



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

Termomechanické zkoušky pájecích plošek

Thermomechanical tests of soldering pads

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Autor práce: Denis Froš

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Froš** Jméno: **Denis** Osobní číslo: **440924**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Termomechanické zkoušky pájecích plošek

Název diplomové práce anglicky:

Thermomechanical tests of soldering pads

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií povrchové montáže a s deskami plošných spojů.
- 2) Připravte si vzorky, na kterých provedete termomechanické zkoušky s ohledem na namáhání pájecí ploška/pájený spoj.
- 3) Výsledky zkoušek vyhodnoťte s ohledem na skladbu vzorků.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
[2] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2019** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Termomechanické zkoušky pájecích plošek vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce. Dále prohlašuji, že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Denis Froš

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce. Rovněž bych chtěl panu docentovi poděkovat za vstřícnost a podporu při získávání potřebných informací a podkladů.

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje spolehlivosti pájeného spoje se zaměřením na soudržnost měděných pájecích plošek k substrátu. Zkoumá zejména odloupávání pájecích plošek a jev nazývaný „pad cratering“. Zmíněné jevy jsou zkoumány v závislosti na teplotě skelného přechodu pryskyřice obsažené v laminátu desky plošného spoje a různých tepelných podmínek. Práce rovněž zahrnuje témata, která úzce korespondují se současnou problematikou spolehlivosti pájeného spoje při termomechanickém namáhání. Popisuje několik různých zkoušek ověřujících tuto spolehlivost a technologii desek plošných spojů. Práce dále obsahuje část praktickou, v níž jsou na připravených vzorcích popsány jevy předmětem studie. Výsledky studie jsou následně vyhodnoceny.

Klíčová slova

Spolehlivost, laminát, pryskyřice, teplota skelného přechodu, měděná fólie, „pad cratering“, intermetalické sloučeniny, zkoušky spolehlivosti, termomechanické namáhání.

Abstract

Diploma thesis deals with reliability of soldered joint focusing on adhesion of copper soldering pads to substrate. Especially two phenomena as copper foil peeling off and pad cratering are investigated. Investigation of these failures is processed in dependence on glass transition temperature of resin as a part of printed circuit board laminate. Another variable is testing temperature. Topics related to current issue of soldered joint reliability under thermomechanical loading are included. Further, the thesis contains description of some reliability tests and printed circuit board technology. The mentioned phenomena and prepared specimens are subject of research in the practical part of this thesis. The results of tests and measurements are presented and evaluated.

Key words

Reliability, laminate, resin, glass transition temperature, copper foil, pad cratering, intermetallic compound, reliability test, thermomechanical stress.

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PÁJENÍ V ELEKTROTECHNICE	14
2.1	Techniky pájení	14
2.1.1	Pájení vlnou	14
2.1.1.1	Využití pájení vlnou u povrchové montáže	16
2.1.2	Pájení přetavením	18
2.1.2.1	Pájení v parách	19
2.1.2.2	Pájení infračerveným zářením	20
2.1.2.3	Pájení konvekčním ohřevem	20
2.1.2.4	Laserové pájení	21
2.2	Teplotní profil	22
2.2.1	Zóna předeřevu	22
2.2.2	Aktivační zóna	23
2.2.3	Zóna přetavení	23
2.2.4	Zóna chlazení	24
2.3	Integrál teploty a času pájení	24
3	TECHNOLOGIE PLOŠNÝCH SPOJŮ	26
3.1	Plnivo (výztuha)	26
3.2	Pryskyřice	26
3.3	Měděná fólie	28
3.4	Výroba laminátu a desky plošného spoje	29
3.4.1	Výroba laminátu	30
3.4.2	Vytvoření DPS	30
3.5	Parametry substrátu (laminátu)	33
3.5.1	Tepelné parametry	34
3.5.2	Test adheze	36
3.5.3	Pevnost v odtrhu	36
3.6	Typy DPS substrátů (laminátů)	37
3.6.1	Laminát s fenol-formaldehydovou (fenolickou) pryskyřicí	37

3.6.2	Laminát s epoxidovou pryskyřicí	37
3.6.3	PTFE lamináty	38
3.6.4	Polyimidový laminát	39
3.6.5	Silikonový laminát	40
3.6.6	Melaminový laminát	40
4	POVRCHOVÉ ÚPRAVY PÁJECÍCH PLOCH DPS.....	40
4.1	OSP (Organic Solderability Preservative)	42
4.2	HASL/HAL (Hot Air Solder Level)	43
4.3	Imerzní stříbro	43
4.4	Imerzní cín	43
4.5	ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)	44
4.6	Tavitelná vrstva bezolovnatých pájek nebo čistého cínu	44
5	INTERMETALICKÉ SLOUČENINY	46
5.1	Vznik a rozvoj IMC.....	47
5.2	Fázové digramy binárních systémů	49
5.2.1	Systém Cu-Sn	50
5.2.2	Systém Ag-Sn	50
5.2.3	Systém Au-Sn	50
6	SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE	51
6.1	Mechanika pájeného spoje	53
6.2	Mechanické zkoušky	57
6.2.1	Zkouška odolnosti proti odtržení	58
6.2.2	Zkouška stříhem	59
6.2.3	Cyklická zkouška ohybem	60
6.2.4	Zkouška pádem.....	60
6.3	Tepelné namáhání.....	62
6.3.1	Teplotní cyklování	63
6.4	„Pad cratering“ efekt.....	65
6.4.1	Testovací metody „pad crateringu“	65

7	TESTOVÁNÍ PÁJECÍCH PLOŠEK.....	66
7.1	Příprava experimentu.....	66
7.1.1	Návrh a výběr desky plošného spoje (DPS).....	67
7.1.2	Pájecí pasta a její aplikace.....	68
7.1.3	Osazení konektorů.....	68
7.1.4	Přetavení konvekčním ohřevem.....	69
7.1.5	Teplotní profil.....	70
7.1.6	Dokončení přípravy vzorků.....	71
7.2	Způsob realizace termomechanických zkoušek.....	71
7.2.1	Deformační zařízení.....	72
7.2.2	Sběr a zaznamenávání dat.....	74
7.2.3	Zpracování dat.....	74
7.3	Výsledky termomechanických zkoušek.....	75
7.3.1	Průběh mechanické zkoušky.....	75
7.3.2	Vypočtené hodnoty, grafické srovnání a vyhodnocení výsledků.....	76
7.3.3	Mikroskopické snímky.....	82
7.4	Analýza intermetalických vrstev.....	82
7.4.1	Snímky IMC.....	83
7.4.2	Měření tloušťky IMC.....	83
7.4.3	Prvková analýza.....	85
8	ZÁVĚR.....	86
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	87
	BIBLIOGRAFIE.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	92
	SEZNAM TABULEK.....	94
	SEZNAM GRAFŮ.....	94

PŘÍLOHY

1 ÚVOD

Restrikcí olova došlo v oblasti pájení v elektrotechnice k výrazným změnám. Zvýšená teplota při pájení má vliv na vlastnosti všech částí osazené desky plošného spoje, které procesem pájením prochází. Už při pájení může dojít při zvolení nevhodných materiálů a postupů k nevratnému poškození některé části desky plošného spoje (DPS), což ve výsledku vyústí k rané nebo časté poruchovosti zařízení. Tepelně je ovlivňován nejen právě vznikající pájený spoj prostřednictvím formující se tloušťky intermetalické vrstvy, ale i součástky, vodivé motivy tvořené mědí a také samotný substrát. Tepelná odolnost substrátu z laminátového materiálu je dána použitou pryskyřicí. Volbou adekvátního laminátu pro výrobu DPS lze některým poruchám předejít. Další zkouškou odolnosti a potažmo i spolehlivosti elektrotechnických zařízení je provoz v extrémních okolních podmínkách. Na snížení životnosti se může podílet několik částí, které zařízení tvoří a nejsou schopny odolávat nevhodným okolním podmínkám ve formě zvýšené vlhkosti, teploty, vibrací atd. V případě teploty okolí, v níž se zařízení vyskytuje, jsou zároveň problematické i pomalé či rychlé změny teploty v čase. Při nevhodné konstrukci pro dané prostředí patří pájené spoje k těm částem zařízení, které jsou náchylné k pomalé nebo i rychlé degradaci. To v důsledku vede ke zvýšení poruchovosti a snižování životnosti celého zařízení. Dalším požadavkem, který přispívá ke vzniku poruch, je miniaturizace a zvyšující se nároky na výkonové zatížení. Hlavním cílem výzkumu a vývoje technologie pájení je zvyšování odolnosti zařízení pro provoz ve výše zmíněných podmínkách v součinnosti s ekonomickou optimalizací. Problematika spolehlivosti pájených spojů a vlivů, které se na namáhání spojů podílejí, je v současnosti velmi rozsáhlá, proto je téma diplomové práce zaměřeno na termomechanické vlastnosti pájecích plošek.

Diplomová práce je koncipována tak, že v kapitolách teoretické části (2-6) jsou zahrnuty témata, která jsou zaměřena na povrchovou montáž, okolnosti ovlivňující pevnost spoje a adhezi pájecích ploch k substrátu. Na popis technik hromadného pájení navazuje technologie výroby laminátu a desky plošného spoje. Dále je čtenář seznámen s povrchovými úpravami pájecích ploch, při jejichž aplikaci dochází například k tepelnému nebo chemickému působení na DPS. V diplomové práci je i kapitola věnující se intermetalickým sloučeninám, jejichž existence má očekávaný vliv na praktické zkoušky. Některé způsoby testování spolehlivosti pájeného spoje, adheze měděné fólie k substrátu či jevu „pad cratering“ jsou v průběhu teoretické části rozebrány a popsány. Praktická kapitola věnující se experimentálnímu testování pájecích plošek popisuje návrh zkušebních destiček pro zkoušky, realizaci termomechanických zkoušek a vyhodnocení získaných výsledků.

2 PÁJENÍ V ELEKTROTECHNICE

Pájení je proces využívající přídavný materiál za účelem vytvoření pevného spoje mezi dvěma kovy, které zůstávají v pevném stavu. Podle teploty, které je pájecí slitina vystavena, je možné rozdělit pájení na tzv. měkké pájení a tvrdé pájení. V elektrotechnice, kde hlavním významem pájení je vytvoření nejen mechanického, ale i dobře vodivého spoje, se jednoznačně vyžívá první zmíněná varianta. Měkké pájení je charakterizováno využitím pájky s teplotou tání do 450 °C. Konkrétně dnes používané pájecí slitiny mají nejčastěji eutektickou teplotu tání v intervalu mezi 210-230 °C. Při samotném procesu pájení dochází ke vzniku pevného spoje na základě reakce roztavené pájecí slitiny a pájené plochy. Během tavení dochází k narušení plochy na rozhraní obou materiálů, což vede k vytvoření vazeb mezi atomy a formování výsledného spoje. Reakcí slitiny a pájecí plochy (velmi často cínu a mědi) se zároveň formuje intermetalická sloučenina, která je následkem difúze atomů dvou různých navzájem spojovaných materiálů. Při chladnutí již zformovaného spoje dochází k upevnění vzniklých vazeb. [1]

2.1 Techniky pájení

Hromadné pájení je v současnosti realizováno pomocí dvou nejrozšířenějších způsobů. Jedná se o strojní pájení vlnou a pájení přetavením. Přestože neustále převládá snaha některá zařízení zmenšovat, s čímž se pojí nadvláda techniky povrchové montáže a pájení přetavením, tak pájení vlnou není zcela potlačeno. Osazování součástkami THD (Through-hole Device) popřípadě jejich kombinace s SMD (Surface Mount Device) dodnes nevymizelo, a tudíž je technika pájení vlnou stále aktuální. Základním rozdílem dvou zmíněných technik je zdroj tepla a způsob aplikace pájky. Výběr dané techniky záleží na několika faktorech. Mezi ně lze zařadit typ montáže (typ I, II, III)¹, tepelné citlivosti použitých součástek, možnost dodatečného pájení atd. Pro úplnost je nutné zmínit techniku ručního pájení. Jedná se o okrajovou techniku, která je využívána hlavně pro případy oprav a výrobu prototypů, proto se jí podrobněji zabývat nebudu. [2]

2.1.1 Pájení vlnou

Pájení vlnou je druhem pájení tekutou pájkou, stejně jako v případě pájení vlečením a pájení ponorem. Pájení vlnou se často využívá jako technika strojního (hromadného) pájení pro DPS osazené čistě součástkami s drátovými vývody. Své využití ale také nachází v případě kombinované montáže součástek THD spolu s SMD. Potom jsou SMD součástky nalepeny na spodní straně desky v kombinaci s THD součástkami osazenými z vrchu – montáž typu II,

¹ Montáž (popř. obvod) typu I: Montáž SMD po obou stranách DPS.

Montáž typu II: Na jedné straně DPS je smíšená montáž THD a SMD a na druhé straně pouze SMD.

Montáž typu III: Na jedné straně DPS pouze součástky typu THD a na druhé jen typ SMD.

popřípadě typu III. Lepidla využívaná k lepení součástek musí splňovat určité požadavky. Patří mezi ně malá roztékavost, dobrá adheze, pevnost spoje, teplotní stálost, nesmí být elektricky vodivé a chemicky aktivní. [2]

Typický proces pájení vlnou se skládá z následujících třech hlavních fází:

- ◆ aplikace tavidla,
- ◆ předeheřev,
- ◆ pájení.

Základní funkcí tavidla je odstranění nečistot pájených částí, zajištění čistoty během pájení a zvýšení smáčivosti povrchů. Tavidlo používané k pokrytí DPS v zařízení pro pájení vlnou se nachází v kapalném stavu. Aplikace musí být taková, aby došlo k celkovému pokrytí tavidlem i v případě ztížených podmínek. Pro aplikaci tavidel je možno se využít třech hlavních způsobů. První možností je aplikace pěnového tavidla. Pěna je vyráběna pomocí vzduchu, který je přes aerátor vháněn do kapaliny s tavidlem. Přes vznikající pěnu je následně DPS dopravována pomocí dopravníku a tím je na ni tavidlo nanášeno. Pomocí pěny vzniká tenký a rovnoměrný potah tavidla, ale ne všechny typy tavidel jsou pro pění vhodné. Dále rozlišujeme sprejové nanášení tavidla, při kterém se používá stlačený vzduch nebo čerpadlo k nástřiku tavidla na DPS. Poslední variantou je nanášení vlnou, což je principálně stejný způsob, jako je samotné nanášení pájky. Nanášení vlnou je velmi účinné u vícevrstvých DPS, nicméně je náchylné k aplikaci nadměrného množství tavidla. [3]

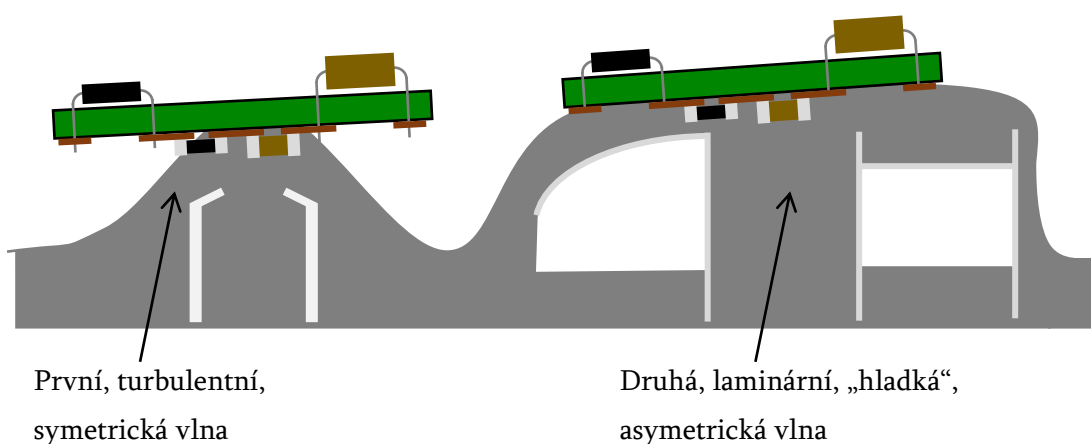
Předeheřev je přípravnou fází před zapájením. Účelem předeheřevu je zrychlení pájecího procesu. Další funkce předeheřevu spočívají v odpaření rozpouštědel v tavidle, aktivaci tavidla a snížení tepelného šoku. Pomalým ohříváním v rozmezí teplot 80-130 °C dojde k výraznému omezení teplotního šoku. Ten může mít dva nežádoucí následky, jako je zničení součástky při rychlém nárůstu teploty a deformace ve formě prohnutí DPS. Prohnutí vzniká například v důsledku rozdílnosti teploty obou povrchů desky. [3]

Proces pájení nastává po předchozím předeheřevu nad nádobou s roztavenou pájkou. Funkcí této části procesu je vzrůst teploty na teplotu pájení, dokončení aktivace tavidla a zajištění smáčivosti vývodů/kontaktů součástek a pájecích ploch. Nádoba, v níž se roztavená pájka nachází, musí být odolná vůči působení několika vlivů, jako je například vysoká teplota, váha pájky, tavidlo, zbytky tavidla či pájka samotná (odolnost proti smáčení). Na základě těchto požadavků musí být z vhodných materiálů zhotoveny i části uvnitř nádoby, které se podílejí na tvorbě vlny a jejím tvaru. [3]

Vlastnosti vlny jsou velmi důležitými aspekty ovlivňující celkový výsledek pájení. Mezi sledované faktory patří:

- ◆ tvar vlny,
- ◆ výstupní úhel – úhel mezi vlnou a horizontální osou DPS,
- ◆ doba působení,
- ◆ relativní rychlost proudící pájky a DPS na dopravníku,
- ◆ kontaktní plocha – plocha mezi DPS a vlnou.

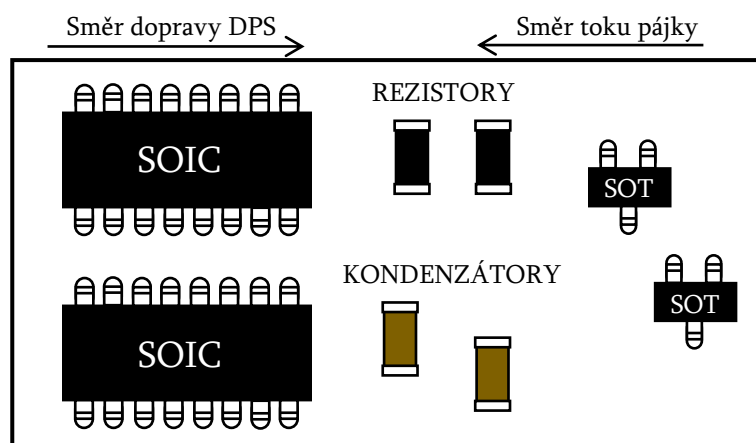
Tvar vlny může být symetrický a asymetrický. Obě varianty je možné pomocí podpůrných nastavitelných desek a dalších útvarů umístěných v nádobě vhodně vytvarovat. Hlavním účelem „zplacatění“ vrcholu vlny je, aby došlo ke zvětšení kontaktní plochy. Technologie pájení dvojitou vlnou zpravidla využívá první vlny - turbulentní, která má „drsný“ charakter, symetrický tvar a menší kontaktní plochu. Jejím účelem je podpoření funkce tavidla, smáčivosti spojovaných povrchů včetně jejich dokonalého očištění. Druhá laminární vlna je hladkého charakteru s asymetrickým tvarem a velkou kontaktní plochou. Působením druhé vlny dochází k dokonalému homogennímu zapájení spoje. Funkce druhé vlny bývá často umocněna tzv. „horkým nožem“. Pod tímto pojmem se skrývá proud horkého vzduchu, jehož funkcí je redukce nadměrného množství pájky, a tím i odstranění tzv. „bridging“ jevu (odstranění/omezení zkratů). [3]



Obrázek 1 Princip zařízení s dvojitou vlnou [3]

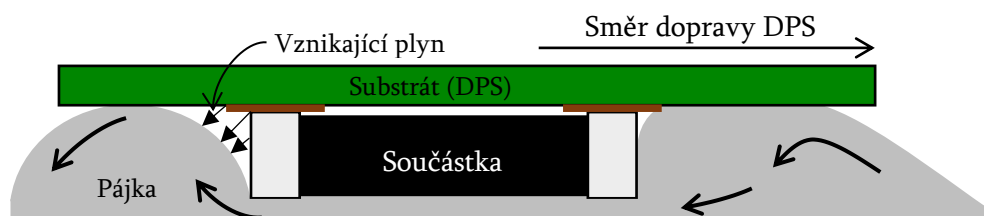
2.1.1.1 Využití pájení vlnou u povrchové montáže

Využití pájení vlnou pro technologii povrchové montáže přináší sebou několik úskalí. Pájení je složitější, neboť součástka obdélníkového či válcového tvaru sedí na pájecích plochách, čímž vznikají ostré zákoutí mezi deskou a součástkou. Laminární vlna narazí na spodní část součástky tangenciálně a nemusí se vždy dostat do vytvořených rohů pravouhlými součástmi a plochou deskou. [2]



Obrázek 2 Doporučená orientace součástek při pájení vlnou [2]

Dalším jevem vznikajícím během pájení SMD rezistorů a kondenzátorů vlnou je vznik plynů a neúplné zapájení. Oba zmíněné problémy spolu úzce souvisí. Vznik plynu je totiž vyvolán nedokonalým odpařením rozpouštědel obsažených v tavidlu a zformováním dutého prostoru mezi pájkou, kontaktem součástky a DPS. Ve vzniklém prostoru se rozpouštědla začnou odpařovat. Výskyt dutého prostoru je obvykle nazýván „stínování“ a vzniká v důsledku působení samotné součástky, v místech velké hustoty součástek, nebo pokud je menší součástka umístěna v zákrytu některé větší. Tyto chyby včetně „bridging“ efektu se běžně vyskytují u již zmíněných čipových rezistorů a kondenzátorů dále pak u součástek typu SOIC, SOT a QFP. Nejvhodnější prevencí výskytu nežádoucích jevů je správná orientace součástek, která musí být vzata v potaz již při návrhu DPS. [2]

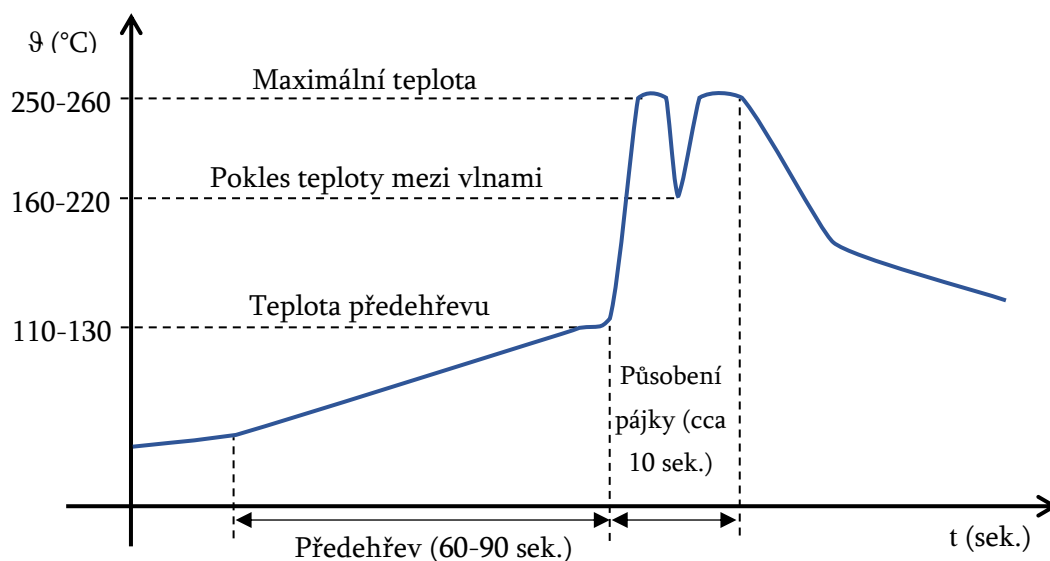


Obrázek 3 Vývoj plynu při pájení vlnou v důsledku stínění [2]

Zkratky tvořené pájkou mezi kontakty se mohou vytvářet pod malými SMD rezistory a kondenzátory jako například 0805 (0,2×0,13 mm). Se zmenšujícími se rozměry součástek je výskyt „bridging“ efektu ještě intenzivnější. Takto vzniklé přemostění je vizuálními kontrolami nespazřitelné a je diagnostikováno až během elektrických testů. Příčinou vzniku tohoto nežádoucího jevu je kapilární působení mezi tečkami lepidla nebo mezi pájecími plochami. Kapilární působení může být eliminováno mírným zvětšením rozteče mezi pájecími plochami, využitím nepájivé masky. [2]

Pasivní součástky pro povrchovou montáž jsou konstruovány tak, aby vydržely bez trvalých změn teploty roztavené pájky během pájení. Jejich odolnost je obvykle nastavena na teplotu 260 °C po dobu působení 10 s. Nicméně vliv teploty pájky je registrován u aktivních

pouzder typu SOIC, PQFP, a PLCC. U těchto součástek může vlivem rozdílné roztažnosti jednotlivých částí pouzdra docházet k prosakování tavidla do součástky. [2]



Obrázek 4 Příklad teplotního profilu při pájení dvojitou vlnou

2.1.2 Pájení přetavením

Dosažení kvalitního pájeného spoje si vyžaduje správné množství pájky, tavidla a dodaného tepla, a to na správném místě a ve vhodný okamžik. V případě pájení vlnou a ručního pájení nejprve dochází k aplikaci tavidla a následně je dodáno teplo s pájecí slitinou najednou. Právě tímto pořadím se metoda pájení přetavením odlišuje. U všech metod pájení přetavením totiž dochází k dodání tepla v posledním kroku. Celý proces tedy začíná aplikací pájecí pasty, která již obsahuje pájecí slitinu a tavidlo. Následným krokem je osazení součástkami. Všechny doposud provedené úkony probíhají za teploty okolí. Výsledný spoj vznikne zahřátím osazené DPS na určitou teplotou po stanovenou dobu. Metoda pájení přetavením je v současnosti ve spojení s povrchovou montáží (SMT) upřednostňována před technikou pájení vlnou. Jedním z důvodů, proč je kombinace SMT a pájení přetavením ideální, je například absence již popisovaného stínící jevu. Tím vzniká možnost hustšího osazování součástek bez ohledu na jejich orientaci [1]

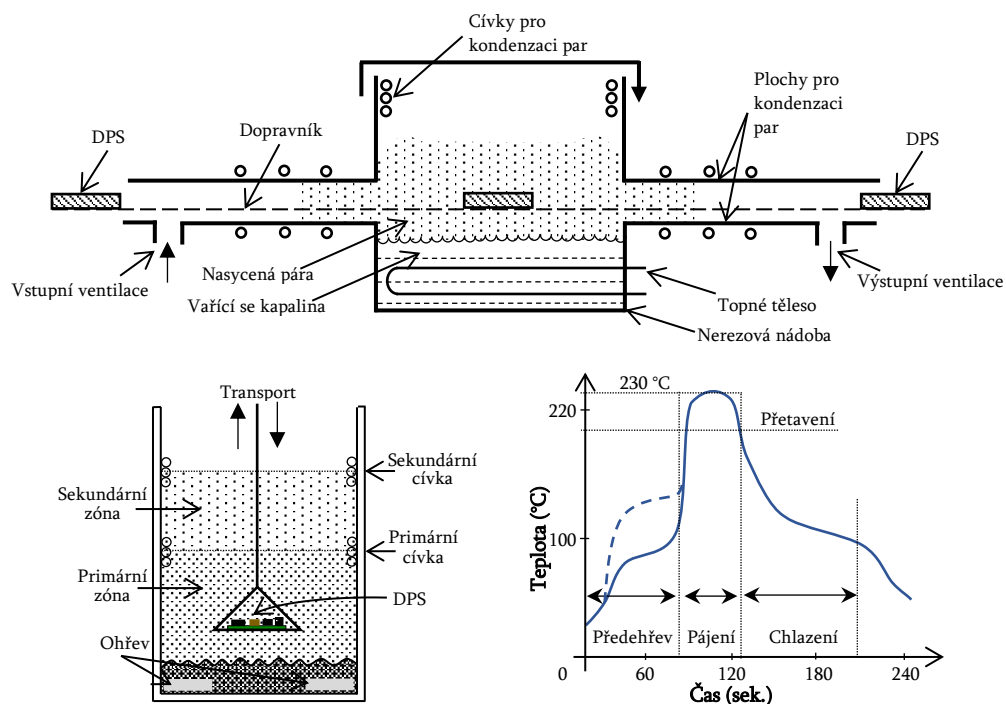
Metody pájení přetavením lze rozlišit na hromadné a selektivní. Volba dané metody závisí na aktuálních požadavcích a zejména na výhodách, které daná metoda přináší. Podle způsobu dodání tepla existují následující metody.

- ◆ Pájení horkým vzduchem nebo plynem (konvekční ohřev),
- ◆ pájení infračerveným zářením (infra ohřev),
- ◆ kondenzační pájení (pájení v kondenzovaných parách),
- ◆ pájení laserem,

- ◆ pájení vyhřívaným nástrojem (impulsní pájení),
- ◆ induktivní pájení (indukční ohřev),
- ◆ pájení na horké desce nebo pásu.

2.1.2.1 Pájení v parách

Princip pájení v parách je v základu velmi jednoduchý. Vložením chladné osazené DPS do nasycené páry vařící se kapaliny dochází k okamžité kondenzaci páry na povrchu desky a vývodech součástek. Při kondenzaci dochází k předání latentního tepla. Kondenzace probíhá do té doby, než dojde k vyrovnání teploty vloženého předmětu a páry. Teplota v místě nasycené páry je stejná, jako je teplota varu použité kapaliny. Teplota varu kapaliny pak udává i maximální možnou teplotu. U této metody pájení není zapotřebí kontrola dodaného tepla vznikajícím spojům ani tepla dodaného substrátu. Zahřívání je rovnoměrné a bez ohledu na tvar součástky nikdy nedochází k většímu oteplení součástky, než je teplota varu. Proto je pájení v parách vhodné k pájení dílů neobvyklého tvaru, ohebných obvodů, pinů, konektorů atd. [1]



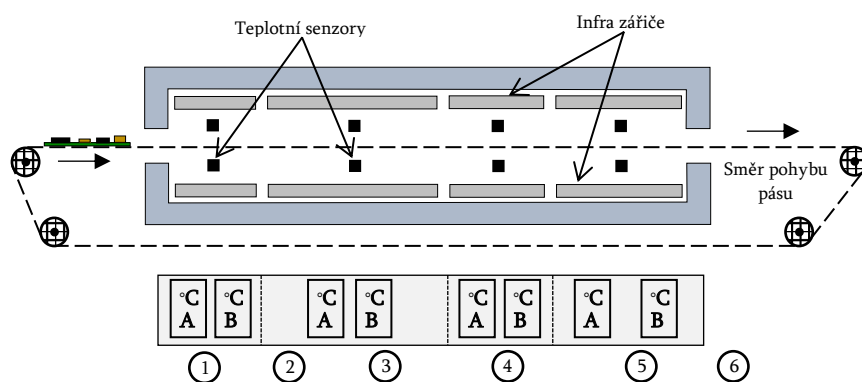
Obrázek 5 Dopravníkový (nahore) [2] a dávkový (vlevo dole) [39] systém pájení v parách s příkladem teplotního profilu

Pájení v parách je lehce automatizovatelný proces, u kterého se využívají dva možné systémy. Jednak je možné pájení realizovat průběžným dávkováním dopravníkovým systémem, nebo lze pájet jednotlivé dávky – dávkový systém. Druhý zmíněný způsob je vhodný pro výzkum, vývoj a výrobu s menším objemem produkce. Naopak dopravníková verze se využívá pro velkoobjemovou produkci. Oba dva systémy jsou patrné na obrázku č. 5. [2]

2.1.2.2 Pájení infračerveným zářením

Přenos tepla u infračerveného ohřevu je primárně realizován pomocí absorpce vyzařované energie. Energie infračerveného záření je vyzařována pomocí elektromagnetických vln s vlnovými délkami mezi 0,72 a 1000 μm . Nicméně účinný rozsah vlnových délek pro ohřev se volí mezi 1-8 μm . Ohřev probíhá nepřímo v okamžiku, kdy dojde k pohlcení záření molekulární strukturou a následnému vzrůstu lokální teploty. Infračervené záření je především pohlcováno organickými látkami jako substrát, tavidlo a rozpouštědla obsažená v pájecí pastě a také plastovými součástkami. Hloubka vniku, ve které dochází k přeměně na teplo, je závislá na vlnové délce záření. Kratší vlnové délky pronikají hlouběji. Kovové povrchy většinu infračerveného záření odrážejí, avšak fungují jako vodiče tepla, které vedou teplo z horkých do chladnějších oblastí. Jelikož většina energie je absorbována DPS, tak se zahřeje nejdříve a teplo následně předává pájecím plochám. Primární ohřev pájecích ploch způsobí tavení pájky a její smáčení, poté následuje smáčení kontaktů součástky. Tímto automaticky probíhajícím sledem dějů je omezeno nadměrné vzlínání pájky a riziko tvorby otevřeného spoje v důsledku „úniku“ pájecí slitiny. [4]

S infračerveným ohřevem se pojí několik obtíží, z nichž je nutné vyzdvihnout rozdílnost absorpce energie jednotlivými oblastmi DPS a součástkami. U velkorozměrových DPS se může vyskytnout velký teplotní rozdíl (až 20 °C) mezi jejím středem s hustším osazením a okrajovými částmi. Návrh teplotního profilu tudíž není jednoduchý a větší míře unifikovatelný. Ohřev DPS lze v zařízení regulovat jednak výkonem zářičů a také rychlostí dopravníku tak, aby byla dosažena požadovaná teplota a zároveň nedošlo k překročení maximální dovolené teploty. Zařízení poskytující infra ohřev má zpravidla tři a více zón s nezávislou kontrolou spodních a horních zdrojů tepla. Ukázka průběžného zařízení se čtyřmi zónami a teplotními senzory je na obrázku č. 6. [4]

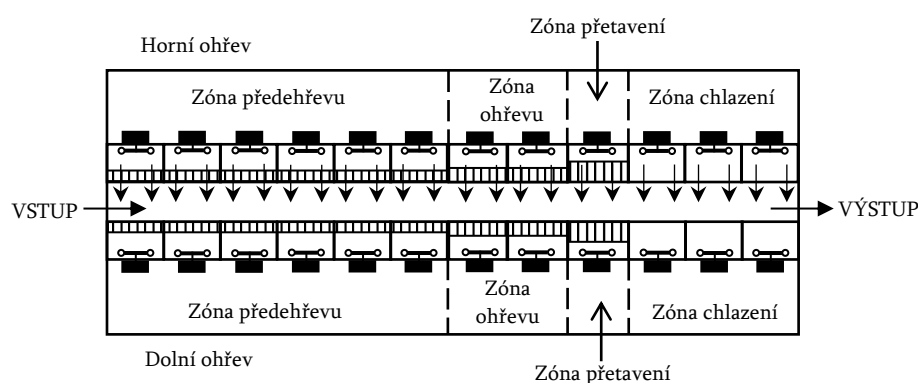


Obrázek 6 Pájecí zařízení s infračerveným ohřevem [39]

2.1.2.3 Pájení konvekčním ohřevem

Pájení horkým vzduchem či plynem je proces, při kterém je osazená DPS vložena do pece a vystavena působení tepla primárně dodaného prouděním ohřátého plynu. Teplotní

profil v peci je principiálně podobně jako u předchozí metody dán rychlostí dopravníku a teplotou vháněného vzduchu, jehož průtok lze regulovat. Malý tepelný příspěvek je sekundárně dodáván radiací a vedením z horkých ploch uvnitř pece. Zařízení bývají konstruovány s několika zónami produkujícími teplo pro ohřev a zónou určenou ke chlazení. Obecně ale platí, že se zvyšujícím se počtem zón je možné snáze docílit požadovaného průběhu teplotního profilu. Pro zlepšení podmínek uvnitř, zejména k prevenci oxidace, je možné využít inertní či redukční atmosféry. Výhodou konvekčního ohřevu je do jisté míry universálnost teplotního profilu pro rozdílné rozměry DPS, hustotu osazení a materiály. Na druhou stranu ve srovnání s IR pecemi jsou tyto pece konstrukčně složitější, a to hlavně z důvodu zajištění adekvátního přestupu tepla ze zdroje do prostor pece. [4]

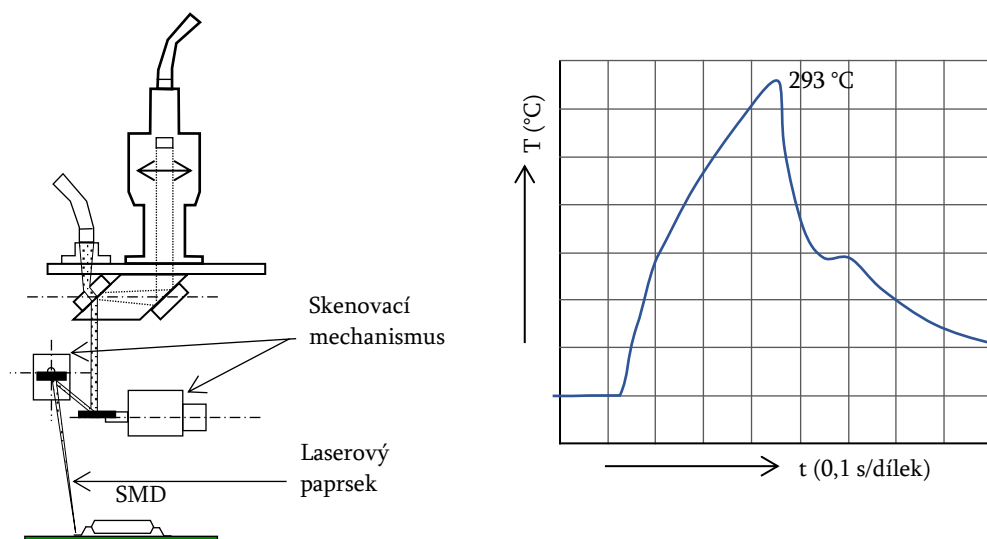


Obrázek 7 Pájecí pec s konvekčním ohřevem [39]

2.1.2.4 Laserové pájení

Vytvoření pájeného spoje laserem je docíleno pomocí zaměření paprsku na požadovaný spoj, přičemž spoj je kompletně vytvořen po několika pulsech. Poté musí dojít k pohybu DPS nebo aparátu s laserem, aby následovalo opětovné zaměření a vytvoření dalšího spoje pulzujícím paprskem. Pohyb DPS (popř. laseru) vyžaduje počítačovou kontrolu a detailní přípravu programu ovládající celé ústrojí pro vytvoření téměř každého spoje. Z finanční a časového hlediska je takovýto proces velmi náročný, proto se laserového pájení v hromadné sériové výrobě používá velmi zřídka. [4]

Laserové pájení je možné uplatnit v oblasti individuálního pájení dvou nejčastějších případech. Prvním z nich je pájení geometricky speciálních a teplotně citlivých součástek. Výhodou laseru je velmi přesné zaměření paprsku, což umožňuje pájet součástky s velmi malou roztečí vývodů. V případě pájení laserem dochází díky krátkému působení zdroje tepla k tvorbě spoje velmi rychle, proto je intermetalická vrstva tenká a rovněž lepší mikrostruktura spoje. Takto vytvořený spoj má velmi dobré termomechanické vlastnosti a splňuje požadavek na dlouhou životnost. Technika pájení laserem se využívá jako dodatková k již zmíněným technikám, pokud je požadavek osadit DPS senzitivními součástkami. Druhým případem využití je oprava vadných součástek v zařízeních. [1]



Obrázek 8 Příklad pájení FTP součástky laserem [39]

2.2 Teplotní profil

Stanovení teplotního profilu je velmi důležitou součástí pájení přetavením. V této kapitole podrobněji popíše jednotlivé části, ze kterých se profil skládá. Při odladování teplotního profilu se využívá termočlánků, které jsou během průběhu pecí umístěny na nejrizikovějších místech DPS – nejchladnější a nejteplejší části, citlivé a speciální součástky apod. V praxi se využívají dva základní typy profilů (1) Ramp-Soak-Spike profil a (2) Ramp-to-Spike. Rozdílem těchto dvou profilů je absence „plošiny“ určené pro aktivační² zónu u profilu (2). Teplota tedy v čase lineárně před dosažením maximální teploty roste bez známky chvilkového ustálení na nějaké hodnotě. Na obrázku č. 9 je příklad teplotního profilu, který by se zařadil do skupiny (1). [5]

2.2.1 Zóna předehřevu

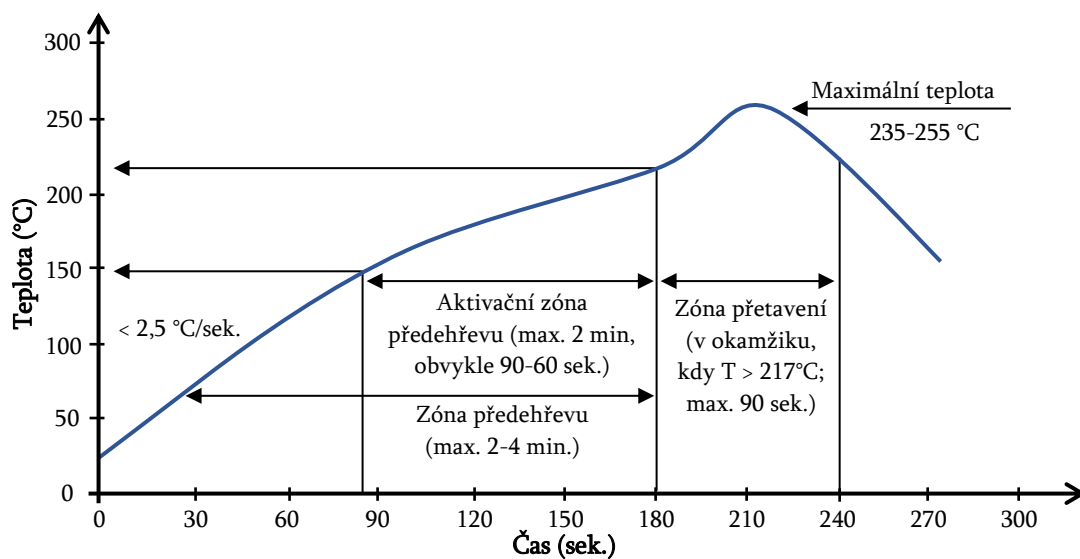
DPS a součástky jsou během předehřevu postupně zahřívány z pokojové teploty na teplotu okolo 170 °C. Těkavé složky, které jsou součástí tavidel, se odpařují. Nejvíce sledovaným parametrem předehřevu je nárůstu teploty v čase. Za ideální se považuje rychlost zvyšování teploty o 1-3 °C za sekundu. V případě rychlejšího růstu teploty může dojít k termálnímu šoku komponent na DPS i desky samotné. Rychlé oteplení dále může způsobit rozstřík tavidla. [5]

² Někdy bývá tato zóna označována jako zóna „před přetavením“ nebo zóna vysychání (pre-reflow/soaking zone/dry out zone)

2.2.2 Aktivační zóna

Zóna, v níž se teplota pohybuje v rozmezí 170-220 °C po delší dobu. U profilu typu Ramp-Soak-Spike je doba trvání zóny „před přetavením“ zhruba 120 sekund, v případě Ramp-to-Spike se jedná o kratší úsek a pohybuje se okolo 60 sekund. Zařazením tohoto úseku dochází ke snížení rozdílu teploty mezi jednotlivými částmi DPS a ke sjednocení teplot veškerých komponent na DPS. Díky tomu jsou všechny části na stejné teplotní úrovni, což je jedním z předpokladů k tvorbě kvalitního spoje. [5]

Během aktivační fáze dochází, jak již název samotný napovídá, k aktivaci tavidla a rozvoji jeho hlavní funkce. Tavidlo očišťuje částičky kovu v pájecí pastě, pájecí plošky a také kontakty součástek od oxidů příslušných kovů a udržuje je čisté. Příliš dlouhá doba této fáze může způsobovat selhání tavidla a ztrátu jeho funkcí ještě před přetavením. Popisovaná zóna ještě kromě aktivace tavidla napomáhá předešlé fázi k úplnému odpaření těkavých složek, tak aby ve spojích nevznikaly voidy (dutiny v pájeném spoji). Problém s voidy kvůli nedostatečnému odpaření plynů vznikajících v pastě se týká zejména součástek BGA, LGA, QFN, u nichž je ztížen odvod vzniklých plynů. [6]



Obrázek 9 Teplotní profil pro pájení přetavením bezolovnatými pájecími pastami

2.2.3 Zóna přetavení

Vstupem DPS do fáze přetavení dochází k roztavení částic kovu a formování spoje mezi DPS a vývody součástky. U bezolovnatých pájek se běžná maximální teplota pohybuje v rozpětí 235-255 °C. Další důležitou podmínkou je udržení teploty nad 220 °C po určitou dobu (typicky 45-80 sekund), aby bylo dosaženo správného smáčení pájky a formace spoje. Nerespektování doporučených maximálních hodnot daných veličin má za následek v případě překročení teploty přepálení tavidla a poškození součástek či DPS. Překročení časového

intervalu s sebou přináší tvorbu nadměrné tloušťky intermetalické vrstvy, jež má vliv na výslednou pevnost spoje. [5]

2.2.4 Zóna chlazení

Upřednostňováno je rychlé chlazení, neboť tak vznikne mnohem jemnější struktura částic tvořících spoj. Jemnější struktura poskytuje z mechanického pohledu velmi pevný spoj. Limitujícím faktorem, který udává maximální míru chlazení, je namáhání právě vzniklého spoje. Tepelné namáhání, jehož projev je závislý zejména na rozdílnosti koeficientů tepelné roztažnosti kontaktních ploch, by mohlo způsobit narušení nebo dokonce roztržení spoje. Popsané komplikace by se neměly projevit při chladnutí do 4 °C za sekundu. [6]

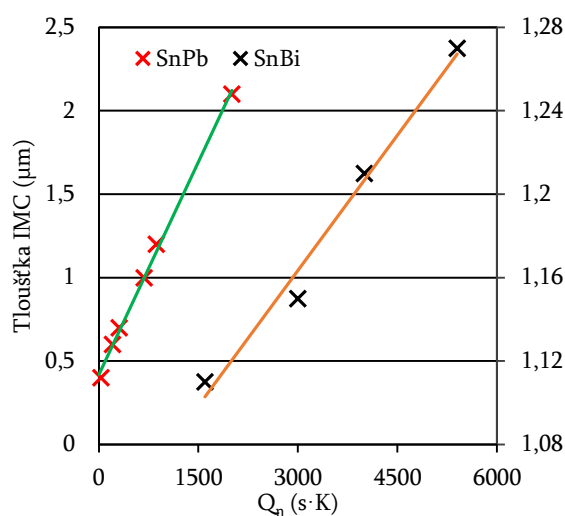
2.3 Integrál teploty a času pájení

Jedna z možností, jak se posuzuje spolehlivost a životnost pájeného spoje, se zakládá na analýze pomocí tzv. integrálu teploty a času (Q_t) neboli „heating“ faktoru. Vezmeme-li v potaz teplotu T_m , která je teplotou tání pájecí slitiny, potom „heating factor“ je matematicky definován jako integrál měřené teploty $T(t)$ nad teplotou T_m . Integrační meze (t_1 a t_2) jsou dány intervalem, kdy je pájecí slitina v kapalném stavu. [7]

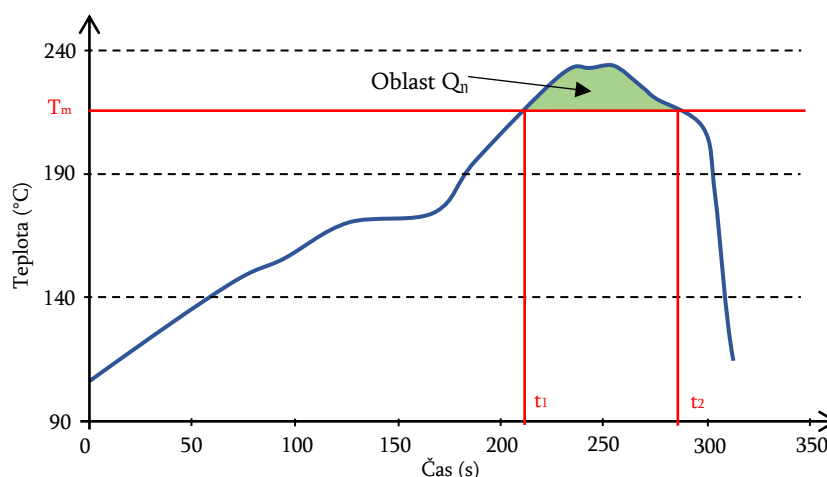
$$Q_t = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt, \quad (1)$$

kde jednotka Q_t je s·K. Řečeno slovy jedná se o teplo, které je vznikajícímu spoji dodáno po roztavení slitiny. Délka setrvání pájecí slitiny v roztaveném stavu a její teplota má značný vliv na tvorbu intermetalické sloučeniny (IMC). Mikrostruktura a tloušťka IMC následně hraje významnou roli v oblasti životnosti spoje. Tloušťka IMC není rovnoměrná a je složitě měřitelná. Pro účely analýz se využívá mikrovýbrusu a následné měření

pomocí mikroskopu. Na obrázku č. 10 je patrná závislost tloušťky IMC na Q_t pro pájecí slitinu 63Sn37Pb a měděné pájecí plošky (červené body) a pro 58Bi42Sn (černé body a vedlejší vstřední osa). Nejčastěji se v souvislosti s „heating“ faktorem a tloušťkou IMC hovoří o lineární závislosti ve sledovaných úsecích Q_t , což dokazují i proklady naměřených hodnot. Existuje však předpoklad, že závislost tloušťky IMC se od určité hodnoty Q_t od linearity odchýlí. V lineární oblasti lze celkem jednoduše řídit požadovanou tloušťku intermetalické vrstvy velikostí Q_t a docílit tak požadované spolehlivosti pájeného spoje. [7] [8]

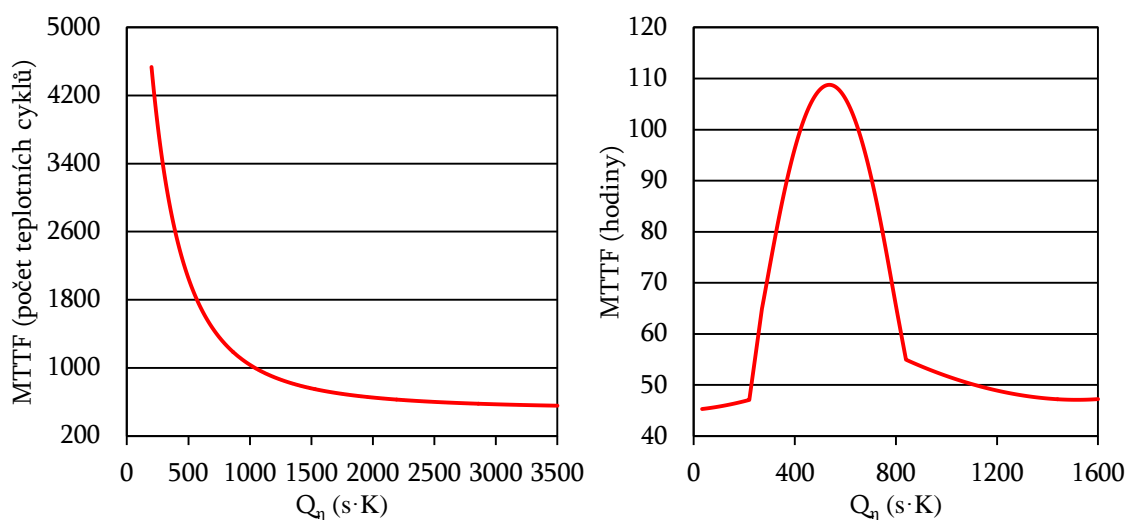


Obrázek 10 Závislost tloušťky IMC na „heating“ faktoru [7] [8]



Obrázek 11 Teplotní profil slitiny SAC 305 s vyznačenou oblastí – „heating“ faktorem [8]

Výsledky studií ukazují, že MTTF (Mean Time to Failure) pájených spojů při teplotních cyklických testech rychle klesá se vzrůstajícím Q_T a následně po překročení určité hranice integrálu teploty ($Q_T > 1500 \text{ s}\cdot\text{K}$) již hodnota MTTF klesá velmi zvolna (viz obr. č 12). Po překročení hranice $Q_T = 3000 \text{ s}\cdot\text{K}$ je rozdíl počtu cyklů na intervalu $\Delta Q_T = 500 \text{ s}\cdot\text{K}$ přibližně 5%. Tento jev je s největší pravděpodobností způsoben vznikem limitní tloušťky IMC danou kombinací zvolených materiálů. Při nižším Q_T je vrstva IMC menší, která se při dalším teplotním cyklování postupně zvětšuje až do kritické tloušťky. Na základě těchto výsledků by bylo pro dosažení vyššího MTTF nutné zajistit nižší Q_T během fáze přetavení. V rozporu s tímto závěrem je výsledek další studie, která se zabývala závislostí MTTF na „heating“ faktoru při vibračních (mechanických) zkouškách u pájených spojů μBGA . Na obrázku č. 12 je patrný nárůst MTTF a po dosažení maxima dochází k poklesu spolehlivosti. Nejvyšší hodnota MTTF se nachází v okolí $Q_T = 500 \text{ K}\cdot\text{s}$, a tudíž ideálním intervalem pro přetavení μBGA je mezi 300-700 $\text{K}\cdot\text{s}$. [7] [9]



Obrázek 12 Závislost MTTF na velikosti „heating“ faktoru, vlevo -teplotní cyklování, vpravo - vibrační testy u μBGA [7] [9]

3 TECHNOLOGIE PLOŠNÝCH SPOJŮ

Propojování elektronických součástek čistě pomocí běžných vodičů (kabelů) je v elektronických zařízeních z prostorového hlediska téměř nereálné. Obzvláště vezme-li se v potaz neustálé zmenšování téměř všech zařízení. Propojení pomocí vodičů je velmi rozšířené a úspěšně nahrazeno plošným obvodem (printed circuit board - PCB). Ten je vytvořen leptáním nalisované měděné fólie nebo pokovením. Obvod je „natisknut“ na základní materiál, kterým je nejčastěji laminát. Základní funkcí laminátu je mechanické ukotvení elektronických součástek včetně jejich elektrického propojení. Lamináty pro DPS jsou kompozitními materiály. Jedná se o produkt získaný lisování vrstev plnicího materiálu impregnovaného pryskyřicí za zvýšené teploty a tlaku. Výsledkem je tenký izolační materiál - substrát, který je složen z plniva (výztuhy) a pryskyřice a na kterém se nachází vodiče a po osazení rovněž všechny součástky. V závislosti na požadavku je možné dosáhnout pevného nebo flexibilního provedení. [10]

3.1 Plnivo (výztuha)

Významem plniv je zajištění mechanické pevnosti, stability a tuhosti laminátu. Běžně používanými výztuhami je široké spektrum papírů, bavlněná tkanina, sklo ve formě kontinuálního vlákna nebo ve formě stříže a dříve azbest. Zmíněné materiály ještě doplňuje keramika a molybden. Nejrozšířenějšími jsou však skelná vlákna a papír. [11]

Papír byl používán jako výztuž u většiny desek plošných spojů. Jedná se totiž nízkonákladový a jednoduše zpracovatelný materiál. Tyto výhody jsou zastíněny tendencí absorbovat velké množství vlhkosti. Další variantou výztuhy je skelné vlákno, které tvoří základní prvek skelné tkaniny. Jednotlivá vlákna jsou spojována proplétáním tak, že vytvářejí příze a svazky. Tkaním několika přízí vzniká stejně, jako u jakékoliv jiné látky, finální výrobek ve formě skelné tkaniny. Výztuž vyrobená ze skleněných vláken vyniká velkou pevností v tahu a stabilitou tvaru. Mezi pozitivní vlastnosti dále patří vysoká odolnost vůči měnící se teplotě a nízká absorpce vlhkosti [11]

3.2 Pryskyřice

Pryskyřice slouží k impregnaci zvoleného plniva. Obvyklé pryskyřice používané při výrobě substrátu jsou na bázi fenolu, polyesteru, kyanátu, epoxidu a polyimidu. Přičemž velká část produkce (zhruba 90% všech laminátů pro DPS) je založená na epoxidových a fenolových pryskyřicích. Převážná část těchto materiálů je syntetického typu, konkrétně lze hovořit o termosetech a termoplastech získaných polymerací (zesíťováním molekul nízkomolekulární látky neboli monomeru). Výběr vhodné pryskyřice závisí na elektrických, mechanických,

chemických a teplotních vlastnostech. Všechny tyto vlastnosti mají různé stupně významu v závislosti na konkrétní aplikaci DPS. [11]

Nejvyužívanější epoxidové pryskyřice bývají aditivy upravovány, aby bylo docíleno lepších teplotních vlastností a vyšší chemické odolnosti. V kompozitu závisí vlastnosti laminátu na druhu a množství použitých surovin, jejich způsobu vytvrzování a postupech výroby DPS. Důležitým faktorem je dostatek pryskyřice, která musí vyplnit veškerý objem mezi vlákny tak, aby nedocházelo ke vzniku dutin způsobujících mechanické oslabení a selhání laminátu. [11]

Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti laminátových materiálů [11]

Materiál laminátu	Absorpce vody (%)	Síla odtrhu Cu fólie (kg/mm ²)		T _g (°C)
		Při 25 °C	Při 200 °C	
Standartní FR4	0,11	0,0773	0,0401	130-140
Vysokoteplotní FR4	0,04-0,20	0,0633-0,0773	0,0527-0,0555	180
Polyimid	0,35	0,0598	0,0562	220
Bismaleimide Triazine (BT)	0,40	0,0612	0,0366	180
Kyanátester	0,39	0,0562	0,0443	240
PTFE	0,01	0,0703	0,0562	160
Polyfenylen ether				175
Polyfenylen oxid				180
Thermount (netkaný aramidový laminát)				220
Polymery tekutých krystalů (LCP)				280

Polyimidové pryskyřice se volí pro výrobu substrátu v okamžiku, kdy se očekává delší setrvání DPS v podmínkách vysokých teplot už během samotné výroby nebo v následném provozu. Své využití nachází i v případě osazení DPS drahými součástkami, u nichž se z cenového hlediska vyplatí výměna při defektu. Polyimidová pryskyřice si velmi úspěšně zachovává vytvořenou vazbu s měděnou fólií i při opětovném pájení. Teplota skelného přechodu (T_g) této pryskyřice je vyšší než 220 °C, a tudíž je vhodná pro tepelně výkonové aplikace. Nové typy laminátů vyvinutých v posledních letech rovněž disponují s T_g přesahující hodnotu 200 °C a výjimkou nejsou ani ty s T_g blížící se teplotě 300 °C. Příklady těchto pryskyřic jsou shrnuty v tabulce č. 1. [11]

3.3 Měděná fólie

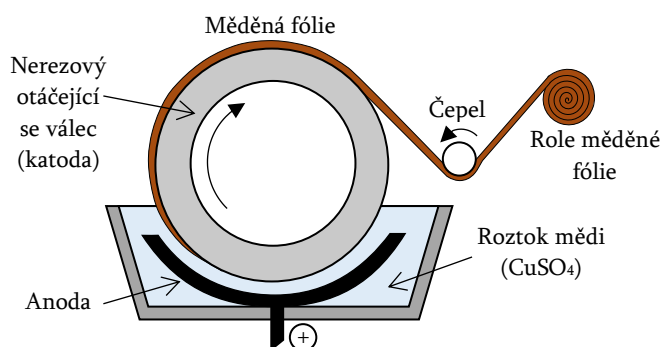
Vyhotovením podkladu je možné přejít k dalšímu kroku výroby DPS, a tím je vytvoření vodivé vrstvy. Vodivá vrstva může být vytvořena z mědi, niklu, nerezové oceli nebo beryliové mědi. Vzhledem k dostupnosti, ceně a funkčnosti je nejpoužívanějším prvkem měď. Podle potřeby je možné nanášet měď na laminát jednostranně či oboustranně. Vlastnosti měděné fólie do značné míry udávají výslednou kvalitu DPS. Plošná hmotnost (hmotnost na jednotku plochy) měděné fólie se běžně uvádí v uncích na čtvereční stopu, čemuž zhruba odpovídá 305,2 g/m². V tabulce č. 2 jsou patrné standardní tloušťky běžně vyráběných měděných fólií, přičemž převážná část vyprodukovaných DPS obsahuje fólie o gramáži 305 g/m² a menší. Jedním z kvalitativních parametrů je rezistivita, jejíž hodnota by neměla překročit hodnotu 0,16 Ω-gram/m². Dále by fólie neměla obsahovat žádné defekty, jako jsou škrábance, díry, nerovnoměrná tloušťka atd. V současnosti jsou k dispozici i velmi slabé fólie o tloušťce 5 a 9 mikronů, které jsou využívány k výrobě vícevrstvých, ale i standardních pevných DPS. Takto slabé fólie vynikají kratším časem leptání, menším množstvím odleptaného materiálu, vypuštěním procesu ošetření ploch před aplikací fotorezistu a lepší adhezí fotorezistu. [11]

Tabulka 2 Standardní tloušťky a hmotnosti měděných fólií [11]

Tloušťka	Plošná hmotnost		
	Oz/ft ²	g/m ²	Tolerance
12 μm	3/8	107	± 10 %
18 μm	1/2	153	
35 μm	1	305	
70 μm	2	610	

Měděnou fólie lze pro účel výroby DPS získat dvěma způsoby, a to válcováním nebo elektrolyticky. Výroba válcováním spočívá v rozválcování vhodně připravených ingotů mědi na maximální šířku do 1 m. Válcovaná fólie se využívá zejména ve výrobě flexibilních DPS. Výroba válcováním je ze dvou zmíněných variant sice jednodušší, ale takto vyrobené fólie mají několik následujících nevýhod, jako omezená šířka, horší pájitelnost, adheze a tažnost způsobené deformací krystalové struktury. Elektrolytický způsob výroby je znázorněn na obrázku č. 13, na kterém je patrná nerezová nádoba, rotující buben zastupující katodu a anodu zprostředkovanou čistou mědí. Anoda a katoda jsou ponořeny v roztoku síranu měďnatého. Nanesená vrstva mědi na buben je lehce odstranitelná díky slabé adhezi. Tloušťka vznikající fólie se reguluje pomocí rychlosti otáčení bubnu a proudovou hustotou. Takto vzniklá fólie ze strany od bubnu velmi hladká lesklá a na straně, která byla v kontaktu s bubnem, je matná. Matná strana následně prochází dalším procesem zvyšující drsnost, což vede k lepší adhezí fólie k laminátu. V současnosti využívané procesy se nazývají black oxide a brown oxide.

Prvně zmíněný je již méně využívaný a spočívá v tvorbě oxidu měďnatého na povrchu mědi. Tento oxid se vytváří na vertikální lince a má černou barvu. Modernějším způsobem zdršňování je brown oxide proces, který je realizován na horizontální lince. Během procesu dochází k mikro-leptání mědi do hloubky přibližně 1,2-1,5 μm za současného pokrývání povrchu organometalickou strukturou. Vzniklá struktura má nahnědlou barvu, proto je proces nazýván brown oxide. Elektrolyticky vyráběné fólie dosahují šířky větší, než jsou dva metry. [11] [12]



Obrázek 13 Ukázka výroby měděné fólie [11]

3.4 Výroba laminátu a desky plošného spoje

Přípravou základu pro tvorbu DPS je proces výroby laminátu včetně vodivé fólie, který se skládá z těchto následujících kroků:

- ◆ impregnace,
- ◆ usazení Cu fólie,
- ◆ lisování,
- ◆ odstranění okrajů a řezání,
- ◆ kontrola kvality.

Na vypsané body výroby navazuje tvorba DPS již s vodivými cestami a plochami pro napájení součástek pro specifické účely. Výrobu lze shrnout následujícím postupem:

- ◆ fotolitografie,
- ◆ leptání,
- ◆ vrtání,
- ◆ aplikování nepájivé masky,
- ◆ pokovení,
- ◆ testy DPS.

3.4.1 Výroba laminátu

Impregnace je proces, v rámci něhož je tekutá pryskyřice nanášena na skelnou tkaninu prostřednictvím kombinace posuvných a nanášecích válců. Dále je tkanina vystavena kontrolovanému zdroji tepla, který způsobuje částečné vytvrzení pryskyřice. Teplo je dodáváno prostřednictvím sušící pece, která může být horkovzdušná popřípadě s infračerveným ohřevem. Tím dojde k odpaření těkavých látek a impregnovaná deska je tak na dotek suchá. Vzniklý produkt je obvykle nazýván jako prepreg. [11]

Další fází výroby je usazení měděné fólie na zhotovené prepregy před slisováním. Na připravenou měděnou fólii jsou naskládány prepregy v tolika vrstvách, jaká je požadovaná tloušťka laminátu (substrátu). V případě výroby oboustranné DPS se položí měděná fólie na vrch poslední vrstvy prepregu. Pokud se jedná o jednovrstvou DPS, tak je Cu fólie nahrazena speciálním povlakem. [11]

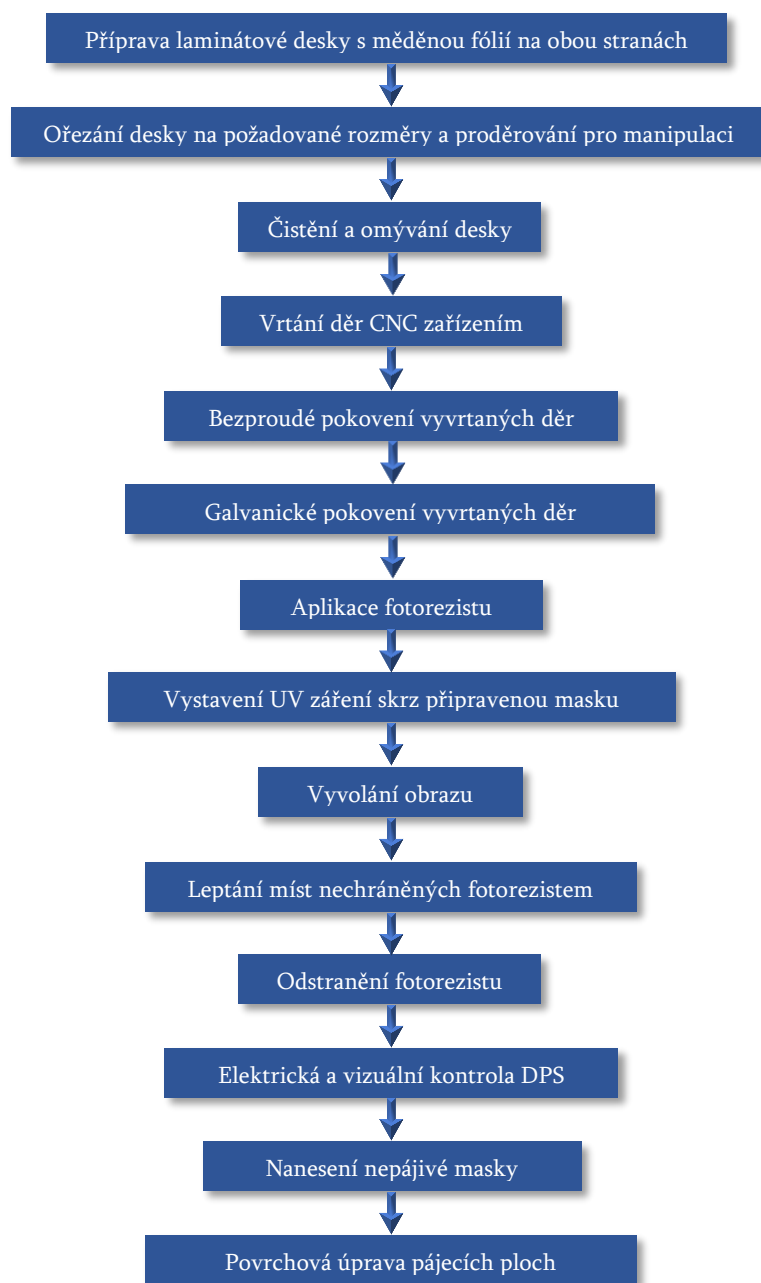
Lisování probíhá za současného působení teploty a tlaku na pakety připravené v předchozím kroku, čímž vzniká plně vytvrzený laminát. Tato operace se provádí v hydraulickém lisu, který je schopen vyvinout tlak až 7 MPa a zdrojem tepla je typicky pára. Během lisování částečně vytvrzená pryskyřice zkapalňuje, proudí a vylučuje veškerý zachycený vzduch nebo plyny. Pohyb pryskyřice zároveň působí k její správné homogenizaci a zároveň k tomu, aby se ošetřená strana fólie správně přichytila a byla dosažena její adheze k laminátu. Manipulace s vyrobenými laminátovými deskami je možná až po postupném ochlazování na teplotu 25-30 °C. Po vyjmutí desek z lisu jsou oříznuty jejich okraje, kde se nachází oblasti nepravidelně vyplněné tokem pryskyřice. Zároveň probíhá i nařezání desek na požadované rozměry. [11]

Konečnou fází výroby základu DPS je kontrola velkého množství vlastností laminátu. Těmito vlastnostmi jsou například čistota, tloušťka, absorpce vody, odolnost vůči pájce, složení pryskyřice včetně podílu těkavých látek, tvarová stálost, chování při vrtání a stříhání atd. [11]

3.4.2 Vytvoření DPS

Fotolitografie slouží ke tvorbě vodivých cest a pájecích ploch podle potřeb výrobce zařízení. Fotorezist je látka, která osvětlením UV zářením dané vlnové délky změní své vlastnosti. K účelům fotolitografie se využívá jak pozitivního, tak i negativního fotorezistu. Univerzálnějším je negativní fotorezist, který je po ozáření nerozpustný, což je dáno jeho polymerací. Naopak při ozáření pozitivního fotorezistu dojde k narušení polymerních vazeb, a tudíž je rozpustný. Na ozáření fotorezistu skrz masku s určitou časovou prodlevou navazuje vyvolání motivu. Motiv je vyvolán postřikem roztoku uhličitanu sodného a následně vodou. Fotorezist lze rozdělit podle jeho skupenství. Kapalný je levnější a je nanášen namáčecími

válci, sprejem nebo ponorem. Tuhý polymerní fotorezist je aplikován ve formě sendvičové struktury, kde fotocitlivá vrstva je z obou stran obklopena fóliemi rovněž z polymeru. Separáční fólie se odstraní při laminování, čím je umožněno fotosenzitivnímu polymeru přilnout přímo na povrch desky. Druhá krycí fólie je ponechána na fotorezistu podle potřeby. [10]



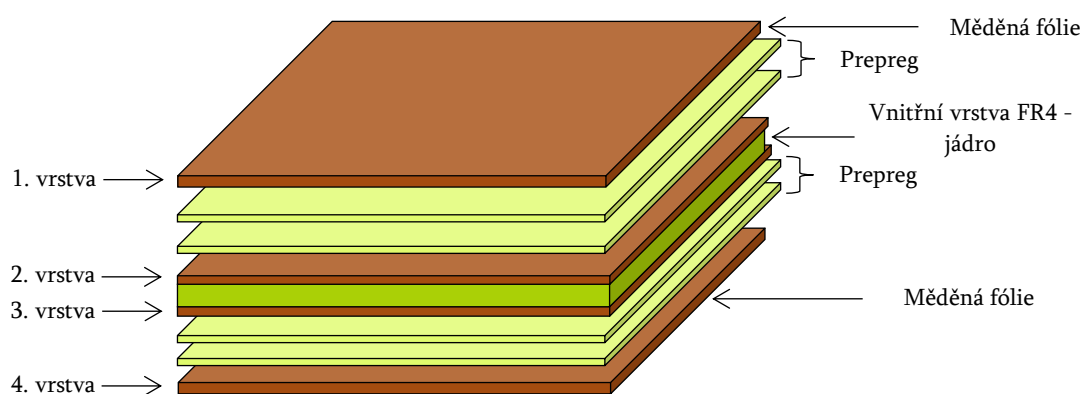
Obrázek 14 Pořadí jednotlivých kroků výroby oboustranných DPS [10]

Leptání měděného povrchu probíhá na místech, která nejsou chráněna vůči leptadlům. Působením leptajících látek dochází k rozpuštění mědi, a tím k vytvoření požadovaných vodivých cest a pájecích plošek. Volba vhodného leptadla je závislá na kompatibilitě s fotorezistem, rychlostí leptání, cenou a charakteristikou znečišťujících částic. Mezi používané typy leptadel se řadí například chlorid železitý, chlorid měďnatý, roztok kyseliny

chlorovodíkové a peroxidu vodíku, alkalické roztoky. V důsledku nemožnosti kontroly procesu leptání ponořením je v hromadné výrobě upřednostňováno sprejové nanášení. Rovnoměrnost leptání je zajištěna vhodně rozloženými tryskami. Kontrola leptacího procesu je velmi důležitá, aby nedocházelo k zanechání mědi na laminátu, což by mohlo způsobit zkrat mezi vodivými cestami. Opačným extrémem, ke kterému nesmí docházet, je nadměrné leptání. To má za následek zeštíhlení nebo dokonce přerušování vodivých cest. [10]

Vrtání desek se realizuje z několika důvodů, kterými jsou připojení součástek s drátovými vývody, propojení jednotlivých vrstev (u vícevrstvých DPS), mechanické ukotvení DPS, přichycení konektorů a chladičů. S různými účely se pojí i různé průměry vrtaných otvorů. K vrtání děr se v komerční výrobě používají zejména CNC vrtací stroje. Při vrtání jsou desky sevřeny mezi dvě pomocné desky, které zabraňují vzniku otřepů. [10]

Nepájkivá maska je organický povlak a nanáší se na ta místa, u nichž je požadována nesmáčivost pájecí slitinou. Nepájkivá maska může být jednosložková nebo dvousložková a po aplikaci musí dojít k jejímu vytvrzení. Vytvrzení lze provést tepelně nebo vystavením UV záření. Před samotnou aplikací nepájkivé masky je nutné zajistit dostatečnou čistotu povrchu, aby nedocházelo k jejímu odloupávání. V závislosti na typu masky se volí její nanášení. Tekutá maska se aplikuje síťotiskem a fotocitlivá maska je nanesena clonově. Suchá fotocitlivá maska je zvýšené teploty a tlaku na povrch DPS naválcována. Mezi nesporné výhody nepájkivých masek se řadí eliminace vzniku zkratů při pájení, redukce znečištění pájky během pájení, zlepšení mechanických vlastností DPS a vytvoření bariéry mezi okolní atmosférou a deskou. [10]



Obrázek 15 Složení jednotlivých vrstev DPS [12]

Výroba dvoustranných a vícevrstvých desek plošných spojů vyžaduje elektrické spojení jednotlivých vrstev. Propojení se zajistí pokovením vytvořených otvorů, a to bezproudým a galvanickým způsobem. Pomocí bezproudého pokovení se ve vyvrtaném otvoru vytvoří dostatečná vrstva, která zajistí vodivost celého povrchu otvoru. Potom je možné vzniklou měděnou vrstvu zesílit na požadovanou tloušťku galvanickým pokovením. [10]

3.5 Parametry substrátu (laminátu)

Stanovení hodnot sledovaných parametrů je velmi důležité z hlediska vhodné volby laminátu pro dané využití a prostředí. Jelikož vlastnosti se liší laminát od laminátu v závislosti na zvoleném plnivu a pryskyřici, potom i výsledné hodnoty veličin nejsou pro všechny druhy stejné. Elektrické, mechanické, chemické a teplotní vlastnosti jsou však dány zejména výběrem pryskyřice. Nutno podotknout, že elektrické a mechanické atributy jsou ovlivňovány okolním prostředím skrze vlhkost, teplotu a korozivní atmosféru, atd. Sledované parametry jsou v bodech vypsány níže. [11]

- ◆ Relativní permitivita,
- ◆ elektrická pevnost,
- ◆ izolační odpor,
- ◆ ztrátový činitel,
- ◆ pevnost v tahu,
- ◆ pevnost v ohybu,
- ◆ pevnost při nárazu,
- ◆ pevnost v tlaku (stlačitelnost),
- ◆ odolnost vůči el. oblouku
- ◆ adheze měděných pájecích ploch,
- ◆ tepelná odolnost,
- ◆ odolnost vůči ohni,
- ◆ samozhášecí schopnost,
- ◆ odolnost vůči houbám a mikroorganismům.

V následujících odstavcích jsou stručně popsány některé výše zmíněné veličiny a vlastnosti. Shrnutí význačných vlastností některých substrátů vhodných pro DPS včetně jejich značení a složení nabízí tabulka č. 5. [11]

Tabulka 3 Příklady průrazných napětí jednotlivých laminátů [11]

Materiál	U_p (kV)
XXX PC a FR-2	15
FR-3 a FR-6	30
CEM-1, CEM-3, G-10, G-11, FR-4, FR-5	40
GT a GX	20

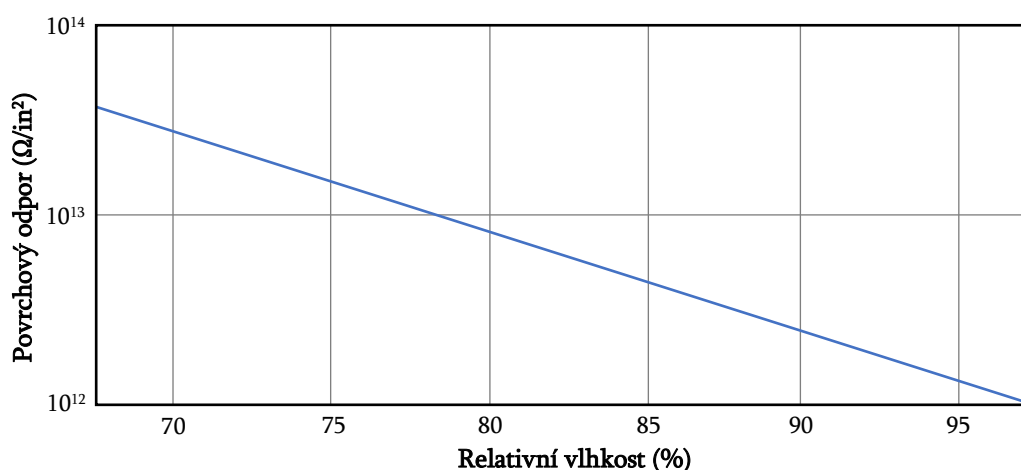
Elektrická pevnost je obecně schopnost izolačního materiálu odolat průchodu elektrického proudu za přítomnosti elektrického pole. Podobně jako u ostatních dielektrických materiálů, tak i v případě laminátu je elektrická pevnost závislá na jeho chemickém složení, molekulární struktuře, vlhkosti, tloušťce, čistotě, struktuře povrchu a stavu z hlediska stárnutí materiálu. Elektrická pevnost se testuje vložení vzorku mezi dvě elektrody, se kterými se ponoří do oleje, a postupně se zvyšuje napětí do okamžiku elektrického průrazu. Tabulka č. 3 poskytuje příklady hodnot elektrické pevnosti pro vybrané lamináty. [11]

Význam relativní permitivity a ztrátového činitele ($\text{tg} \delta$) zde není třeba podrobně rozebírat, pouze poukážu na závislost těchto veličin na různých faktorech. Relativní permitivita je závislá na teplotě, vlhkosti, frekvenci a složení materiálu, přičemž změna teploty a frekvence působí na hodnotu relativní permitivity u každého materiálu jinak. Závislost velikosti ztrátového činitele na měnících se podmínkách je téměř stejná, jako tomu je u relativní permitivity. Například s rostoucí frekvencí dochází k poklesu $\text{tg} \delta$, naopak nárůst $\text{tg} \delta$ je spojen se vzrůstající teplotou. Činné (odporové) ztráty laminátu jsou přímo úměrné ztrátovému činiteli, proto v případě obvodu pracujícího s velkými výkonovými ztrátami je vhodné volit lamináty s menším ztrátovým činitelem. V tabulce č. 4 je uveden $\text{tg} \delta$ pro běžné kombinace plniva a pryskyřice. [11]

Tabulka 4 Typické hodnoty ztrátového činitele [11]

Plnivo a pryskyřice	Papír a fenol	Sklo a epoxid	Sklo a PTFE
$\text{tg} \delta$ (-)	0,02-0,08	0,01-0,03	0,0008-0,005

Při posuzování izolačního odporu se zpravidla zajímáme jak o povrchový izolační odpor, tak i odpor hmoty samotného laminátu (objemový odpor). Není žádným překvapením, že obě hodnoty jsou velmi závislé na okolním prostředí. Proto je důležité tyto parametry testovat za provozních podmínek. Dalším faktorem ovlivňující hodnoty odporů je jejich chemické složení. Například objemový odpor, který je velmi důležitým elektrickým parametrem laminátu, s rostoucí teplotou velmi rychle klesá. Jeho hodnota je zároveň závislá na schopnosti laminátu pohlcovat vlhkost, přičemž za jeden z nejlépe odolávajících vlhkosti a s tím spojené změně objemového odporu se považuje PTFE laminát. [11]



Obrázek 16 Závislost povrchového odporu na relativní vlhkosti pro FR4 [11]

3.5.1 Tepelné parametry

Dalšími sledovanými parametry, které je v této kapitole nutné v souvislosti s DPS a lamináty blíže popsat, je teplota skelného přechodu T_g (Glass transition temperature), teplota

rozkladu T_d (Decomposition temperature) a čas delaminace (Time to delamination). Teplotou skelného přechodu rozumíme takovou teplotu, kdy dochází ke změně stavu z pevného do viskózního či pružného v důsledku vratného rozbití vazby mezi polymerními molekulovými řetězci. Vazby mezi řetězci vznikají díky působení van der Waalsovy síly. Po překročení teploty T_g dochází ke změně hned několika parametrů, kterými jsou koeficient teplotní roztažnosti, Youngův modul, tepelná kapacita a relativní permitivita. Velmi diskutovaným tématem je i změna samotného T_g . Je dokázáno, že teplota skelného přechodu se mění vlivem působení vlhkosti. Pokles se udává v intervalu od 10 °C do 30 °C v závislosti na materiálu substrátu. Teplotu skelného přechodu materiálu lze stanovit pomocí diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), jež je založena na konstantní rychlosti zahřívání dvou objektů. Jedním z objektů je testovaný vzorek a druhý objekt je vzorek s podobnými vlastnostmi nebo prázdná nádoba. Každopádně musí být referenční vzorek při experimentálních teplotách inertní. Měřením rozdílu tepelného toku v závislosti na teplotě je například z grafického zobrazení možné stanovit T_g . Další možností určení T_g je termomechanická analýza (TMA), která využívá rozměrových změn materiálu v závislosti na teplotě. Sondou je měřena expanze vzorku. Na zaznamenávané křivce roztažnosti je patrná změna strmosti křivky, která indikuje přechod jednoho stavu do jiného. Teplota T_g se stanoví pomocí průsečíku přímků vzniklých extrapolací lineárních částí naměřené křivky. [13] [14]

Tabulka 5 Důležité vlastnosti laminátů [11]

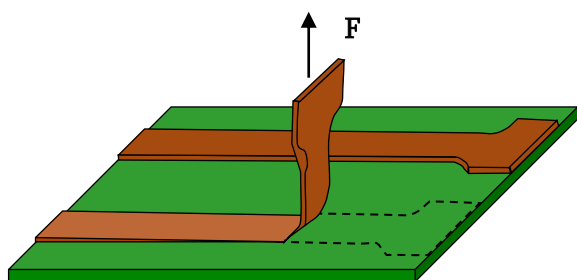
Značení	Složení	Význačná vlastnost
XXXPC	Papír/formaldehyd	Rezistence vůči vlhkosti, nejlepší mechanické vlastnosti ze skupiny laminátů papír/formaldehyd
FR2	Papír/formaldehyd	Podobné XXXPC, ale samozhášecí schopnost
FR3	Papír/epoxid	Velmi dobré mechanické a vlastnosti, samozhášecí schopnost
FR4	Sklo/epoxid	Samozhášecí schopnost, chemicky odolné, nízká absorpce vody
G3	Sklo/formaldehyd	Vysoká pevnost v ohybu a rozměrová stabilita
G5	Sklo/melamin	Vysoká odolnost vůči nárazu
G9	Sklo/melamin	Stejně jako u G5, ale lepší elektrické vlastnosti
G10	Sklo/epoxid	Stejně jako FR4, ale nemá samozhášecí schopnost
G11	Sklo/epoxid	Stejně jako G10, ale vyšší pevnost v ohybu za tepla
G30	Sklo/polyimid	Vysoká rozměrová stálost za tepla a samozhášecí schopnost
FR5	Sklo/epoxid	Stejně jako G11 včetně samozhášecí schopnosti
GPO1	Sklo/polyester	Všeobecné použití, průměrné mechanické a elektrické vlastnosti
GPO2	Sklo/polyester	Stejně jako GPO1, ale méně hořlavý

Teplota rozkladu je teplota, jejíž překročení znamená nevratné fyzikální a chemické změny tepelnou destrukcí vnitřních vazeb. Výsledkem je úbytek hmotnosti materiálu, přičemž teplota je definována pro pětiprocentní úbytek, ale počátek delaminace je

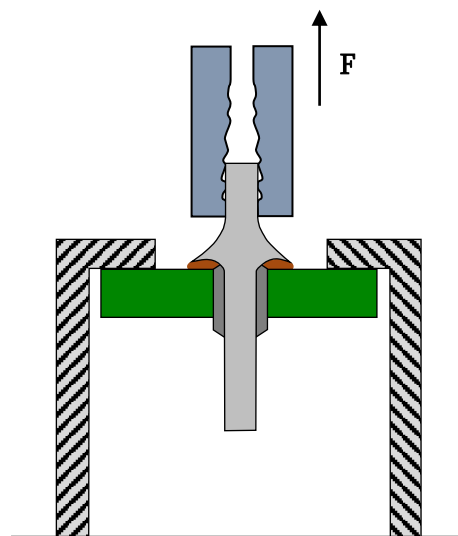
zaznamenán již při jednoprocenním úbytku hmotnosti. Čas delaminace je doba při vystavení laminátu konstantní teplotě, za níž dojde k oddělení vrstev prepregů nebo měděné fólie vlivem separace pryskyřice a skleněných vláken popřípadě Cu fólie. Používané teploty jsou 260 °C a 288 °C (T-260, T-288). [13]

3.5.2 Test adheze

Zkouška adheze nebo také pevnost při odlupování (peel strength) je proces, při kterém se testuje pevnost vazby mezi laminátem a měděnou fólií. Pro účely této zkoušky (dle americké normy MIL-P) se běžným způsobem vyrobí DPS se speciálním tvarem testovacích proužků Cu fólie. Následně je jeden konec proužku předem odloupen a nastaven kolmo k upevněnému vzorku substrátu. Odloupený konec je sevřen svěrkou, která je napojena na indikátor síly. Poměr zaznamenané síly k šířce pásku je silou odlupování. Jako jednotky se běžně používají libry na palec šířky nebo kilogramy na milimetr šířky. Pro nejběžnější lamináty minimální síla pro Cu fólie 1 oz/ft² je 0,143 kg/mm a pro fólie 2 oz/ft² je vyžadována minimální síla odloupení 0,1756 kg/mm na laminátu typu XXXP, XXXPC, FR3, FR4 a FR5. Téměř identickou zkoušku s názvem pevnost v loupání za různých podmínek (po tepelném rázu, ponoru do rozpouštědla, suchém teple atd.) lze rovněž nalézt v české normě, která se liší pouze v některých bodech, jako jsou rozměry měděných ploch či vyjádření výsledné pevnosti v loupání (N/mm). [11] [14]



Obrázek 17 Test pevnosti při odlupování za působení síly F [11]



Obrázek 18 Uspořádání při testu pevnosti v odtrhu [11]

3.5.3 Pevnost v odtrhu

Další zkouškou, která vyhodnocuje pevnost vazby mezi vodivou plochou a substrátem, je pevnost v odtrhu. Příprava spočívá ve vyvrtání otvoru o průměru přibližně 1,3 mm do středu připraveného motivu Cu fólie (pájecí plochy). Skrze otvor se zasune měděný drátek orientovaný kolmo k pájené ploše a pomocí ruční páječky se připevní. Drátek je uchycen

prostřednictvím kleští v rámci trhacího zařízení. Vyhodnocení minimální síly potřebné odtržení pájecí plochy je možné, pouze pokud dojde odtržení měděného motivu od laminátu. Končí-li zkouška přetržením drátku nebo poškozením pájeného spoje (např. vytržením drátku), tak se hodnota síly tohoto měření nezapočítává. [14]

3.6 Typy DPS substrátů (laminátů)

3.6.1 Laminát s fenol-formaldehydovou (fenolickou) pryskyřicí

Název této pryskyřice již napovídá, jaké látky se k výrobě využívají. Jedná se tedy o reakci roztoků fenolu a formaldehydu v příslušném rozpouštědle. Nejznámějším materiálem založeným na formaldehydové pryskyřici je bakelit. Pro účely DPS jsou původní plniva (např. dřevěná moučka, kovový prášek atd.) nahrazena z největší části papírem. Klasifikace laminátů je podle NEMA X, XX, a XXX. Počet písmen „X“ udává podíl formaldehydové pryskyřice zastoupené v laminátu, konkrétně se jedná o 35, 45 a 55 procent. Zbýlý podíl je zastoupen plnivem a aditivami zlepšujícími vlastnosti laminátu. Z vyjmenovaných tříd laminátů se první dvě (X a XX) z důvodu nevyhovujících elektrických vlastností pro výrobu DPS využívají pouze zřídka. Dalšími úpravami třídy XXX lze získat třídu XXP a XXPC, kde P a PC zastupuje „punchable“ a „cold punchable“, to znamená možnost děrování za zvýšené teploty (90-120 °C) nebo za studena (20-50 °C). Třídu XXXP, která se od XXP liší pouze vyšším podílem pryskyřice, je možné aplikovat v zařízeních pro běžné použití. Třída XXXPC je vhodná díky vyššímu izolačnímu odporu a menší absorpci vody pro zařízení pracující v prostředí s vyšší vlhkostí. Nicméně v porovnání s lamináty založených na epoxidové pryskyřici je absorpce vody formaldehydových pryskyřic stále vyšší a dále odolnost vůči elektrickému oblouku je nižší. Výhodou je snadná výroba a nízká cena. [10]

3.6.2 Laminát s epoxidovou pryskyřicí

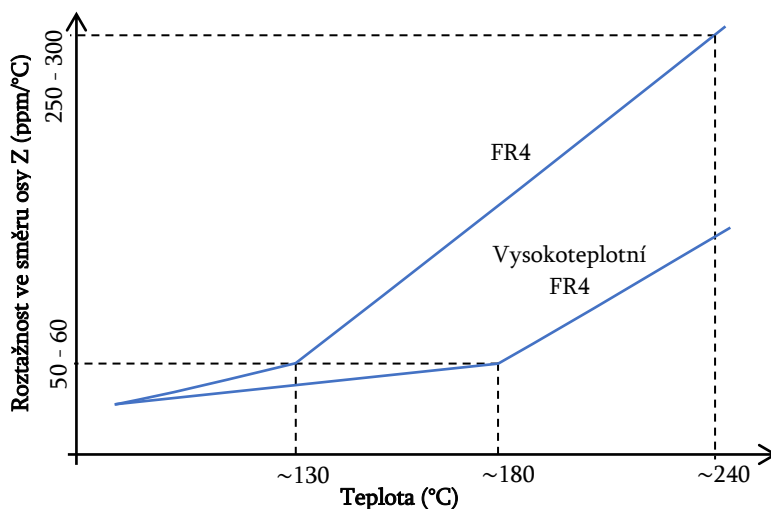
Plnivem epoxidové pryskyřice může kromě nejběžnějších sklených vláken být i papír. Během laminování se epoxidová pryskyřice vytvrzuje teplem, tlakem a působením přidaného katalyzátoru. Výsledkem je produkt s termosetovými vlastnostmi, který je velmi pevný a nerozpustný. Je schopný odolávat veškerým chemikáliím vyjma oxidujících kyselin a k jeho destrukci je nutná vysoká teplota. Mezi výjimečné vlastnosti tohoto laminátu patří:

- ◆ velmi nízká smrštitelnost při vytvrzování,
- ◆ vysoká tuhost, tvrdost a mechanická pevnost,
- ◆ tvorba vynikajících adhezních vazeb,
- ◆ výborná odolnost při kontaktu se zásadami a kyselinami,

- ◆ schopnost zachovat si dobré elektrické vlastnosti v širokém pásmu teplot a frekvencí,
- ◆ vysoká elektrická pevnost a izolační schopnost,
- ◆ nízká absorpce vody.

Značení běžně dostupných laminátů vzniklých kombinací epoxidové pryskyřice a skleněné tkaniny je G-10, G-11, FR4 a FR5. Skleněná vlákna mající v průměru běžně 9,6 mikronů se proplétají mezi sebou za vzniku přízí. Z nich se pak vytváří mřížky, které se kladou jedna na druhou. Laminát o tloušťce 1,6 mm je složen z osmi vrstev skleněné tkaniny a pro zajímavost při vrtání díry o průměru 1 mm se přeruší přibližně 10 000 vláken.

Mezi důležité fyzikální vlastnosti laminátů patří hodnota tzv. rozpínivosti ve směru osy Z. Změna rozměru ve směru osy Z je nejvíce výrazná při průchodu pecí při přetavení a poté v menší míře v průběhu provozu při změnách okolní teploty. Tímto jevem jsou poznamenány hlavně prokovy, které při vertikálním „nabobtnání“ mohou praskat, nebo BGA pouzdra. Je zřejmé, že čím menší je expanze laminátu ve směru osy Z, tím menší je mechanické namáhání prvků trpících touto expanzí, a tudíž se očekává delší MTTF. Z výsledků studií vyplývá, že největší vliv na popsáný jev má hodnota T_g . Na průběhu na obrázku č. 19 jsou vyneseny závislosti dvou laminátů FR4 s různou teplotou T_g (130 a 180 °C). Z nich je patrné, že s vyšší hodnotou T_g dochází ke stejnému vertikálnímu rozpínání při mnohem vyšší teplotě. Průběh také znázorňuje mnohem rychlejší expanzi po překročení teploty skelného přechodu. [11] [15]

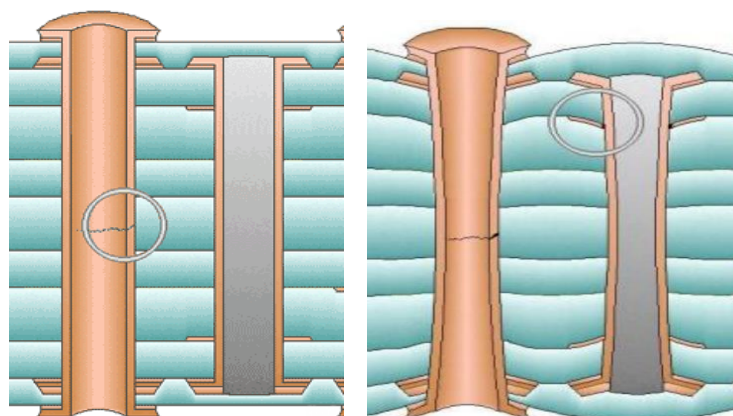


Obrázek 19 Rozpínání v ose Z v závislosti na pájecí teplotě [15]

3.6.3 PTFE lamináty

Polytetrafluorethylen se řadí k termoplastům a je také známý pod názvem teflon. Zpevněním skelnými vlákny vzniká laminát s vhodnými vlastnostmi pro využití v zařízeních pracujících s vysokými frekvencemi a pro mikrovlnné aplikace. Mezi přednosti tohoto

laminátu patří možnost velmi přesné výroby tloušťky materiálu v rámci celé jeho plochy, což vede k téměř totožným hodnotám relativní permitivity a $\text{tg } \delta$ po celé ploše DPS. Díky stejným hodnotám dielektrických parametrů se zejména u mikrovlnných aplikací snižují výkonové ztráty. Navíc tyto dva parametry zůstávají nízké v širokém intervalu teplot a vlhkosti. Velmi nízká absorpce je zapříčiněna molekulární strukturou PTFE. Během zahřívání prochází termoplasty chemickou a fázovou změnou a vytvářejí trojrozměrnou síťovanou strukturu. Díky těmto vlastnostem dosahují PTFE lamináty velmi nízké degradace vlivem vlhkosti a zachovávají si elektrickou pevnost a izolační schopnost i za vysoké relativní vlhkosti. [10]



Obrázek 20 Chování laminátu při pokojové teplotě (vlevo) a po překročení teploty T_g (vpravo) [15]

Do pozitivních vlastností PTFE se řadí vysoká interlaminární pevnost a s tím spojená odolnost měděné fólie vůči odloupenutí. Vyšší míra adheze vodivých cest je požadována například pro ty DPS, které jsou exponovány vysokým teplotám vícekrát v průběhu své životnosti. To znamená, že procházejí například procesem předělávání při opravách. PTFE lamináty splňují přísné normy na hořlavost. Konkrétně podle standardu UL-94 jsou klasifikovány jako V-0³. Zpomalování hoření a uhasnutí plamene je dosaženo nahrazení funkční skupiny pryskyřice některým halogenem, jako je např. chlor nebo brom. [11]

3.6.4 Polyimidový laminát

Materiál s vynikajícími elektrickými a mechanickými vlastnostmi, které jsou zachovány i při vysokých teplotách. Laminát z polyimidu je velmi tvrdý, a tudíž jsou zde vyšší nároky na materiál vrtáků. Vyvrtání kvalitních otvorů tedy vyžaduje jejich častou výměnu. Vyplnění sklenými vlákny se používá pro nejnáročnější aplikace určené pro vojenské a kosmické účely. Mezi tímto laminátem a měděnou fólií je vazba ve srovnání s epoxidovou pryskyřicí pevnější a není narušena běžnými pájecími teplotami. [10]

³ Při vertikální testování plamen zhasne do pěti sekund. V-0 označuje nejméně hořlavé materiály.

3.6.5 Silikonový laminát

Silikonová pryskyřice vyplněná skelnými vlákny nabízí velmi dobrou odolnost vůči velmi vysokým teplotám (až 250 °C při trvalém působení a až 400 °C při periodickém zatěžování v závislosti na zvoleném typu). Nevýhodou je nízká schopnost zachování vazby mezi samotným laminátem a měděnou fólií. Z důvodu vysoké ceny je aplikování silikonového laminátu silně limitováno, a to i navzdory výborným elektrickým vlastnostem. [10]

3.6.6 Melaminový laminát

Melaminovou pryskyřici je možné kombinovat s několika druhy plniv, i když nejčastějším z nich jsou skelná vlákna. Melaminové lamináty vynikají velkou tvrdostí povrchu a odolností vůči elektrickému oblouku. Melaminový laminát má nízkou rozměrovou stabilitu, když je vystaven střídání vysokým a nízkým úrovním vlhkosti. [10]

Dalšími organickými materiály bez bližšího popisu jsou lamináty polyesterové, polyamidové, kyanátoesterové, bismaleimide-triazine epoxidové, diallyl ftalátové. Dále se používají i kompozitní substráty, jejichž základem je papír a sklo. Rozlišujeme CEM-1 a CEM-3. Nejčastější CEM-1 je složen jádrem tvořeným celulózovým papírem, který je impregnovaný epoxidem.

4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PÁJECÍCH PLOCH DPS

Povrchová úprava tvoří kritické místo u spojení mezi součástkou a zbytkem propojovacího obvodu. Její nejdůležitější funkcí je pokrytí měděných pájecích ploch a zajištění jejich ochrany tak, aby byla zachována požadovaná pájitelnost. Mezi širší požadavky, které musí povrchové úpravy splňovat, lze zařadit elektrickou vodivost, ekologickou nezávadnost, vhodné fyzikální vlastnosti a patřičnou odolnost. Vlastnosti jednotlivých povrchových úprav jsou uvedeny zvlášť v rámci následujících podkapitol. Finální povětšinou chemická úprava prošla v rámci technologie DPS mnoha změnami z důvodu velkého množství nároků, které jsou na tuto kritickou část kladeny. Široká škála funkčních, technických, finančních a spolehlivostních problémů včetně otázky produktivity se promítla do vývoje a aplikace povrchových vrstev. Největší vliv na technologii vrstev přineslo vyloučení olova z pájecích slitin v rámci RoHS. Využíváním bezolovnatých pájek došlo ke zhoršení smáčivosti, vyplňování pokovených otvorů pájecí slitinou a nárůstu tvorby voidů. Popsané jevy jsou způsobeny rozdílnými metalurgickými vlastnostmi olovnatých a bezolovnatých pájek. Konečně i vyšší pájecí teplota má negativní dopad na trvanlivost a pájitelnost povrchových úprav. [16]

Vývoj povrchových úprav byl takový, že zprvu se povrchových úprav nevyužívalo, neboť pomocí velmi aktivních tavidel bylo možné pájet přímo na měděné plochy. Ochrana

měděných ploch ve formě kovového nebo organického povlaku byla navržena souběžně s nárůstem hromadné produkce DPS. Nejčastějším ochranným povlakem se stala slitina cínu a olova galvanicky nanesená na požadované plochy, která mohla být následně bezproblémově přetavena. Další změna přišla s nástupem nepájivé masky, protože vrstva olovo-cín se při přetavení dostane do tekutého stavu a negativně působí na nepájivou masku. Nástupcem se stala vrstva HAL (HASL) a s rostoucí hustotou obvodů DPS přišla řada nových úprav, jako jsou organické povlaky (OSP) a kovové vrstvy (např. ENIG). Současný důraz na no-clean technologie má za následek pokles využití OSP a naopak nárůst ENIG. Každá z těchto úprav má své nevýhody, což vede k vývoji a využití nízko nákladových a vysoce funkčních vrstev nanášených ponořením do roztoku stříbra nebo cínu (immersion silver/immersion tin). Výběr vhodné vrstvy není jednoznačný a výsledná povrchová úprava musí být v souladu s požadavky shrnutými v tabulce č. 6. [16]

Tabulka 6 Shrnutí klíčových požadavků na povrchové úpravy [17]

POŽADAVKY NA VLASTNOSTI POVRCHOVÝCH ÚPRAV
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Příznivé smáčivé vlastnosti, náležitá pájitelnost včetně zachování těchto atribut v případě vystavení různým okolním podmínkám a odolnosti vůči přirozenému stárnutí. ◆ Kompatibilita s přetavujícím teplotním profilem, tavidly používanými v rámci bezolovnatého pájení a ostatními materiály v rámci DPS. ◆ Kompatibilita s technologií povrchové montáže (SMT), „wire bondingem“ a velkou hustotou propojení (HDI – high density interconnect). ◆ Vysoká míra produktivity při výrobě – ve většině případů to znamená nanášení z chemického roztoku, jehož složení lze snadno kontrolovat. Nenarušují nepájivou masku, vytvářejí chemicky stabilní vrstvy, které jsou odolné vůči dalším procesům. ◆ Nepodléhají oxidaci, změně vlastností a vzhledu během skladování při doporučených vnějších podmínkách. ◆ Cenově efektivní – jak materiál potřebný na výrobu, tak i výroba samotná.

Přehledný seznam dostupných povrchových vrstev je uveden níže. V průběhu kapitoly 2.2 jsou nepoužívanější povrchové úpravy podrobněji popsány.

- ◆ OSP – Organic Solderability Preservative
- ◆ HASL/HAL – Hot Air Solder Level
- ◆ Imerzní stříbro
- ◆ Imerzní cín
- ◆ ENIG - Electroless Nickel/Immersion Gold – Bezproudá depozice niklu/Imerzní zlato
- ◆ ENEPIG - Electroless Nickel/Electroless Palladium/Immersion Gold

- ◆ Bezproudá depozice palladia
- ◆ Elektrolytická depozice niklu, zlata nebo cínu
- ◆ Bezproudá depozice zlata
- ◆ Imerzní zlato – přímo nanášené
- ◆ Tavitelná vrstva slitiny olovo-cín, bezolovnatých slitin popřípadě samotného cínu

Tabulka 7 Typické tloušťky jednotlivých úprav [16]

Typ povrchové vrstvy	Standardní tloušťka
Hot Air Solder Level	2-40 μm
Organic Solderability Preservative	0,1-0,6 μm
Bezproudá depozice niklu/Imerzní zlato	Nikl: 3-5 μm Zlato: 0,05-0,15 μm
Imerzní stříbro	0,1-0,4 μm
Imerzní cín	0,6-1,2 μm

4.1 OSP (Organic Solderability Preservative)

Již z názvu povlaku je zřejmé, že se jedná o organickou velmi tenkou vrstvu zajišťující požadovanou míru pájitelnosti měděných ploch DPS. Na rozdíl od ostatních typů povlaků, které disponují často i více funkcemi. Nejrozšířenějšími OSP jsou ty založené na benzimidazolech a fenylimidazolech, které jsou vyvinuty z dříve používaných antioxidačních povlaků. Současná vylepšená generace benzoimidazolů s připojenou funkční skupinou dodává molekule větší hmotnost a teplotní odolnost. Díky tomu jsou schopné vydržet několik vysokoteplotních operací v rámci bezolovnatého pájecího procesu. V případě aplikace starší generace a opakovaného pájení například oboustranně osazených DPS je nutné pájet v rychlém sledu z důvodu postupné degradace OSP vrstvy způsobené právě tepelným namáháním. Potom není vyloučen problém se smáčivostí. Celkově se jedná o nejlevnější a nejjednodušší ochrannou vrstvu, která je hojně využívána zejména v nenáročných aplikacích. Avšak nutno podotknout zhoršené kontaktování při ICT a dalších elektrických testech. [16]

Tvorba vrstvy je procesně jednoduchá ve srovnání s ostatními povrchovými úpravami, nicméně chemické pozadí je ve skutečnosti složité. Ve zkratce popis vývinu vrstvy je takový, že velká organická molekula se rozpustí v roztoku vody organické kyseliny. DPS je vystavena vzniklému roztoku a molekula OSP se zachytí na nezakrytých měděných místech, čímž se vytvoří chemická vazba mezi molekulou mědi a funkční skupinou obsahující dusík. Neboť se nejedná o agresivní sloučeninu, tak je doporučeno před vytvořením OPS vrstvy dekontaminovat povrch DPS oplachem. [16]

4.2 HASL/HAL (Hot Air Solder Level)

HASL je proces, kdy dochází k ponoření DPS do roztavené pájky. Nanášení může být provedeno jak v horizontálním, tak i vertikálním postavení DPS. Před samotným ponořením jsou měděné plochy očištěny, oleptány a pokryty tavidlem. Horký nůž po vytažení z pájky zajišťuje odfouknutí nadměrného množství pájecí slitiny. Následuje opláchnutí tavidla agresivními rozpouštědly. Kvůli oplachování tavidla a energetické náročnosti není z ekologického hlediska HASL proces zcela akceptovatelný. Z důvodu vysokých teplot a agresivních tavidel je potřeba výrobních zařízení z odolných materiálů – nerezová ocel, titan a další slitiny. Vyjma již nepoužívané slitiny olovo-cín, jsou pro bezolovnaté aplikace typické slitiny cín-měď, cín-stříbro-měď, cín-měď-nikl a cín-měď-nikl-germanium. Tloušťka vrstvy je zmíněna v tabulce č. 7 a je dána povrchovým napětím roztavené pájky. [16]

4.3 Imerzní stříbro

Imerze neboli pokovení „nahrazením“ je nanášení kovového povlaku na kovový substrát v roztoku, který obsahuje nanášený kov. Během tohoto procesu je kov na substrátu nahrazen iontem kovu z roztoku, který má nižší standardní elektroodový (redoxní) potenciál, než nahrazovaný kovový iont. Kov substrátu vniká do roztoku v iontové formě a naopak kovový iont z roztoku se ukládá na místo původního prvku. Při imerzním pokovení není potřeba žádného zdroje energie, elektrického spojení a redukčních činidel. Rozdíl mezi imerzním a bezproudým pokovením (immersion vs. electroless plating) je dán přítomností elektronů potřebných k vynucení depoziční reakce, které jsou do reakce poskytovány redukčním činidlem. Limitujícím faktorem imerzního nanášení je maximální tloušťka vrstvy, kdy je proces automaticky ukončen po pokrytí celé plochy substrátu. [17]

Standardní redoxní potenciál stříbra (+0,8 V) je nižší než u mědi (+0,34 V), proto stříbro nahrazuje při imerzi měď na povrchu pájecích plošek. Aby nedocházelo k pokrytí stříbrné vrstvy jejím oxidem, tak se jsou do roztoků přidávány další chemické prostředky zabraňující následnou tvorbu oxidu. Ochranné stříbrné povlaky vykazují vynikající a téměř okamžitou smáčivost díky roztavení a proniknutí stříbra do objemu pájky. [17]

4.4 Imerzní cín

Na rozdíl od předchozího nanášení stříbra je v případě imerze cínu zapotřebí činidel (katalyzátorů) podporujících usazování cínu na povrchu substrátu. Tyto činidla způsobí, že se povrch jeví jako více záporný, neboť redoxní potenciál cínu je -0,1375 V. Avšak projev činidel může být i negativní kvůli jejich agresivitě. Konkrétně není vyloučeno poškození nepájivé masky. Výborná pájitelnost může být časem silně omezována tvorbou intermetalické

sloučeniny. V krajním případě dochází v úplné spotřebě cínu na povrchu ve prospěch IMC. Rychlost tvorby IMC je dána délkou a podmínkami, ve kterých jsou DPS skladovány. [17]

4.5 ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)

Z chemického hlediska je zlato ideálním prvkem ke tvorbě povlaků v rámci DPS. Zlato netvoří sloučeniny oxidů, proto není ENIG úprava negativně ovlivňována teplotou a ostatními skladovacími podmínkami, které by mohly u ostatních úprav zkrátit skladovací dobu. Navíc zlato se rozpouští do pájecí slitiny a zajišťuje tak výbornou smáčivost. Na druhou stranu musí být dodržena maximální tloušťka zlaté vrstvy (maximálně 0,3 μm), protože nadměrné množství zlata (přibližně nad 3 hm. %) vede k tvorbě křehkých pájených spojů. Dalším problémem je, že se zlato mísí s mědí, což by mohlo způsobit problémy s pájitelností způsobené oxidací mědi. Tomu se předchází nanesením vrstvy niklu, který zajišťuje separaci mědi a zlata. [16]

Tvorba ENIG vrstvy zahrnuje několik procesů počínaje čištěním rozpouštědly na vodní bázi, které odstraní nečistoty a tlusté vrstvy oxidů mědi. Následuje leptání mědi v kyselém prostředí, tak že 1-2 μm mědi je oxidována na Cu^{2+} a následně rozpuštěna. Na měď je následně pomocí katalyzátorů a navazující chemické reakce nanášen nikl. Tloušťka vrstvy niklu je měřena opticky nebo pomocí titrace. Na konci procesu je opět pomocí chemické reakce nanášena vrstva zlata. Celý proces zpravidla trvá desítky minut, a proto je k docílení požadované produkce zapotřebí více zařízení s nádržemi daných roztoků. [16]

Jelikož se jedná o složitý proces nanášení vrstev, tak se v jeho průběhu může vyskytnout několik nedostatků, které vedou k vytvoření nekvalitního povlaku. Mezi nedostatky lze zařadit vytvoření nedokonalé vrstvy niklu a následná migrace mědi do vrstvy zlata. Při nadměrném působení katalyzátoru dochází k nadbytečnému pokovení a výskytu zkratů. Dalším jevem, který zmíním je tvorba tzv. black pads (nesmáčivých oblastí), jenž vznikají v důsledku nadměrné aktivace niklové lázně a s tím související depozice fosforu. Na takto vytvořené oblasti následně nedojde k uchycení finálního zlatého povlaku. Posledním zde uvedeným nedostatkem je možnost odloupení zlaté vrstvy z niklu. To je často způsobeno příliš dlouhou dobou oplachu po nanesení niklové vrstvy nebo špatnou kvalitou oplachu. [16]

4.6 Tavitelná vrstva bezolovnatých pájek nebo čistého cínu

Jedná se o elektrolytické nanesení vrstvy dané slitiny na měděné plošky a cesty na DPS před aplikací nepájivé masky. Následně je slitina selektivně odstraněna z těch oblastí měděných ploch, které mají být pokryty nepájivou maskou. Proces je zakončen přetavením, které slouží k vytvoření konečné povrchové úpravy. Rozdíl mezi touto úpravou a HASL spočívá v tloušťce nanesené vrstvy, přičemž vrstva vytvořená přetavením je tenčí a vhodná pro pájení SMT součástek s malou roztečí vývodů. [17]

Tabulka 8 Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých povrchových úprav [16] [17]

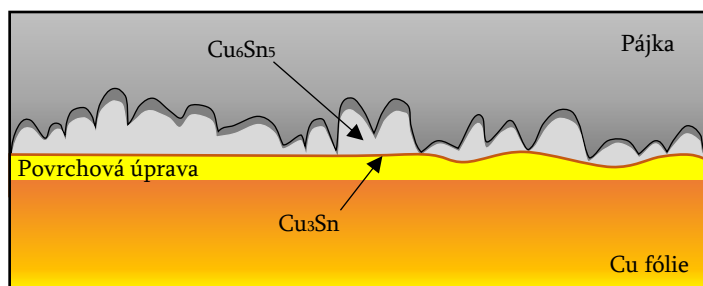
	VÝHODY	NEVÝHODY
OSP	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Hladký povrch umožňující osazování součástek s vývody s malou roztečí ◆ Jedna z nelevnějších variant ◆ Jednoduchý postup vytvoření vrstvy ◆ Neobsahuje olovo ◆ Vysoká míra produktivity výroby ◆ Dostupné ve velkém množství ◆ Možnost předělení/upravení vrstvy ◆ Pájený spoj měď/cín 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Absence přímého měření tloušťky vrstvy ◆ Vysoký odpor povrchové úpravy ◆ Špatné pájení PTH (Plated through-hole) ◆ Kratší doba skladování - životnost ◆ Nechráněné měděné plochy na hotovém výrobku ◆ Nelze provést kontrolu před osazováním ◆ Degradace vrstvy s vícerym pájením ◆ Senzitivní na poškození při čteném nebo nevhodném zacházení ◆ Potíže s odstraněním chybně natisknuté pájecí pasty
HASL	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Relativně nízká cena ◆ Široce dostupné ◆ Delší skladovací doba ◆ Možnost předělení/upravení vrstvy ◆ Vhodné pro vícenásobné přetavení ◆ Pájený spoj měď/cín ◆ Ideální elektrická teostovatelnost 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Povrch není hladký ◆ Chyby v tisku pasty způsobené špatnou těsností šablony ◆ Nevhodné pro osazování součástek s vývody s malou roztečí ◆ Může obsahovat olovo ◆ Teplotní poškození DPS ◆ Výskyt zkratů ◆ Tvorba tlustých IMC vrstev
Imerzní stříbro	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Hladký povrch umožňující osazování součástek s vývody s malou roztečí ◆ Méně cenově nákladný typ vrstvy ◆ Jednoduchý postup vytvoření vrstvy ◆ Široce dostupné ◆ Pájený spoj měď/cín ◆ Možnost předělení/upravení vrstvy ◆ Vysoká míra produktivity výroby ◆ Neobsahuje olovo ◆ Snadné měření tloušťky vrstvy ◆ Nedochází k poškození vrstvy při opakovaném pájení přetavením ◆ Velmi dobré vlastnosti během kontaktování a kontaktních testech 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Senzitivní na poškození při čteném nebo nevhodném zacházení ◆ Výskyt voidů ◆ Vystavené části stříbra mohou na hotovém výrobku korodovat ◆ Růst dendritů v souvislosti s korozi ◆ Oxidace stříbra ◆ Vznik závad na rozhraní s nepájevou maskou

Imerzní cín	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Rovný a přesný povrch umožňující osazování součástek s vývody s malou roztečí ◆ Méně cenově nákladný typ vrstvy ◆ Pájený spoj měď/cín ◆ Absence olova ◆ Vysoká preciznost ◆ Zanedbatelný výskyt oxidu ◆ Příznivá kontrola procesu 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Citlivé na poškození při čteném nebo nevhodném zacházení ◆ Využití thiomocoviny během výroby (karcinogenní látka) ◆ Vystavené části cínu mohou na hotovém výrobku korodovat ◆ Tvorba whiskerů i v rámci skladování při pokojové teplotě ◆ Narušení nepájivé masky ◆ Nevhodné pro opakované pájení z důvodu degradace teplo/čas ◆ Komplikované měření tloušťky vrstvy
ENIG	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Rovný a přesný povrch umožňující osazování součástek s vývody s malou roztečí ◆ Absence olova ◆ Spoj v případě PHT je pevný ◆ Možnost dlouhodobého skladování ◆ Nedochozí k rozpuštění měděných ploch 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Vysoká cena (zlato, palladium) ◆ Pájený spoj nikl/cín je křehký ◆ Nelze předělat/upravit vrstvy ◆ Ne zcela kompatibilní s nepájvou maskou ◆ Zdlouhavý a složitý proces ◆ Ztráta signálu při vysokých frekvencích ◆ Výskyt tzv. black pads (nesmáčivých oblastí)
Tavitelná vrstva pájecí slitiny	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Menší tloušťka vrstvy zejména oproti HASL ◆ Rovný a přesný povrch umožňující osazování součástek s vývody s malou roztečí ◆ Dobrá pájitelnost a smáčivost ◆ Možnost dlouhodobého skladování ◆ Elektricky vodivý povrch ◆ Nedochozí ke zhoršení vlastností vrstvy při opakovaném pájení přetavením 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Omezené množství dodavatelů, kteří realizují tento typ vrstev ◆ Tepelné namáhání DPS ◆ Zhoršená přilnavost nepájivé masky v případě malých mezer mezi jednotlivými pájecími plochami (např. u BGA součástek)

5 INTERMETALICKÉ SLOUČENINY

Dosažení smáčivosti pájkou s sebou přináší metalurgickou reakci mezi přídavným materiálem a materiálem základním. Tato interakce na rozhraní pájky a kovu tvořící základ vede k vytvoření vrstvy s vazbami mezi atomy kovalentního charakteru známou jako intermetalická sloučenina (IMC). Základ nejčastěji představuje vývod (kontakt) součástky nebo pájecí plochu. Na rozdíl od kovové vazby, kterou tvoří kovy a slitiny, jsou intermetalické sloučeniny téže kovů s kovalentní vazbou tvrdší a křehčí. Dále jsou charakteristické vysokou teplotou tání a odolností vůči chemickým prostředkům. Odlišnost vlastností od mateřských

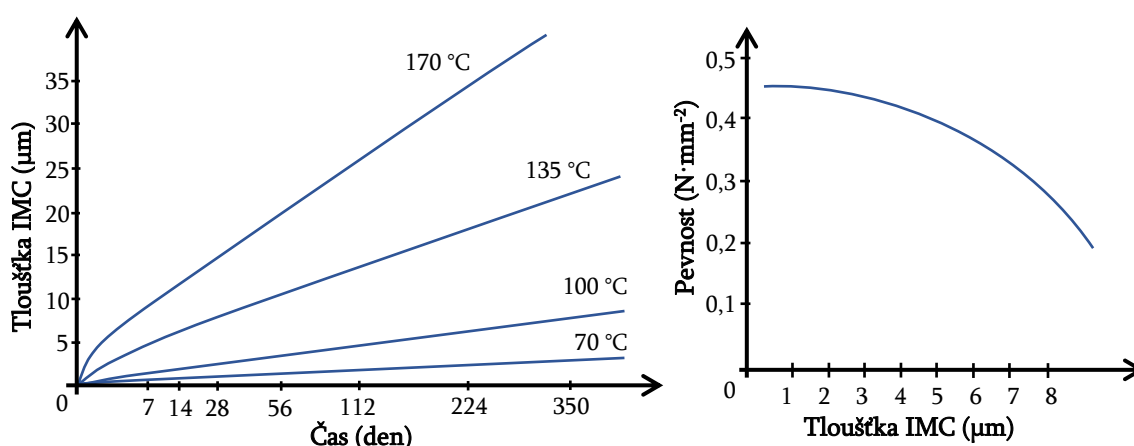
kovů je dána rozdílností a parametry krystalové mřížky IMC. Elektronové konfigurace mateřských kovů však mají podstatný vliv na charakter krystalické mřížky, kterou IMC disponuje. Ta zároveň udává pevnost vazeb mezi atomy. Nicméně nadměrná tvrdost IMC není v tomto případě výhodou, neboť může ohrozit fyzickou a mechanickou integritu pájeného spoje. Mezi nevýhody IMC se dále řadí snížená elektrická vodivost a vyšší náchylnost k elektromigraci či tvorbě voidů. [18]



Obrázek 21 Znáornění fázového rozhraní struktury IMC na rozhraní měď/pájecí slitina SAC [19]

5.1 Vznik a rozvoj IMC

Dva procesy hrají při pájení a tvorbě IMC v pájeném spoji hlavní roli. Za prvé jde o intenzivní chemickou reakci pevného kovu a roztavené pájky, přičemž IMC vznikají na fázovém rozhraní rozpuštěním základního kovu a difúzí. Množství rozpuštěného materiálu je dáno jeho rozpustností v roztavené pájecí slitině. Za reaktanty vstupující do reakce lze označit atomy kovů obou materiálů. Druhým jevem je růst IMC v pevné fázi. Ztuhnutím pájecí slitiny se zastaví růst IMC v důsledku rozpouštění a přejde na čistě difúzní mechanismus. Difúze je závislá na okolní teplotě a u kovů na typu krystalické mřížky včetně její nepravidlosti. Součinitel difúze rovněž roste s narůstajícím množstvím poruch v krystalické mřížce. [18]



Obrázek 22 VLEVO: Závislost tloušťky IMC na čase pro různé teploty, VPRAVO: Závislost pevnosti pájeného spoje na tloušťce IMC vrstvy [41]

Růst tloušťky vrstvy IMC hlavně na úkor cínu pokračuje do té doby, než je dosaženo rovnovážného stavu. Pomalým tempem tomu tak je i při pokojové teplotě. Při vyšších

teplotách je nárůst intermetalické vrstvy rychlejší, což znázorňuje obrázek č. 22. I když tvorba a přítomnost IMC je nezbytnou podmínkou správného smáčení a vytvoření kvalitního spoje, tak další růst IMC v průběhu skladování a provozu zařízení je nežádoucí z hlediska degradace spoje. S růstem vrstvy je zároveň spojen i vznik trhlinek, jejichž následkem jsou změny mechanických a elektrických vlastností, jako je měnění se různorodost koeficientu tepelné roztažnosti, elasticita a zvýšení přechodového odporu. Dochází ke vzniku kladné zpětné vazby, neboť zvýšením odporu se spoj více zahřívá a vyšší teplota dále podporuje růst tloušťky IMC a trhlin. Za účelem inhibice narůstání vrstvy IMC se využívají difúzní bariéry, kterou nejčastěji představuje vrstva niklu. Nikl totiž vytváří s cínem IMC rostoucí pomaleji v porovnání s IMC mezi mědí a cínem. [19] [20]

Pro jednu z nejpoužívanějších slitin v bezolovnatém pájení SAC platí několik závislostí a charakteristik. Je dokázáno, že pro dosažení tenčí intermetalické vrstvy (konkrétně Cu_6Sn_5) je vhodné DPS po přetavení rychleji ochlazovat. Zároveň při rychlejší chlazení se eliminuje výskyt a případně tloušťka vrstvy Ag_3Sn . Přítomnost mědi snižuje tloušťku vrstvy Ag_3Sn a rovněž plní funkci bariéry mezi pájecí ploškou a slitinou, takže je omezena difúze mědi do cínu. [19]

Obecně se difúzí rozumí nesouměrné přemísťování částic (atomů kovu), které je způsobeno tepelným nebo koncentračním gradientem. Výsledkem difúze by mělo být rovnoměrné rozdělení hustoty částic v prostoru. Difúze v případě nehomogenních slitin probíhá makroskopickým tokem příměsových částic v důsledku koncentračního gradientu. Rychlost difúze lze vyjádřit hustotou difúzního toku, pro který platí:

$$\mathbf{J} = -D \text{grad} c, \quad (2)$$

kde \mathbf{J} je hustota difundujících částic – difúzní tok ($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), který lze jinými slovy popsat jako množství částic, které prodifundují za jednotku času jednotkou plochy. Dále D zastupuje difúzní koeficient ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) a c je koncentrace částic (m^{-3}). Vztah (2) je nazýván 1. Fickovým zákonem a přesně platí za předpokladu, že studovaný proces je izotermický a difúze je pozorována v binární směsi při značném přebytku látky C v porovnání s ostatními látkami. V nestacionárním systému lze časovou změnu koncentrace difundující látky v elementárním objemu $dx dy dz$ popsat 2. Fickovým zákonem:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c, \quad (3)$$

přičemž tento zákon platí při splnění podmínky nezávislosti difúzního koeficientu D na koncentraci. [19] [20]

Difúze může být povrchová a objemová. Při objemové difúzi může docházet k průchodu atomu látkou různými mechanismy. Existuje difúze přímou záměnou, postupnou záměnou, intersticiálně a pohybem na sousední vakantní místo. Pro vznik IMC v pájeném

spoji je typický vakanční mechanismus. Ten probíhá tak, že v případě získání dostatečné aktivační energie ΔE atomem a výskytu vakance v jeho okolí, dojde k obsazení tohoto volného uzlu mřížky a vakance se přesune na místo atomu. Difúze probíhá snáze na hranici zrn nebo fází (např. β -Sn a IMC), než je tomu uvnitř krystalické mřížky. Difúzní koeficient závisí na mechanismu difúze a dalších aspektech, což v případě pevných látek může být velikost a uspořádání dislokací. Difúzní koeficient je rovněž závislý na teplotě a platí pro něj tento vztah:

$$D = D_0 e^{-\frac{\Delta E}{RT}}, \quad (4)$$

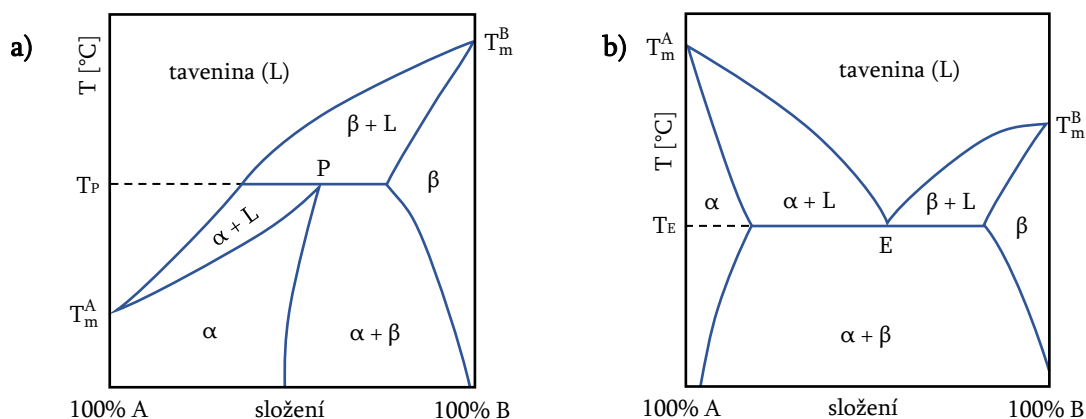
kde D_0 je materiálová konstanta (difúzní konstanta) ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), T je absolutní teplota (K), R je plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$) a ΔE je aktivační energie (J), která se rovná součtu energie vzniku vakance a energie pohybu vakancí. Číselným příkladem aktivační energie IMC je 116 kJ/mol pro Cu_6Sn_5 anebo 67 kJ/mol pro Cu_3Sn . Difúzní konstanta v podstatě charakterizuje rychlost difúze. Z druhého Fickova zákona lze stanovit vztah (5) za použití součinitele difúze, který udává tloušťku difúzní vrstvy vzniklé za určitou dobu pájení.

$$\delta = \sqrt{Dt}, \quad (5)$$

kde δ je tloušťka IMC (m), D je difúzní koeficient ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) a t čas (s). Souvislost mezi „heating“ faktorem a tloušťkou intermetalické vrstvy je již uveden v kapitole 2.3. [19] [20]

5.2 Fázové digramy binárních systémů

Vznik IMC souvisí s binárními fázovými diagramy pájecích slitin. IMC vzniká jako nová fáze při mísení rozpuštěného a základního kovu. Rozpuštěný kov může reagovat za vzniku primárního tuhého roztoku se stejnou krystalickou strukturou základního kovu, anebo za vzniku nové fáze. Existence daných fází se zobrazuje v tzv. rovnovážných diagramech, na nichž jsou patrné fáze při dosažení rovnováhy v závislosti na složení systému a teplotě. Pro pájecí slitiny jsou charakteristické dva rovnovážné diagramy, které jsou popsány v dalším odstavci. [19] [21]



Obrázek 23 Rovnovážný fázový diagram kovů omezeně rozpustných v tuhém stavu, a) Peritektický typ, b) Eutektický typ [19]

Na obrázku č. 23 jsou dva typy digramů. Na obr. za a) jsou dva kovy A a B, jejichž teplota tavení se zřetelně liší. U těchto dvou kovů je pravděpodobné, že bude docházet k peritektické reakci. Během peritektické reakce při teplotě T_P reaguje tavenina a tuhá fáze β za vzniku tuhé fáze α , jejíž složení odpovídá koncentraci bodu P. Diagram za b) tvoří kovy s blízkými hodnotami teplot tavení a je typický eutektickým minimem. To znamená, že při teplotě T_E přechází tavenina o koncentraci E do tuhé fáze za vzniku dvou tuhých směsí α a β . S ohledem na digramy je zřejmá existence šesti fází. Konkrétně jde o taveninu (L), α , $\alpha+L$, β , $\beta+L$, $\alpha+\beta$. Řecké písmeno α označuje tuhý roztok primárního kovu B v kovu A v tuhém stavu. U β je tomu analogicky obráceně. Bod nejvyšší vzájemné primární rozpustnosti obou kovů se zpravidla objevuje při eutektické nebo peritektické teplotě. Se snižující se teplotou rozpustnost rovněž klesá. [19]

5.2.1 Systém Cu-Sn

Vezme-li se v potaz to, že základem pájecích slitin určených pro měkké pájení v elektrotechnice je cín a vodivý motiv je vytvořen z měděné fólie, tak binární systém Cu-Sn je z hlediska tvorby IMC nejdůležitější. Měď a cín vytvářejí vrstvy z Cu_6Sn_5 (též η -fáze) a Cu_3Sn (ε -fáze). Přesněji řečeno za pokojové teploty se formuje fáze η' a při teplotách vyšších jak $186^\circ C$ je to fáze η . Rozdíl mezi Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn je v krystalické struktuře. Vrstva Cu_6Sn_5 má šesterečnou (hexagonální) krystalickou strukturu, vzniká při nižších teplotách v okamžiku smáčení měděných ploch. Fáze ε se složením Cu_3Sn je tvořena kosočtverečnou (ortorombickou) strukturou. Její dominance je dána za vyšších teplot difúzí mědi do pájecí slitiny a má nesmáčivý charakter. Obě fáze jsou charakteristické vysokou tvrdostí, ale v porovnání s houževnatou mědí jsou velmi křehké. Vznik jednotlivých fází v závislosti na teplotě a poměru cínu a mědi ve slitině je zřejmý z fázového diagramu na obrázku č. 24. [21]

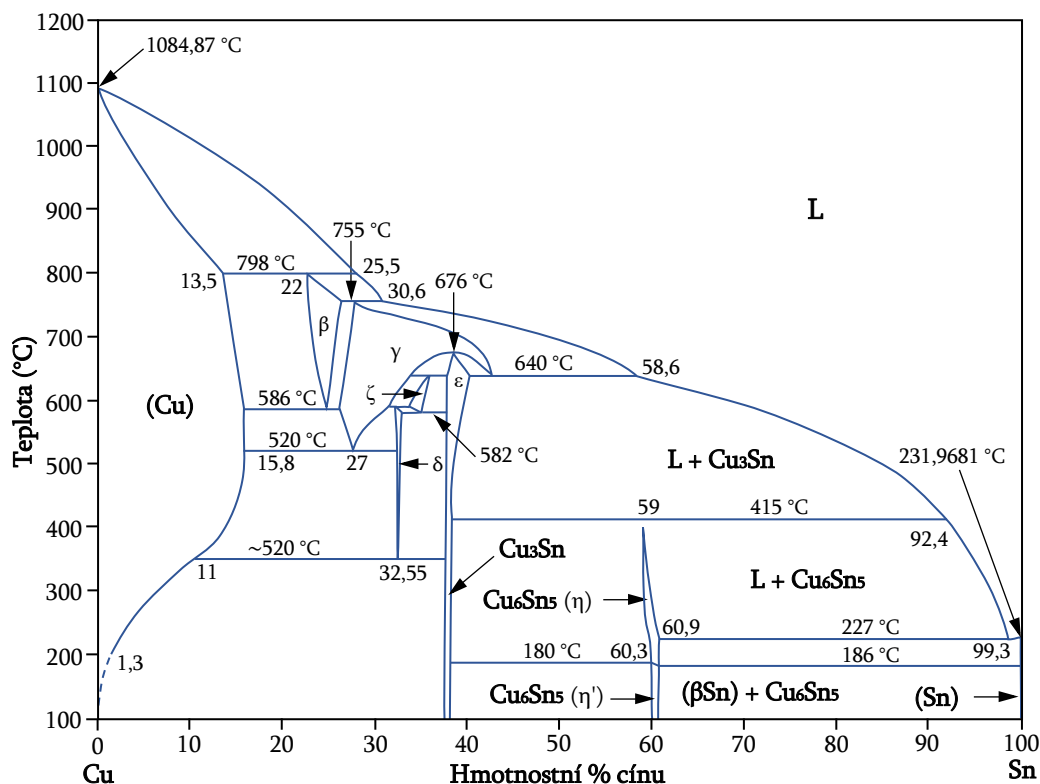
5.2.2 Systém Ag-Sn

Eutektické složení binárního systému Ag-Sn se objevuje při 3,5 hm. % zastoupení zlata ve slitině. Tomu odpovídá eutektická teplota $221^\circ C$. Vznikající druhá fáze slitiny Ag-Sn je intermetalickou sloučeninou Ag_3Sn . IMC Ag_3Sn je v pájených spojích viditelná díky tvaru, který vytváří. Často se jedná o jehlicovité popřípadě talířovité útvary, které za určitých podmínek mohou zhoršovat kvalitu spoje. Záleží zejména na podílu těchto útvarů na celkovém objem pájky (velikosti spoje) a konfiguraci pájecích ploch. [21]

5.2.3 Systém Au-Sn

Ve fázovém diagramu lze nalézt několik IMC vznikajících na rozhraní Au-Sn. Za ztrátou spolehlivosti pájeného spoje se nejčastěji skrývá fáze β ($AuSn_4$), jež je velmi křehká. Na druhou stranu je zlato díky svým výborným pájecím vlastnostem hojně využíváno, proto

je důležité optimalizovat tloušťku pozlacených povrchů. Nadměrně tlustá vrstva zlata může vést k selhání spoje například při tepelném cyklování. Nevýhodou slabé vrstvy je zase její pórovitost, a tudíž neposkytování ochrany po dlouho dobu. Tento problém se často řeší nanesením 0,15-0,40 μm tlusté vrstvy niklu. Ke křehkosti a snížení odolnosti se v oblasti IMC často přidává i pórovitost, jako jsou Kirkendallové voidy⁴. [21]



Obrázek 24 Rovnovázný fázový diagram systému Cu-Sn [21]

6 SPOLEHLIVOST PÁJENÉHO SPOJE

Kapitolu zabývající se spolehlivostí pájeného spoje zde uvádím, protože spolehlivost se většinou zkoumá komplexně v nezávislosti na místě vzniku poruchy. To znamená, že selhání spoje může nastat prasknutím spoje, odtržením vývodu od součástky nebo právě oddělením vodivé cesty od substrátu DPS. Všechny zmíněné poruchy mohou být umocněny tepelným namáháním, o jehož vlivu na části tvořící pájený spoj se také zmiňuji.

Spolehlivost produktu je velmi důležitý faktor zejména v oblasti mobilních zařízení, protože tyto stále více výkonné a komplexnější elektronické zařízení čelí různým elektrickým, teplotním, mechanickým a teplotně-mechanickým vlivům v prostředí, v němž vykonávají svou činnost. Existují dva hlavní důvody, proč je v poslední době otázka spolehlivosti tak důležitá. Tím prvním je větší nejen hustota součástek na DPS, ale i mnohem

⁴ Dutiny vznikající rozdílem v rychlosti difúze jednotlivých kovů tvořící pájený spoj. [20]

větší koncentrace pájených spojů v rámci jedné součástky (např. BGA, CSP, Flip Chip). S využíváním těchto součástek se pojí problematika v podobě menšího množství pájecí slitiny tvořící pájený spoj. Snížení objemu pájky přiblížilo součástky k povrchu DPS, a proto je také namáhání těchto miniaturních spojů mnohem větší. Současně u malých objemů pájky existuje riziko, že velká část spoje se přemění v křehkou intermetalickou sloučeninu. Druhým důvodem je zapojení bezolovnatých pájek, čipů s kovovou úpravou pod kuličkou pájky, součástek s pokovenými vývody a různých povrchových úprav DPS. Po spojení všech součástí dojde k vytvoření jedné soustavy, která je z metalurgického hlediska velmi komplexní. Vzniklé mikrostruktury jsou zodpovědné za spolehlivost pájeného spoje a je evidentní, že spolehlivost různých kombinací materiálů bude jiná. Od této skutečnosti se odvíjí i zaměření výzkumu spolehlivosti spoje. Jednou z nejdůležitějších oblastí zkoumání je zaměření na metalurgické reakce probíhající v efektivní oblasti a výsledné mikrostruktury v rámci celého spoje. Efektivní oblast lze chápat, jako tu část, kde koncentrace složek se liší od složení původního kontaktního materiálu. [22]

Spoj z bezolovnaté pájky může obsahovat komplexní mezi materiálové vrstvy, jako jsou fosfidy, které kovový spoj jednoznačně oslabují. Lze předpovídat, že mechanická selhávání budou v budoucnosti stále ovlivňovat spolehlivost zejména, pokud metalurgicky nekompatibilní pokovení součástek nebo povrchové úpravy DPS budou bez důkladných analýz a zkoušek využívány v elektronických zařízeních. Ke snížení spolehlivosti navíc přispívá i to, že vzniklé mikrostruktury během pájení nejsou stabilní a v průběhu provozu se dále vyvíjí. Je zřejmé, že mechanismy a druhy selhání jsou závislé na způsobu zatěžování. Při termomechanickém namáhání je zrod a rozvoj trhlin způsoben mikrostrukturami vytvořenými při pájení a jejich procesem rekystalizace v průběhu testů popřípadě užívání. Na druhou stranu způsoby selhání při mechanických šocích mají svoji příčinu jinde. Vzniklá trhlinka se nejčastěji objeví v křehké intermetalické vrstvě a nikoliv v objemu pájecí slitiny. V praxi se však tyto dva způsoby selhání často prolínají, neboť u mobilního zařízení je vysoce pravděpodobné, že před pádem a tím způsobeným mechanickým šokem je vystaveno zvýšeným teplotám či nějakému teplotnímu cyklování. [22]

Hlubší analýza spolehlivosti a jednotlivých možností selhání pájeného spoje nás může vést k několika závěrům, na jejichž základě lze například vybrat nejvhodnější pájecí slitinu nebo navrhnout design DPS tak, aby bylo dosaženo nejvyšší míry odolnosti vůči vnějším vlivům. Pájecí slitina tvořící pájený spoj je často namáhána několika způsoby. Do těchto vlivů lze zahrnout rozdílný koeficient teplotní roztažnosti součástek a substrátu DPS, mechanické vibrace v průběhu života zařízení a manipulaci během transportu.

Spolehlivostní zkoušky s sebou přináší několik problémů, které musí být před samotným provedením vyřešeny, aby nám testy poskytly přínosné výsledky. Důležité je zvolit relevantní testovací metody, způsob monitorování, atd. Velmi náročné je rovněž nastavit

parametry zkoušek, aby bylo možné docílit co nejlepšího napodobení podmínek ve zrychleném režimu, kterým bude zařízení během svého provozu vystaveno. Pouze vhodně zvolené metody, jejich parametry a průběh jsou zdrojem výsledků, které je možné považovat za vypovídající a použitelné pro případné řešení nedostatků pájených spojů. [2]

V elektrotechnologii se využívá mnoho způsobů zkoušek spolehlivosti pájených spojů, mezi nejběžnější a nejpoužívanější patří tři zatěžovací způsoby v cyklickém režimu pro obvody typu I, II a III u komerčních a průmyslových zařízení. [23]

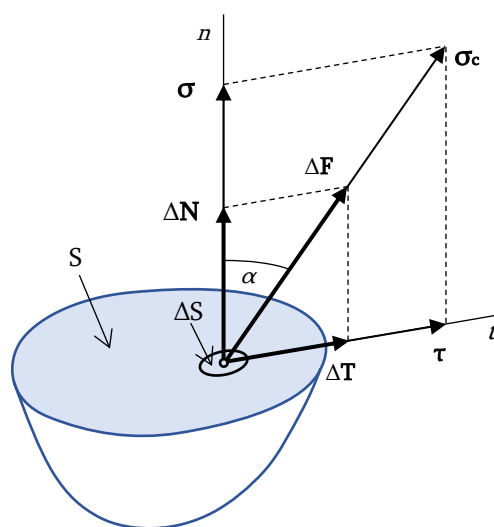
- ◆ Provozně funkční zkoušky,
- ◆ mechanické cyklické zkoušky (např. zkouška ohybem, vibrační testy),
- ◆ teplotní cyklování.

V kapitole 6.2 jsou popsány i jednorázové mechanické zkoušky, při kterých působí destruktivní mechanismus v jednom časovém intervalu beze změny v čase až do doby poškození.

Provozně funkční zkoušky poskytují mnoho informací o chování výrobku ve skutečných provozních podmínkách. Během těchto zkoušek dochází k modelování například okolního prostředí, způsobu chlazení, atd. Nevýhodou tohoto typu zkoušky je finanční, časová a realizační náročnost. Za účelem zrychlení testu je možné podmínky v průběhu zkoušky měnit s určitou frekvencí. V případě variabilní frekvence je nutné její změny provádět s opatrností a analyzovat vliv změny frekvence na výsledky testování. [23]

6.1 Mechanika pájeného spoje

Před popisem mechanických vlastností pájeného spoje je důležité poznamenat, že se v rámci této problematiky setkáváme se dvěma různými mechanickými napětí a v souvislosti s tím se dvěma deformacemi. Celkové napětí (σ_c) se totiž skládá ze dvou složek, a to napětí normálového (σ – napětí v tahu popř. tlaku) a napětí tečného též tangenciálního (τ – napětí ve smyku). Rozdíl mezi napětími je takový, že σ působí ve směru normály k ploše a τ ve směru tečném. Rozložení celkového napětí postihuje obrázek č. 25. Rozklad vektoru napětí σ_c v rovinném řezu a daném bodě na dvě zmíněné složky lze zapsat skalárními výrazy (7), (8).



Obrázek 25 Rozklad napětí do složek [24]

Působením normálových sil se mění rozměry tělesa a zavádí se relativní prodloužení (ε), které je dáno vzorcem (9). Smyková (tangenciální) napětí způsobují posunutí bodů v rovině průřezu. Tím dochází ke změně pravých úhlů na kosé. Změnu způsobenou smykovým napětím udává relativní zkosení - zkos (γ) a na základě obrázku č. 26 lze zapsat rovnici (10).

$$\sigma_c = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}, \quad (6)$$

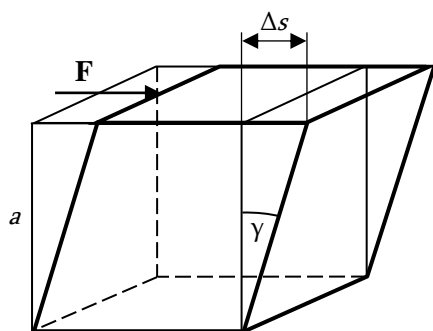
$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta S} = \frac{dN}{dS} = \frac{dF}{dS} \cos \alpha, \quad (7)$$

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta S} = \frac{dT}{dS} = \frac{dF}{dS} \sin \alpha, \quad (8)$$

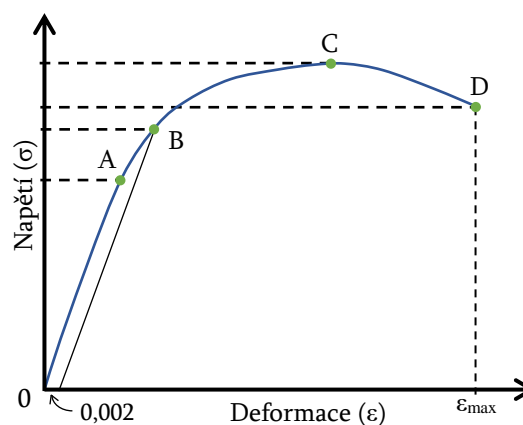
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}, \quad (9)$$

$$\gamma \approx \operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta s}{a} = \frac{\tau}{G}, \quad (10)$$

kde ΔF je vnitřní síla působící na elementární ploše ΔS . ΔN a ΔT jsou velikosti průmětu síly ΔF do n a t . Úhel α ve výrazech (6) a (7) je odchylka od síly ΔF od směru vnější normály n . E je modul pružnosti v tahu zvaný též Youngův modul a G je modul pružnosti ve smyku. [24]



Obrázek 26 Objekt deformovaný smykem [24]



Obrázek 27 Typický tvar křivky napětí deformace [25]

Nejpodstatnějšími veličinami v oblasti posuzování životnosti materiálů jsou výše popsané veličiny mechanické napětí a deformace. Zjednodušeně řečeno, deformace je relativní změna tvaru objektu na jednotku délky a v podstatě se jedná o dislokaci částic materiálu. Napětí je síla na jednotku plochy a rozlišujeme dva následující typy z hlediska oblasti jeho vzniku. Jedná se o napětí způsobené ovlivněním spoje zevnějšku. Příkladem mohou být některé mechanické zkoušky popsané v této kapitole nebo vnější vlivy během provozu zařízení. Druhou možností je vznik napětí v důsledku interních podmínek spoje. Do tohoto typu nejčastěji řadíme zatěžování spoje vlivem působení teploty zejména při teplotním cyklování. U DPS vzniká napětí na základě odlišné relativní změny velikosti jednotlivých prvků a částí této soustavy. Obrázek č. 27 znázorňuje typickou tahovou křivku pro kov nebo kovou slitinu. První část křivky od počátku do bodu A zvaného mez úměrnosti je lineární a

působící napětí způsobuje pružnou (elastickou, vratnou) deformaci. Sklon této části křivky je dán Youngovým modulem slitiny, jehož hodnota je velmi důležitá při určování mechanických vlastností. Materiál se může chovat elasticky až do bodu B označovaného jako mez pružnosti nebo rovněž elasticity. Další namáhání způsobuje trvalou (plastickou, tvárnou) deformaci. Bod B je obvykle v technických aplikacích definován pro takové napětí, které vyvolá relativní prodloužení o velikosti 0,002. Podle empirického Hall-Petchova vztahu (11) existuje závislost mezi velikostí zrna a mezí pružnosti:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d}}, \quad (11)$$

kde σ_y je hodnota meze pružnosti v bodě B, σ_0 a K jsou materiálové konstanty a d je velikost zrna. Z této závislosti vyplývá, že čím menší je velikost zrna, tím větší je hodnota meze pružnosti. Bod C udává maximální hodnotu tahové síly, jež je slitina schopna snést. Tažnost slitiny je dána maximální hodnotou relativního prodloužení v bodě D. [25]

S ohledem na závislost deformace-čas (viz obr. č. 28) lze říct, že veškerá pružná deformace a část tvárné deformace nastává okamžitě. Větší část plastické změny tvaru se dále rozvíjí s časem a jedná se o tzv. deformaci tečením (creep⁵ strain), která je závislá na působícím napětí a teplotě, přičemž napětí zůstává konstantní a mění se pouze deformace. Ke creepu dochází u pájených spojů obvykle v případě, když DPS projde změnou teploty. Běžně se tak stává, při změně okolní teploty, v níž je zařízení provozováno. Napětí tedy nevzniká působením vnější síly, ale v důsledku rozdílných CTE (Coefficient of thermal expansion) prvků DPS. Neboť se jedná o napětí působící na pájený spoj zejména v tečném směru, tak jeho velikost lze určit ze vztahu:

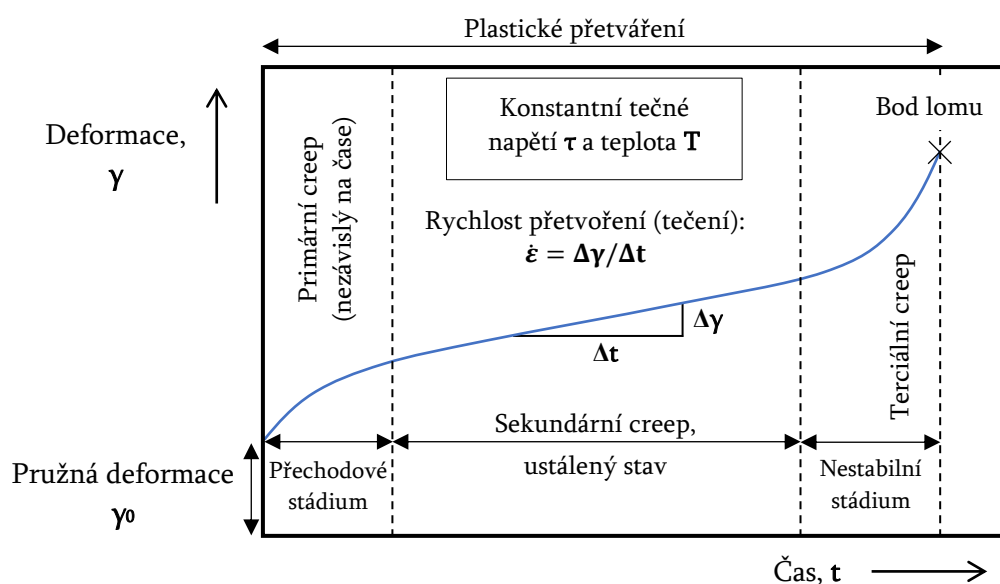
$$\Delta\gamma = (\alpha_s - \alpha_c)(T - T_0) \frac{l}{h}, \quad (12)$$

kde γ je velikost napětí ve smyku, α_s resp. α_c je koeficient teplotní roztažnosti substrátu resp. součástky, T je teplota, T_0 je teplota při nulovém napětí ve smyku, l je polovina vzdálenosti pájecích bodů součástky (u čipů se bere vzdálenost po diagonále ke stanovení nejhorší varianty) a h tloušťka pájky. U pájecích slitin lze pozorovat creep v případě působení napětí a teploty vyšší než je 60 % homologické teploty⁶. Creep je spojen s relaxací materiálů a slouží ke zmírnění působícího napětí. V okamžiku, kdy je výsledné napětí dáno konstantním poměrným prodloužením, tak velikost napětí s časem přirozeně klesá. Tento jev se nazývá relaxace napětí a je funkcí původního poměrného prodloužení (tj. chování materiálu po dosažení deformace. Relaxace nastává v okamžiku, kdy uvnitř materiálu dojde k mikrostrukturálním změnám (difúzní a dislokační creep). Ty způsobují únavu materiálu vznikem a rozvojem mikrotrhlin. [26] [27]

⁵ Překlad jevu creep je tečení, ale i v české odborné literatuře se obvykle vyskytuje pojem creep.

⁶ Homologická teplota se definuje jako T/T_m , kde T je provozní teplota a T_m je teplota tavení.

Atomy materiálu elasticky mění svoji polohu v případě, kdy na útvar v pevném skupenství působí vnější síla při určité teplotě. To ale trvá velmi krátkou dobu, a proto je časový interval elastické změny v praxi považován za nulový. Prvotní fáze plastické deformace je iniciována v okamžiku překročení hranice elasticity materiálu a lze hovořit o primárním creepu. Rychlost deformace je v průběhu intervalu primárního creepu velká. Neustálým působením mechanického napětí příslušné velikosti dojde k přechodu do druhého stádia, pro který je typický přesun atomů při konstantní míře deformace (sekundární creep). Sekundární creep někdy bývá nazýván jako stacionární nebo ustálený a udává výkonové vlastnosti materiálu a je rozhodující z hlediska životnosti a spolehlivosti spoje za podmínek creepu. Pokud je napětí větší, než kterému je materiál schopen odolat, dochází opět ke vzrůstu rychlosti deformace. Materiál se nachází v nestabilní oblasti terciálního creepu, které končí rychlým vznikem praskliny a následným odtržením. Dalšími dopady creepu na pájený spoj před jeho případným selháním může být změna tvaru pájeného spoje spojená se vznikem koncentrace napětí v některých jeho částech nebo přetváření mikrostruktury spojené s hrubnutím zrna, což je nežádoucí děj zeslabující pevnost spoje. [26] [27]



Obrázek 28 Jednotlivá stádia creepu [26]

Zmíněný jev relaxace napětí (creepová relaxace) je patrný na obr. č. 29, který znázorňuje efekt působení neměnné deformační míry a tomu adekvátní odpověď ve formě tečného napětí. Popis celého průběhu na tomto obrázku je následující. Vzniklá deformace (γ) materiálu při konstantní deformační míře ($\partial\gamma/\partial t > 0$) je nejprve pružná až do meze úměrnosti. Pomocí rovnice (13) a znalosti Youngova modulu (modulu pružnosti v tahu) lze získat modul pružnosti ve smyku za předpokladu známé hodnoty Poissonova čísla.

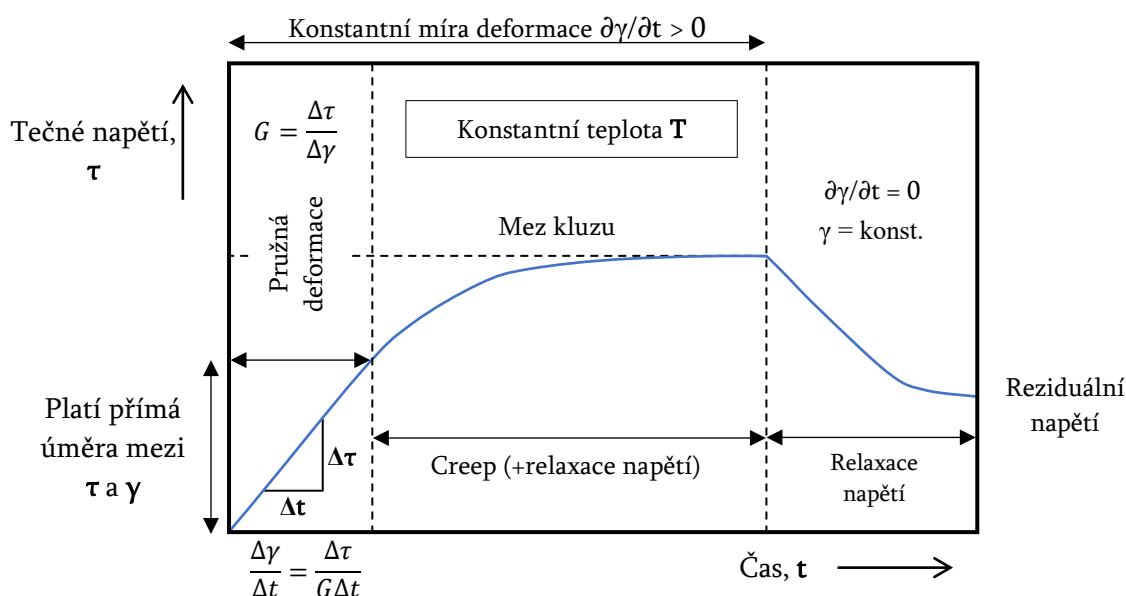
$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (13)$$

kde E je modul pružnosti v tahu zvaný též Youngův modul, který lze pro pružnou deformaci určit dle Hookova zákona ($E = \sigma/\epsilon$). G je modul pružnosti ve smyku a ν je Poissonovo číslo, které je specifické pro každý materiál. [26]

Po překročení meze úměrnosti nastávají uvnitř materiálu další procesy. Společně s trvalou časově nezávislou deformací probíhá časově závislá creepová deformace a relaxace napětí. Za podmínky dostatečně velké míry deformace lze příspěvek relaxace napětí, který je také závislý na čase, zanedbat. Potom se k výpočtu celkové velikosti deformace pájeného spoje ve smyku využije vzorec (14).

$$\gamma = \gamma_{el} + \gamma_{pl} + \gamma_{cr} = konst. , \quad (14)$$

kde γ je celkové napětí dosažené při řízené rychlosti deformace, γ_{el} je časově nezávislá pružná deformace, γ_{pl} je časově nezávislá trvalá deformace a γ_{cr} je časově závislá deformace creepem. [26]



Obrázek 29 Znáznornění relaxace napětí [26]

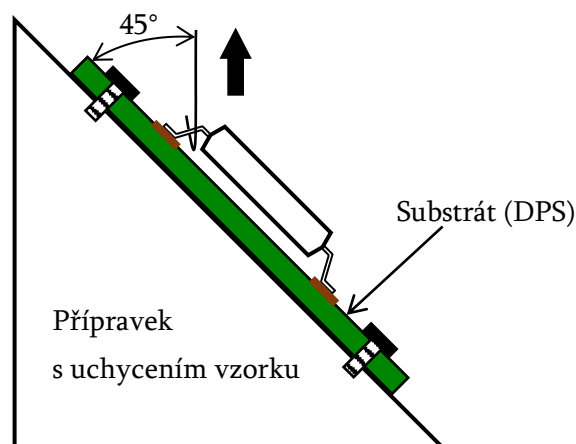
6.2 Mechanické zkoušky

Popis jednotlivých mechanických zkoušek je podrobně popsán v příslušných normách. Velká část českých norem, které se touto problematikou zabývají, je většinou bez úprav přejata z mezinárodních norem IEC. Pro většinu testovacích metod platí, že vzorek musí být připraven doporučeným procesem popsaným v normě. To například znamená volbu typického teplotního profilu při procesu pájení přetavením, odstranění tavidla nebo uchování vzorku ve standardních atmosférických podmínkách po dobu více než čtyř hodin od ukončení procesu pájení. V následujících podkapitolách jsou zkoušky, které je možné za účelem stanovení pevnosti pájeného spoje vykonat, stručně popsány. Důležité je poznamenat, že

cílem diplomové práce je se zaměřit na termomechanické vlastnosti pájecích ploch, čili na jejich adhezi k substrátu. Zkoušky spolehlivosti pájeného spoje jsou popisovány obecně bez speciálního zaměření se na některou část tvořící spoj. V kapitolách 3.5.2 a 3.5.3 jsem se zmínil o zkouškách zabývající adhezí Cu fólie. Nicméně testy v praktické části jsou realizovány i s ohledem na vytvořený pájený spoj mezi součástkou (konektorem) a pájecími plochami, neboť zkoušky nejsou zhotoveny přesně podle norem na testování adheze Cu fólie. Ve zmíněných zkouškách pájeného spoje je při vyhodnocování výsledků jedním z možných bodů defektu právě mnou zkoumaná problematika.

6.2.1 Zkouška odolnosti proti odtržení

Popis a parametry této zkoušky jsou možné dohledat v normě ČSN EN 62137 – 1 – 1. Test odolnosti proti odtržení slouží ke stanovení pevnosti pájeného spoje včetně součástky pod úhlem 45°. Před aplikováním tažné síly je nutné vzorek umístit na nakloněnou rovinu a upevnit ho (viz obr. č. 30). Důležité je zvolit rychlost tažení. Pokud není žádným způsobem doporučena, tak se musí stanovit pomocí předchozích zkoušek. S tím, že doba potřebná k poškození spoje, by se měla pohybovat od několika desítek sekund až po jednotky minut. [28]



Obrázek 30 Způsob uchycení vzorku při zkoušce odolnosti proti odtržení [28]

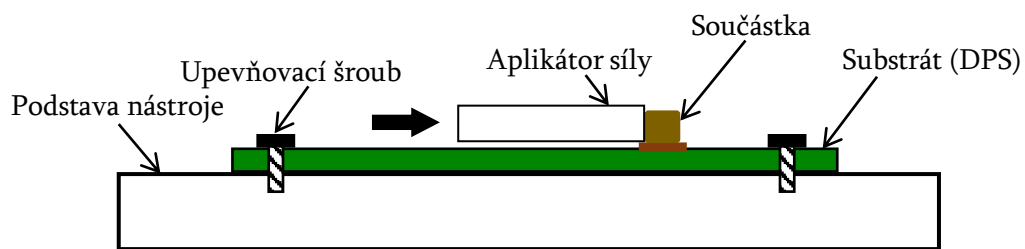
Nástroj určený k přenosu síly by se měl v průběhu zkoušky pohybovat postupně již stanovenou rychlostí, dokud není patrná destrukce spoje nebo jiné části. Aplikovaná síla se průběžně monitoruje a maximální naměřená síla je pak silou odtrhu pájeného spoje. Další možností je nechat podstoupit vzorek před samotnou zkouškou teplotnímu cyklování, po kterém následuje zotavení a potom teprve dojde k vykonání zkoušky. Níže jsou shrnuty možné defekty, které mohou během tohoto testu nastat. [28]

- ◆ Poškození součástky – odtržení vývodu
- ◆ Odtrhnutí na rozhraní vývod součástky-pájka

- ◆ Prasknutí pájeného spoje
- ◆ Odtržení vývodu včetně pájecí slitiny od pájecí plošky
- ◆ Vytržení pájecí plošky ze substrátu

6.2.2 Zkouška stříhem

Stříhová zkouška ve srovnání s tou předchozí je vhodná pro testy pevnosti pájených spojů u součástek SMT v provedení jako čipové pouzdro (flat chip). Tyto součástky nemají vývody jako je například vývod typu „L“ (gull wing), za které by bylo možné je zachytit tak, jak je to patrné na obrázku č. 30. Zkouška stříhem je destruktivní metoda, která slouží ke zjištění celkové pevnosti spoje. Dále může být v průběhu zkoušky vyhodnocováno šíření trhliny a míra poškození spoje. Zkoušecí metoda je založena na předpokladu tvorby trhliny, její velikost a následné šíření ovlivní výslednou pevnost spoje. Při vyhodnocení výsledků je proto možné vytvořit souvislost mezi pevností spoje a jeho selháním. Síla, která je potřebná k odtržení součástky, se může lišit v závislosti na typu použité součástky, pájecí pasty, atd. [29]



Obrázek 31 Upevnění vzorku při zkoušce stříhem [29]

Vzorek je před samotným testem nutné připravit za daných podmínek a následně upevnit do zkušebního zařízení. Vzorek musí být uchycen tak, aby nedocházelo k jeho ohýbání. Síla je aplikována tlačícím nástrojem (stříhovou hlavou) rovnoběžně se substrátem a kolmo na boční stěnu součástky. Síla potřebná k utržení součástky a způsob destrukce může být ovlivněn způsobem styku nástroje a součástky, proto je důležité v průběhu testu zachovávat neměnnou vzdálenost mezi nástrojem aplikující sílu a DPS. Výška mezery mezi nástrojem a DPS by neměla přesahovat jednu čtvrtinu výšky součástky. Průběh zkoušky je takový, že nástroj vyvíjející sílu se přesune na jemný dotyk k součástce. Potom dochází k postupnému posouvání nástroje až do doby, kdy dojde k narušení spoje. Schematicky je zkouška zobrazena na obrázku č. 31. Destruktivní možnosti, které se mohou během testu objevit, jsou téměř stejné jako při zkoušce proti odtržení. Rozdíl je pouze u porušení pouzdra součástky. Zde může nastat dvojitý způsob zničení. [29]

- ◆ Utržení těla součástky – kontakty zůstanou na původním místě
- ◆ Vytvoření trhliny a následné narušení samotných kontaktů

6.2.3 Cyklická zkouška ohybem

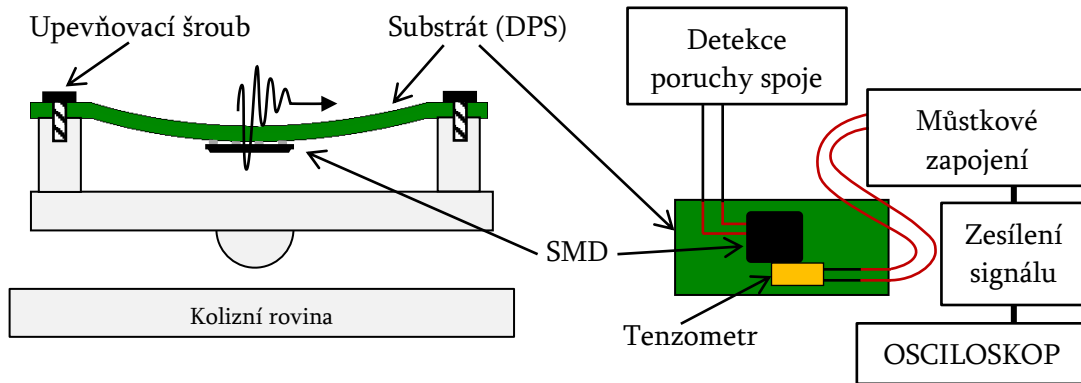
Podstatou zkoušky ohybem je stanovení odolnosti pájeného spoje mezi vývodem součástky a pájecí plochou. Není ale vyloučeno, že by zkouška ohybem nemohla být rovněž využita pro určení míry adheze pájecí plochy na substrátu DPS. Pomocí zkoušky lze zhodnotit vliv mechanického namáhání na pevnost pájeného spoje v delším časovém horizontu. Na základě výsledků zkoušky a zhodnocení vlastností pájeného spoje za různých podmínek je možné pro dané zařízení zvolit takové řešení, které je z hlediska odolnosti proti ohybu nejvhodnější. Různými podmínkami je míněna volba rozdílných pájecích past, substrátu o různých vlastnostech, součástek atd. Příkladem reálného namáhání, které lze touto zkouškou simulovat, může být stiskávání tlačítek na zařízení. [30]

Zkouška probíhá tak, že se připravený vzorek upevní do dvou podpěrných držáků, jejichž doporučená vzdálenost je 9 cm. Následně je vzorek uprostřed stlačován hrotem (cca 5 mm/s) v rozmezí od 0,5-5 mm. Přesná hodnota průhybu se volí předem pro konkrétní zařízení a na základě předchozích předběžných testů. Během zkoušky se zaznamenává síla, počet cyklů a zejména odpor, podle kterého se detekuje elektrické přerušování spoje v časovém intervalu 10-100 μ s. V případě, že odpor přesáhne hodnotu $10^3 \Omega$, tak je zkouška ukončena. [30]

Běžná frekvencí ohybů je 240 cyklů během jednoho dne, než dojde k selhání. Nevýhodou je opět délka trvání zkoušky. U DPS s tloušťkou 1-1,5 mm, které jsou velmi flexibilní, dochází k narušení pájeného spoje po 20 000-30 000 cyklech, což znamená po 84-126 dnech. [2]

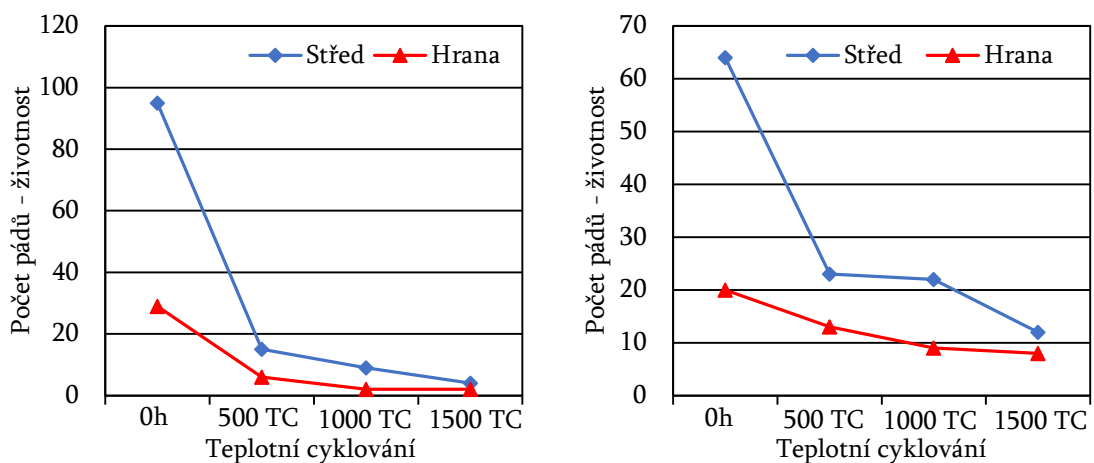
6.2.4 Zkouška pádem

Posuzování odolnosti pájeného spoje při pádu se realizuje na přípravku, který zajišťuje možnost spuštění vzorku z definované výšky na podložku. Osazená deska plošného spoje je připevněna na základovou kovovou destičku s vyčnívajícími útvary. Vytvořená soustava je pomocí vodících tyčí udržována v koridoru tak, aby došlo k pádu na kolizní rovinu a přenesení účinku nárazu na pájené spoje. Nezbytnou součástí zkoušky je monitorování namáhání vzorku při pádu desky a kontrola elektrické vodivosti spoje. Monitoring namáhání je zprostředkován tenzory umístěnými v blízkém okolí sledovaného spoje. Upevnění tenzoru probíhá pomocí vhodného lepidla a musí probíhat za stavu, kdy na vzorek nepůsobí žádná síla. Pro získání správné velikosti síly je nutné měřenou hodnotu korigovat deformačním součinitelem tenzometru. Mechanické narušení spoje se například sleduje pomocí stejnosměrného napětí přiloženého na spoj a jeho měření. V okamžiku, kdy velikost napětí na spoji se blíží k velikosti zdrojového napětí je spoj narušen. [31]



Obrázek 33 Uspořádání přípravku (vpravo) a zjednodušené schéma měření požadovaných veličin (vpravo) [31]

Po ukončení zkoušky přerušением spoje následuje zápis počtu pádů sloužící k případné analýze odolnosti. Na základě testů je možné nastavit takové vlastnosti pájeného spoje optimalizací pájecí slitiny, substrátu a návrhu DPS, aby finální zařízení bylo vůči pádu co nejodolnější. Zkoušku pádem je možné realizovat po předešlém teplotním cyklování. Tím dojde k přiblížení se reálným podmínkám, ve kterých se DPS pohybuje. Z výsledků prezentovaných v publikaci [32] je zřejmé, že na odolnost vůči pádu má vliv nejenom teplotní cyklování, ale i povrchová úprava pájecích ploch (Cu-OSP, ENIG). U obou povrchových úprav klesl počet provedených pádů o více než 50 % po provedení 500 teplotních cyklů⁷. Další odlišnost v počtu cyklů je zaznamenána v případě umístění součástky v rámci vzorku. U součástek umístěných na okraji desky je počet pádů ve srovnání se vzorky okolo mnohem nižší.

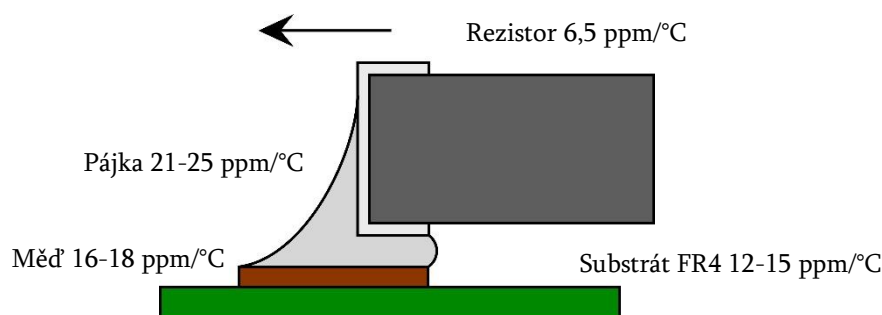


Obrázek 32 Počet provedených zkoušek pádem pro dvě různé povrchové úpravy (Cu-OSP - vlevo a ENIG - vpravo) před a po tepelném cyklování [32]

⁷ Teplotní cyklus – od -40 do 120 °C během 1 hodiny, 15 minut setrvání na úrovni minimální a maximální teploty

6.3 Tepelné namáhání

V případě osazování DPS součástkami s drátovými vývody (THT – Through-hole Technology) nebylo téma spolehlivosti tolik znepokojujícím aspektem, jako je tomu u povrchové montáže. Pokovená díra určená pro vývod součástky totiž napomáhala pájenému spoji lépe snášet mechanické namáhání. Na rozdíl od THT se pájené spoje u povrchové montáže se musí v plné míře podílet jak na mechanickém, tak i elektrickém spojení. Potom nastává logická otázka, zda jsou pájené spoje u SMT (Surface Mount Technology) méně spolehlivé, než v případě THT z důvodu absence pokoveného otvoru. Odpověď na tuto otázku není jednoznačná a záleží na použitých materiálech jednotlivých součástek. Součástky v plastovém krytí s několika tvarovanými vývody nebo malé keramické čipy nejsou problémem z hlediska teplotní spolehlivosti spoje, neboť rozdíly koeficientů tepelné roztažnosti DPS FR4 a danou součástkou je velmi malý. Rozdíl tepelných roztažností a následně rozdíl velikostí způsobený termomechanickým cyklickým působením jsou následně schopny převzít vývody součástek. Na druhou stranu v některých zařízeních jsou použity součástky s takovým krytím, které není z hlediska rozdílnosti teplotního koeficientu pouzdra součástky a materiálu DPS kompatibilní. Jedná se například o keramická pouzdra využívaná v zařízeních pro vojenské a jiné podobné účely. [2]



Obrázek 34 Schématické znázornění odlišných CTE u SMT v ose x [34]

Čipové rezistory a odpory, které jsou na desky typu FR4 osazovány velmi často, rovněž obsahují keramický základ, nicméně u těchto součástek ale nedochází k překročení mechanické pevnosti pájeného spoje změnou rozměrů součástky. Rozměry takových součástek jsou relativně malé a při změně teploty nevytvoří takové napětí, které by mohlo spoj poškodit. [2]

Vystavením osazené DPS tepelnému namáhání dojde k tomu, že prvky DPS (tj. součástky a substrát) přenášející vzniklé napětí na pájku jsou obvykle namáhány v pružném rozsahu. Tudíž je možné zavést a pracovat s „tuhostí“ (k) DPS, jež je dána derivací síly s ohledem na dislokaci.

$$k = -\frac{dF}{dx} \quad (15)$$

To znamená, když pájka změní tvar o velikost Δx , tak síla působící na spoj se zmenší o hodnotu $k\Delta x$, kde k je již naznačená tuhost DPS. Vezmeme-li v potaz několik zjednodušujících podmínek, tak pro konstantní teplotu ($\Delta T = 0$) dostaneme (16) nebo také (17).

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta x}{h}, \quad (16)$$

$$\Delta\gamma = \frac{-\Delta F}{kh}, \quad (17)$$

kde F je síla působící na spoj. Ze znalosti rovnice (12) za předpokladu $F = 0$ (tzn. úplná relaxace), a jejím sloučením se vztahem (17) dojdeme k níže uvedené rovnici.

$$\Delta\gamma = (\alpha_s - \alpha_c) \frac{l}{h} \Delta T - \frac{\Delta F}{kh} \quad (18)$$

Navzdory jednoduchosti dává tato rovnice do souvislosti tečné napětí, zkos a teplotu a ve své podstatě udává, jak napětí a deformace vyrovnává rozdílné teplotní koeficienty. Rovnice nám například říká, že při udržování konstantní teploty bude síla lineárně závislá na tečném napětí, přičemž směrnice přímky bude $-kH$. To znamená, že spoj je v již zmíněné oblasti creep-relaxace. V případě vyšší hodnoty k se koná relaxace napětí. Naopak menší velikost k značí pohyb v oblasti creepu. [4]

Alternativním pohledem získáme další skutečnost, která nám tato rovnice poskytuje. Bude-li se měnit teplota, tak neshoda roztažnosti (první člen na pravé straně) způsobí změnu síly (druhý člen na pravé straně) nebo změnu zkosu. Vyloučena není ani kombinace zmíněných změn, a to v závislosti na vlastnostech pájky. Vysoká poddajnost pájky se při nesouladu roztažnosti projeví spíše zkosením, stejně jako při vysokých teplotách. U tuhé pájky je následek rozdílné roztažnosti převážně na straně zvyšujícího se napětí, jako tomu je za nízkých teplot. [4]

6.3.1 Teplotní cyklování

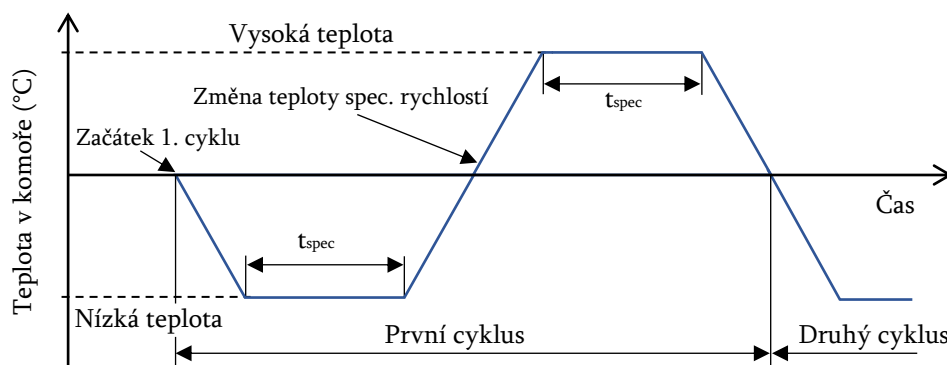
Zkoušky teplotním cyklováním (TC) jsou určeny pro stanovení vlivu termomechanického namáhání, které vzniká vlivem tepelných ztrát nebo změnou okolní teploty, na spolehlivost elektronických zařízení. Jak již bylo zmíněno v průběhu této práce, mechanické napětí a s ním spojená deformace je důsledkem rozdílných CTE použitých materiálů. Vznikající deformace mohou vyústit ke vzniku a rozvoji trhlin. Odolnost vůči cyklickým deformačním změnám je dána materiálovými vlastnostmi materiálu a liší rozsahem a rychlostí deformace. Následky teplotního cyklování jsou téměř shodné s těmi, se kterými se spoj potýká při přirozeném používání zařízení. Aby bylo možné posoudit spolehlivost pájeného spoje a použité pájecí slitiny v kratším čase, než je tomu za provozních podmínek, tak je TC často realizováno ve zrychleném režimu. To znamená, že podobně jako u vibračních testů se zvýší frekvence a amplituda aplikované změny působícího zátěžového faktoru. Při TC

bývají vyšší krajní hodnoty teplot než, kterým je spoj vytaven v provozu. Potom je nutné zavést akcelerační faktor, který respektuje zrychlené zatěžování. Akcelerační faktor (AF) je poměr mezi počtem teplotních cyklů při zrychleném testování a počtem přirozených cyklů, které způsobují podobné poškození pájeného spoje. Příkladem takového faktoru může být Norris-Landzbergův model

$$AF = \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{-m} \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{max,1}} - \frac{1}{T_{max,2}}\right)\right], \quad (19)$$

kde dolní indexy „1“ a „2“ většinou přísluší provozním a testovacím podmínkám, f je frekvence teplotních cyklů, T_{max} je maximální teplota pájky, E_a je aktivační energie, k je Boltzmannova konstanta a m a n jsou materiálové konstanty. Hodnoty konstant m , n a poměru E_a/k se získávají empiricky na základě experimentů a liší se například použitou pájecí slitinou nebo osazenými součástkami. [33] [34]

Teplotní zkoušky jsou zpravidla realizovány v komorách typu vzduch-vzduch nebo kapalina-kapalina v závislosti na požadované míře změny teploty. Realizace je možná buďto v jedné komoře, která schopna rychlých změn teploty, nebo ve dvou samostatných komorách. Pokud je vzorek testován dvoukomorovým způsobem, tak je při přemísťování nutné dodržet předepsanou dobu. Teplotní profil zkoušky je dán několika hodnotami, mezi které patří minimální a maximální teplota, doba setrvání na teplotní hladině, rychlost změny mezi maximem a minimem teploty a počet cyklů. Některé doporučené hodnoty těchto parametrů, lze vyhledat v normě ČSN EN 60068-2-14. Norma se rovněž zabývá i jaký typ zkoušky volit pro hodnocení různých vlastností. Stejný typ teplotního profilu (obr. č. 35) se volí pro stanovení elektrických a mechanických vlastností během změn teploty. Jiným typem profilu se ověřuje, zda je zařízení schopno odolávat změnám teploty při zachování své funkce. Pokud bychom chtěli hodnotit elektrické vlastnosti popřípadě odolnost použitých materiálů po určitém počtu rychlých změn teploty, tak dle zmíněné normy volíme jiný profil. [22]



Obrázek 35 Příklad tvaru teplotního profilu při tepelném cyklování [40]

6.4 „Pad cratering“ efekt

Pojem „pad cratering“ úzce souvisí problémem vytržení měděné vodivé cesty ze substrátu. Přesněji řečeno jedná se o tvorbu jemné trhlinky pod pájecími plochami určenými pro osazení součástkou nejčastěji typu BGA. Trhliny jsou iniciovány nejčastěji od hrany měděné plochy v důsledku koncentrace mechanického napětí a rozdílných vlastností mědi a pryskyřice v laminátu. Není ale vyloučena ani iniciace trhliny přímo ve vodivé cestě (viz obr. č. 36). Trhliny se šíří uvnitř pryskyřice až do místa, kde se nachází svazky skleněných vláken. V průběhu dalších zatížení trhlinka dále roste podél rozhraní mezi pryskyřicí a skleněnými vlákny nebo také za svazkem skleněných vláken. Studie [35] dokazuje, že míra růstu trhliny pod ploškami BGA silně závisí na umístění a orientaci svazků skleněných vláken vzhledem k BGA plošce. [36]

„Pad cratering“ je nebezpečný jev, protože v závislosti na provozních podmínkách mohou trhliny působit buď jako zdroj okamžité poruchy, nebo jako skryté defekty, které mohou ovlivnit dlouhodobou spolehlivost. Přejít k bezolovnatým slitinám tento problém ještě umocnil kvůli několika faktorům. Vyšší teplota přetavení bezolovnatých slitin způsobuje vyšší zbytkové mechanické napětí na rozhraní BGA plošek. Slitiny typu SAC (Sn-Ag-Cu), které jsou významně tvrdší a křehčí než eutektické slitiny cínu a olova, přenášejí při daném mechanickém zatížení vyšší napětí na BGA plošky. Lamináty z epoxidové pryskyřice s vyšším T_g vytvrzované fenolickou pryskyřicí (novolakem) vhodné pro bezolovnaté pájení jsou ve srovnání s lamináty tvrzenými DICY (dikyandiamid), které se používaly pro pájení olovnatou pájkou, podstatně křehčí. Vykazují nižší pevnost v loupání a jsou méně odolné vůči ohybu. K intenzivnějšímu výskytu „pad crateringu“ také negativně přispívá zvyšující se osazovací hustota a zmenšující se velikost součástek s jemnou roztečí a malým rozměrem pájecích plošek. Menší rozměry plošek jsou pak náchylnější k odtrhávání, a to při relativně nižším mechanickém zatížení. [37]



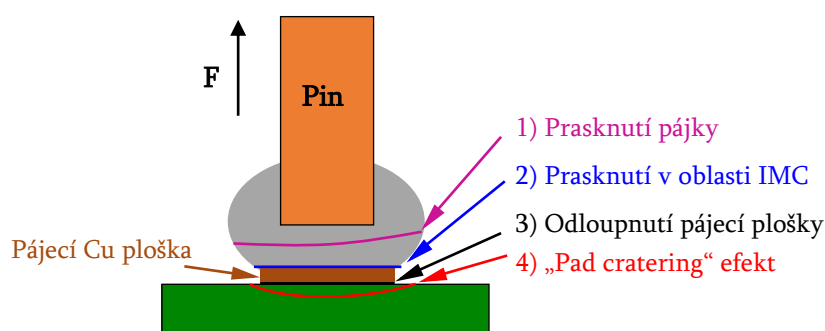
Obrázek 36 "Pad cratering" s prasklinou šířící se skrz vodivou cestu [38]

6.4.1 Testovací metody „pad crateringu“

Zkouška pádem ocelové koule je efektivní k porovnání náchylnosti materiálů DPS tvořit trhliny. Jedná se o simulaci dynamické síly, která může vzniknout při pádu. Hmotnost ocelové koule se pohybuje okolo 500 g a její dopadová rychlost se může pohybovat v rozmezí 442-5200 mm/s. Koule při tomto testu dopadá na spodní stranu podložené DPS do místa pájecí plošky. Podobnou zkouškou, při níž dochází k namáhání pájecích plošek prostřednictvím

DPS, jsou ohybové zkoušky. Při ohybových testech se například sleduje akustická emise (AE), což je spontánní uvolňování přechodných elastických vln v důsledku náhlého uvolnění energie uvnitř materiálu. [36] [37]

Mezi metody zkoumající „pad cratering“ přes kuličku pájky patří zkouška stříhem (smykem) kuličky, kdy dochází k namáhání kuličky stříhovou hlavou ze strany. Další možností je tažením kuličky pomocí speciální pinzety. V mnoha případech však dochází k poruše v pájce a „pad cratering“ může v závislosti na stavu podložky a nastavení testu v průměru představovat pouze 50 % poruch. Jako atraktivnější metoda se jeví tažení pinu (pin-pull test), u které je až 90% pravděpodobnost výskytu „pad crateringu“. Metoda spočívá v různých způsobech upevnění pinu přes pájecí kuličku k pájecí plošce. Poté dojde k uchycení pinu do čelistí a tažení. Možná místa vzniku defektu při testu tažením pinu jsou shrnuty na obrázku č. 37. [37] [38]



Obrázek 37 Klasifikace možností selhání při zkoušce tažením pinu [38]

7 TESTOVÁNÍ PÁJECÍCH PLOŠEK

Praktickým úkolem diplomové práce bylo navržení destiček pro přípravu vzorků, příprava vzorků a trhací zkoušky. Účelem této sedmé kapitoly je shrnout veškeré informace a výsledky, ke kterým jsem v průběhu přípravy a samotných zkoušek získal.

Hlavním cílem experimentu bylo stanovit vliv hodnoty teploty skelného přechodu (T_g) pryskyřice na odloupení měděné fólie – pájecí plošky popřípadě na výskyt „pad crateringu“. S ohledem na sestavu vzorku je zřejmé, že určitý vliv na výsledky při zkouškách měl pájený spoj a intermetalické sloučeniny.

7.1 Příprava experimentu

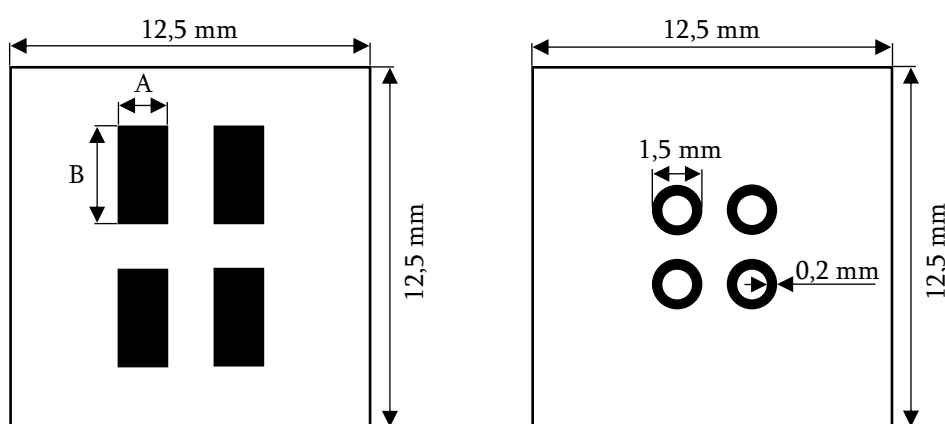
Příprava experimentu zahrnovala několik kroků, než bylo možné zahájit trhací testy. Nezbytnými fázemi přípravy, které jsou dále podrobněji popsány, jsou:

- ◆ návrh desky plošného spoje,
- ◆ výběr parametrů laminátu (T_g) a povrchových úprav pájecích plošek,

- ◆ volba pájecí pasty,
- ◆ aplikace pájecí pasty,
- ◆ osazení desek propojovacími konektory,
- ◆ konvekční přetavení,
- ◆ ruční připájení horní destičky.

7.1.1 Návrh a výběr desky plošného spoje (DPS)

Testovací vzorky bylo nutné navrhnout tak, aby bylo možné využít trhačku s trhací hlavou, která je k dispozici v laboratoři katedry. Po konzultaci s vedoucím mé práce jsem navrhl vzorky tak, že testovací vzorek je tvořen dvěma malými destičkami, které jsou propojené konektorem „deska-deska“ (viz obr. 39). Přesně se jedná o konektor od společnosti Würth Elektronik s názvem PHD Dual SMT Pin Header 2,54 mm. Konektor je měděný s pozlaceným povrchem. Rozměry konektorů jsou zřejmé z obrázku č. 39. V průřezu je konektor čtvercový s velikostí strany 0,64 mm.



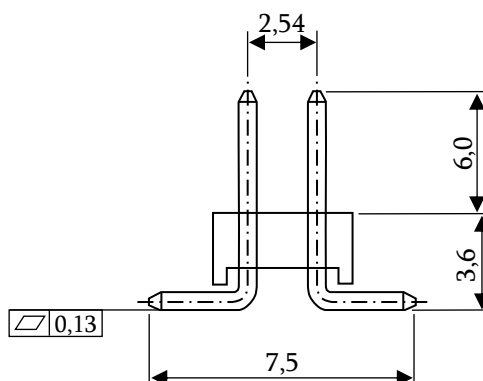
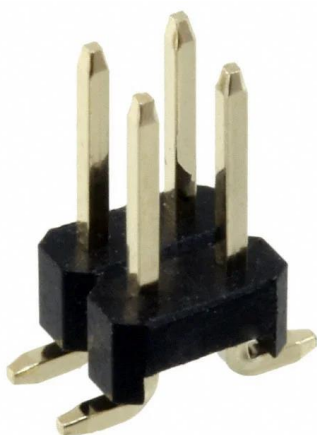
Obrázek 38 Vzor návrhu spodní a horní destičky

Návrh jsem provedl v softwaru EAGLE s využitím knihovny výrobce konektoru. Po exportu do požadovaného formátu jsem údaje předal výrobcí DPS. Na spodní destičce jsou zkušební plošky o velikosti doporučené výrobcem a dalšími třemi různými velikostmi pájecích plošek, na které byl v dalších krocích připájen konektor. Konektor slouží k napojení horní destičky, která je zde pouze pro účely zasazení do trhací hlavy a vyvolání potřebné síly.

Rozdílné parametry jsou nastaveny tak, aby bylo možné analyzovat vliv jednotlivých odlišností na výsledky zkoušek. Spodní destičky se liší v několika následujících parametrech:

- ◆ **Teplota skelného přechodu (T_g):** 135 °C, 180 °C
- ◆ **Povrchová úprava pájecích ploch:** Cu-OSP, HAL

- ◆ **Velikost pájecích ploch (rozměr A×B):** 0,8×2,8 mm; 1×3,1 mm (doporučeno výrobcem konektoru), 1,4×3,3 mm, 1,8×3,5 mm



Obrázek 39 Propojovací konektor SMD Dual Pin Header včetně jeho rozměrů.

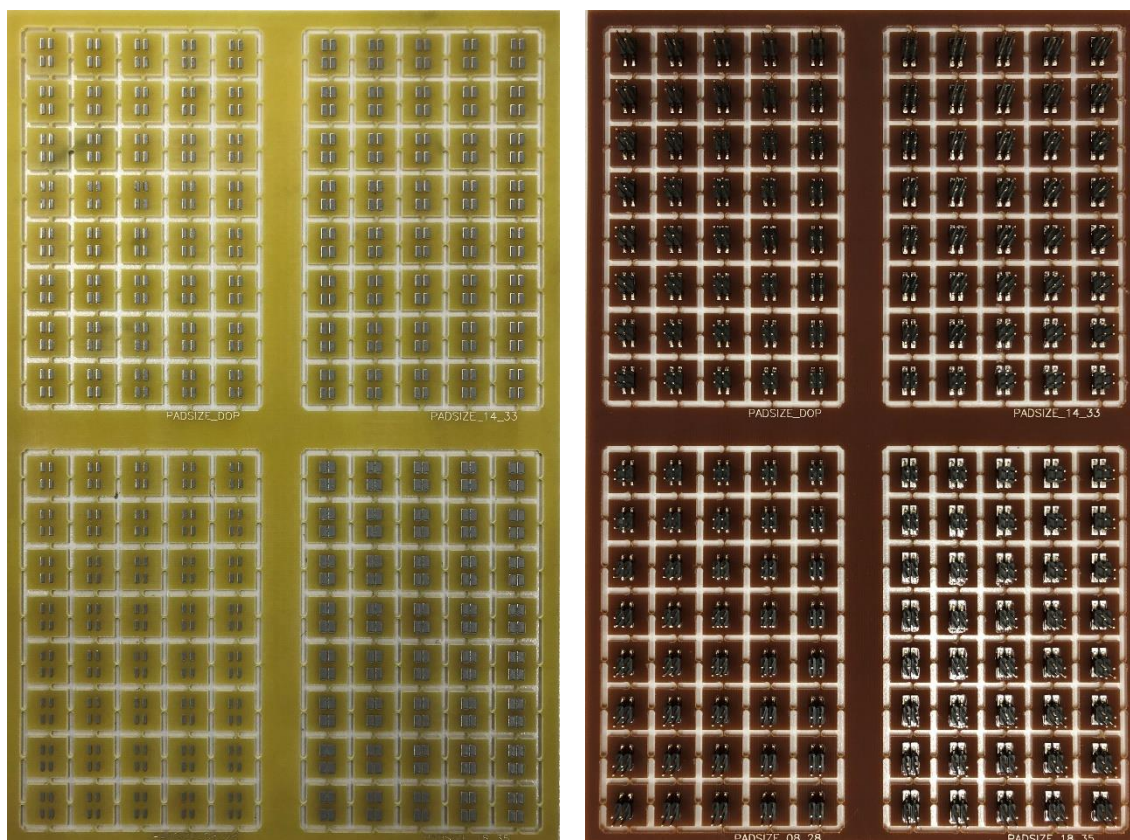
7.1.2 Pájecí pasta a její aplikace

Zvolená pasta je typu SAC o složení 95,75 % cínu, 3,5 % stříbra a 0,75 % mědi. Výrobcem pasty je Senju Manufacturing (Europe) Ltd., který ji produkuje pod obchodním názvem ECO SOLDER PASTE. Typové označení pájecí pasty je M31-GRN360-K1MK-V4. Teplota tavení se pohybuje v rozmezí 217-219 °C.

Jako velmi přesnou a efektivní metodu nanesení pájecí pasty jsem zvolil šablonový tisk. Šablonu vyrobenou pro mnou navržené motivy jsem nejprve upevnil do upínací konstrukce síťotiskového zařízení SAB 06. Tloušťka šablony činila 150 μm. Následovalo nanesení pájecí pasty na šablonu a její protlačení na pájecí plošky DPS.

7.1.3 Osazení konektorů

Podrobnější popis konektorů je uveden v kapitole 7.1.1. Vzhledem ke tvaru konektorů nebylo možné použít dostupné manipulační zařízení vhodné pro osazení SMD součástek. Proto jsem musel všechny konektory osadit ručně nebo pomocí pinzety. Snaha osadit destičky konektory byla na nejvyšší míře hlavně proto, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků vlivem špatného vycentrování konektorů na pájecích ploškách. Na obrázku č. 40 je fotografie DPS s nižším Tg (světlá varianta) s nanesenou pájecí pastou a tmavá varianta DPS s vyšším Tg již osazená a zapájená.



Obrázek 40 Vlevo světlá DPS – nižší $T_g = 135\text{ }^\circ\text{C}$, vpravo tmavá zapájená DPS – vyšší $T_g = 180\text{ }^\circ\text{C}$

7.1.4 Přetavení konvekčním ohřevem

Zapájení konektoru proběhlo pomocí pájení přetavením horkým vzduchem. Pro tyto účely je v laboratoři katedry k dispozici horkovzdušná pec Mistral 260. Pec je dopravníková s nastavitelnou rychlostí posuvu. Obsahuje dvě zóny předehřevu a jednu zónu přetavení, jejichž teploty jsou nezávisle nastavitelné na základě požadovaného teplotního profilu. Ochlazování je zajišťováno dvěma ventilátory na konci pece. Po odsouhlasení teplotního profilu rozebraného v následující kapitole bylo v předehřívacích zónách nastavena teplota $150\text{ }^\circ\text{C}$ respektive $210\text{ }^\circ\text{C}$ a zóna přetavení byla vyhřívána na teplotu $260\text{ }^\circ\text{C}$. Rychlost dopravníku byla nastavena na 15 cm za minutu.



Obrázek 41 Průběžná pájecí pec Mistral 260

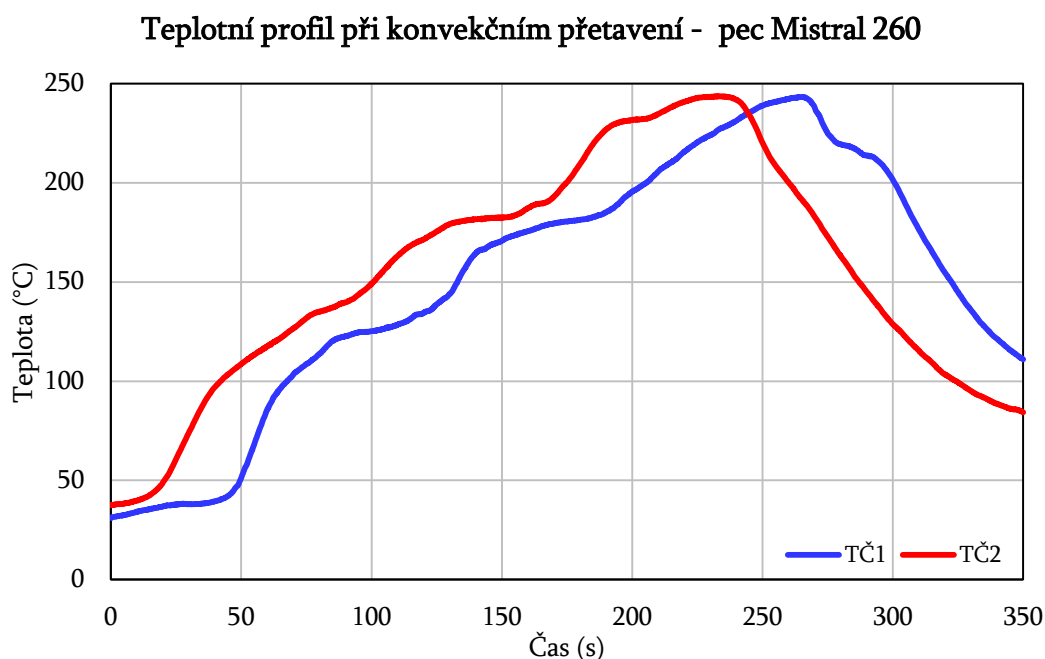
7.1.5 Teplotní profil

Vytvoření vhodného tvaru a volba číselných hodnot teplotního profilu musí být v souladu se všemi částmi DPS a s doporučením výrobce pájecí pasty. Poznatky týkající se teplotního profilu jsou podrobně rozebrány v kapitolách 2.2 a 2.3. Vzhledem k pájení již zmíněných konektorů nebylo zapotřebí teplotní profil podrobněji nastavovat, jako tomu je u složitějších DPS. Nejdůležitějším parametrem bylo dosažení maximální teploty a doby, kdy pájka setrvává s roztaveným stavu.



Obrázek 42 Profilometr KIC Explorer

Parametry teplotního profilu jsem zaznamenal a ověřil pomocí profilometru KIC Explorer 2000. Zařízení je vybaveno sedmi vstupními kanály pro připojení termočlánků. Profilometr lze přes USB rozhraní připojit k PC a prostřednictvím softwaru KIC 2000 lze data přenášet v reálném čase a sledovat tak teplotní profil na obrazovce. Termočlánky jsem upevnil na zkušební DPS a nechal ji projet skrz pec. Tento postup jsem opakoval do okamžiku, než bylo docíleno akceptovatelného teplotního profilu. Výsledný profil ze dvou termočlánků je vyneseno na grafu č. 1. Pro úplnost jsem ze zaznamenaných dat vypočetl „heating“ faktor, jehož hodnota činí 1080,8 s·K.



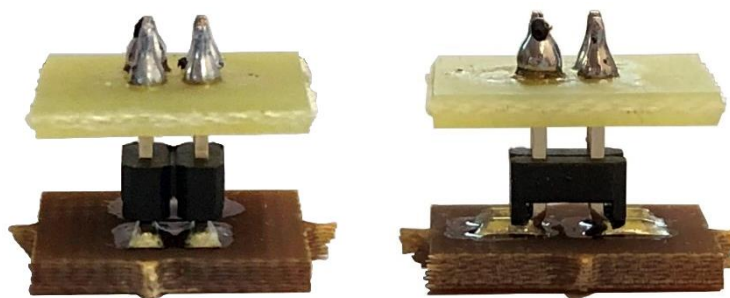
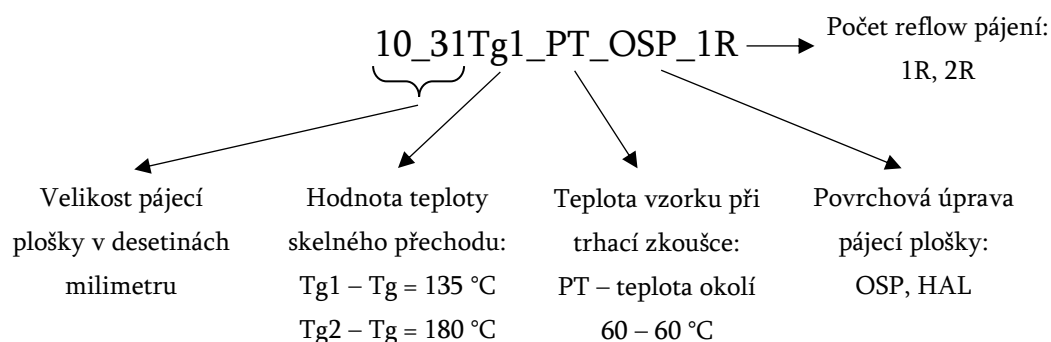
Graf 1 Teplotní profil při pájení zkušebních vzorků

Červený průběh byl zaznamenán termočlánkem v přední části zkušební DPS. Zatímco modrý průběh byl snímán pomocí termočlánku na opačném konci DPS, tudíž je časově zpožděn.

7.1.6 Dokončení přípravy vzorků

Posledním úkonem před trhací zkouškami bylo připevnit horní destičku s prokovy na konektor připájený k té spodní. Pro upevnění jsem využil běžnou hrotovou ruční páječku a pájku (Sn63Pb37) ve formě přidavného drátu. K dosažení lepšího smáčení jsem na plochy prokovů nejprve nanesl tavidlo.

Celkově jsem připravil 640 vzorků, přičemž každá varianta čítala deset kusů. Zhotovený vzorek je zachycen na obrázku č. 43. Vzorový popis jedné varianty pro orientaci ve výsledcích a grafech je uveden níže. Dvojité projetí DPS pájecí pecí, které je v názvu označeno 2R, jsem do zkoušek zařadil, z toho důvodu, aby bylo možné z technologického pohledu posoudit vliv teploty na sledované vlastnosti při pájení oboustranně osazené DPS.



Obrázek 43 Ukázka kompletně připraveného vzorku

7.2 Způsob realizace termomechanických zkoušek

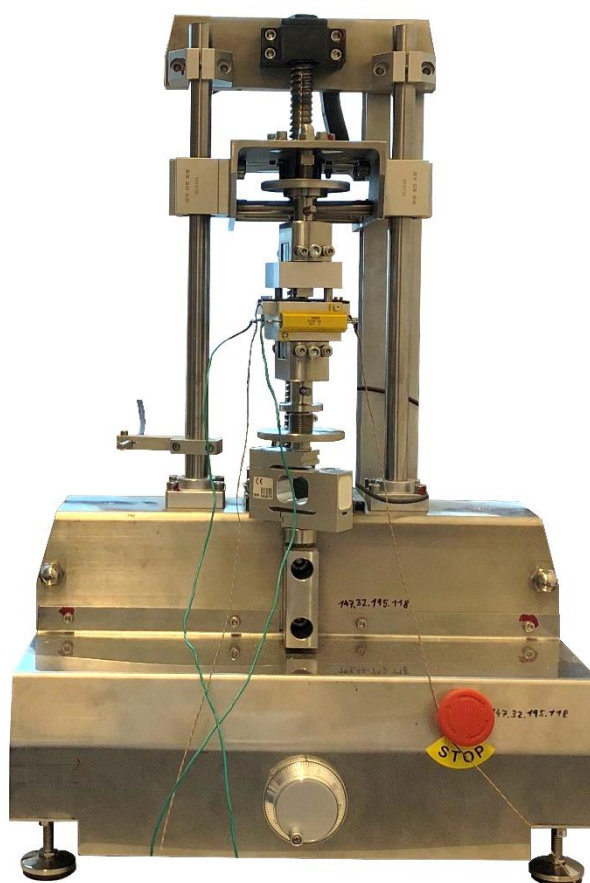
Součástí kapitoly 7.2 je popis měřícího zařízení, postup měření termomechanických zkoušek, sběr dat a jejich zpracování. Testování součástí tvořících pájený spoj je důležité, protože funkčnost zařízení je zajištěna do této doby, dokud není v jakémkoliv místě narušen elektrický obvod. Realizací termomechanických zkoušek lze posoudit, zda návrh DPS obstojí při provozu za předem stanovených podmínek. V případě, že návrh nevyhovuje tepelnému a

mechanickému zatížení, tak údaje zjištěné při zkouškách mohou posloužit jako zdroj informací pro vylepšení. I když namáhání pájeného spoje a pájecích plošek bylo zprostředkováno pinovým konektorem, lze takto získané výsledky považovat za užitečné i pro jiné typy součástek na DPS. Totéž namáhání za zvýšené teploty dodává studii na významnosti, neboť provoz zařízení při zvolené teplotě 60 °C je celkem běžným jevem.

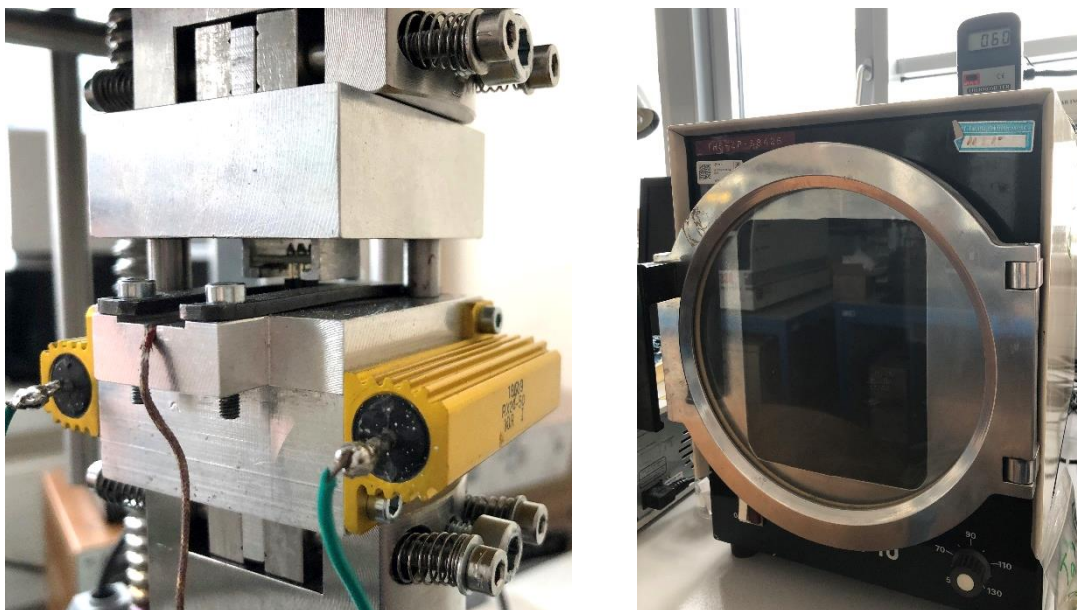
7.2.1 Deformační zařízení

Testy mechanického zatížení jsem prováděl na zkušebním deformačním zařízení DEFORM 02 od výrobce Pemar spol. s r.o. Jedná se o přesné laboratorní zařízení k reologickým zkouškám jak tahovým, tak i tlakovým v oblasti desítek milinewtonů až stovek newtonů. Rychlost deformace je nastavitelná v rozmezí 10^{-1} - 10^2 mm/min a rozlišovací schopnost je 1 mN. Na obrázku č. 44 je popsané deformační zařízení zachyceno.

Trhací hlava, jejíž detail s upevněným vzorkem je zřejmý na obrázku č. 45, byla pro ohřívací účely vybavena dvěma rezistory o velikosti 10 Ω . Rezistory byly zapojeny do série a napájeny ze stejnosměrného zdroje. Napětí na odporech bylo v průběhu zkoušek ručně regulováno, aby se teplota spodní části trhací hlavy snímaná upevněnými termočlánky pohybovala okolo hodnoty 60 °C. Samotné vzorky jsem před upevněním do trhací hlavy s dostatečným časovým předstihem předehtřival v pícce na 60 °C za účelem zajištění kompletního prohřátí vzorků. Výměna každého vzorku probíhala tak, že jsem musel povolit všechny čtyři šrouby (na obr. č. 45 jsou viditelné dva), vzorek vysunout, vyměnit za další a následně opět šrouby dostatečně utáhnout.

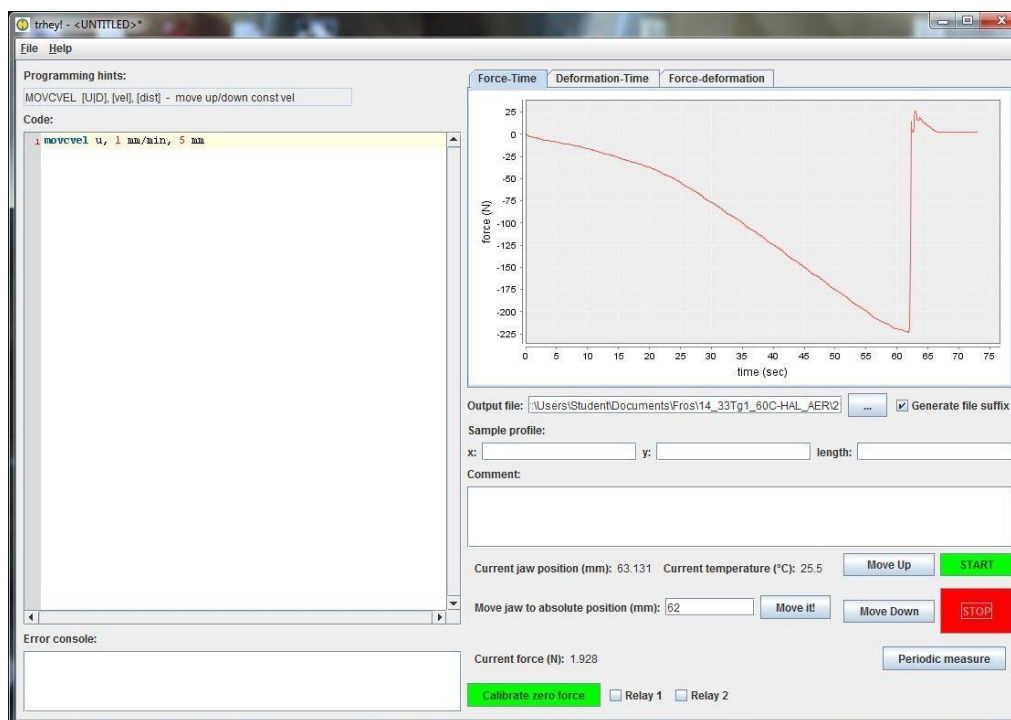


Obrázek 44 Zařízení DEFORM 02



Obrázek 45 Trhací hlava se vzorkem a pívka zahřátá na 60 °C

Pro ovládání trhačky a zaznamenávání dat jsem použil program „Trhey!“, který je součástí dodávky od výrobce. Program vyniká svojí jednoduchostí také díky soustředění všech potřebných údajů a možností ovládání na jednu obrazovku (viz obr. č. 46). Prostřednictvím tohoto softwaru je možná kompletní obsluha zařízení, jako posun čelistí do určité vzdálenosti od sebe, pohyb čelistí s definovaným krokem do stanovené vzdálenosti. Součástí programu je i okamžité vykreslování grafu (např. závislost síly na čase) z aktuálního měření. Pomocí tlačítek „START“ a „STOP“ se dává povel trhacímu zařízení k započetí nebo ukončení pohybu čelistí.



Obrázek 46 Zobrazení okna programu „Trhey!“

Rychlost posuvu čelistí jsem nastavil na hodnotu 1 mm/min. Maximální posun byl stanoven na 5 mm, nicméně jsem téměř každý test individuálně zastavoval po kompletním utrnutí konektoru. Jednoduchý příkaz zapsaný v programu, který ovládal trhačku popsáním způsobem, je patrný v příkazovém řádku vlevo nahoře na obrázku č. 46.

7.2.2 Sběr a zaznamenávání dat

Ukládání dat tvořící průběh namáhání probíhalo automaticky díky použití již popisovaného softwaru a na příslušném PC. Zaznamenávání hodnoty síly působící na vzorek a posun čelistí probíhalo přibližně každou desetinu sekundy. Vytvořené textové soubory s naměřenými údaji pro každý vzorek jsem naimportoval do programu Microsoft Excel. Zde jsem stanovil hodnotu maximální síly, kterou byl vzorek namáhán v okamžiku odtržení. Hodnoty jsem vypsal do přehledných tabulek, které jsou přiloženy k diplomové práci jako příloha. V případě, že k odtržení došlo po částech, to znamená, že se například nejprve uvolnily pouze některé plošky, tak hodnotu síly pro další analýzu jsem zvolil jako první minimum, které nastalo před částečným uvolněním. Tento jev byl v průběhu zkoušek nejtýpější pro nejmenší navržené pájecí plošky a v kombinaci s laminátem s vyšším T_g. Použil jsem termín minimum, neboť při pohybu čelisti směrem nahoru je síla zaznamenávána jako záporná, nicméně při dalším zpracování jsem již pracoval s absolutní hodnotou síly odtrhu.

Podle vizuálního výsledku zkoušky jsem si ke každému vzorku poznamenal, kolik pájecích plošek se z celkového počtu na jednom vzorku (4 ks) odtrhlo od substrátu. Můj původní předpoklad byl, že by mohlo docházet ke třem možnostem, kde dojde k narušení spoje. Během zkoušek se však objevily pouze dva případy, a to odtržení/odloupnutí pájecí plošky a vytržení konektoru z pájecí slitiny na rozhraní vývod pájecí slitina. Proto je v tabulkách s naměřenými hodnotami sil uveden pouze počet utrnutých pájecích ploch. Zbýlý počet tvoří druhá zmíněná porucha. Poškození spoje v IMC mezi pájecí plochou a pájkou nenastalo v žádném případě.

7.2.3 Zpracování dat

Po vypsání všech hodnot síly odtrhu jsem přistoupil k jejich dalšímu zpracování, aby bylo možné jednotlivé varianty mezi sebou porovnat. Pro tyto účely jsem do výpočtů zařadil aritmetický průměr, výběrový rozptyl a výběrovou směrodatnou odchylku. Vzorce (20-22) pro výpočty těchto ukazatelů jsou ve stejném pořadí součástí této podkapitoly. Rozptyl a směrodatná odchylka patří mezi nejpoužívanější míry variability zkoumaných veličin. Určují proměnlivost (rozptýlení a odchýlení) naměřených hodnot okolo jejich střední hodnoty (aritmetického průměru). Konkrétně velikost hodnoty směrodatné odchylky určuje, jak se jednotlivé hodnoty od sebe liší v rámci celého souboru hodnot. Malá hodnota odchylky

vypovídá vysoké míře podobnosti. U velké hodnoty je tomu naopak. Dále jsem z naměřených údajů vytvořil tzv. krabicové grafy, pro jejichž vytvoření je potřebné stanovit další ukazatele. Pomocí funkcí v programu Microsoft Excel jsem určil první a třetí kvartil, druhý kvartil neboli medián a minimální a maximální hodnotu. Kvartily jsou speciálním typem kvantilů a rozdělují uspořádanou řadu hodnot na 4 stejné části. Například první (dolní) kvartil odděluje 25 % jednotek s nejnižšími hodnotami.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (20)$$

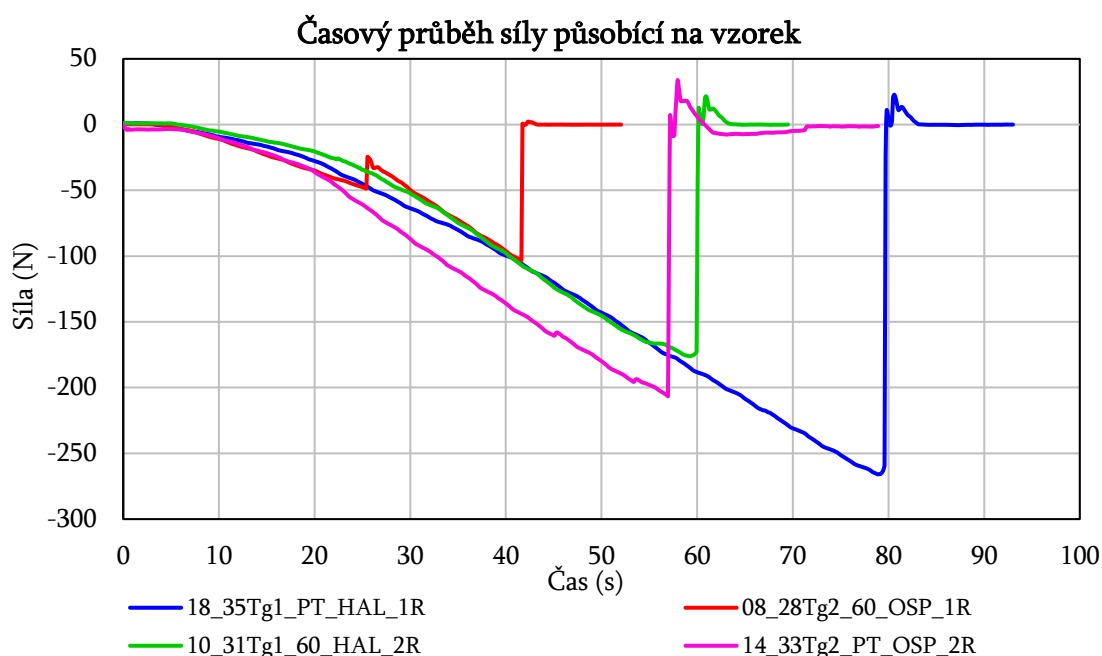
$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (21)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (22)$$

kde x_i je i -tá naměřená hodnota a n je celkový počet naměřených hodnot u dané varianty vzorku.

7.3 Výsledky termomechanických zkoušek

7.3.1 Průběh mechanické zkoušky



Graf 2 Ukázka časové závislosti síly pro různé typy vzorků

Na přiloženém grafu č. 2 jsou patrné typické průběhy při namáhání testovaných vzorků silou v normálovém směru. Do grafu jsem zahrnul průběhy pro všechny velikosti pájecích

plošek, přičemž na červeném průběhu je patrné předčasné uvolnění některé pájecí plochy či narušení pájeného spoje. Jak již bylo řečeno, při takto výrazném „zubu“ na průběhu jsem vzal v potaz pro další výpočty právě „první minimální“ hodnotu. Všechny 632 vzorků (zbylých 8 kusů bylo podrobena mikrovýbrusům) jsem tímto způsobem s velmi obdobnými průběhy otestoval. Odečtení hodnoty síly jsem rovněž popsal v přechozích kapitolách.

7.3.2 Vypočtené hodnoty, grafické srovnání a vyhodnocení výsledků

Následující tabulky č. 9 a 10 obsahují některé vypočtené hodnoty popsané v kapitole 7.2.3. Jejich porovnání pak nabízí vytvořené grafy. Graf č. 3 znázorňuje ve formě sloupců aritmetické průměry naměřených hodnot včetně průměrného počtu odtržených pájecích ploch. Modré sloupce a zelený průběh přísluší vzorkům, které byly vystaveny jednomu pájení přetavením (1R). Červené sloupce a černý průběh platí pro vzorky po dvojitým přetavením (2R). Díky počtu odtržených ploch je možné usuzovat, jaká část daného typu vzorku je méně odolná a při pohledu na hodnoty určit, jaká ze dvou zmíněných variant selhání se více podílí na průměrné hodnotě síly odtrhu.

Porovnáním hodnot v grafech č. 3 a 4 je možné shrnout některé následující poznatky. Očekávaným jevem je, že s rostoucími plochami pájecích plošek roste síla odtrhu u všech zkoumaných variant. Zajímavým nálezem je, že průměrná síla pro daný vzorek s nižším Tg je svou velikostí velmi blízká průměrné síle vzorku s vyšším Tg a pájecími plochami o jednu úroveň většími. S tím se pojí jeden z nejdůležitějších výsledků z celé provedené studie, neboť z naměřených dat jasně vyplývá větší odolnost laminátu s nižším Tg (135 °C) vůči odtrhu pájecí plošky. Tento jev je s největší pravděpodobností způsoben vyšší tekutostí pryskyřice s nižší teplotou skelného přechodu při procesu lisování měděné fólie na laminát a vznikem lepší vazby mezi těmito dvěma materiály. Zvýšená teplota (60 °C) má na výslednou sílu poměrně malý vliv, ale pohledem na graf č. 3 (srovnání levé části – hodnot pro PT - a pravé části – hodnot pro 60 – zeleného a černého průběhu) lze říci, že zkoušky provedené za zvýšené teploty vedly k zvýšenému počtu odtržených pájecích plošek. Jinak v případě vzorků s hodnotou Tg 135 °C je u většiny variant zaznamenán mírný pokles síly odtrhu. U vzorků s hodnotou Tg 180 °C byl trend velmi rozmanitý. U některých variant jsem detekoval dokonce mírný nárůst odolnosti proti odtržení. Pokud k poklesu došlo, tak ještě k menšímu než u vzorků Tg1.

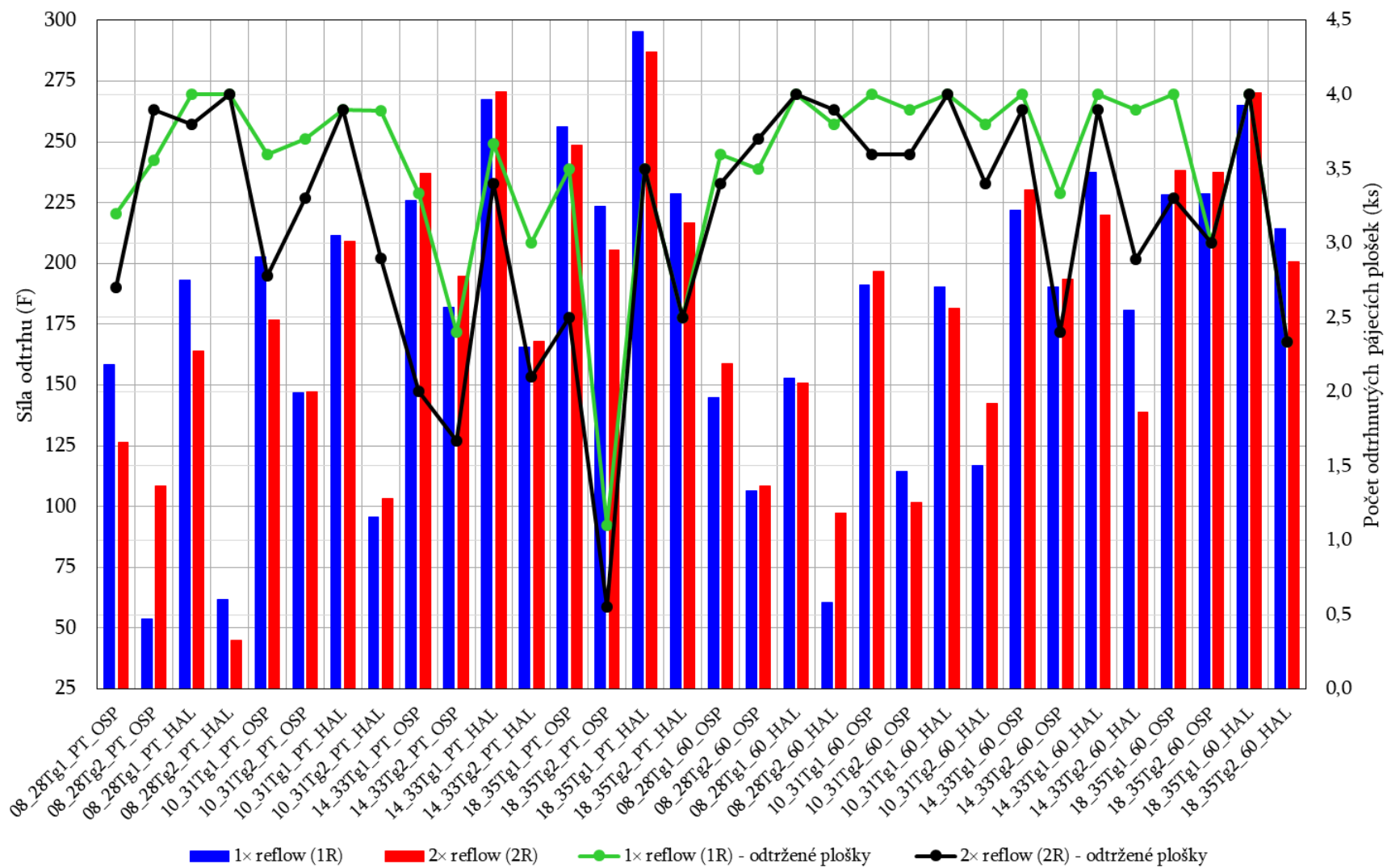
Dopad na výsledky z hlediska povrchových úprav je rovněž pozorovatelný. Vzorky s Tg1 a povrchovou úpravou HAL mají odolnost vůči odtržení vyšší, než ty ošetřené organickým povlakem (OSP). Nejvýraznější projev vlivu povrchové úpravy je u vzorků testovaných při pokojové teplotě a po jednom přetavení. Zde průměrná síla je u vzorků s úpravou HAL téměř vždy vyšší. Zmíněný poznatek je v rozporu s osobní předpokladem, který jsem měl před samotnými zkouškami. Původní hypotéza (*pokračování na str. 81*)

Tabulka 9 Vypočtené hodnoty pro vzorky 1R

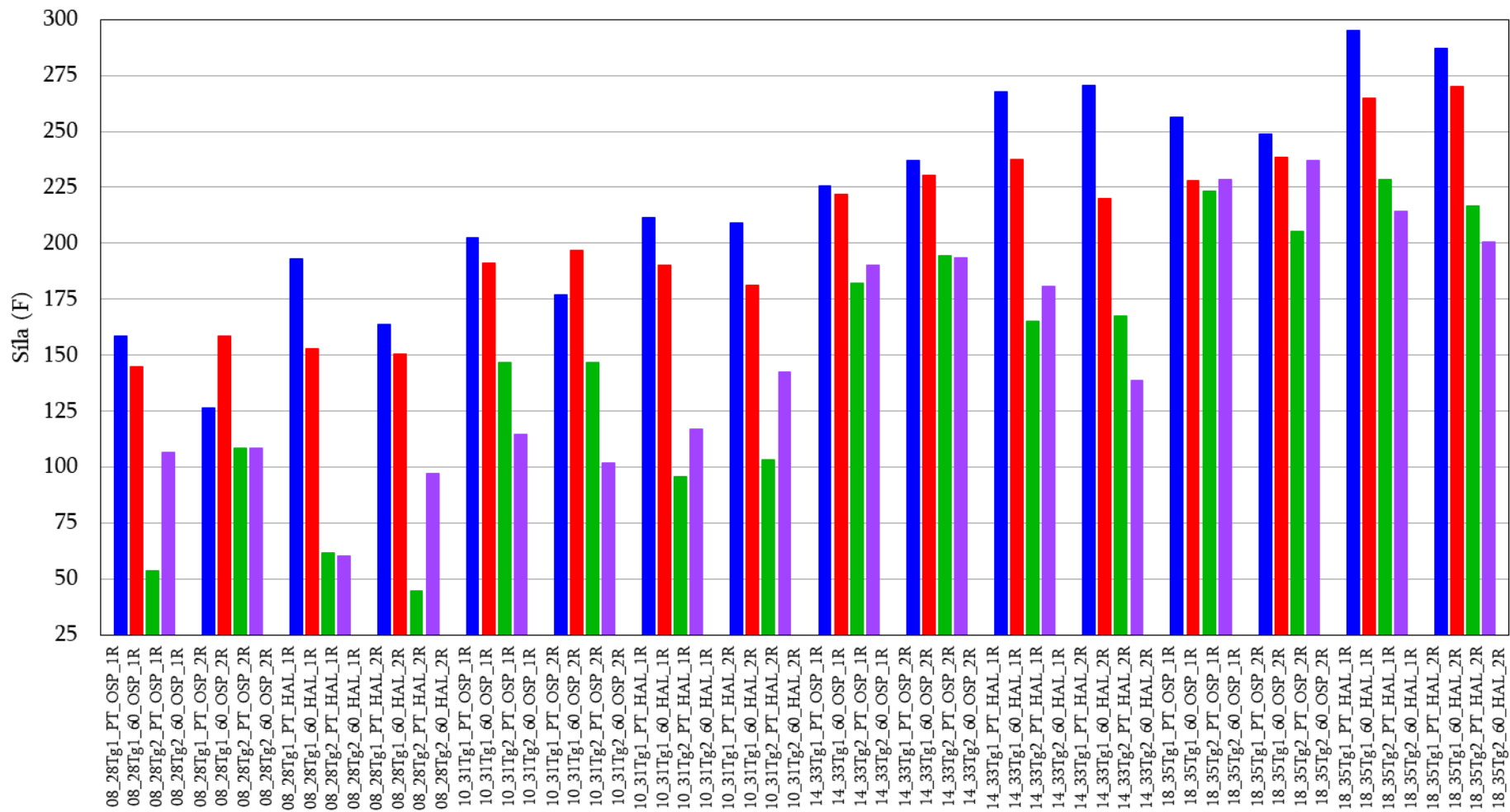
Typ vzorku	08_28Tg1_PT_OSP_1R	08_28Tg2_PT_OSP_1R	08_28Tg1_PT_HAL_1R	08_28Tg2_PT_HAL_1R	10_31Tg1_PT_OSP_1R	10_31Tg2_PT_OSP_1R	10_31Tg1_PT_HAL_1R	10_31Tg2_PT_HAL_1R	14_33Tg1_PT_OSP_1R	14_33Tg2_PT_OSP_1R	14_33Tg1_PT_HAL_1R	14_33Tg2_PT_HAL_1R	18_35Tg1_PT_OSP_1R	18_35Tg2_PT_OSP_1R	18_35Tg1_PT_HAL_1R	18_35Tg2_PT_HAL_1R
Průměr odtržených pájecích plošek (ks)	3,20	3,56	4,00	4,00	3,60	3,70	3,90	3,89	3,33	2,40	3,67	3,00	3,50	1,10	3,50	2,50
Aritmetický průměr (N)	158,6	53,7	193,0	61,9	202,6	146,9	211,4	95,6	225,7	182,1	267,6	165,4	256,2	223,3	295,3	228,6
Rozptyl	2623,6	369,9	735,5	801,9	2566,6	2390,3	1952,6	1133,2	813,2	2384,0	870,2	1698,2	1574,1	1250,9	229,1	1574,1
Směrodatná odchylka (N)	51,2	19,2	27,1	28,3	50,7	48,9	44,2	33,7	28,5	48,8	29,5	41,2	39,7	35,4	15,1	39,7
Typ vzorku	08_28Tg1_60_OSP_1R	08_28Tg2_60_OSP_1R	08_28Tg1_60_HAL_1R	08_28Tg2_60_HAL_1R	10_31Tg1_60_OSP_1R	10_31Tg2_60_OSP_1R	10_31Tg1_60_HAL_1R	10_31Tg2_60_HAL_1R	14_33Tg1_60_OSP_1R	14_33Tg2_60_OSP_1R	14_33Tg1_60_HAL_1R	14_33Tg2_60_HAL_1R	18_35Tg1_60_OSP_1R	18_35Tg2_60_OSP_1R	18_35Tg1_60_HAL_1R	18_35Tg2_60_HAL_1R
Průměr odtržených pájecích plošek (ks)	3,60	3,50	4,00	3,80	4,00	3,90	4,00	3,80	4,00	3,33	4,00	3,90	4,00	3,00	4,00	2,33
Aritmetický průměr (N)	144,8	106,6	152,8	60,4	191,1	114,7	190,5	116,8	221,9	190,4	237,4	180,9	228,2	228,5	265,1	214,2
Rozptyl	1247,1	2163,3	1092,9	1045,8	1626,0	2431,8	946,4	1661,6	1080,1	1277,0	179,2	1059,4	995,5	951,8	135,8	1481,9
Směrodatná odchylka (N)	35,3	46,5	33,1	32,3	40,3	49,3	30,8	40,8	32,9	35,7	13,4	32,5	31,6	30,9	11,7	38,5

Tabulka 10 Vypočtené hodnoty pro vzorky 2R

Typ vzorku	08_28Tg1_PT_OSP_2R	08_28Tg2_PT_OSP_2R	08_28Tg1_PT_HAL_2R	08_28Tg2_PT_HAL_2R	10_31Tg1_PT_OSP_2R	10_31Tg2_PT_OSP_2R	10_31Tg1_PT_HAL_2R	10_31Tg2_PT_HAL_2R	14_33Tg1_PT_OSP_2R	14_33Tg2_PT_OSP_2R	14_33Tg1_PT_HAL_2R	14_33Tg2_PT_HAL_2R	18_35Tg1_PT_OSP_2R	18_35Tg2_PT_OSP_2R	18_35Tg1_PT_HAL_2R	18_35Tg2_PT_HAL_2R
Průměr odtržených pájecích plošek (ks)	2,70	3,90	3,80	4,00	2,78	3,30	3,90	2,90	2,00	1,67	3,40	2,10	2,50	0,56	3,50	2,50
Aritmetický průměr (N)	126,3	108,5	164,0	44,9	176,8	147,0	209,2	103,2	236,9	194,7	270,8	167,8	248,6	205,3	287,0	216,6
Rozptyl	1155,3	1046,8	1248,1	282,7	800,0	559,9	1315,9	883,7	629,9	392,9	596,6	1411,3	882,1	911,4	282,3	1023,6
Směrodatná odchylka (N)	34,0	32,4	35,3	16,8	28,3	23,7	36,3	29,7	25,1	19,8	24,4	37,6	29,7	30,2	16,8	32,0
Typ vzorku	08_28Tg1_60_OSP_2R	08_28Tg2_60_OSP_2R	08_28Tg1_60_HAL_2R	08_28Tg2_60_HAL_2R	10_31Tg1_60_OSP_2R	10_31Tg2_60_OSP_2R	10_31Tg1_60_HAL_2R	10_31Tg2_60_HAL_2R	14_33Tg1_60_OSP_2R	14_33Tg2_60_OSP_2R	14_33Tg1_60_HAL_2R	14_33Tg2_60_HAL_2R	18_35Tg1_60_OSP_2R	18_35Tg2_60_OSP_2R	18_35Tg1_60_HAL_2R	18_35Tg2_60_HAL_2R
Průměr odtržených pájecích plošek (ks)	3,40	3,70	4,00	3,90	3,60	3,60	4,00	3,40	3,90	2,40	3,90	2,89	3,30	3,00	4,00	2,33
Aritmetický průměr (N)	158,6	108,5	150,8	97,4	196,7	101,7	181,5	142,4	230,2	193,7	220,0	139,0	238,3	237,3	270,3	200,7
Rozptyl	1314,7	901,5	999,0	848,0	519,4	2133,0	839,1	1044,8	675,8	787,3	480,3	478,1	249,8	442,3	110,1	763,5
Směrodatná odchylka (N)	36,3	30,0	31,6	29,1	22,8	46,2	29,0	32,3	26,0	28,1	21,9	21,9	15,8	21,0	10,5	27,6



Graf 3 Srovnání průměrných hodnot síly odtrhu a počtu odtržených pájecích plošek



Graf 4 Porovnání průměrné síly odtrhu - stejná velikost plošky a povrch. úprava, různá teplota a Tg

byla taková, že při aplikaci vrstvy HAL dochází k tepelnému ovlivnění laminátu popřípadě pryskyřice a zároveň k narušení soudržnosti fólie a substrátu. Výsledky ve formě vyšší síly odtrhu však dokazují nesprávnost předpokladu a pro vzorky testované při pokojové teplotě je zřejmé posílení vazby mezi Cu fólií a laminátem při aplikaci úpravy pájecích plošek typu HAL. Výraznější rozdíl síly odtrhu je pozorovatelný u pájecích ploch větších rozměrů. Při testech za zvýšené nebo při testování vzorků zatížených dvojitým přetavením je rozdíl velikosti menší nebo je trend klesající. Jiná situace nastala u vzorků Tg2, u kterých je patrná nižší síla odtrhu pro vzorky HAL ve srovnání s OSP. Rozdíl průměrné hodnoty síly potřebné k odtržení se s rostoucími plochami stírá. Vzorky 18_35 už vykazují de facto stejnou odolnost nezávisle na povrchové úpravě.

Pro lepší přehlednost a podpoření závěrů výše vyřčených jsem do přílohy zařadil sloupcové grafy s pouze některými vybranými typy vzorků. Graf I na straně VII přílohy srovnává sílu potřebnou k odtržení pájecí plošky v závislosti na teplotě skelného přechodu pryskyřice použité při výrobě laminátu. Na grafu II porovnávám průměr naměřených hodnot za různých teplotních podmínek při trhací zkoušce a rozdílném Tg. Vyhodnocení vlivu povrchových úprav pájecích plošek nabízí graf III.

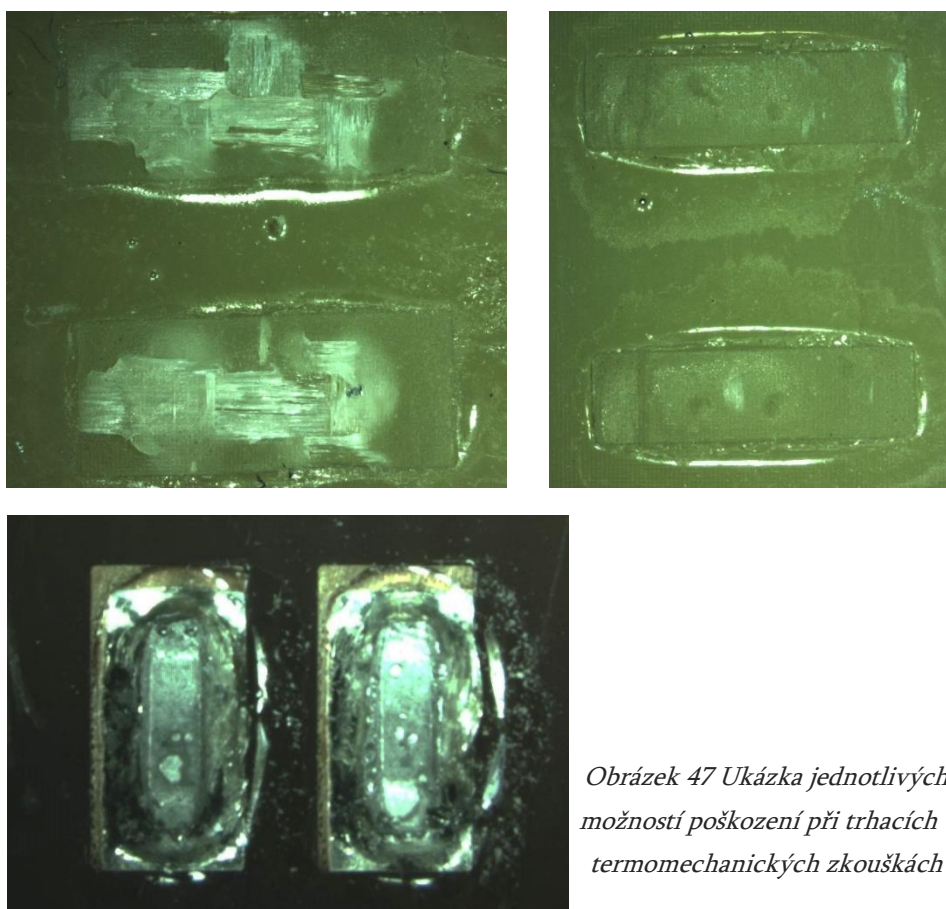
Dvojitě přetavení (viz graf č. 3) nevykazuje jak z hlediska průměrné síly, tak i z počtu odtržených pájecích plošek žádný obecný vliv na výsledky studie. Pouze mírnou tendenci lze spatřit v tom, že v případě destiček s hodnotou Tg 180 °C a větších pájecích ploch je počet odtržených ploch menší. To je pravděpodobně dáno tím, že odolnost vůči působící síle je u pájecí plošky větší, než které je schopna odolávat IMC vrstva. Zcela se nepotvrdil předpoklad, že dalším tepleným ovlivněním DPS a pájeného spoje dojde k celkovému oslabení této soustavy.

Seřazením směrodatné odchylky podle její velikosti jsem zjistil, že nejmenších hodnot nabývá pro vzorky s největší velikostí pájecích plošek a zároveň jsou to vzorky typu Tg1 s úpravou plošek HAL. Prvních šest nejmenších hodnot σ obsahuje všechny čtyři kombinace dvou zmíněných parametrů. Největší hodnoty byly výpočtem stanoveny pro velikosti pájecích plošek 08_28 a 10_31 v kombinaci s parametry Tg2, OSP a 1R.

Další možnost porovnání nabízí krabicové grafy, které je možné nalézt v příloze. Krabicové grafy znázorňují význačné hodnoty včetně rozložení těch naměřených. Pokud se některá hodnota nachází nad nebo pod koncem „vousku“, tak je z toho důvodu, že se jedná o odlehlou hodnotu. Odlehlá hodnota se zjistí, tak že po výpočtu kvartilového rozpětí, které se stanoví jako rozdíl třetího a prvního kvartilu, jeho hodnota vynásobí 1,5 krát. Takto stanovená hodnota se odečte o prvního kvartilu, popřípadě přičte ke třetímu, a pokud je minimální nebo maximální hodnota mimo tento interval, tak jde o hodnotu odlehlou. Minimum či maximum se pak do grafu vykreslí jako ta hodnota, která se nachází ve vypočteném intervalu.

7.3.3 Mikroskopické snímky

Snímky jsem provedl po ukončení trhacích zkoušek pro poukázání, v jakých oblastech docházelo k utržení. Obrázky jsou pořízené na optickém systému HAWK QC 5000 při různých zvětšeních. Na obrázku č. 47 vpravo nahoře je patrné čisté odtržení samotných pájecích plošek. Odlišnost je viditelná na obrázku vlevo nahoře, kde došlo odtržení pájecí plošky včetně pryskyřice pokrývající skelná vlákna, které jsou na stejném obrázku pozorovatelná. Spodní obrázek znázorňuje poškození spoje na rozhraní nožičky konektoru a pájecí slitiny. Po hlubším průřezu nešlo stanovit určitý trend těchto dvou jevů



Obrázek 47 Ukázka jednotlivých možností poškození při trhacích - termomechanických zkouškách

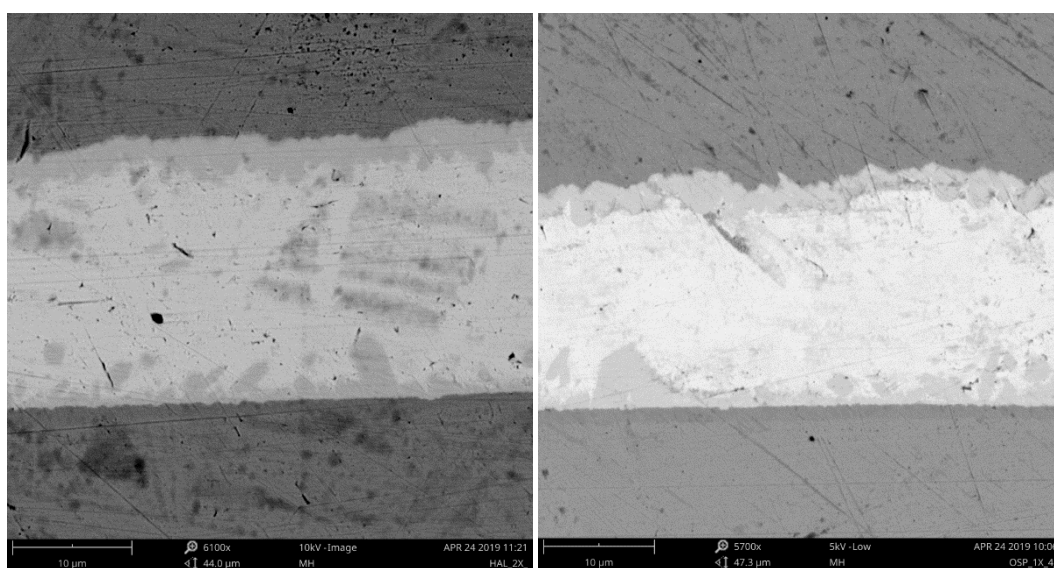
7.4 Analýza intermetalických vrstev

Hodnotit složení a tloušťku intermetalické vrstvy je možné po zhotovení mikrovýbrusů. Neboť jsem IMC pozoroval pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM), tak na základě tohoto faktu musely být připraveny i mikrovýbrusy. Vytvoření mikrovýbrusu je pro pozorování elektronovým mikroskopem založeno na zalití upevněného vzorku v zalévací formě do vodivého polymeru. Po zatvrdnutí směsi dochází k broušení brusným materiálem se snižující se velikostí brusných zrn. Nakonec se vzorek patřičně vyleští. Připravený vzorek se vloží do elektronové mikroskopu. Vhodným nastavením všech parametrů (např. urychlovací napětí) a prostřednictvím PC jsem zaznamenal několik obrázků, u nichž jsem

následně hodnotil tloušťku IMC. Do analýzy jsem zařadil celkem čtyři variant vzorků. Jednalo se o typy HAL_1R, HAL_2R, OSP_1R a OSP_2R.

7.4.1 Snímky IMC

Přiložené obrázky znázorňují dvě zřejmě viditelné intermetalické vrstvy. Vlevo je HAL_2R a vpravo OSP_1R. V horních částech je možné spatřit IMC mezi pájecí ploškou a pájkou. Dole je IMC na rozhraní konektor a pájecí slitina. IMC se jeví i podle dalších snímků v případě OSP jako méně homogenní, než je tomu u HAL, u kterého je IMC více souvislá bez většího počtu extrémů v tloušťce. Tvar i tloušťka IMC jsou v místě napojení konektoru (spodní část spoje na obr. č. 48) velmi rozmanité. To může být jednou z příčin kromě rozdílu ploch pájecí plošky a konektoru, která se podílí na poškození spoje v tomto místě při trhacím testu.



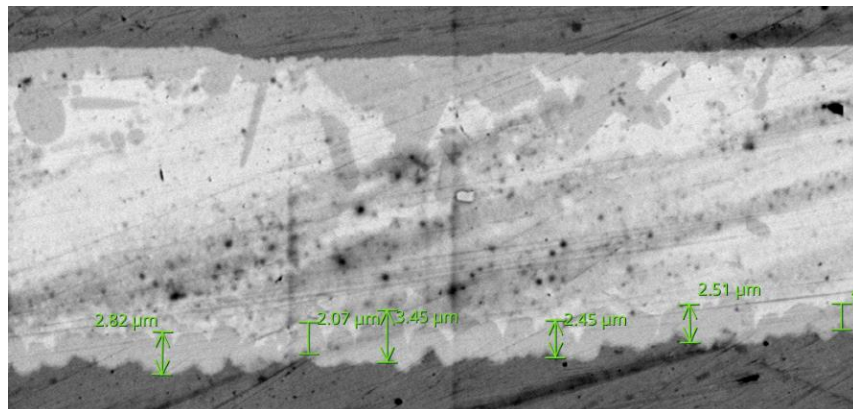
Obrázek 48 Mikroskopické snímky IMC

7.4.2 Měření tloušťky IMC

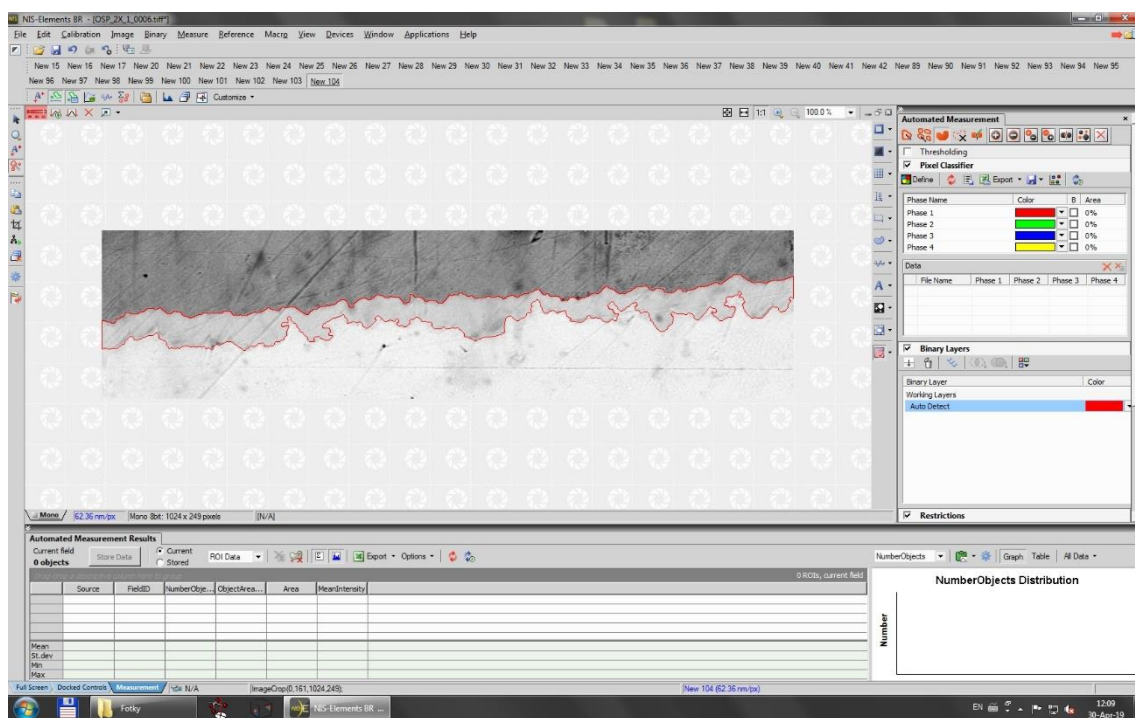
Změřit tloušťku IMC je možné několika způsoby. Příkladem může být obrázek č. 49, na kterém jsou umístěny kóty znázorňující tloušťku v daném místě. Takové měření je však velmi přibližné a pouze orientační. Proto jsem v programu NIS-Elements přistoupil k variantě založené na výběru IMC na obrázku (viz. obr. č. 50) a následného vytvoření binárního obrazu, jako tomu je na obrázku č. 51. Kalibrační snímku pomocí měřítka jsem stanovil skutečnou velikost jednoho pixelu. V dalším kroku jsem v softwaru Mathematica vytvořil program, kterým jsem stanovil počet bílých pixelů v jedné sloupci a ten vynásobil zjištěnou kalibrační konstantou. Z vypočtených tloušťek jsem vypočetl aritmetický průměr a určil medián. V tabulce č. 11 jsou již určené aritmetické průměry z aritmetických průměrů pro jednotlivé varianty. Všechny zjištěné hodnoty jsou dostupné v příloze. Hodnoty průměru naznačují, že tloušťka IMC je pro HAL tenčí oproti OSP a v případě dvojitého přetavení je patrný nárůst tloušťky. Přičemž nárůst u OSP je výraznější.

Tabulka 11 Naměřené tloušťky IMC

Typ vzorku	HAL_1R	HAL_2R	OSP_1R	OSP_2R
Arit. Průměr (μm)	2,635	2,888	2,773	3,393



Obrázek 49 Orientační měření tloušťky IMC okótováním



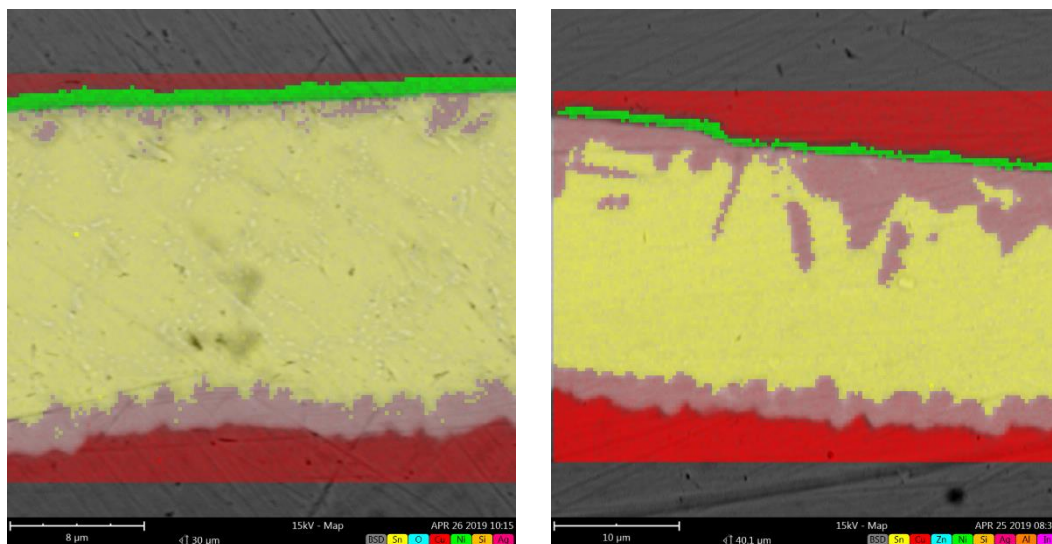
Obrázek 50 Výběr IMC vrstvy v softwaru NIS-Elements



Obrázek 51 Obráz – binární mapa IMC sloužící k výpočtu její tloušťky

7.4.3 Prvková analýza

Zaznamenané obrázky jsem pro ukázkou nechal podrobit prvkové analýze. Na obrázcích je zřejmé, jaké prvky se ve spoji vyskytují a podílí se na jeho struktuře. Kromě běžných prvků mědi a cínu a jejich sloučenin se ve větším množství vyskytuje pouze nikl. Nikl je v místě napojení konektoru a figuruje zde jako pozůstatek jeho povrchové úpravy. Zlato jako další část povrchové úpravy a stříbro jakou součást pájecí slitiny jsou zastoupeny ve velmi malém množství, a proto nejsou na sdružené prvkové mapě spatřitelné.



Obrázek 52 Prvková mapa zkoumaného pájeného spoje (vlevo HAL a vpravo OSP)

8 ZÁVĚR

Úvodní teoretická část byla věnována všem podstatným tématům, tak aby korespondovala s problematikou studovanou při praktických zkouškách. Kromě možnosti hromadného pájení jsem se zabýval technologií desek plošných spojů, u nichž jsem se zaměřil na výrobu a vlastnosti laminátu a měděné fólie. V případě pryskyřic tvořících jednu ze složek laminátů jsem vyzdvihl pojem teplota skelného přechodu (T_g), jako důležitý parametr pro posuzování tepelné odolnosti DPS. Popisem používaných úprav pájecích plošek jsem nastínil problematiku chemického a tepelného ovlivnění DPS při aplikaci těchto vrstev. Ke značnému tepelnému působení na DPS dochází ve výrobě při nanesení povrchové úpravy HAL, proto byl tento typ zařazen do praktických zkoušek. V kapitole o povrchových úpravách jsem rovněž shrnul jejich výhody a nevýhody. Dále jsem uvedl několik informací o intermetalických sloučeninách, které jsou nutnou podmínkou vzniku pájeného spoje. Mají velký vliv na jeho životnost a spolehlivost. Nakonec jsem do teoretické části zařadil spolehlivost pájených spojů. Nejprve jsem popsal mechaniku spoje a následně několik běžně využívaných mechanických a tepelných zkoušek. Součástí šesté kapitoly je popis „pad crateringu“, který byl v podstatě cílem studie praktické části, a to v závislosti na několika různých parametrech.

Praktická část zahrnovala několik částí. Nejprve bylo nutné navrhnout zkušební destičky pro dostupnou trhací hlavu. Všechny tři části (spodní destička, pinový konektor, horní destička) tvořící výsledný vzorek, který se mohl vložit do trhací hlavy, se následně musely spojit. Po zhotovení testovacích vzorků jsem přistoupil k trhacím testům na deformačním zařízení. Veškeré naměřené hodnoty jsem zaznamenal a na základě nich jsem provedl srovnání jednotlivých zkoumaných variant. Z naměřených hodnot jsem vypočetl některé ukazatele. Grafické i slovní zhodnocení výsledků jsem uvedl jako součást podkapitoly 7.3.2. Za nejdůležitější výsledek, který stojí za to vyzdvihnout, je lepší adheze měděné fólie (pájecích ploch) k laminátu s nižší hodnotou T_g . Součástí experimentální části je i studium intermetalických vrstev, konkrétně jejich složení a tloušťka. Pro obě hodnocení posloužily připravené mikrovýbrusy vzorků a následné zkoumání pomocí skenovacího elektronového mikroskopu. Součástí výsledků je postup a výsledek měření tloušťky IMC. Vliv IMC na měření přilnavosti pájecích ploch byl pouze u některých typů vzorků. U většiny docházelo k odtržení pájecí plošky od laminátu, než k porušení pájeného spoje v místě IMC.

Ze studie provedené v rámci diplomové práce vyplývá, že míra adheze pájecích plošek může být ovlivněna několika parametry. Proto se zde vidím možnost pokračování ve zkoumání této problematiky, ať už za použití testovacích metod popsaných v diplomové práci nebo při zvolení jiných parametrů vzorků popřípadě podmínek (teplota, tepelné cyklování, vlhkost atd.) ovlivňující vlastnosti vzorků, a tím i výsledky zkoušek.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

- THT** (Through-hole Technology) – osazování DPS součástkami s drátovými vývody
- THD** (Through-hole Device) – součástka s drátovými vývody
- SMT** (Surface Mount Technology) – technologie povrchové montáže součástek
- SMD** (Surface Mount Device) – součástka pro povrchovou montáž plošných spojů
- DPS** (Deska plošného spoje)
- SOIC** (Small Outline Integrated Circuit) – pouzdro pro integrovaná obvod IO
- SOT** (Small Outline Transistor) – pouzdro pro tranzistor
- QFP, QFN** (Quad Flat Pack) – čtvercové ploché pouzdro, vývody jsou vyvedeny do všech čtyř stran součástky
- PQFP** (Plastic Quad Flat Pack) – plastové pouzdro
- PLCC** (Plastic Leadless Chip Carrier) - plastové bezvývodové pouzdro
- BGA** (Ball Grid Array) – pouzdro integrovaného obvodu pro povrchovou montáž, vývody pouze ze spodní strany a jsou uspořádány do pravoúhlé mřížky
- LGA** (Land Grid Array)
- μBGA** (micro Ball Grid Array) – BGA s menší roztečí vývodů
- RoHS** (Restriction of the use of certain Hazardous Substances) - omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních
- T_g** (Glass transition temperature) – teplota skelného přechodu
- T_d** (Decomposition temperature) – teplota rozkladu
- TMA** (Thermomechanical analysis) – termomechická analýza k určení T_g
- DSC** (Differential scanning calorimetry) – diferenční kompenzační kalorimetrie (vhodná ke stanovení T_g)
- Cu-OSP** (Cuprum organic solderability preservative)
- ENIG** (Electroless nickel immersion gold)
- HASL/HAL** (Hot Air Solder Level)
- PTH** (Plated through hole) – pokovené otvory
- ICT** (In-circuit test)
- IMC** (Intermetallic Compound) – intermetalická sloučenina
- MTTF** (Mean Time to Failure) – střední doba do poruchy
- FR4** (Flame Retardant 4) – materiál desky plošného spoje
- CTE** (Coefficient of thermal expansion) – teplotní součinitel roztažnosti
- CSP** (Chip scale package)

BIBLIOGRAFIE

- [1] STRAUSS, Rudolf. *SMT soldering handbook*. 2nd ed. Boston: Newnes, 1998. ISBN 978-075-0635-899.
- [2] PRASAD, Ray. *Surface mount technology: Principles and practice*. 2nd ed. New York: Chapman, 1997. ISBN 978-0-412-12921-6.
- [3] JUDD, Mike a Keith BRINDLEY. *Soldering in electronics assembly*. 2nd ed. Boston: Newnes, 1999. ISBN 07-506-3545-2.
- [4] LAU, John. *Solder joint reliability: theory and applications*. 1991. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. ISBN 0442002602.
- [5] BATH, Jasbir. *Lead-free soldering*. New York: Springer, 2007. ISBN 9780387684222.
- [6] BRIGGS, Ed a Ph.D., PE, LASKY. Best Practices Reflow Profiling for Lead-Free SMT Assembly. *Indium Corporation Tech Paper, White Papers* [online]. 2016, [cit. 2018-12-25]. Dostupné z: <https://kicthermal.com/category/technology-information/white-papers/>
- [7] TAO, Bo, Yiping WU, Han DING a Y.L. XIONG. A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor $Q\eta$. *Microelectronics Reliability* [online]. 2006, 46(5-6), 864-872 [cit. 2019-02-08]. DOI: 10.1016/j.microrel.2005.04.013. ISSN 00262714. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026271405000922>
- [8] HIRMAN, Martin, Karel RENDL, Frantisek STEINER a Vaclav WIRTH. Influence of reflow soldering profiles on creation of IMC at the interface of SnBi/Cu. *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology* [online]. IEEE, 2014, 147-151 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1109/ISSE.2014.6887582. ISBN 978-1-4799-4455-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6887582/>
- [9] TAO BO, , YIN ZHOUPING, DING HAN a WU YIPING. Mechanical reliability estimation for μ BGA solder joints based on heating factor Q . *2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging* [online]. IEEE, 2008, 1-4 [cit. 2019-02-08]. DOI: 10.1109/ICEPT.2008.4607120. ISBN 978-1-4244-2739-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4607120/>
- [10] GUPTA, K. a Nishu GUPTA. *Advanced electrical and electronics materials*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-99835-9.
- [11] KHANDPUR, Raghbir. *Printed circuit boards: design, fabrication, assembly and testing*. New York: McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-146420-4.

- [12] BELUCZ, Jakub. Delaminace – co to vlastně je?. *DPS Elektronika od A do Z: Odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky* [online]. 2017, - [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba>
- [13] MA, Lili, Bhanu SOOD a Michael PECHT. Effect of Moisture on Thermal Properties of Halogen-Free and Halogenated Printed-Circuit-Board Laminates. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* [online]. 2011, 11(1), 66-75 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1109/TDMR.2011.2106785. ISSN 1530-4388. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5730004/>
- [14] ČSN EN 61189-2 ED. 2 (359039). *Zkušební metody pro elektrotechnické materiály, desky s plošnými spoji a další propojovací struktury a sestavy - Část 2: Zkušební metody pro materiály pro propojovací struktury*. 06/2007. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [15] *IPC Part: 3: Base Material for Printed Circuit Boards* [online]. Mittuniversitetet: -, 2014 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: http://apachepersonal.miun.se/~gorthu/ASS/IPC_Lecture/
- [16] COOMBS, Clyde. *Printed circuits handbook*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0071467346.
- [17] PUTTLITZ, Karl a Kathleen STALTER. *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies*. 2004. New York: Marcel Dekker, 2004. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 170. ISBN 0824748700.
- [18] SCHWARTZ, Mel. *Soldering: understanding the basics*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2014. ISBN 978-1-62708-058-3.
- [19] PIETRIKOVÁ, Alena, Juraj ĎURIŠIN a Pavel MACH. *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [20] WIRTH, Václav,. *Diagnostika propojovacích struktur součástek a substrátů*. Plzeň, 2017, 85 s. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Steiner František, Doc. Ing. Ph.D.
- [21] EVANS, John a Werner ENGELMAIER. *A guide to lead-free solders: physical metallurgy and reliability*. London: Springer, 2007. ISBN 978-184-6283-093.
- [22] SUHIR, Ephraim, Yung-Cheng LEE a C. WONG. *Micro- and opto-electronic materials and structures: physics, mechanics, design, reliability, packaging*. New York: Springer, 2007. ISBN 03-872-7974-1.

- [23] PECHT, Michael. *Handbook of electronic package design*. New York: Marcel Dekker, 1991. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 76. ISBN 08-247-7921-5.
- [24] VYBÍRAL, Bohumil. Mechanika pružného tělesa: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku. In: - [online], s. - [cit. 2019-03-04].
- [25] WANG, Qing, William GAIL a Wayne JOHNSON. *Mechanical Properties and Microstructure Investigation Of Lead Free Solder* [online]. Auburn University, 2005 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://nepp.nasa.gov/files/16163>. 162 Broun Hall/ECE Dept., Auburn University.
- [26] SZENDIUCH, Ivan a Marek NOVOTNÝ. Lead-free Solder Joint Quality Investigation. In: *Research of Microelectronics Technologies for 3D systems* [online]. Brno University of Technology, FECC, Dept. Microelectronics:, 2007, s. - [cit. 2019-03-04].
- [27] LECHOVIČ, Emil, Erika HODÚLOVÁ, Beáta SCZEWCZYKOVÁ a Koloman ULRICH. Solder joint reliability. *Internetový časopis* [online]. Institute of Production Technologies, Faculty of Materials Science and Technology, Slovak University of Technology, 2009, - [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/internetovy_casopis/2009
- [28] ČSN EN 62137-1-1 (359391), TECHNOLOGIE POVRCHOVÉ MONTÁŽE. *Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 1: Zkouška odolnosti proti odtržení. 2008.* -. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [29] ČSN EN 62137-1-2 (359391), TECHNOLOGIE POVRCHOVÉ MONTÁŽE. *Metody zkoušení vlivu prostředí a trvanlivosti povrchově montovaného spoje – část 1 – 2: Zkouška pevnosti ve smyku.* -. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [30] ČSN EN 62137-1-4 (359391), TECHNOLOGIE POVRCHOVÉ MONTÁŽE. *Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje - Část 1-4: Zkouška cyklickým ohybem.* -. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [31] ČSN EN 62137-1-3 (359391), TECHNOLOGIE POVRCHOVÉ MONTÁŽE. *Metody zkoušení vlivů prostředí a trvanlivosti pro povrchově montované pájené spoje - Část 1-3: Zkouška cyklickým padáním.* -. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [32] PANG, John. *Lead free solder: Mechanics and reliability*. 2012. New York, NY: Springer, 2012. ISBN 978-1-4614-0462-0.
- [33] VASUDEVAN, Vasu a XUEJUN FAN. An acceleration model for lead-free (SAC) solder joint reliability under thermal cycling. *2008 58th Electronic Components and Technology Conference* [online]. IEEE, 2008, 139-145 [cit. 2019-03-04]. DOI:

- 10.1109/ECTC.2008.4549960. ISBN 978-1-4244-2230-2. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/4549960/>
- [34] WICKHAM, Martin, Christopher HUNT a Milos DUSEK. The Impact of Thermal Cycle Regime on the Shear Strength of Lead-free Solder Joints. *NPL Report MATC(A)156* [online]. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, 2003, - [cit. 2019-03-04]. ISSN 1473 2734. Dostupné z:
http://publications.npl.co.uk/npl_web/search.htm
- [35] GODBOLE, Gaurav, Brian ROGGEMAN, Peter BORGESSEN a Krishnaswamy SRIHARI. On the nature of pad cratering. In: *2009 59th Electronic Components and Technology Conference* [online]. -: IEEE, 2009, s. 100-108 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1109/ECTC.2009.5074003. ISBN 978-1-4244-4475-5. ISSN -. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/5074003/>
- [36] BANSAL, Anurag, Gnyaneshwar RAMAKRISHNA a Kuo-Chuan LIU. A New Approach for Early Detection of PCB Pad Cratering Failures. *IPC/APEX Conference, Las Vegas, NV* [online]. Cisco Systems, Inc., San Jose, CA, 2011, -(-), 1391-1428 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org>
- [37] DONGJI XIE, , Clavius CHIN, KARHWEE ANG, Dennis LAU a DONGKAI SHANGGUAN. A new method to evaluate BGA pad cratering in lead-free soldering. In: *2008 58th Electronic Components and Technology Conference* [online]. -: IEEE, 2008, s. 893-898 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1109/ECTC.2008.4550082. ISBN 978-1-4244-2230-2. ISSN -. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4550082/>
- [38] CAI, M., D.J. XIE, W.B. CHEN, B.Y. WU, D.G. YANG a G.Q. ZHANG. A novel soldering method to evaluate PCB pad cratering for pin-pull testing. *Microelectronics Reliability* [online]. 2013, **53**(9-11), 1568-1574 [cit. 2019-04-04]. DOI: 10.1016/j.microrel.2013.07.025. ISSN 00262714. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002627141300200X>
- [39] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronické montážní technologie*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1997. ISBN 80-214-0901-0.
- [40] ČSN EN 60068-2-14 ED. 2 (345791). *Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-14: Zkoušky - Zkouška N: Změna teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [41] JEŽEK, Vladimír. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Princip zařízení s dvojitou vlnou [3] -----	16
Obrázek 2 Doporučená orientace součástek při pájení vlnou [2]-----	17
Obrázek 3 Vývoj plynu při pájení vlnou v důsledku stínění [2]-----	17
Obrázek 4 Příklad teplotního profilu při pájení dvojitou vlnou-----	18
Obrázek 5 Dopravníkový (nahore) [2] a dávkový (vlevo dole) [39] systém pájení v parách s příkladem teplotního profilu -----	19
Obrázek 6 Pájecí zařízení s infračerveným ohřevem [39] -----	20
Obrázek 7 Pájecí pec s konvekčním ohřevem [39]-----	21
Obrázek 8 Příklad pájení FTP součástky laserem [39] -----	22
Obrázek 9 Teplotní profil pro pájení přetavením bezolovnatými pájecími pastami -----	23
Obrázek 10 Závislost tloušťky IMC na „heating“ faktoru [7] [8] -----	24
Obrázek 11 Teplotní profil slitiny SAC 305 s vyznačenou oblastí – „heating“ faktorem [8]-	25
Obrázek 12 Závislost MTTF na velikosti „heating“ faktoru, vlevo -teplotní cyklování, vpravo - vibrační testy u μ BGA [7] [9] -----	25
Obrázek 13 Ukázka výroby měděné fólie [11] -----	29
Obrázek 14 Pořadí jednotlivých kroků výroby oboustranných DPS [10]-----	31
Obrázek 15 Složení jednotlivých vrstev DPS [12] -----	32
Obrázek 16 Závislost povrchového odporu na relativní vlhkosti pro FR4 [11] -----	34
Obrázek 17 Test pevnosti při odlupování za působení síly F [11] -----	36
Obrázek 18 Uspořádání při testu pevnosti v odtrhu [11] -----	36
Obrázek 19 Rozpínání v ose Z v závislosti na pájecí teplotě [15]-----	38
Obrázek 20 Chování laminátu při pokojové teplotě (vlevo) a po překročení teploty T_g (vpravo) [15] -----	39
Obrázek 21 Znázornění fázového rozhraní struktury IMC na rozhraní měď/pájecí slitina SAC [19] -----	47
Obrázek 22 VLEVO: Závislost tloušťky IMC na čase pro různé teploty, VPRAVO: Závislost pevnosti pájeného spoje na tloušťce IMC vrstvy [41]-----	47
Obrázek 23 Rovnovážený fázový diagram kovů omezeně rozpustných v tuhém stavu, a) Peritektický typ, b) Eutektický typ [19]-----	49
Obrázek 24 Rovnovážený fázový diagram systému Cu-Sn [21] -----	51
Obrázek 25 Rozklad napětí do složek [24] -----	53
Obrázek 26 Objekt deformovaný smykem [24]-----	54
Obrázek 27 Typický tvar křivky napětí deformace [25] -----	54
Obrázek 28 Jednotlivá stádia creepu [26] -----	56
Obrázek 29 Znázornění relaxace napětí [26]-----	57
Obrázek 30 Způsob uchycení vzorku při zkoušce odolnosti proti odtržení [28]-----	58

Obrázek 31 Upevnění vzorku při zkoušce stříhem [29]-----	59
Obrázek 32 Počet provedených zkoušek pádem pro dvě různé povrchové úpravy (Cu-OSP - vlevo a ENIG - vpravo) před a po tepelném cyklování [32]-----	61
Obrázek 33 Uspořádání přípravku (vpravo) a zjednodušené schéma měření požadovaných veličin (vpravo) [31]-----	61
Obrázek 34 Schématické znázornění odlišných CTE u SMT v ose x [34] -----	62
Obrázek 35 Příklad tvaru teplotního profilu při tepelném cyklování [40] -----	64
Obrázek 36 "Pad cratering" s prasklinou šířící se skrz vodivou cestu [38]-----	65
Obrázek 37 Klasifikace možností selhání při zkoušce tažením pinu [38]-----	66
Obrázek 38 Vzor návrhu spodní a horní destičky-----	67
Obrázek 39 Propojovací konektor SMD Dual Pin Header včetně jeho rozměrů. -----	68
Obrázek 40 Vlevo světlá DPS – nižší $T_g = 135\text{ }^\circ\text{C}$, vpravo tmavá zapájená DPS – vyšší $T_g = 180\text{ }^\circ\text{C}$ -----	69
Obrázek 41 Průběžná pájecí pec Mistral 260-----	69
Obrázek 42 Profilometr KIC Explorer-----	70
Obrázek 43 Ukázka kompletně připraveného vzorku -----	71
Obrázek 44 Zařízení DEFORM 02-----	72
Obrázek 45 Trhací hlava se vzorkem a píčka zahřátá na $60\text{ }^\circ\text{C}$ -----	73
Obrázek 46 Zobrazení okna programu „Trhey!“ -----	73
Obrázek 47 Ukázka jednotlivých možností poškození při trhacích - termomechanických zkouškách -----	82
Obrázek 48 Mikroskopické snímky IMC -----	83
Obrázek 49 Orientační měření tloušťky IMC okótováním -----	84
Obrázek 50 Výběr IMC vrstvy v softwaru NIS-Elements-----	84
Obrázek 51 Obraz – binární mapa IMC sloužící k výpočtu její tloušťky -----	84
Obrázek 52 Prvková mapa zkoumaného pájeného spoje (vlevo HAL a vpravo OSP) -----	85

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti laminátových materiálů [11] -----	27
Tabulka 2 Standartní tloušťky a hmotnosti měděných fólií [11] -----	28
Tabulka 3 Příklady průrazných napětí jednotlivých laminátů [11] -----	33
Tabulka 4 Typické hodnoty ztrátového činitele [11] -----	34
Tabulka 5 Důležité vlastnosti laminátů [11] -----	35
Tabulka 6 Shrnutí klíčových požadavků na povrchové úpravy [17] -----	41
Tabulka 7 Typické tloušťky jednotlivých úprav [16] -----	42
Tabulka 8 Shrnutí výhod a nevýhod jednotlivých povrchových úprav [16] [17] -----	45
Tabulka 9 Vypočtené hodnoty pro vzorky 1R -----	77
Tabulka 10 Vypočtené hodnoty pro vzorky 2R -----	78
Tabulka 11 Naměřené tloušťky IMC -----	84

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Teplotní profil při pájení zkušebních vzorků.....	70
Graf 2 Ukázka časové závislosti síly pro různé typy vzorků.....	75
Graf 3 Srovnání průměrných hodnot síly odtrhu a počtu odtržených pájecích plošek	79
Graf 4 Porovnání průměrné síly odtrhu - stejná velikost plošky a povrch. úprava, různá teplota a T_g	80

PŘÍLOHY

Seznam příloh

Naměřené hodnoty (1×reflow – 1R).....	II
Naměřené hodnoty (2×reflow – 2R).....	IV
Grafické vyhodnocení výsledků studie	VII
Naměřené hodnoty – tloušťka intermetalické vrstvy	IX
Krabicové grafy	IX

Naměřené hodnoty (1×reflow – 1R)

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	123,5	4	219,8	4	281,3	4	273,7	4
2	109,8	3	214,6	4	204,3	2	261,7	4
3	170,9	3	243,3	4			225,2	2
4	96,8	2	229,7	3	238,7	3	221,5	4
5	133,6	4	108,9	4	235,7	3	171,4	3
6	117,3	2	249,2	4	228,5	3	291,5	3
7	169,4	4	256,0	3	238,1	4	287,2	3
8	210,3	3	155,5	3	196,2	4	250,8	4
9	199,5	4	138,0	4	185,1	3	286,3	4
10	254,7	3	211,2	3	223,1	4	292,7	4

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	46,2	4	113,0	3	198,0	2	273,4	2
2	70,4	4	202,5	4	145,0	3	174,0	1
3	91,5	3	117,6	4	206,7	3	260,3	2
4	33,5	2	239,4	4	253,6	1	215,0	0
5	38,7	4	156,1	4	118,7	4	255,6	1
6	40,3	4	183,5	4	256,2	2	239,9	0
7	53,2	4	122,5	3	145,0	2	208,0	1
8			147,6	4	190,1	2	232,6	1
9	68,4	3	98,6	4	125,9	3	205,0	1
10	40,8	4	87,7	3	182,2	2	169,4	2

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrh (N)		Fodtrh (N)		Fodtrh (N)		Fodtrh (N)	
1	135,1	4	156,2	4	238,4	4	286,7	4
2	203,9	4	147,1	4	216,9	4	265,9	4
3	199,8	4	204,5	4	276,9	4	304,8	4
4	206,7	4	237,4	4	281,6	4	294,0	3
5			176,3	4	256,8	4	310,6	3
6	194,0	4	282,7	4	271,6	3	291,9	4
7	168,2	4	249,3	3	322,9	3	291,4	3
8	213,5	4	236,9	4	267,4	3	299,7	2
9	226,6	4	186,8	4	275,7	4	321,4	4
10	189,3	4	237,1	4			286,9	4

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	64,7	4			137,5	3	193,7	3
2	26,3	4	61,8	4	137,2	2	181,3	1
3	74,1	4	54,6	4	148,4	3	254,7	3
4	68,1	4	60,1	4	228,8	3	259,0	4
5	32,9	4	108,0	3	192,3	2	260,6	2
6	113,9	4	137,0	4	222,2	2	213,9	3
7	44,5	4	84,5	4	153,6	4	201,5	3
8	54,4	4	92,8	4	196,3	4	175,1	0
9	41,0	4	115,4	4	120,4	4	285,9	2
10	99,5	4	146,5	4	117,1	3	260,0	4

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	71,7	4	150,7	4	175,3	4	261,2	4
2	173,3	3	194,5	4	226,0	4	269,4	4
3	152,6	3	227,3	4	225,8	4	173,6	4
4	142,9	4	229,0	4	237,4	4	233,2	4
5	97,8	4	216,4	4	242,9	4	173,8	4
6	180,5	4	216,7	4	256,4	4	232,4	4
7	146,7	4	153,4	4	231,3	4	236,2	4
8	142,1	3	187,7	4	243,3	4	237,5	4
9	158,9	3	111,1	4	158,5	4	230,4	4
10	181,0	4	224,5	4			234,1	4

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	105,3	4	193,4	4	211,3	4	224,9	3
2	58,3	4	108,8	4	176,9	3	208,4	4
3	171,9	4	91,7	4	128,9	2	202,9	4
4	67,9	4	84,0	4	157,7	3	277,1	2
5	170,4	4	200,5	4	199,6	3	270,9	2
6	103,1	2	124,2	3	184,5	3	199,3	2
7	86,6	4	66,4	4	216,3	4	216,6	4
8	167,8	3	136,7	4	185,5	4	267,1	3
9	63,6	4	68,2	4	253,1	4	202,3	3
10	70,6	2	72,8	4			215,7	3

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	118,5	4	139,2	4	265,2	4	261,6	4
2	147,0	4	170,9	4	230,0	4	261,0	4
3	152,8	4	215,0	4	227,9	4	286,7	4
4	166,1	4	229,0	4	224,6	4	245,7	4
5	206,8	4	188,0	4	232,6	4	263,4	4
6	203,4	4	190,0	4	223,0	4	277,8	4
7	164,0	4	203,6	4	246,8	4	256,2	4
8	118,5	4	156,6	4	232,1	4	271,9	4
9	135,0	4	178,0	4	250,5	4	258,1	4
10	116,0	4	234,5	4	241,0	4	268,5	4

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	55,6	4	109,0	4	144,4	4	261,0	2
2	28,9	4	171,3	3	216,1	4	177,2	2
3	29,2	4	50,6	4	186,3	4	237,0	1
4	39,1	4	179,2	4	176,7	4	229,3	2
5	89,4	4	128,4	4	220,2	4	188,1	3
6	133,0	4	134,1	3	198,9	4	208,6	3
7	39,7	4	87,7	4	122,8	4	166,7	3
8	70,5	4	128,0	4	149,8	3	184,7	3
9	46,5	3	109,7	4	187,6	4	275,1	2
10	72,0	3	70,0	4	206,6	4		

Naměřené hodnoty (2×reflow – 2R)

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	123,8	3	237,5	4	225,1	1	229,1	1
2	131,5	1	175,2	2	276,8	4	215,5	3
3	89,4	2	152,0	2	197,1	1	308,8	4
4	104,4	3	212,4	4	250,1	3	278,3	3
5	80,4	1	179,6	4	217,7	0	226,2	2
6	118,6	4	165,3	2	239,5	2	266,1	3
7	153,3	3	181,8	4	238,3	2	225,1	1
8	106,6	3	154,0	3	220,4	2	226,3	2
9	179,4	3	153,7	2	266,9	3	257,3	3
10	175,5	4	156,5	2			253,5	3

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	85,9	3	147,3	2	185,8	1	194,5	0
2	92,9	4	163,0	4	183,6	0	166,1	0
3	94,1	4	137,3	3	212,8	3	175,1	0
4	132,5	4	193,5	4	213,3	2	203,1	1
5	103,9	4	111,7	4	206,4	2	259,1	1
6	163,6	4	133,2	1	190,0	3	222,7	0
7	101,2	4	142,6	4	220,6	1	238,2	1
8	154,3	4	159,8	4	187,7	1	184,3	2
9	57,6	4	120,5	3	193,9	2	204,8	0
10	99,3	4	161,3	4	152,5	0		

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	182,0	4	180,2	3	234,0	2	290,3	4
2	214,9	2	206,9	4	268,2	4	308,8	4
3	191,9	4	180,3	4	275,5	3	310,0	3
4	135,0	4	154,3	4	276,4	4	276,6	4
5	138,1	4	269,2	4	268,2	4	301,1	3
6	177,3	4	217,5	4	294,3	3	274,3	2
7	202,1	4	202,1	4	237,6	3	270,2	2
8	132,2	4	255,7	4	305,3	4	286,2	4
9	105,9	4	187,9	4	250,9	3	259,8	2
10	160,5	4	237,7	4	297,4	4	292,9	3

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	Okolí		Okolí		Okolí		Okolí	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	81,1	4	122,0	3	125,0	3	225,7	2
2	33,3	4	82,6	4	203,1	3	260,5	3
3	64,0	4	91,6	3	191,7	1	192,0	1
4	35,0	4	106,7	3	184,4	3	234,4	2
5	30,0	4	118,3	3	215,8	2	236,4	2
6	46,5	4	68,3	4	213,9	2	175,0	2
7	36,1	4	150,7	3	128,2	2	202,3	2
8	31,8	4	87,1	3	148,3	2	249,6	3
9	36,4	4	77,3	1	140,7	1	173,7	0
10	54,4	4	146,4	2	127,0	2		

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	159,5	4	193,6	4	264,6	4	212,4	4
2	208,1	3	174,7	3	255,5	4	228,5	4
3	121,9	3	228,2	4	230,6	4	234,3	3
4	216,4	4	182,4	4	216,7	4	259,7	4
5	153,6	3	177,9	3	221,7	4	250,6	4
6	181,1	3	190,1	3	237,7	4	230,7	2
7	126,0	4	211,7	4	192,9	3	221,7	2
8	126,5	4	164,5	3	191,7	4	260,0	3
9	176,3	2	215,8	4	227,9	4	240,0	3
10	116,7	4	227,7	4	262,9	4	245,3	4

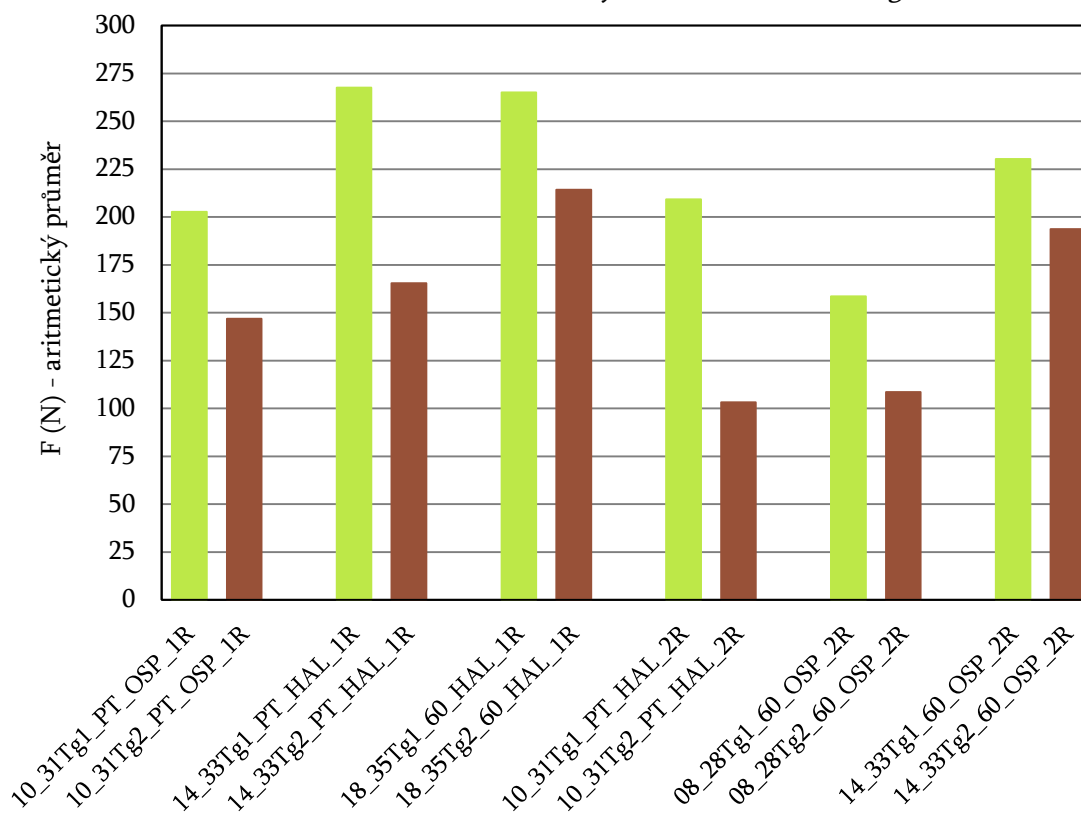
Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP		Cu-OSP	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	97,4	4	157,8	4	220,9	3	248,2	2
2	58,5	3	57,0	4	241,4	4	260,2	2
3	162,7	4	51,2	4	215,1	2	251,0	2
4	111,6	4	57,7	4	172,5	2	220,5	1
5	85,0	4	59,1	3	201,9	1	255,1	3
6	132,5	2	129,4	4	208,6	3	220,1	0
7	132,1	4	73,5	4	153,2	4	232,8	3
8	108,9	4	120,3	3	183,9	1	215,7	3
9	116,4	4	158,0	4	169,9	1	204,9	3
10	80,3	4	153,4	2	169,8	3	264,1	2

Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	135 °C		135 °C		135 °C		135 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	200,8	4	177,5	4	216,4	3	284,7	4
2	128,7	4	168,8	4	221,2	4	258,4	4
3	144,5	4	155,8	4	225,1	4	281,4	4
4	146,2	4	147,9	4	174,1	4	277,3	4
5	111,0	4	195,3	4	228,4	4	270,3	4
6	98,5	4	222,3	4	226,9	4	260,0	4
7	174,9	4	215,0	4	231,1	4	276,9	4
8	159,5	4	213,8	4	207,3	4	276,1	4
9	164,9	4	176,2	4	209,2	4	254,9	4
10	178,5	4	142,3	4	260,7	4	263,3	4

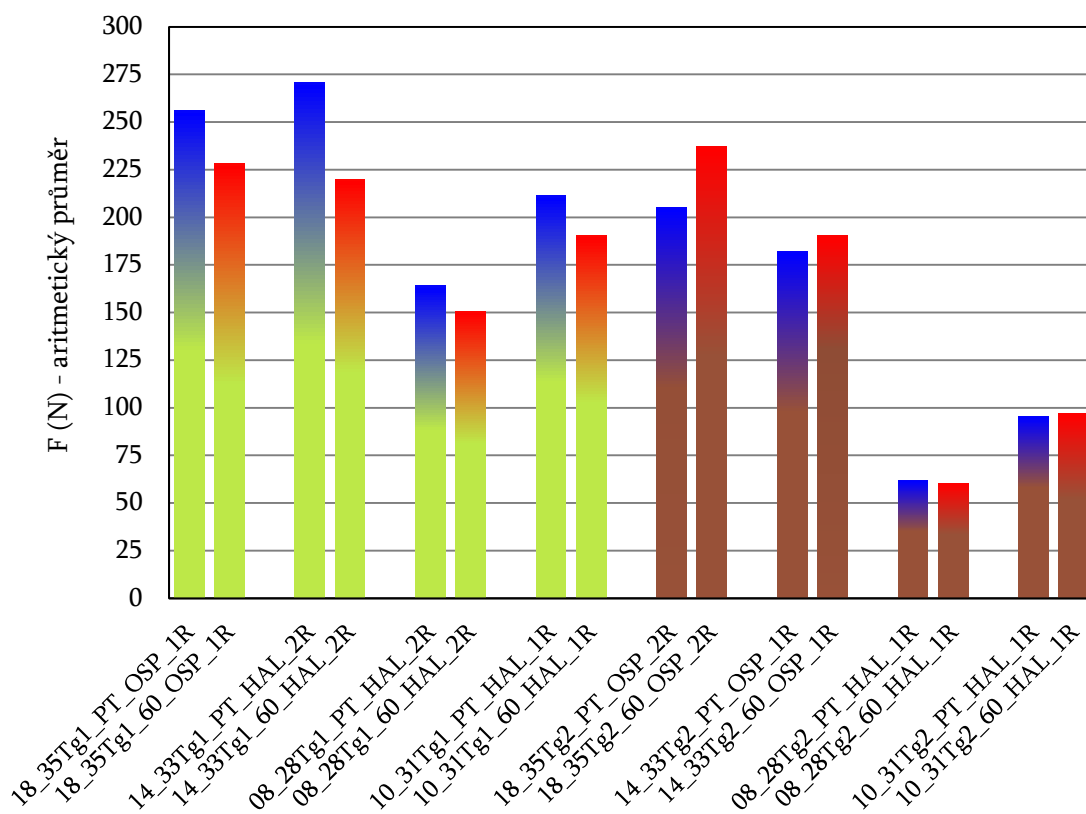
Velikost plochy	0,8×2,8 mm	Održené plošky	1,0×3,1 mm	Održené plošky	1,4×3,3 mm	Održené plošky	1,8×3,5 mm	Održené plošky
Povrch. úprava	HAL		HAL		HAL		HAL	
Tg	180 °C		180 °C		180 °C		180 °C	
Teplota	60 °C		60 °C		60 °C		60 °C	
Číslo měření	Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)		Fodtrhu (N)	
1	135,6	4	166,2	4	139,1	3	218,0	1
2	82,9	4	141,4	4	118,1	2	154,8	4
3	131,0	4	185,7	2	139,6	1	160,5	3
4	82,2	4	174,3	4	132,3	3	209,5	2
5	145,3	4	127,1	2	128,1	3	224,6	3
6	68,1	3	131,2	4	108,6	2	182,2	2
7	63,0	4	87,6	3	145,3	4	208,2	3
8	87,6	4	176,4	3	156,5	4	243,0	3
9	93,0	4	125,4	4	183,2	4	201,7	4
10	85,1	4	108,7	4			204,1	3

Grafické vyhodnocení výsledků studie

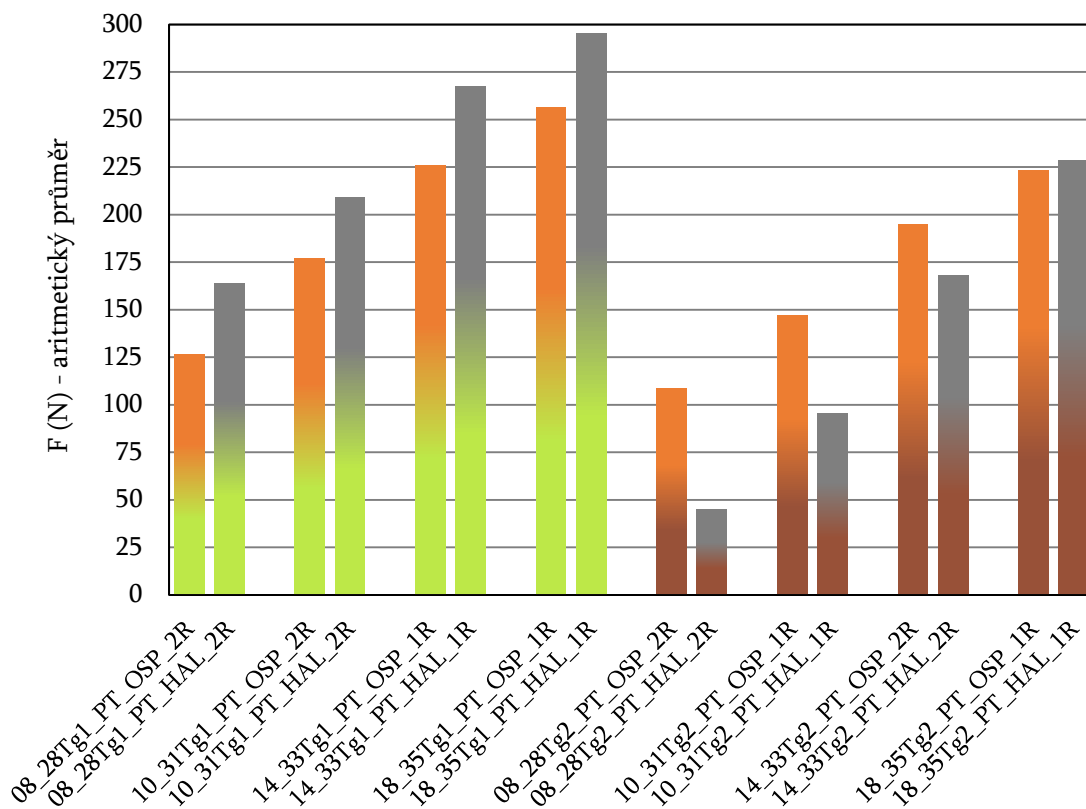
Graf I: Porovnání závilosti síly odtrhu na odlišném Tg



Graf II: Srovnání účinků vyšší teploty při trhací zkoušce pro různé Tg



Graf III: Vyhodnocení vlivu povrchové úpravy pájecích plošek na výsledky

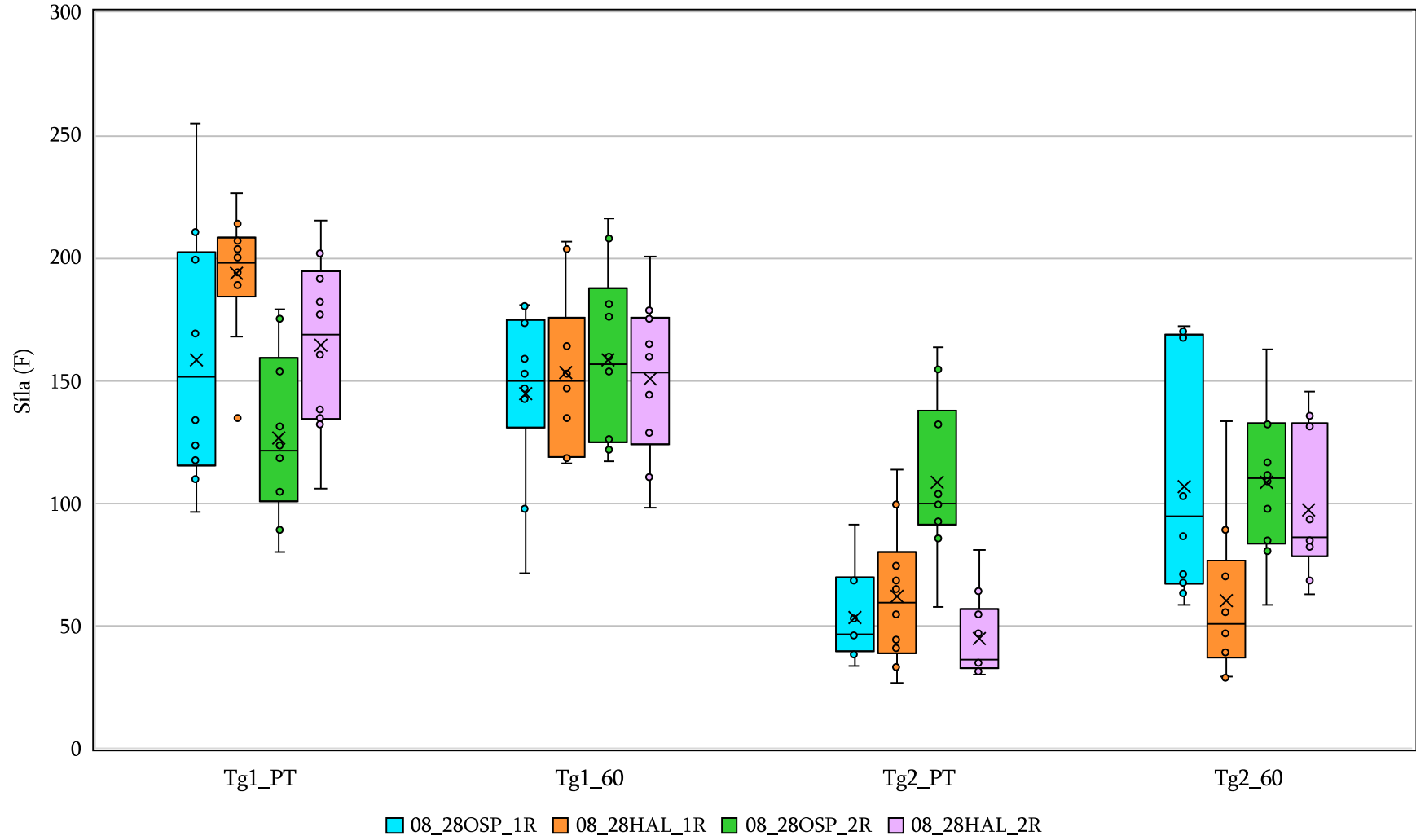


Naměřené hodnoty – tloušťka intermetalické vrstvy

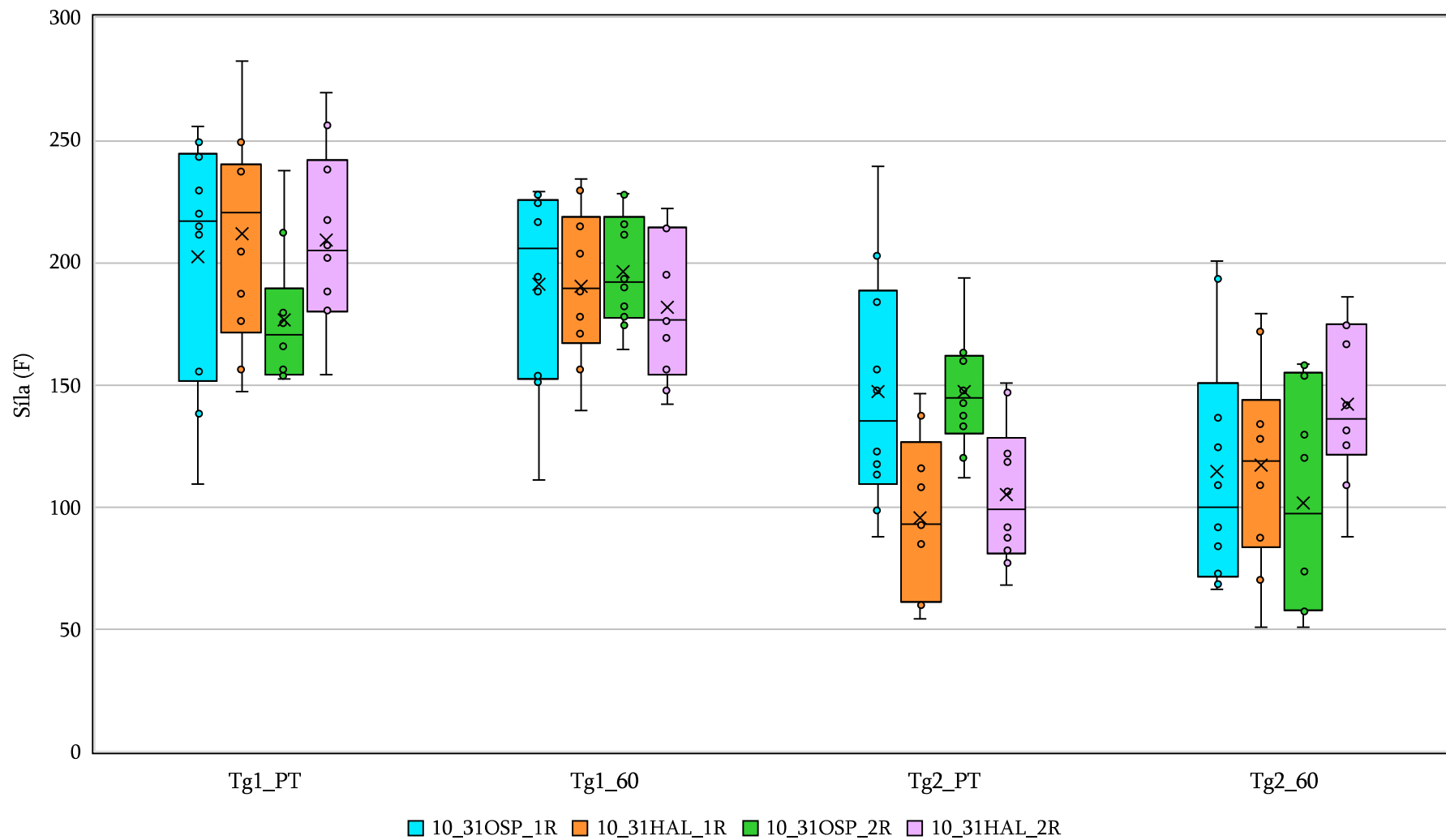
Číslo měření	Typ vzorku							
	HAL_1R		HAL_2R		OSP_1R		OSP_2R	
	Průměr (μm)	Median (μm)	Průměr (μm)	Median (μm)	Průměr (μm)	Median (μm)	Průměr (μm)	Median (μm)
1	2,71	2,69	2,85	2,87	2,47	2,36	3,89	3,87
2	2,57	2,51	2,76	2,69	2,72	2,73	3,27	3,3
3	2,48	2,45	3,15	2,99	3,02	2,91	3,65	3,65
4	2,64	2,51	2,95	2,86	2,84	2,87	3,16	3,29
5	2,85	2,69	3,02	3,04	2,73	2,73	3,36	3,16
6	2,67	2,72	2,6	2,56	2,68	2,73	3,03	3,06
7	2,57	2,54			2,91	2,84		
8	2,59	2,57			2,81	2,79		

Krabicové grafy

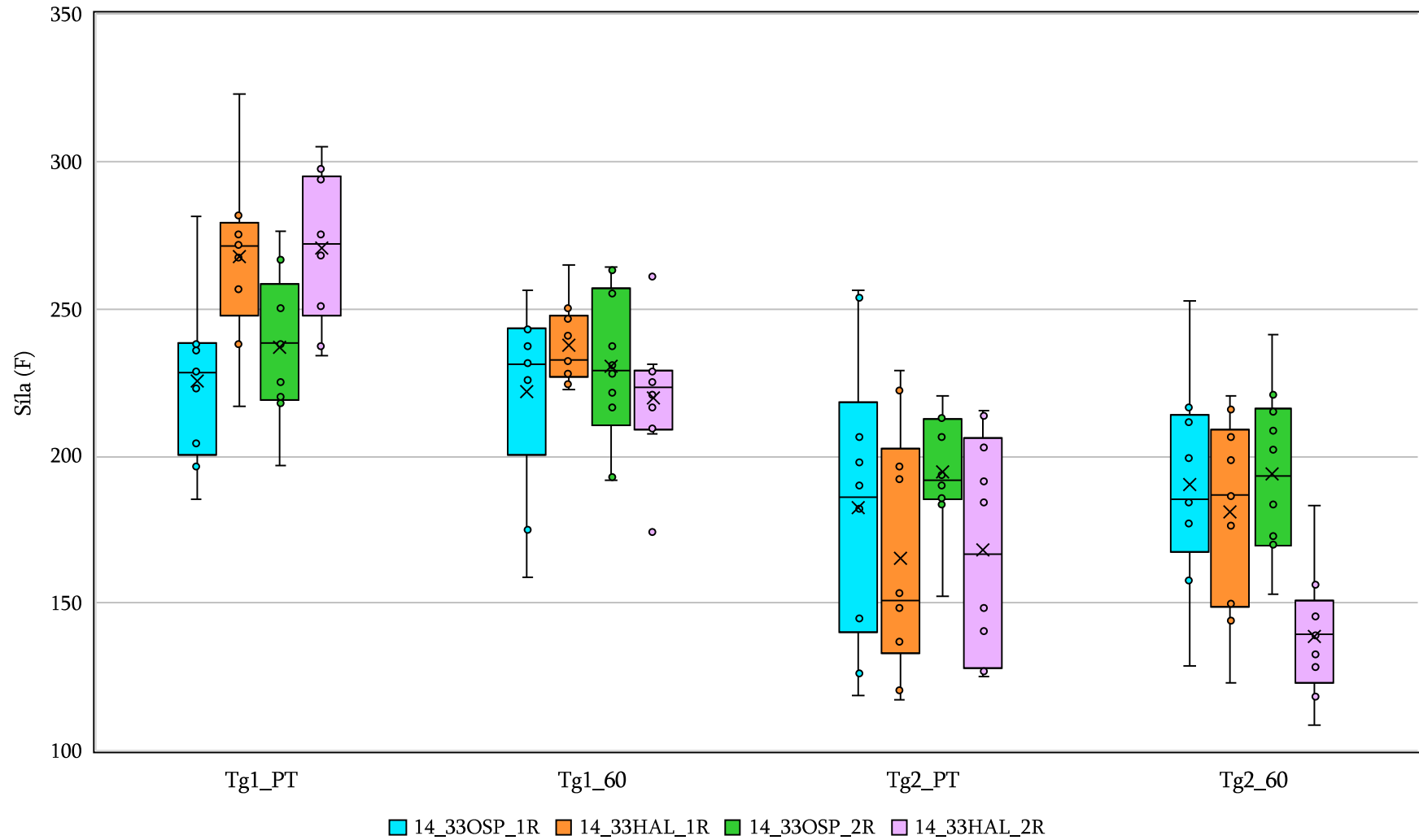
Porovnání naměřených hodnot pro velikost pájecích plošek 0,8×2,8 mm



Porovnání naměřených hodnot pro velikost pájecích plošek 1×3,1 mm



Porovnání naměřených hodnot pro velikost pájecích plošek 1,4×3,3 mm



Porovnání naměřených hodnot pro velikost pájecích plošek 1,8×3,5 mm

