souvislá oproti hodnotě $Q\eta = 751$ s.K. U středních hodnot $Q\eta$ lze zase vyzorovat velmi nerovné rozhraní, a tím větší styčné plochy, na rozhraní pájka-IMC vrstva. Tyto nerovnosti mohou mít vliv na výsledky testu pevnosti spoje pomocí stříhu.

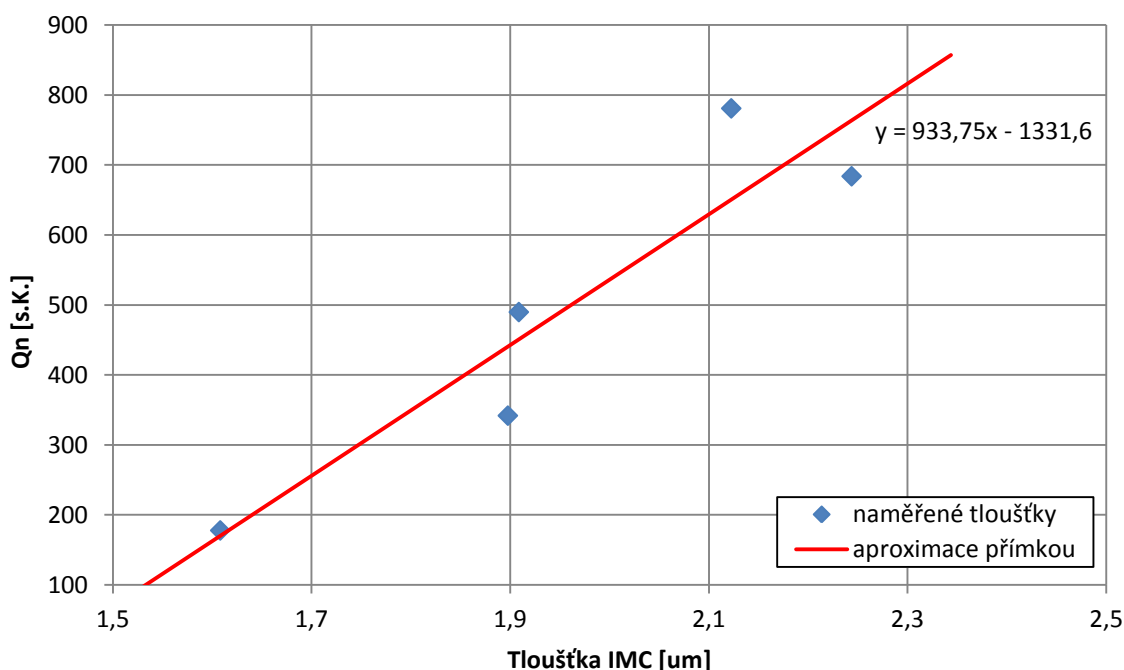


Obr. 4.12: Souhrnný přehled struktury a tloušťky IMC na rozhraní měď-pájka zjištěné pomocí ESEM.

Vhledem k nerovnoměrné struktuře povrchu IMC vrstev bylo hrubé měření tloušťky provedeno na vždy deseti náhodných místech u dvou spojů (viz příloha A7) a z takto získaných údajů byla vypočtena průměrná tloušťka IMC pro každou hodnotu Q_{η} , výsledky jsou uvedeny v tabulce 4. Přesnější zjištění tloušťky by vyžadovalo pokročilejší počítačové zpracování získaných obrázků. Přesto lze z takto získaných přibližných výsledků sestavit bodový graf proložený lineární přímkou (viz obr. 4.13) a orientačně znázornit závislost tloušťky IMC vrstvy na velikosti Q_{η} , podobně jako je uveden v [6] a podrobněji rozebírán v kapitole 3.2. Z porovnání obou grafů lze odvodit, že průměrná tloušťka IMC vrstvy u použité bezolovnaté pájky SAC305 je více než dvojnásobná oproti použití olovnaté pájky Sn63Pb37 při stejných hodnotách Q_{η} .

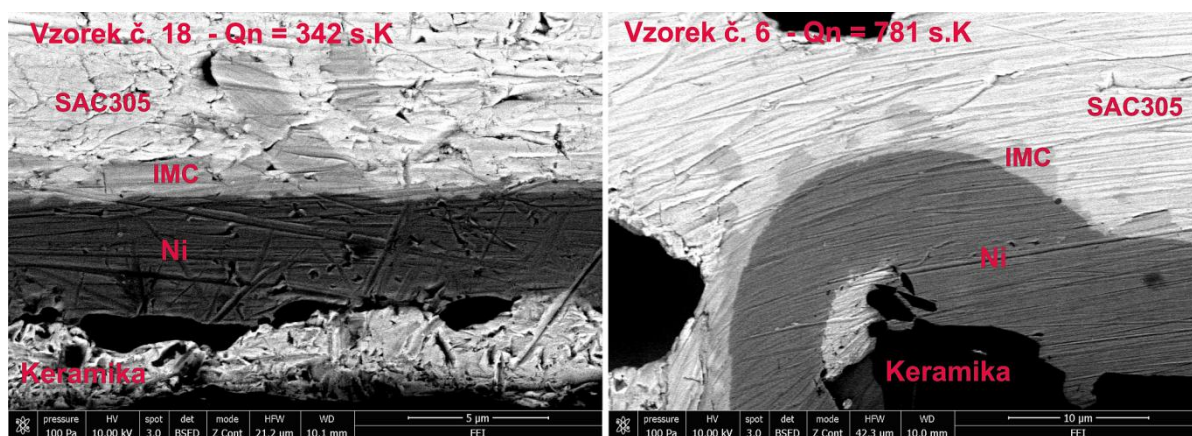
Tabulka 4.3: Výsledky měření průměrné tloušťky IMC vrstvy (na rozhraní měď-pájka).

	Q_{η} [s.K]				
	178	342	490	684	781
Průměrná tloušťka IMC - δ [μm]	1,61	1,90	1,91	2,24	2,12



Obr. 4.13: Graf změřené závislosti tloušťky IMC na Q_{η} pro pájku SAC305.

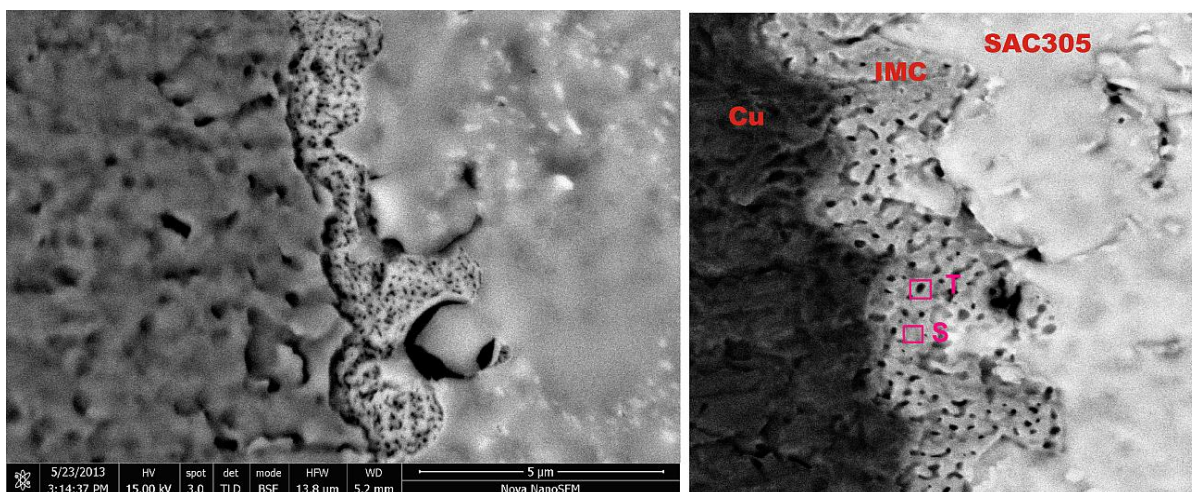
Další zkoumání bylo provedeno na pájeném spoji v oblasti součástka-pájka. Podle technického listu výrobce použitého rezistoru, viz [18], je vývod součástky (metalizovaná ploška) vyroben z niklu s cínovou povrchovou úpravou. IMC vrstvy pájeného spoje v této oblasti tedy obsahují hlavně sloučeniny Ni_3Sn_4 a $NiSn_3$. Dostupnými technickými prostředky se bohužel nepodařilo spolehlivě a prokazatelně vyhodnotit strukturu a tloušťky této vrstvy u všech vzorků. Na většině ze zkoumaných rezistorů byl ale v místě pájeného spoje zjištěn nerovný povrch keramického tělíska tvořící základ součástky a byla identifikována i vrstva niklu o tloušťce v rozmezí cca 4 - 10 μm tvořící terminál součástky. Ukázky přehledových snímků jsou na obrázku 4.14 (pravý snímek znázorňuje roh součástky v místě pájeného spoje). Tloušťka a homogenita IMC vrstvy u všech zkoumaných vzorků místy značně kolísá, stejně jako struktura povrchu na rozhraní IMC-pájka.



Obr. 4.14: Ukázka struktury a rozložení vrstev na rozhraní ploška součástky-pájka.

Doplňující zkoumání pájeného spoje bylo provedeno u vzorku zapájeného hodnotou $Q\eta = 490$ s.K. Nejprve byla pomocí dlouhodobého působení fokusovaného iontového svazku (FIB) vyleštěna (rovnoměrně odprášena) rozsáhlejší oblast na rozhraní měď-IMC-pájka. Při této činnosti dochází k vedlejšímu efektu, kdy jsou některé oblasti (v závislosti např. na hmotnosti obsažených atomů nebo na typu, orientaci a složení krystalové mříže) odprašovány rychleji než jiné a vzniká tím nerovnoměrný povrch. Tímto jednoduchým způsobem lze tedy zvýraznit oblasti s odlišným prvkovým složením. Výsledné snímky je možno vidět na obrázku 4.15 (levý snímek tvoří zvětšenou oblast rozhraní měď-IMC-pájka).

Na rozhraní měď-IMC lze také vyzorovat tmavší oblast, kterou pravděpodobně tvoří mezivrstva s vyšším obsahem mědi – Cu_3Sn . Zbylou větší část IMC tvoří pravděpodobně mezivrstva Cu_6Sn_5 . Pomocí EDS analýzy byl pokusně zjištěn obsah prvků v pájce a ve dvou oblastech (světlé a tmavé) v IMC vrstvě, na obrázku 4.15 vyznačených jako S a T. Výsledky jsou přehledně shrnuty v tabulce 4.4. Obsah hliníku je pravděpodobně z části ovlivněn zbytky z keramického substrátu rezistorů (Al_2O_3), podobně jako obsah křemíku mohou tvořit zbytky (SiC , Si_3N_4) ze smirkových papírů při hrubé mechanické přípravě vzorků (může obsahovat také Al_2O_3).



Obr. 4.15: Struktura povrchu spoje (měď-pájka) po vyleštění iontovým svazkem – $Q\eta = 490$ s.K.

Tabulka 4.4: Výsledky EDS analýzy zkoumaných oblastí.

Místo odběru (oblast):		Prvek:				
		Měď (Cu)	Cín (Sn)	Hliník (Al)	Stříbro (Ag)	Křemík (Si)
Pájka mimo IMC	Hmotnostní složení [%]	5,07	85,65	2,52	1,94	1,40
	Normované hmotnostní složení [%]	5,25	88,69	2,61	2,01	1,45
Světlá oblast v IMC	Hmotnostní složení [%]	27,09	61,19	2,53	1,81	1,38
	Normované hmotnostní složení [%]	28,82	65,10	2,70	1,93	1,46
Tmavá oblast v IMC č.1	Hmotnostní složení [%]	34,33	55,50	0,96	1,29	0,37
	Normované hmotnostní složení [%]	37,14	60,03	1,04	1,39	0,40
Tmavá oblast v IMC č.2	Hmotnostní složení [%]	25,22	65,80	1,29	1,15	0,75
	Normované hmotnostní složení [%]	26,77	69,85	1,37	1,22	0,80
Tmavá oblast v IMC č.3	Hmotnostní složení [%]	16,10	74,07	1,48	1,63	0,73
	Normované hmotnostní složení [%]	17,13	78,79	1,58	1,73	0,77

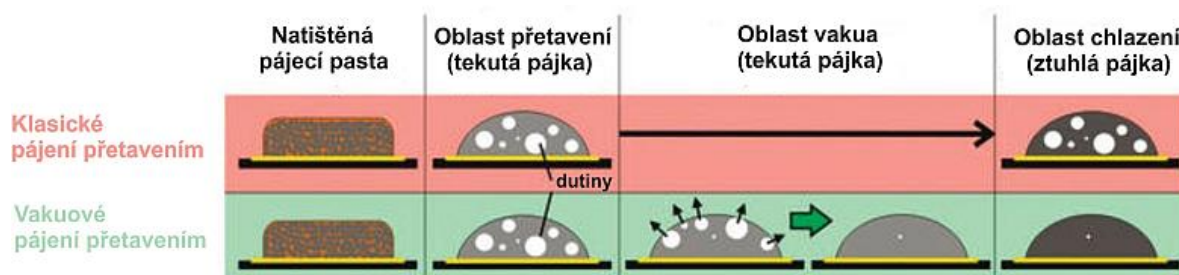
4.6 Diskuze dosažených výsledků a jejich využití v praxi

Provedeným aplikačním výzkumem byla pomocí definovaně zapájených vzorků zjištěna závislost integrálu teploty a času pájení ($Q\eta$) na pevnost bezolovnaté spoje. Při provádění testu stříhem docházelo i při srovnatelných pájených plochách na straně součástky (aktivní plocha terminálu cca 1,17 mm²) a pájecí plošky na DPS (plocha cca 0,91 mm²) k odtržení v IMC vrstvě pouze na straně součástky. Lze se tedy domnívat, že mechanická pevnost IMC vrstvy na rozhraní nikl-pájka je menší než na rozhraní měď-pájka. Je možné, že mají na výslednou nižší mechanickou pevnost IMC vrstvy nikl-pájka vliv i jiné faktory (například jakost a provedení použitých rezistorů, jejich skladování apod.). Dále lze diskutovat otázku, zdali použitá metoda pomocí zkoušky stříhem je vhodná pro stanovení odpovídající výsledné pevnosti pájeného spoje a nebylo by vhodné ověřit získané závislosti i jinou metodou (mechanickým vibračním testem apod.), případně alespoň při použití jiného nastavení rychlosti stříhací hlavy. Na získané závislosti mohly mít vliv i jiné další faktory, přesnost sesouhlasení hrany součástky a stříhací hlavy, stav použitého testovacího zařízení apod.

Zkoumáním vzorků v elektronovém mikroskopu byly získány snímky struktury jednotlivých vrstev pájeného spoje a dále zjištěna přibližná tloušťka IMC vrstvy, zejména na rozhraní měď-pájka. V případě IMC na rozhraní nikl-pájka nelze závislost přesně posoudit a porovnat s IMC na rozhraní měď-pájka, je možno ale předpokládat částečnou analogii. Při vyhodnocení těchto získaných informací lze vyvodit následující závěr. Při hodnotách $Q\eta$ okolo 200 s.K je již tenká homogenní IMC vrstva na rozhraní měď-pájka částečně zformována, ale nedosahuje velké mechanické pevnosti, stejně jako IMC na rozhraní nikl-pájka. Při hodnotách $Q\eta$ okolo 500 s.K dosahuje IMC vrstva již velmi dobré homogenní tloušťky a zároveň její nerovný povrch na rozhraní IMC-pájka může zvyšovat mechanickou pevnost spoje. Při dalším zvětšování $Q\eta$ k hodnotám 800 s.K dochází k dalšímu nárůstu tloušťky IMC vrstvy a vyhlazování rozhraní IMC-pájka. Z hlediska pevnosti spoje jsou výsledky v intervalu $Q\eta = 500$ až 800 s.K částečně rozporuplné (pokles pevnosti spoje okolo $Q\eta = 680$ s.K versus dále klesající podíl odtržených spojů v IMC vrstvě nikl-pájka), ale důvod může být v poměru a tvaru povrchů na rozhraní IMC-pájka. Vysvětlení tohoto jevu a určení mechanismu bude zřejmě vyžadovat další podrobné zkoumání. Z celkového pohledu vykazují i spoje zapájené při hodnotách $Q\eta = 500$ až 800 s.K velmi dobrých mechanických a vzhledových vlastností. Dále při hrubém porovnání nevyhodnocovaných dvouprůchodových vzorků (viz příloha A6) se zdá, že pevnost bude s narůstajícím $Q\eta$ dále narůstat (dále se zvětšuje podíl spojů odtržených v místě plošky součástky u vzorků s $Q\eta = 490$ a 781 s.K prošlých 2x pecí). Tento fakt může souviset i s všeobecnou větší mechanickou pevností bezolovnatých pájek a je možno se domnívat, že pájené spoje budou tedy vykazovat velmi dobré mechanické parametry i při vyšších hodnotách $Q\eta$.

Jak již bylo v průběhu vyhodnocování pájených spojů v kapitolách 4.3 a 4.4 několikrát zmíněno, v řadě míst v pájeném spoji byl zjištěn rozsáhlý výskyt nežádoucích dutin (voidů). Jsou to plynné inkluze v pájeném spoji, které vedou ke snížení tepelné vodivosti spoje a pokud je například takto připájený komponent více proudově a tím i tepelně zatížen, může to v důsledku vést ke snížení jeho životnosti. Tyto nežádoucí dutiny, vzhledem k jejich

velikostem a množstvím výskytu, mohou mít i negativní vliv na konečnou pevnost a jakost výsledného pájeného spoje a mohou také zkreslovat některé naměřené hodnoty uvedené v této práci. Pro snížení jejich počtu téměř na nulu lze nyní například využít nových přetavovacích pecí obsahujících vakuovou pájecí zónu. Základní princip této metody je zobrazen na následujícím obrázku 4.16. Při klasickém pájecím procesu jsou v čase přetavení pájecí pasty v pájeném spoji vytvářeny plynné inkluze, které jsou po zchlazení pájky přítomny v pájeném spoji. Při vakuovém pájení obsahuje pájecí pec ještě dodatečnou (vakuovou) zónu, kterou jsou ještě ve fázi roztavené pájky tyto plynné póry roztáhnuty a odstraněny z pájeného spoje. Další informace ohledně tohoto nového způsobu pájení lze nalézt v [17].



Obr. 4.16: Základní princip vakuového pájení přetavením [17].

Využitím procesního parametru „Heating factor“ může operátorům ve výrobním procesu značně ulehčit a urychlit nastavování správných či požadovaných podélných teplotních profilů přetavovacích pecí nebo může alespoň sloužit pro jejich rychlou kontrolu. V tomto směru je znatelná i podpora u výrobců teplotních profiloměrů, kde je tento parametr nově zařazován do vyhodnocovacího softwaru a není proto potřeba provádět složité matematické výpočty.

Při diskuzi o optimální hodnotě velikosti tohoto parametru lze dojít na základě této práce a interpretace zahraničních zdrojů k závěru, že v aplikacích kde je vyžadována zvýšená spolehlivost pájeného spoje a zapájená součástka (či výrobek) bude vystavena zvýšenému mechanickému zátěži je doporučeno provádět zapájení daných součástek pomocí Q_{η} pohybující se okolo optimální hodnoty 500 s.K. Tato hodnota je vhodná při použití olovnaté i bezolovnaté pájecí slitiny. Z praktického hlediska je ale patrné, že ne vždy lze této optimální hodnoty dosáhnout, například z důvodu různé zástavbové hustoty součástek na DPS nebo různé velikosti plošek samotných součástek. Proto jako dostačující se jeví u olovnatých pájecích past doporučený interval cca 400 až 700 s.K, jak bylo publikováno v zahraničních pramenech, např. [6,7]. Při použití bezolovnatých slitin může hodnota Q_{η} dosahovat i vyšších hodnot (min. 800 s.K), viz diskuze o maximální hodnotě Q_{η} v této kapitole a výsledky částečně vyhodnocených dvouprůchodových vzorků (viz příloha A6).

Pro další širší využití získaných výsledků by bylo potřeba provést rozsáhlejší výzkum podobného směru, kde by byla například použita širší a hustší škála hodnot Q_{η} (zvláště

hodnoty nad 1000 s.K) nebo byl použit jiný (mechanicky více odolnější) typ pouzdra součástek. Jako zajímavý se například jeví i výzkum vlivu dlouhodobého působení teplot na pájený spoj zapájený definovanou hodnotou $Q\eta$ okolo 500 s.K, porovnání vlastností dvou stejných $Q\eta$ při různém tvaru plochy integrálu nebo provedení a vyhodnocení aproximace konkávního rozhraní pájka-vzduch pomocí vhodné náhradní funkce. Za zvážení by dále stálo použití metody DOE (Design of Experiments) pro analýzu získaných dat.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo teoretické a praktické zkoumání faktorů majících vliv na spolehlivost pájeného spoje. Zvláštní pozornost byla věnována především zjištění vlivu integrálu teploty a času na pájený spoj a jeho možnému využití.

V teoretické části jsou nejprve rozebrány obecné požadavky na pájený spoj, faktory mající vliv na jeho spolehlivost a životnost spoje a popsány procesy formování intermetalických vrstev. Další část je zaměřena na oblast pájení pomocí přetavení a následně analyzuje nejvíce používané teplotní profily a způsoby jejich optimalizace. Na závěr je vysvětlen a matematicky popsán pojem „Heating factor“ jako integrál teploty a času pájení. Dále jsou zde uvedeny některé vztahy mezi jeho velikostí a vlivu na tloušťku IMC vrstev a spolehlivost pájených spojů, které byly citovány v dostupných publikacích.

V praktické části byl úspěšně navržen kompletní zkušební testovací obrazec DPS pro rezistory velikosti 0805, včetně upraveného designu pájecích plošek. Následně byla pokusně zapájena série testovacích DPS definovanou velikostí $Q\eta$ a proveden mechanický test pevnosti pájeného pomocí zkoušky stříhem. Za použití optického a elektronového mikroskopu byl vyhodnocen vzhled spojů a IMC vrstev a byla změřena jejich tloušťka. Takto získané závislosti a snímky vedly v závěrečné diskuzi k doporučení při případném využití v praxi.

Při realizaci této práce vyvstala řada nových témat, která by stála za další výzkum. Jako nejproblematictější se jeví zjištění přesné závislosti (poměru) sčítání jednotlivých integrálů teplot a čas při vícenásobném průchodu DPS přetavovací pecí. Zjištění této skutečnosti by umožnilo využít druhou část série zapájených vzorků a více tím prozkoumat vlastnosti spojů při vyšších hodnotách $Q\eta$. Další možné zkoumání by mohlo směřovat ke zjištění závislosti odporu pájeného spoje na parametru $Q\eta$.

Seznam použité literatury

- [1] JinGang Gao, YiPing Wu, Han Ding, *Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor*. Dostupné z WWW: <http://dx.doi.org/10.1108/09540910710748131>
- [2] 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)
- [3] J. Starý, P. Kahle, *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 208 stran.
- [4] UMEL FEKT VUT v Brně, *Pájení v elektrotechnice*. [Citováno 2012-11-21]. Dostupné z WWW: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>
- [5] Koki Company Ltd, *Reflow profile*. [Citováno 2012-11-21]. Dostupné z WWW: <http://www.koki.org/Files/pdf/Tech/Reflow%20profile%20-%20general%20info.pdf>
- [6] Bo Tao, Yiping Wu, Han Ding, Y.L. Xiong, *A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor $Q\eta$* . Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271405000922>
- [7] Tao Bo, Yin Zhouping, Ding Han, Wu Yiping, *Reflow profile optimization of μ BGA solder joints considering reflow temperature and time coupling*. Dostupné z WWW: <http://dx.doi.org/10.1108/09540910910989420>
- [8] Lačný Radek, *Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FEKT, 2010. 63 s. Diplomová práce.
- [9] Abel Martin, *SMT Technologie povrchové montáže*. 1. vydání, 2000. ISBN 80-902733-1-9
- [10] J. Starý, *Plošné spoje a povrchová montáž*, 2.část, pracovní verze 91220. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 103 stran.
- [11] Szendiuch Ivan, *Pájení a bezolovnaté pájky*. [Citováno 2012-11-30]. Dostupné z WWW: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [12] LIPA VSKÝ, L. *Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem*. Brno: VUT FEKT, 2012. 53 s. Bakalářská práce.

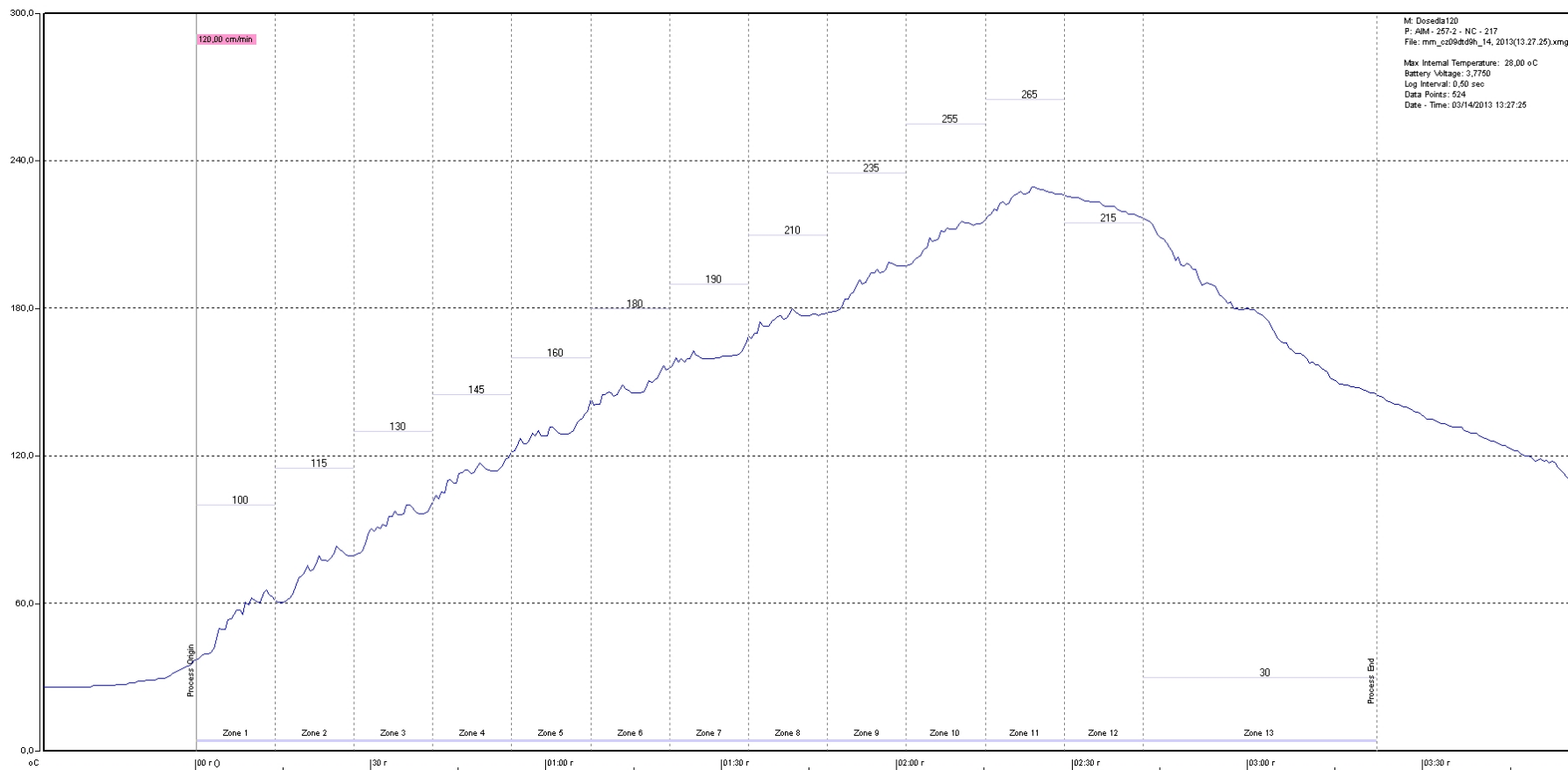
- [13] ČSN EN 62137 – 1 – 2. *Technologie povrchové montáže – Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 2: Zkouška pevnosti ve smyku*. 2008.
- [14] Walsin Technology Corporation, *SMT notes for CHIP-R and MLCC*. [Citováno 2012-12-01] Dostupné z WWW: http://www.ibselectronics.com/pdf/pa/walsin/smt_notes.pdf
- [15] STARÝ, J., ZATLOUKAL, M., STEJSKAL, P. *Montážní a propojovací technologie*, pracovní verze 80509, Brno, 2008, 237 s.
- [16] STARÝ, J. *Bezolovnaté pájení – Materiálová a procesní kompatibilita v interní a interně/redukční atmosféře*. 2005, Disertační práce.
- [17] Christian Ulzhöfer, SMT Wertheim - *Vacuum reflow: A simple approach for void reduction by means of an increased process capability*. [Citováno 2013-05-31]. Dostupné na WWW: <http://www.epp-europe.eu/news/-/article/32536727/37642258/Increased-process-capability>
- [18] YAGEO - *GENERAL PURPOSE CHIP RESISTORS RC0805*. Dostupné na WWW: http://www.yageo.com/documents/recent/PYu-RC0805_51_RoHS_L_5.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

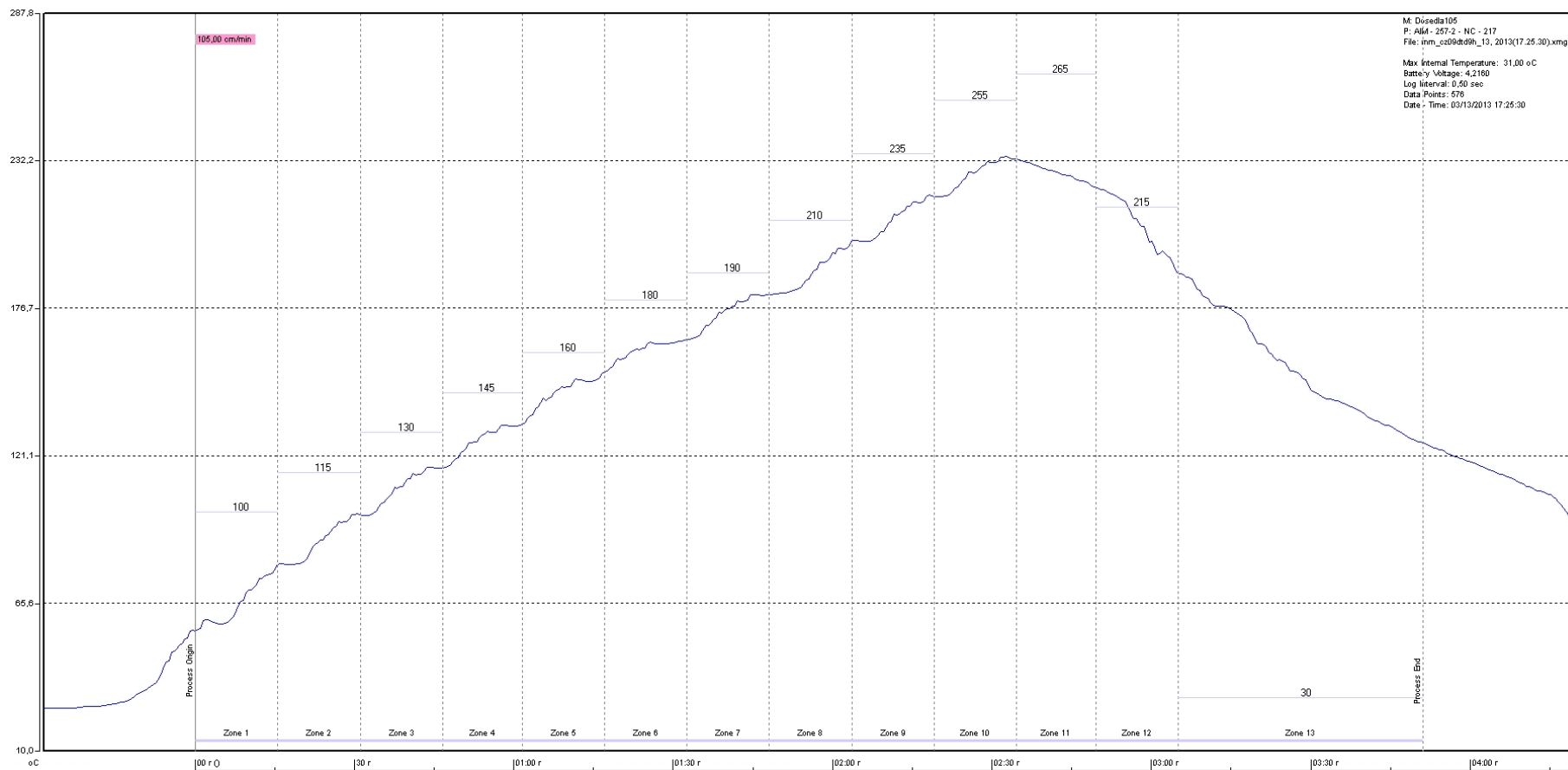
Ag	Stříbro – chemická značka
Au	Zlato – chemická značka
Bi	Bismut – chemická značka
μBGA	micro Ball Grid Array – typ pouzdra součástky
Cu	Měď – chemická značka
DPS	Deska plošných spojů
EDS	EDS - analýza využívající charakteristického rentgenového záření
FIB	Focused Ion Beam – elektronový mikroskop využívající iontový svazek
Flip-chip	Označení metody el. připojení obvodu (čipu) na nosný substrát nebo DPS
FR4	Fire Resistant 4 – organický substrát v samozhášivém provedení
HALT	Typ testu životnosti (Highly Accelerated Life Test)
IMC	Intermetalická sloučenina (Intermetallic Compound)
MTTF	Střední doba poruchy (Mean Time To Failure)
Ni	Nikl – chemická značka
O	Kyslík – chemická značka
Pb	Olovo – chemická značka
RSS	Teplotní profil sedlového typu (Ramp Soak Spike)
RST	Teplotní profil s lineárním nárůstem teploty (Ramp To Spike)
SAC305	Pájecí slitina Sn96,5Ag3Cu0,5
Sb	Antimon – chemická značka
SMD	Surface Mount Device – součástka určená pro povrchovou montáž
SMT	Surface Mount Technology – technologie povrchové montáže
Sn	Cín – chemická značka

A PŘÍLOHY

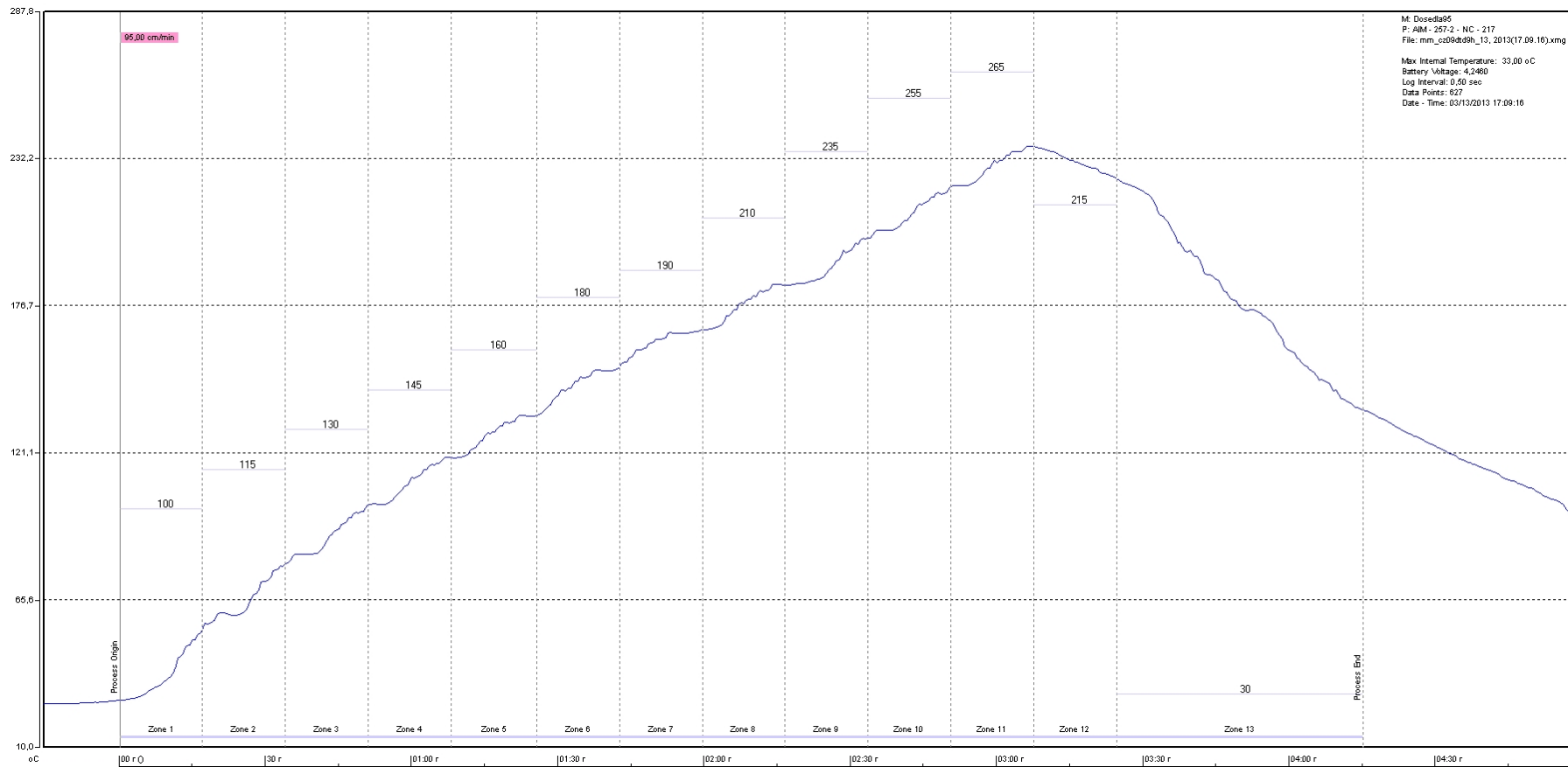
A.1 Podélný teplotní profil pro $Q\eta = 178 \text{ s.K}$



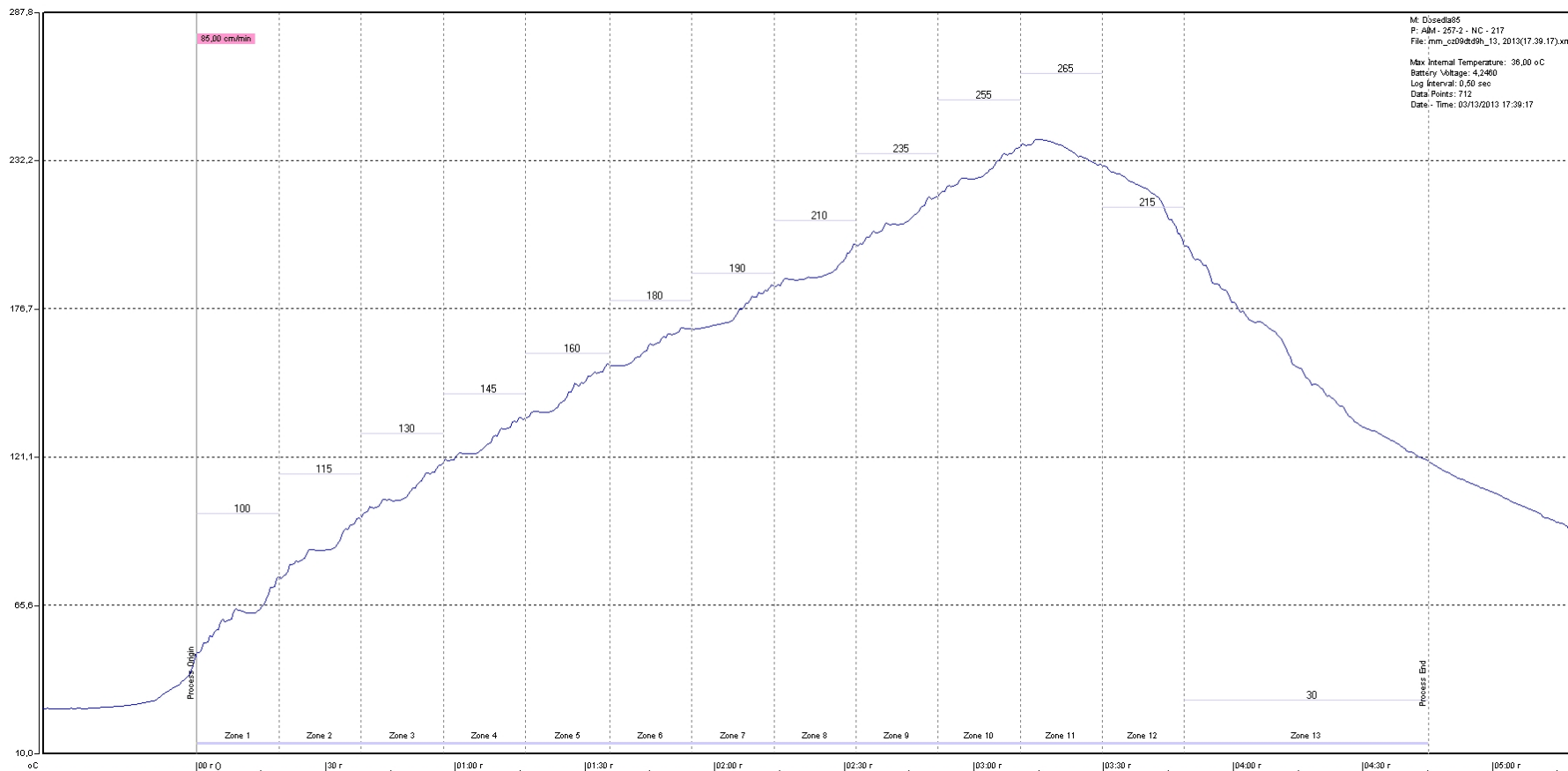
A.2 Podélný teplotní profil pro $Q\eta = 342 \text{ s.K}$



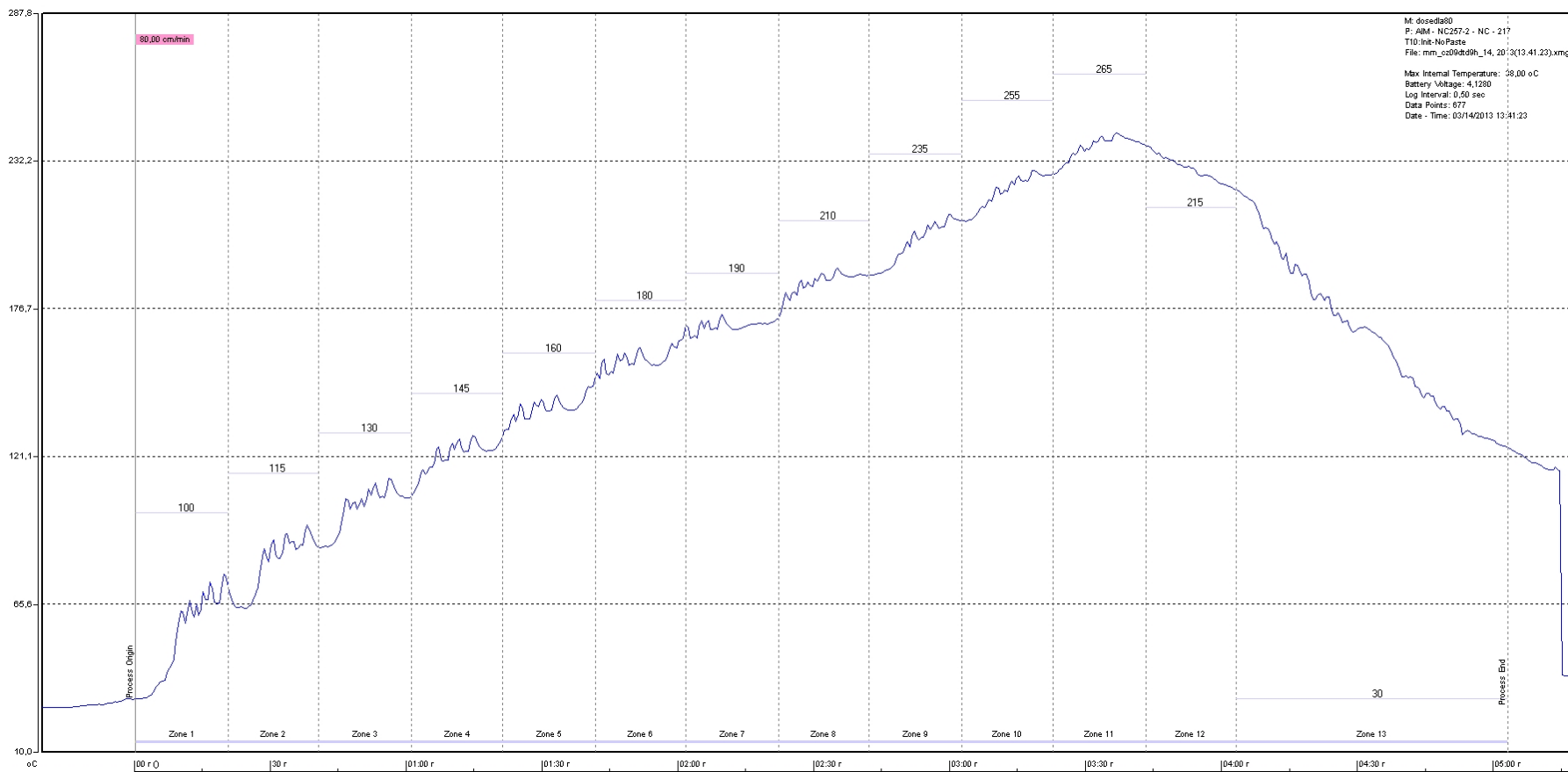
A.3 Podélný teplotní profil pro $Q\eta = 490$ s.K



A.4 Podélný teplotní profil pro $Q\eta = 684 \text{ s.K}$



A.5 Podélný teplotní profil pro $Q\eta = 781$ s.K



A.6 Naměřené hodnoty pevnosti pájených spojů testovaných na stříh

Qn [s.K]:	684						781						490						342						178					
Vzorek číslo:	1		2		3		5		6		7		11		12		13		17		18		19		23		24		25	
Rezistor číslo:	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.
1	4,500	c	4,460	c	3,009	b	3,562	b	4,151	b/c	4,314	b/c	4,520	b/c	4,782	b	3,900	c	3,098	b/c	3,650	b	4,264	b/c	3,929	b/c	3,800	b/c	3,639	b
2	4,721	c	3,415	c	3,771	b/c	3,493	b/c	3,033	b/c	4,164	b	3,875	b/c	3,904	b	3,650	b	3,182	b	3,513	c	3,457	b/c	3,025	b	2,764	b	2,940	b
3	3,521	b	3,160	b/c	3,430	c	2,689	b/c	3,351	c	2,987	b/c	3,360	b/c	3,861	b	3,676	b/c	3,665	c	3,314	b/c	3,458	b	3,082	b	3,073	c	3,131	b
4	3,026	b	3,283	b/c	2,487	b/c	2,909	b/c	2,491	b/c	3,425	b/c	3,817	c	3,420	c	3,797	c	3,230	b/c	3,071	b/c	2,692	c	2,962	b	3,120	b	2,861	b
5	4,865	b/c	3,873	b/c	3,504	c	3,360	c	3,954	c	3,633	b	3,408	b/c	4,421	b/c	3,095	b	3,470	b	3,095	b	4,062	b	3,654	b	3,099	b	3,541	b
6	4,477	c	3,370	b	3,215	b/c	3,297	b/c	4,070	c	3,737	b/c	3,591	b/c	3,590	b/c	3,354	c	3,423	b	3,477	c	3,879	b	3,008	b	2,810	b	2,914	b
7	3,864	b	3,060	b	3,801	b/c	3,021	b/c	3,425	c	3,917	c	2,811	b/c	3,888	b/c	3,337	c	2,610	b	2,891	b/c	3,596	c	3,429	b/c	2,750	b	2,773	b
8	3,442	b/c	3,346	b/c	2,989	b/c	2,836	b/c	4,091	b/c	3,602	c	3,443	b	3,185	c	2,752	b/c	3,223	b/c	3,315	b/c	3,438	c	3,306	b/c	2,291	b	2,964	b
9	2,830	c	2,981	c	2,800	c	2,824	c	3,445	c	3,675	b/c	2,529	b	3,504	c	2,989	b/c	2,544	b/c	3,263	b	2,848	b/c	2,822	b/c	2,785	c	2,957	b/c
10	3,571	b	2,861	b	3,171	b/c	2,752	b/c	3,406	c	2,521	b/c	3,261	b/c	3,147	c	2,965	c	2,927	c	3,279	b/c	3,485	c	2,816	b	2,780	c	3,088	c
11	3,194	b	4,475	b	3,998	b/c	4,123	b	4,188	b/c	3,665	b	3,632	b	3,858	b/c	4,793	b	3,513	b	4,271	b/c	3,680	b	3,217	b	3,706	b	3,389	b
12	3,422	c	3,466	b/c	3,228	c	3,889	b/c	3,961	b	3,248	b	3,735	b	4,324	b	3,942	b	3,368	b	3,713	b	3,774	b/c	3,270	b	2,988	b	3,845	b/c
13	3,744	b/c	3,707	b	3,213	c	3,677	c	3,086	c	3,541	c	3,626	b/c	3,741	b/c	3,435	b	3,355	b	3,433	b/c	3,231	b/c	2,661	b/c	2,437	b	3,301	c
14	2,968	b/c	2,811	b	3,433	b/c	3,601	b	3,306	b/c	3,746	c	3,502	b/c	3,461	b	3,002	b	2,907	c	3,183	b/c	3,146	b/c	2,566	b	2,991	b	2,664	b
15	3,180	b/c	4,551	b/c	3,646	b	4,095	b/c	3,424	b/c	3,493	b/c	3,981	b/c	4,088	b/c	4,010	b/c	4,172	b/c	3,593	b	3,491	b	2,837	b	3,138	b	2,844	b
16	3,326	c	4,301	b/c	3,321	b/c	3,921	b/c	4,216	b	3,518	b	3,606	b	3,556	b/c	3,621	b/c	4,018	b	3,566	b	3,360	b	2,595	b	3,222	b/c	3,014	b
17	3,210	b/c	2,979	c	3,631	b/c	3,235	b/c	3,404	c	2,927	b	3,308	b/c	3,033	b/c	2,883	c	3,330	b/c	3,849	c	2,620	c	2,686	b/c	3,455	b/c	2,772	b/c
18	3,635	b	2,619	b/c	3,727	c	3,682	b	2,904	b/c	3,115	c	2,915	b/c	3,193	b	3,403	b/c	2,821	b/c	3,585	b	3,026	b	2,419	b	2,735	b/c	2,482	b/c
19	3,275	b/c	2,503	b	3,467	b/c	3,125	c	3,041	c	2,771	b/c	2,990	b/c	3,319	b/c	2,957	c	3,682	b/c	2,742	b/c	3,119	b/c	2,362	b/c	3,013	b	2,844	c
20	3,801	c	3,554	b/c	3,579	b/c	3,578	c	2,954	b/c	3,677	b/c	2,946	b/c	2,993	b	3,069	c	3,412	c	3,157	b/c	3,041	c	2,862	b/c	2,521	b/c	3,136	b/c
Průměr zat. na DPS[kg]	3,629		3,439		3,371		3,384		3,495		3,484		3,443		3,663		3,431		3,297		3,398		3,383		2,975		2,974		3,055	
Průměr zat. na Qn [kg]	3,479						3,454						3,513						3,360						3,001					
Směr. odchylka zat. [kg]	0,536						0,460						0,482						0,393						0,370					
M.o. - počet na Qn [ks]	15 x b,		17 x c,		28 x b/c		12 x b,		19 x c,		29 x b/c		18 x b,		13 x c,		29 x b/c		22 x b,		13 x c,		25 x b/c		36 x b,		6 x c,		18 x b/c	

Vysvětlivky: m.o. = místo odtržení, viz obr. 1.5; Zat.[kg] = zatížení, při kterém došlo k odtržení sloučátky

Qn [s.K]:	781 - 2 průchody						490 - 2 průchody						342 - 2 průchody						178 - 2 průchody					
Vzorek číslo:	8		9		10		14		15		16		20		21		22		26		27		28	
Rezistor číslo:	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.	Zat. [kg]	m.o.
1	4,201	c	3,975	b	4,697	c	4,354	b/c	4,396	c	4,223	c	4,048	b	3,260	b/c	3,418	c	3,495	b	3,063	b	2,816	b
2	4,304	b/c	3,184	b/c	3,520	b/c	3,314	b/c	3,248	b/c	3,268	b/c	3,152	b	3,659	c	3,382	c	3,317	b	3,179	c	3,461	b/c
3	3,135	b/c	3,423	b/c	3,037	b/c	3,315	b	3,333	c	2,798	b/c	2,836	b	2,754	b/c	2,666	b	3,192	b/c	3,198	b	3,043	b
4	2,776	b	3,587	c	2,903	b/c	3,356	b	3,065	b	3,031	c	3,402	b/c	2,874	b/c	2,663	c	2,812	b	2,640	b	2,959	b
5	3,833	b/c	4,053	b	4,356	c	3,593	b	4,091	b/c	3,249	b/c	3,553	b/c	3,859	c	3,692	b	2,844	b	3,298	b	3,089	b/c
6	4,045	b/c	3,583	c	3,487	b/c	2,744	c	3,811	b	3,174	b/c	2,781	b	3,006	c	3,300	b/c	3,277	b	3,258	b	2,263	b/c
7	3,449	c	3,399	b	3,592	b/c	3,504	c	3,643	b/c	3,154	b/c	2,889	b/c	3,135	b/c	3,674	b/c	2,775	b	3,037	c	2,960	b/c
8	3,412	b/c		c	3,533	b/c	3,396	c	3,593	c	3,588	b/c	2,800	c	3,171	c	3,185	b/c	3,230	c	2,932	b/c	2,870	b/c
9	2,515	c	3,304	c	2,810	c	3,072	c	2,965	c	2,523	b/c	2,993	c	3,283	c	2,920	b/c	2,752	c	2,954	c	3,304	b/c
10	2,496	c	3,577	c	3,590	b/c	3,553	b/c	3,264	c	3,354	c	2,689	b/c	2,919	b/c	2,664	c	3,009	b/c	3,157	c	3,279	b/c
11	4,094	c	4,466	c	3,771	b/c	4,594	c	4,403	b/c	4,013	b/c	3,791	b/c	3,666	b	3,824	b/c	3,404	c	3,140	b	3,341	b
12	4,629	b	3,700	c	4,121	c	3,569	b	3,826	c	3,643	b/c	3,796	c	3,591	b	3,539	c	3,014	b	3,278	b	3,405	b
13	3,463	c	3,173	b	3,611	b	3,682	b	3,618	c	3,279	b/c	3,053	b	3,274	b/c	3,379	b/c	3,160	b/c	3,026	c	2,754	b
14	3,571	c	3,034	c	3,297	c	2,992	b/c	3,418	c	2,605	c	2,980	b/c	3,202	c	2,931	b/c	2,887	b	2,616	b	3,030	b
15	4,434	c	4,356	c	3,719	b/c	3,969	b	3,923	b/c	3,586	b	4,299	b/c	3,092	b	3,129	c	3,168	b	3,429	b/c	3,551	b/c
16	2,789	b/c	3,768	c	3,735	b	3,473	b/c	3,327	b	3,242	b	3,878	b/c	3,500	b/c	2,347	b/c	3,021	b	3,901	b	3,531	c
17	3,291	c	4,084	c	3,758	c	3,143	b	3,288	c	3,387	b	3,743	b/c	3,167	c	3,510	b/c	2,273	b/c	3,302	b/c	3,194	b/c
18	2,673	c	2,701	b/c	3,046	b/c	3,936	b/c	3,489	c	2,993	c	3,360	b/c	3,271	c	3,719	b/c	3,130	c	2,977	b	3,215	b
19	3,293	c	2,542	b/c	3,221	c	2,827	c	2,869	c	3,274	c	3,077	c	2,835	c		b/c	3,131	c	2,811	b/c	2,881	b/c
20	3,235	b	2,678	b/c	3,200	c	3,255	b/c	2,832	c	3,106	b/c	2,914	c	2,862	c	2,741	b/c	3,230	c	3,013	b/c	2,748	b/c
Průměr zat. na DPS[kg]	3,482		3,505		3,550		3,482		3,520		3,274		3,302		3,219		3,194		3,056		3,111		3,085	
Průměr zat. na Qn [kg]	3,512						3,425						3,239						3,084					
Směr. odchylka zat. [kg]	0,548						0,447						0,407						0,287					
M.o. - počet na Qn [ks]	9 x b,		30 x c,		21 x b/c		13 x b,		24 x c,		23 x b/c		10 x b,		21 x c,		29 x b/c		28 x b,		12 x c,		20 x b/c	

Vysvětlivky: m.o. = místo odtržení, viz obr. 1.5; Zat.[kg] = zatížení, při kterém došlo k odtržení sloučásky

A.7 Měření tloušťky IMC vrstev na rozhraní měď-pájka

