

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

**Studie vlivu povrchových úprav pájecích plošek
na vznik dutin v pájených spojích**

Study of influence of surface finishes of soldering pads on voids
formation inside solder joints

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

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

Bc. Martin Kozák

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kozák** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **420173**
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:

Studie vlivu povrchových úprav pájecích plošek na vznik dutin v pájených spojích

Název diplomové práce anglicky:

Study of influence of surface finishes of soldering pads on voids formation inside solder joints

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení, používanými materiály, povrchovými úpravami pájecích plošek a s vybranými chybami, které mohou při pájení přetavením vzniknout a to především s ohledem na dutiny v pájených spojích.
- 2) Připravte si vzorky pájených spojů na pájecích ploškách s různou povrchovou úpravou a proveďte u nich analýzu dutin. Pro přípravu vzorku použijte pájecí pasty s různým typem tavidla.
- 3) Výsledky analýzy dutin vyhodnoťte s ohledem na použité kombinace materiálů.

Seznam doporučené literatury:

Literatura:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Alena Pietriková, Juraj Ďurišin, and Pavel Mach, Diagnostika a optimalizácia pou žitia ekologických materiálův pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **05.02.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Řípků, 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 Studie vlivu povrchových úprav pájecích plošek na vznik dutin v pájených spojích vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a odborné vedení při psaní této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat odborníkům z firmy AIM Solder Europe za poskytnutou pomoc při specifikaci parametrů pájecích past.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá vznikem voidů v pájených spojích. Teoretická část se věnuje teorii a technologii měkkého pájení, základním metodám pájení, povrchovým úpravám pájecích plošek, tavidly a chybami při pájení se zaměřením na voidy. Praktická část se zabývá vytvořením a zpracováním vzorků, dále vyhodnocením výskytu voidů v pájených spojích při použití různých povrchových úprav a čtyř bezolovnatých pájecích past s aktivitou tavidla ROL0 a ROL1 a s rozdílnou velikostí kovových částic T3 a T4. Z analýzy vzorků plyne, že povrchová úprava HAL bez olova vykazuje téměř u všech vzorků nejnižší četnost i plochu voidů. Nepatrně horší výsledky má povrchová úprava ENIG. Jako méně vhodné k použití se z hlediska voidovitosti jeví použití povrchové úpravy OSP a DPS bez povrchové úpravy. Pájecí pasty nevykazují ve výsledcích tak razantní odlišnosti oproti povrchovým úpravám. Jako vhodnější se pro snížení počtu a plochy voidů v pájeném spoji jeví použití pájecí pasty s tavidlem, které má aktivitu ROL1. Z analýzy také plyne, že ze zkoumaných faktorů má velikost kovových částic na voidovitost nejmenší vliv.

Klíčová slova

Pájení, Pájený spoj, Pájecí pasta, Chyby při pájení, Voidy

Abstract

This diploma thesis deals with the formation of voids in solder joints. The theoretical part deals with theory and technology of soft soldering, basic soldering methods, surface finishes, fluxes and defects involved in soldering with focus on voids. The practical part deals with creation and processing of samples, also with evaluation voids in solder joints using different surface finishes and four lead-free solder pastes with flux activity ROL0 and ROL1 and different sizes of metallic parts T3 and T4. As emerged from the analysis the lead-free HAL has the lowest quantity and area of voids in all samples. Surface finish ENIG has slightly worse results. As less suitable for use appear OSP and PCB without surface finishes. Solder pastes do not show such obvious differences compared to surface finishes. More useable to reduce quantity and area of voids appears a flux with ROL1 activity. The analysis also shows that size of metal parts of solder paste has the smallest influence on quantity of voids and their size.

Key words

Soldering, Soldered joint, Soldering paste, Errors during soldering, Voids

Obsah

Obsah	7
Úvod	9
I. Teoretická část	10
1. Teorie pájení	10
1.1. Pájitelnost.....	10
1.2. Formy pájek	12
2. Základní metody pájení	15
2.1. Tekuté pájení (flow)	15
2.2. Pájení přetavením (reflow).....	18
2.3. Ruční pájení	19
3. Povrchové úpravy DPS.....	20
3.1. OSP.....	21
3.2. ENIG.....	21
3.3. HAL bez olova	21
3.4. Imerzní Sn, Ag	22
3.5. Srovnání různých typů povrchových úprav.....	23
4. Tavidla.....	25
4.1. Rozdělení tavidel dle norem.....	25
4.2. Tavidla pro bezolovnaté pájení	29
4.3. Srovnání kvality tavidel	30
5. Chyby při pájení.....	32
5.1. Nedostatečné přetavení	32
5.2. Whiskery	32
5.3. Zdvihnutí součástky (Thombstone)	33
5.4. Voidy	33

II. Praktická část	39
1. Návrh a příprava vzorků	39
1.1. Počet vzorků	39
1.2. Stárnutí vzorků	39
2. Zapájení rezistorů na DPS	40
2.1. Pájecí pasty	40
2.2. Osazení DPS	41
2.3. Přetavení vzorků	41
3. Analýza dutin v pájených spojích	43
3.1. Rentgenová analýza	43
3.2. Jasová analýza	44
4. Výsledky	45
4.1. Zhodnocení výsledků vzhledem k použitým povrchovým úpravám	46
4.2. Zhodnocení výsledků vzhledem k použitým pájecím pastám	55
4.3. Porovnání výsledků s dalšími výzkumy	70
Závěr	71
Seznam použité literatury	73
Seznam obrázků	75
Seznam tabulek	76
Seznam rovnic	76
Seznam grafů	77
Seznam použitých zkratk	79
Přílohy	80

Úvod

Pájení je v současné době nedílnou součástí výroby téměř veškeré elektroniky. Pro snížení vad elektronických zařízení je mimo jiné nutné dbát na vysokou spolehlivost pájených spojů. Tyto spoje ovšem musí mít velmi dobré elektrické i mechanické vlastnosti. Jednou ze zásadních vad, které vznikají v pájených spojích, a které výše uvedené vlastnosti do značné míry negativně ovlivňují, jsou voidy neboli dutiny v pájených spojích. Touto problematikou se budu v této práci detailněji zabývat.

Teoretická část práce se zabývá teorií měkkého pájení, pájitelností, základními metodami pájení se zaměřením na strojové pájení. Dále používanými povrchovými úpravami pájecích plošek a tavidly s ohledem na praktickou část práce. Závěr této části je věnován chybám vznikajících při pájení. Důraz je zde kladen na vznik a výskyt voidů, kterým se hlouběji zabývám v praktické části práce.

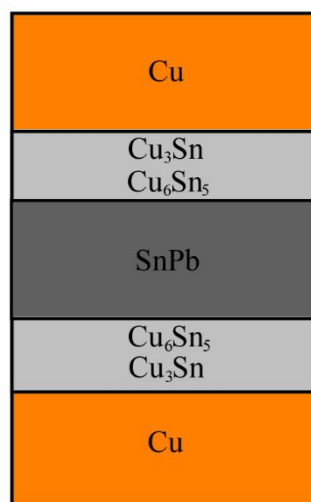
Praktická část popisuje vytvoření a zpracování vzorků společně s vyhodnocením výskytu a vzniku dutin v pájených spojích. Vyhodnocení zde probíhalo ve dvou ohledech, a to z pohledu porovnání použití různých povrchových úprav a z pohledu použití různých bezolovnatých pájecích past s odlišnou aktivitou tavidla a velikostí kovových částic. V závěru této části byly porovnány získané výsledky s výsledky z již publikovaných výzkumů.

I. Teoretická část

1. Teorie pájení

Pájení můžeme definovat jako metalurgické spojování dvou kovů roztavenou pájkou. Atomy základního materiálu jsou ve styku s atomy pájky ve vzdálenosti, kde již působí adhezní a kohezní síly. Během tohoto procesu také dochází k difuzi spojovaných kovů. Tím vznikají mezifázová rozhraní mezi pevným a tekutým kovem. Tyto oblasti mají jiné chemické, mechanické i fyzikální vlastnosti.

Základní rozdělení pájení je na měkké a tvrdé, kde mez mezi těmito dvěma typy určuje hranice teploty tavení, která je definována na 500 °C [3].



Obrázek 1 – Intermetalický spoj [3].

1.1. Pájitelnost

Pájitelnost je schopnost povrchu nechat se smáčet pájkou při procesu pájení. V některých procesech může vykazovat povrch dobrou pájitelnost a při jiných ne.

1.1.1. Smáčení povrchu

Schopnost smáčení se dělí na smáčení, nesmáčení a odsmáčení [3].

1. Smáčení

Při smáčení vykazuje čistý kovový povrch vyšší povrchovou energii než roztavená pájka. Díky tomu lze vytvořit metalurgickou vazbu na rozhraní a pájka smočí kovový povrch. Díky postupu smáčení se vytvoří tenká vrstva na rozhraní a dobrý základ pro spolehlivý spoj [3].

2. Nesmáčení

Při nesmáčení nedochází k vytvoření metalurgické vazby a pájka tedy nesmočí povrch kovu. Důvodem může být značná vrstva oxidů, kterou tavidlo nebylo schopné odstranit, nebo tavidlo nebylo dostatečně aktivní [3].

3. Odsmaččení

K jevu odsmaččení může dojít, pokud jsou mezikovové vrstvy na rozhraní bohaté na cínové směsi, které následně vytahují cín z pájky. Při tomto procesu opouští cín oblasti bohaté na olovo, které mají nízkou pájitelnost. Pokud teplota bude klesat dlouho, pak může pájka ustoupit z již smáčených oblastí. Tento jev může nastat, pokud se pájí povrchy z drahých kovů, které se snadno v pájce rozpustí [3].

1.1.2. Povrchové napětí

Povrchové napětí lze vyjádřit pomocí Young – Dupreho rovnice:

$$\sigma_{PT} = \sigma_{KT} + \sigma_{PK} \cdot \cos \alpha \quad (N \cdot m^{-1}) \quad (1)$$

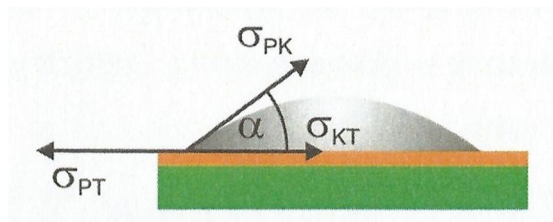
kde

σ_{PT} je povrchové napětí na rozhraní plynné a tuhé fáze ($N \cdot m^{-1}$)

σ_{KT} je povrchové napětí na rozhraní kapalné a tuhé fáze ($N \cdot m^{-1}$)

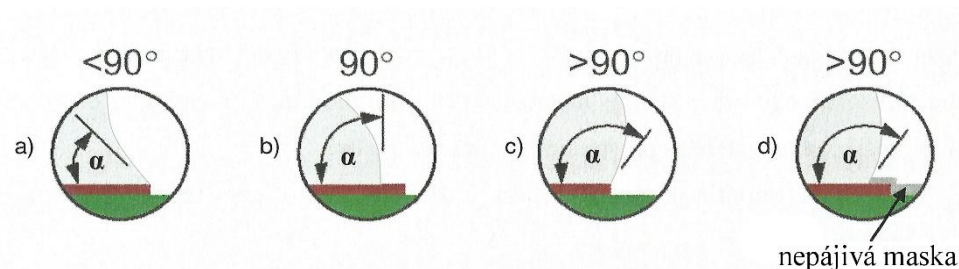
σ_{PK} je povrchové napětí na rozhraní plynné a kapalné fáze ($N \cdot m^{-1}$)

α je kontaktní úhel ($^{\circ}$) nebo součinitel smáčení (-) [1].



Obrázek 2 – Smáčení pájeného povrchu pájkou [1].

Smáčení lze posuzovat s ohledem na velikost smáčecího úhlu. Čím menší smáčecí úhel je, tím lepší je i smáčení.



Obrázek 3 – Kvalita smáčení povrchu pájkou v závislosti na kontaktním úhlu [1].

Za nesmáčení se považuje stav z obrázku 3 – b). Pro dobré smáčení nesmí být kontaktní úhel větší, než 90° . Toto tvrzení neplatí pouze, pokud je množství použité pájky velké a způsobuje konturu rozšiřující se až k nepájivé masce nebo přes okraj pájecí plošky, což ukazuje na obrázku 3 případ c) a d) [1].

1.2. Formy pájek

Pájecí slitiny mají dvě základní formy. První z nich se hodí převážně pro ruční pájení a je ve formě dutých drátů, které v jádru obvykle obsahují tavidlo. Druhou formou je pájecí pasta [4].

1.2.1. Pájecí pasty

Pájecí pasty se používají převážně při metodě pájení přetavením pro součástky typu SMD. Pájecí pasta se skládá z kuliček pájecí slitiny s průměrem $15\ \mu\text{m}$ až $45\ \mu\text{m}$, tavidla a dalších přísad, díky kterým je dostatečně viskózní, lepkavá a roztékavá, což zaručí dobrou montáž součástek.

Kuličky pájecí slitiny tvoří zhruba 89 % podílu pájecí pasty, zatímco tavidlo a aditiva tvoří zbylých 11 %. Volba použitého tavidla zde hraje zásadní roli, protože při špatně zvoleném tavidle může nastat reakce se samotnou pájkou nebo tavidlo nemusí být dostatečně aktivní při procesu pájení.

Kovové kuličky v pájecí pastě jsou obvykle na bázi slitiny typu SAC. Ty se dají vyrobit elektrolytickým vylučováním, mechanickým zpracováním pevného kovu, chemickou reakcí nebo nejčastěji používanou metodou – rozprašováním roztaveného kovu. Zásadní při výrobě těchto kuliček je jejich velikost. Čím jsou částice menší, tím více oxidují. To má následně negativní vliv na pájitelnost a jejich výroba je tedy realizována v ochranné dusíkové atmosféře. Podle velikosti pevných částic se také mění typ a složení tavidla v pájecí pastě.

Jako vlivy vnějších a technologických činitelů jsou definovány: vlhkost, nadměrná teplota, podmínky sítotisku, promíchání pájecí pasty, aklimatizace pájecí pasty a skladování. Velikost kuliček pájky v pájecí pastě jsou spolu s tavidlem zásadní pro danou aplikaci [1]. Rozdělení podle normy pro velikost částic ANSI J-STD-005 nám demonstruje tabulka č. 1.

Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle ANSI J-STD-005 [5].

Typ	80 % částic [μm]	Max 10 % částic [μm]	Žádná větší než [μm]
1	150 – 75	menší než 20	160
2	75 – 45	menší než 20	80
3	45 – 25	menší než 20	50
Typ	90 % částic [μm]	Max 10 % částic [μm]	Žádná větší než [μm]
4	38 – 20	menší než 20	40
5	25 – 15	menší než 15	30
6	5 – 15	menší než 5	20

Typ 1 je vhodný pro běžné aplikace,

Typ 2 je vhodný pro méně náročné aplikace s roztečí komponent 0,65 mm a větší,

Typ 3 je vhodný pro velmi jemné rozteče (rozteč 0,4 mm – 0,3 mm),

Typ 4 je vhodný pro velmi jemné rozteče (rozteč pod 0,3 mm),

Typy 5 a 6 jsou vhodné pro velmi jemné rozteče (rozteč pod 0,1 mm a 0,07 mm) [5].

1.2.1.1. Nanášení pájecí pasty

Nanášení pájecí pasty může ve značné míře ovlivnit kvalitu pájeného spoje a lze ji nanášet disperzerem (dávkováním), sitotiskem nebo šablonovým tiskem [1], [3].

1. Nanášení pasty dávkováním

Tento typ nanášení je vhodný převážně pro opravy nebo při pájení malého množství vzorků. Tento způsob má velkou výhodu v tom, že je pasta nanášena pouze na potřebná místa. Množství nanesené pasty můžeme měnit použitím jehly různých průměrů. V některých dávkovacích zařízeních je pasta v kartuši ohřívána pro zajištění stejné viskozity celého jejího objemu.

Dávkovače se dělí na několik druhů. První z nich využívá pro vytlačení pasty kompresi vzduchu s určenou dobou dávkování a je nejvyužívanější vzhledem k nižším pořizovacím nákladům. Druhý způsob funguje na principu vytlačení pasty pomocí šroubovice. Tento způsob je kvalitnější a snižuje spotřebu pasty. Třetí metodou je použití nánosu pomocí tryskání kapek. Její výhodou je bezkontaktní nanášení do libovolné struktury a tvaru při velké rychlosti. Kapka je za letu vychylována na určenou pozici pomocí elektrického pole. Posledním způsobem je nanášení pájecí pasty z nosné fólie laserem [1], [3].

2. Nanášení pasty sítotiskem

Síto se skládá z vláken, která jsou opatřena fotocitlivým materiálem. Oko síta by mělo být alespoň 2,5krát větší, než je velikost zrn použité pájky. Místa, na která chceme nanést pastu, nejprve osvětlíme UV zářením. Tato místa následně chemicky odstraníme a neosvětlenou část síta necháme ztvrdnout. Síto dále umístíme do pohyblivého rámu, který je zhruba ve výšce 1 cm nad desku plošného spoje (DPS). Následně pomocí stěrky protlačujeme pastu, čímž je síťka prohýbána a dochází k sítotisku na DPS. Při odtrhu ovšem musíme dbát na to, aby nedošlo k rozmazání pasty. Tloušťka nanesené vrstvy je zhruba stejná, jako je tloušťka použitého síta [1], [3].

3. Šablonový tisk

Tato metoda nanášení pájecí pasty na DPS se obvykle používá při sériové výrobě nebo při osazení velkého množství vzorků a v průmyslu patří k nejpoužívanější. Kovovou šablonu obsahující motiv podle DPS nejprve umístíme do rámu. Následně pomocí stěrky protlačujeme pájecí pastu skrz otvory. Jelikož se šablona nachází v těsném kontaktu s DPS, nedochází k průhybu jako při sítotisku.

Šablony lze vyrábět chemickým leptáním, řezáním laserem nebo galvanickou cestou. Metoda chemického leptání je ovšem na ústupu, protože není vhodná při velmi jemných rozestupech součástek. U šablon řezaných laserem, které tyto požadavky jsou schopné splnit, se ovšem musí hlídat jakost provedení a dodržení předepsaných rozměrů. Šablony vytvořené galvanickou cestou tyto všechny požadavky splňují. Pro přesné vytvoření šablon se využívají pro zvýšení přesnosti Gerberová data.

Stěrka, která se používá pro nános pasty, musí splňovat hlavně kritérium tvrdosti. Při použití měkké stěrky totiž může dojít k otěru v rozích šablony, což má velký vliv na kvalitu nanesené vrstvy. Záleží také na úhlu, který stěrka se šablonou při aplikaci pasty svírá.

Výhodami při použití šablony je opakovatelnost a aplikace pájecí pasty přesně na místa i s velmi jemnými roztečemi. Hlavní nevýhodou je cena samotné šablony [1], [3].

2. Základní metody pájení

Výběr metody pájení do značné míry ovlivňuje typ montáže, které rozlišujeme na: povrchovou montáž (Surface mount technology – SMT) a skrzděrovou montáž (Through-hole technology – THT). SMT neboli povrchová montáž, se oproti klasické montáži THT s vývody liší tím, že jsou součástky umísťovány na povrch pájecích plošek. Není tedy nutné vrtání otvorů do DPS. Zároveň lze touto montáží ušetřit velmi mnoho místa. Další výhodou je vystředění umístěných součástek vlivem působení povrchového napětí roztavené pájky.

Metody pájení lze rozdělit na tekuté pájení (flow), pájení přetavením (reflow) a ruční pájení. Tyto metody se od sebe liší způsobem aplikace pájky, použitým pájecím materiálem a způsobem přenosu tepla [1].

2.1. Tekuté pájení (flow)

Metoda pájení flow se dá rozdělit na pájení vlnou, pájení vlečením a pájení ponorem. Tyto postupy jsou nezbytné pro pájení vývodových součástek (Through-hole device – THD), jsou však využitelné i pro součástky pro povrchovou montáž (Surface mount device – SMD). Při montáži SMT jsou součástky nejprve lepeny na DPS pomocí lepidla.

Pájka je při těchto procesech dodávána do pájeného spoje až při samotném procesu pájení tím způsobem, že jsou součástky v kontaktu přímo s roztavenou pájkou po dobu až 3 sekund. Proto tyto metody nejsou vhodné pro součástky, které jsou náchylné na teplotu, jelikož by mohlo dojít k destrukci jejich vnitřní struktury [1].

2.1.1. Pájení vlnou

Pájení vlnou je jedna z nejdůležitějších a nejpoužívanějších metod tekutého pájení umožňující hromadnou výrobu. Nebezpečí zde vzniká při velmi hustém osazení součástek typu SMD, kdy mohou vznikat mosty a pájecí stíny.

Při této metodě jsou DPS posouvány dopravníkem do jednotlivých zón stroje. Samotný proces je velmi rychlý a dosahuje poměrně velké kvality oproti manuálnímu pájení.

Samotné pájení vlnou se realizovalo vlivem zvýšení potřeby automatizace, která zvýšila přesnost a počet vyráběných zařízení.

Proces pájení má pak tři etapy:

1. Aktivace povrchu

Aktivace povrchu se provádí chemicky, dezoxidací, ultrazvukem a dezoxidací v plazmě nebo reaktivními plyny.

Chemická aktivace povrchu, chemické čištění, se provádí za pomoci tavidel a její účel je zabránění tvorby oxidů. Tavidla je nutné nanášet jen potřebné množství, jinak by docházelo k usazování nežádoucích zbytků. Důležitá je rychlost toku tavidla tryskou, rozptyl, přesnost trysky a celkově kvalita nanesení. Nejstarším způsobem nanášení je pomocí vlnového dávkovače, který používá čerpadlo a smáčí DPS. Další možnost je použití pěnového dávkovače tavidla, který nanáší tavidlo stlačeným vzduchem v provzdušňovači. Při použití bezoplachových tavidel je vhodné použít sprejový dávkovač. Dalšími možnostmi jsou: dávkování pomocí rotujícího kartáče, kombinace nástřiku s ultrazvukem a samotný ultrazvukový dávkovač, který je nejmodernějším způsobem dávkování a využívá energii ultrazvukových vln, které prochází tavidlem.

Ultrazvuková aktivace povrchu je mechanický způsob odstranění oxidů v inertní atmosféře, který se využívá pro pájecí lázeň.

Aktivace povrchu v plazmě nebo reaktivním plynem se využívá pro povrch pájených spojů, který dokonale vyčistí od oxidů a připraví ho pro smáčení pájkou [1].

2. Předehřev

Předehřátí DPS má několik zásadních důvodů. Jeho vlivem nedochází k teplotnímu šoku DPS, dále se během předehřevu aktivuje tavidlo. Ohřev desky musí být pozvolný a pomalý na požadovanou teplotu. Provádí se pomocí výhřevných desek, sáláním nebo horkým vzduchem. Zásadní je pak jeho umístění, které musí být přesně navázáno na pájecí vlnu. Při nedokonalém předehřevu by mohlo dojít k odpaření plynů z tavidla až při procesu pájení, což by mohlo vést k velké voidovitosti [1].

3. Pájení vlnou

DPS se při pájení pohybuje proti směru vlny pájky. Nájezdový úhel je 2° až 7° a rychlost záleží na typu použité vlny. Na kvalitu procesu má vliv mnoho faktorů. Těmi jsou: typ vlny, rychlost vlny, rychlost dopravníku, doba styku s pájkou, typ tavidla, způsob nanesení tavidla, typ pájecí slitiny, rozdíl mezi teplotou tavení a tuhnutí, úhly dopravníku a další [1].

2.1.1.1. Typy vln

1. Jednoduchá vlna

Jednoduchá vlna je vhodná pro použití při pájení různých typů součástek povrchové montáže. Problém ovšem může nastat při velmi hustém osazení. Vlna pak nemusí být schopná pokrýt pájkou celou plochu a může vzniknout tzv. suchý spoj. Dalším problémem je vznik mostů mezi vývody jednotlivých součástek. Tento typ vlny je nejrozšířenější, ovšem použitelný je pouze pro řídké osazení nebo při použití velkých součástek na DPS [1].

2. Dvojitá vlna

Další možností je použití dvojité vlny. Ta zaručuje kvalitní kontakt s roztavenou pájkou a zabraňuje vzniku prázdných míst. Jak již název napovídá, jsou zde použity dvě vlny. První vlna – turbulentní má za úkol dokonale smáčet povrch pájkou. Druhá vlna – laminární odstraňuje přebytečnou pájku, a tím snižuje množství poruch.

DPS se při pájení pohybuje proti směru toku pájky. Velmi důležité je zde sladění rychlosti dopravníku a rychlosti proudění vlny, čímž zajistíme kvalitní spoj. Nájezdový úhel pro obě vlny je 6° až 8°. Jako vhodný doplněk zařízení se také osvědčil horkovzdušný nůž, který se umístí za druhou vlnu a odstraňuje přebytečnou pájku. Povrch pájky se pak často pokrývá vrstvou oleje, který eliminuje prázdná místa při pájení. Po procesu je ovšem nutné jeho odstranění [1].

3. Dutá vlna

Dutá vlna využívá při smáčení součástek Bernoulliho zákon, což znamená, že v místě součástky je zvýšená rychlost, klesá statický tlak a pájka je tlačena tlakem z okolí na součástku. Tím je zaručeno velmi dobré smáčení všech součástek. Pro zabezpečení kvalitního spoje platí zásada, že rychlost dopravníku se rovná rychlosti vlny [1].

2.1.1.2. Výhody a nevýhody při pájení vlnou

Mezi výhody této metody pájení patří možnost pájení velkého množství DPS, automatizace procesu a možnost pájení součástek spojovaných pokovenými otvory.

Nevýhody jsou: vysoká energetická náročnost, chyby při pájení jako je možnost nedokonalého vyplnění otvorů, vznik mostů a krápníku, vznik kuliček pájky, odloupenutí spoje a suchý spoj [1].

2.1.2. Pájení ponorem

Stejně jako při pájení vlnou je u pájení ponorem využita lázeň z horké pájky. Samotný proces je pak velmi jednoduchý. DPS se ponoří na určitou dobu do lázně, která zároveň zabraňuje přístupu vzduchu. Tím nedochází k povrchové oxidaci. Na výstupu z lázně bývá umístěný horkovzdušný nůž, který odstraňuje přebytečnou pájku.

Tato metoda pájení má následující výhody: vysoká rychlost ohřevu, snadná regulace a kontrola teploty lázně, rovnoměrný ohřev, a jiné.

Nevýhodou je fakt, že všechny součástky musí být dokonale suché, jinak by mohlo dojít k explozi lázně. Dále je značně nevýhodné, že proces pájení trvá velmi dlouho [1].

2.2. Pájení přetavením (reflow)

Pájení přetavením je velmi významná metoda pájení při použití SMD součástek na DPS. Tato metoda totiž umožňuje velmi husté osazení součástek, čímž se redukuje velikost plošných spojů.

Postup je zcela odlišný od pájení typu flow. Na DPS se nejprve nanese na pájecí plošky pájecí pasta, osadí se součástkami a následuje proces přetavení podle teplotního profilu daného pro použitou pájecí pastu. Teplotní profil hraje při přetavení obrovskou roli a musí být odzkoušený, nejlépe doporučený výrobcem pájecí pasty. Nejprve musí dojít k předehřátí, kdy se začnou odpařovat kapalně složky pájecí pasty, což zabrání přístupu vlhkosti do spoje. Poté se aktivuje tavidlo, které vyčistí povrch pájecích plošek součástek a DPS. Po předehřátí dojde k přetavení pájecí pasty, čímž se zároveň vystředí pájené součástky na DPS. Pokud by byl nevhodně zvolený proces předehřátí (špatný teplotní profil pro použitou pájecí pastu), může docházet k mnohým negativním vlastnostem, které do jisté míry ovlivní pájený spoj.

Technologie přetavení se rozlišuje podle způsobu přetavení pasty na přetavení infračerveným zářením, pájení konvekcí, kondenzací nasycených par, laserem, odporové a další [1], [3].

2.2.1. Přetavení infračerveným zářením

Pro přetavení se využívá infračerveného záření, které se částečně absorbuje, částečně odrazí a částečně projde. Míra těchto jevů závisí na vlastnostech ozářeného materiálu a na použité vlnové délce. U této technologie ovšem narážíme na problém, že všechny prvky na DPS nemají stejný absorpční koeficient. Dochází tedy ke značnému tepelnému namáhání některých součástek. Abychom tomuto předešli, je možné tmavé součástky opatřit reflexním nátěrem.

Pece, která využívá infračerveného záření, má standardně tři zóny, které slouží k předehřevu, aktivaci tavidla a samotnému přetavení. Mohou se ale objevit zařízení, která mají až 12 teplotních zón. Jako zdroj se často používá wolframový zářič.

Výhody této techniky jsou jednoduchá konstrukce pece, pásmové ovládání pece a nízká setrvačnost ohřevu. Nevýhodou je značné pohlcování tepla součástkami [1], [3].

2.2.2. Přetavení horkým plynem

Princip je takový, že horký plyn za velmi krátkou dobu přetaví pájecí pastu. Jeho teplota je o několik desítek stupňů vyšší, než je teplota přetavení pájecí pasty. Tvar proudícího plynu závisí na velikosti a tvaru trysky. Důležitým aspektem u metody přetavení horkým plynem je, že proces probíhá v inertní atmosféře, kvůli snížení oxidace povrchu [1].

2.2.3. Přetavení pomocí kondenzace nasycených par

Po přehřátí se DPS ponoří do nasycených par fluorovaných uhlovodíků, které kondenzují na chladnějších místech celku. Během tohoto procesu dojde k uvolnění energie skupenského tepla, které ohřívá DPS. Postupně takto teplota roste, až dojde k přetavení pájecí pasty. Teplota varu použitého média musí být vždy větší než teplota přetavení pájecí pasty [3].

2.2.4. Přetavení pomocí laseru

Tato metoda je podobná jako při přetavení pomocí infračerveného záření. Svazek monochromatického koherentního světla je nasměrovaný na DPS. Zde je záření absorbováno, odraženo a rozptýleno. Absorbované záření způsobí ohřátí a přetavení pájecí pasty. Vlastnosti použitého laseru jsou zásadní pro míru ohřevu materiálu.

Výhodou tohoto procesu je velmi dobrá kontrola teploty přetavení a nízká doba působení vysoké teploty na DPS. Výraznou výhodou je také velká rychlost pájení, kdy stačí na pájený spoj působit pouze několik milisekund [1].

2.3. Ruční pájení

V současnosti se ruční pájení využívá pouze pro opravy zařízení nebo pro montáž speciálních elektrických součástek, které nemůžeme strojově osadit. Pájka je zde většinou ve formě drátu a do spoje se nanáší přes hrot páječky [1].

3. Povrchové úpravy DPS

Povrchové úpravy desek plošných spojů mají velký vliv na samotné pájení. Brání totiž oxidaci pájeného povrchu, čímž zamezují korozi a následným problémům s pájitelností. Další pozitivní vlastností je možnost delšího skladování. Výsledný povrch by měl mít dobrou smáčivost a odolnost proti korozi. Velmi důležitou roli hraje také typ povrchové úpravy pro vznik intermetalických sloučenin [1]. Nejvyužívanější povrchové úpravy jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Pro volbu povrchové úpravy jdou důležité následující požadavky:

- Materiálová kompatibilita – např. chemicko-fyzikální kompatibilita s měděným povrchem a kompatibilita s nepájeivou maskou.
- Procesní kompatibilita – např. výsledný rovný povrch, možnost kontaktování jinou technologií, vhodná tloušťka povrchu.
- Environmentální kompatibilita – např. netoxická povrchová úprava, kompatibilita s environmentálními vlivy [2].



Obrázek 4 – Povrchová úprava DPS [1].

Tabulka 2 – Nejvýužívanější povrchové úpravy pájecích plošek [1].

Povrchová úprava	Technologie	Tloušťka vrstvy [μm]
OSP	OSP nanesená sprejováním na DPS	0,2–0,6
ENIG	ponor DPS do chemické koupele (2x)	Ni: 4–6
		Au: 0,05–0,2
HAL	ponor DPS do koupele taveniny pájky, nadbytečná pájka následně odstraněna horkovzdušnými noži	5–45
Ponor do Sn	ponor DPS do chemické koupele	0,6–1,2
Ponor do Ag	ponor DPS do chemické koupele	0,15–0,3

3.1. OSP

Povrchová úprava OSP (Organic Solderability Preservative) je organický povlak nanesený na měď ponořením do lázně, kde jsou absorbované efektivní složky organických inhibitorů drženy na povrchu pomocí Van der Waalsových sil. Na mědi se tedy vytvoří průhledný, tenký a rovnoměrný ochranný film, který má tloušťku okolo desetiny mikrometru s vynikající tepelnou a vlhkostní odolností. Hlavním účelem této povrchové úpravy je chránit měděný povrch proti oxidaci po dobu skladování (až jeden rok) a během pájecího procesu.

Výhodou OSP je odolnost vůči otěru, rovinnost povrchu, nízká cena, snadná aplikovatelnost a vhodné použití pro součástky s malým rozstupem pájecích vývodů.

Nevýhodou je stárnutí samotné povrchové úpravy, a tedy poměrně krátká doba skladovatelnosti.

Při zpracování je doporučeno minimalizovat prodlevy mezi operacemi pájení, minimalizovat teplotu přetavení a rychlé chlazení pájeného spoje, zvýšit ponor DPS do pájky pro lepší výplň otvorů a použití nízkoaktivních tavidel [1], [2], [3].

3.2. ENIG

Povrchová úprava ENIG (Electroless Nickel and Immersion Gold) se galvanicky nanáší na pájecí plošky. K tomuto účelu se používají bezkyanidové zlatící lázně. Nejprve se nanese vrstva niklu s tloušťkou v řádech jednotek μm a následně vrstva zlata o tloušťce zhruba setiny až desetiny μm . Au zde slouží převážně pro prevenci oxidace niklu, protože je zoxidovaný nikl špatně pájitelný.

Výhodou této povrchové úpravy je rovinnost povrchu, komplexní znalost procesu nanášení jednotlivých vrstev, možnost vícenásobného pájení a zabránění vzniku intermetalických vrstev (vlivem kompatibility cínu a niklu).

Mezi nevýhody patří vyšší cena, možnost vzniku „černých pájecích plošek“ vlivem přítomnosti fosforu na rozhraní chemicky naneseného povlaku a křehkost Ni. Při použití silnější vrstvy zlata také povrchová úprava vykazuje horší smáčecí charakteristiky [1], [2].

3.3. HAL bez olova

Pro aplikaci povrchové úpravy HAL (Hot Air Levelling) se DPS ponoří do roztavené pájky. Výsledná vrstva nanesené pájky na pájecí plošku může být až desítky μm . Příklady nanesené tloušťky pájecí slitiny ukazuje tabulka č. 3.

Tabulka 3 – Příklad rozpětí tloušťky povrchové úpravy HAL pro konkrétní slitiny [1].

Bezolovnatá slitina	Rozpětí nanesené tloušťky
Sn0,3–0,7Ag	2,6 – 14,2 μm
Sn0,5–3Ag	1,0 – 12,32 μm
Sn0,6–0,7Ag	2,7 – 14,72 μm

Přebytečná pájka se dále odstraňuje horkovzdušnými noži, které foukají na DPS horký vzduch.

Tato povrchová úprava má výhodu především ve velmi dobré smáčivosti a možnosti opakování pájení.

Nevýhodou je zde teplotní šok DPS, nestejnomyšnost tloušťky povrchu a tvorba intermetalických sloučenin [1], [2].

3.4. Imerzní Sn, Ag

Při nanášení povrchové úpravy Sn nebo Ag se používá chemický nebo galvanický proces nanášení kovové vrstvy. Velkou výhodou tohoto povrchu je rovinnost a podstatně nižší cena než při nanášení povrchové úpravy ENIG. Nevýhodou je ovšem horší pájitelnost a kratší doba skladování.

1. Sn vykazuje poměrně velkou rychlost nanášení a volitelnou drsnost povrchu. Tloušťka vrstvy ovšem nemusí být na všech místech stejná. Pájitelnost se razantně snižuje po prvním pájení. Pro zvýšení odolnosti proti oxidaci se mohou používat speciální katalyzátory depoziční reakce, díky kterým se na povrchu mědi vytvoří velké krystaly cínu, čímž roste hustota a snižuje se tak možnost oxidace a difúze. Další možností prevence oxidace je potažení tenkým organickým filmem. Při použití této povrchové úpravy ovšem značně roste riziko růstu intermetalických sloučenin.

Defekty, které se mohou u této povrchové úpravy projevit, jsou cínové whiskery, které vznikají při mechanickém, elektrickém, teplotním nebo vlhkostním namáhání. Dále zde může dojít k tzv. cínovému moru, při němž se při teplotách pod 13 °C transformuje bílý cín na alfa cín (šedý). Při tomto procesu dochází ke změně struktury cínu a jeho objem se zvětší o 26 %. Tato transformace začíná na povrchu a postupně projde do celého spoje a změní jeho vlastnosti.

2. Povrchová úprava Ag má velmi dobrou smáčivost, pájitelnost, rovnoměrnou tloušťku a může se opakovaně pájet. Bohužel se při skladování velmi snadno vytváří oxidy a sulfidy. K jeho pasivaci se tedy jako u Sn užívají organické povlaky či chromany. Tato povrchová úprava je vhodná pro součástky s jemným rozestupem vývodů, protože je po nanášení dostatečně rovná a tlustá pouze několik desetin μm [1], [2].

3.5. Srovnání různých typů povrchových úprav

Celosvětově je nejvyužívanější povrchovou úpravou HAL, který je ovšem nevhodný pro pájení součástek s velmi malou vzdáleností vývodů. Postupně ho tedy nahrazují ostatní výše uvedené povrchové úpravy, které mimo jiné vykazují podstatně nižší cenu při aplikaci [1]. Vlastnosti jednotlivých povrchových úprav shrnují následující tabulky:

Tabulka 4 – Srovnání různých typů povrchových úprav [2].

Vlastnosti	HAL	ENIG	OSP	Imerzní Ag	Imerzní Sn
Vícenásobný teplotní cyklus	Ano	Ano	Probl.	Ano	Ano
Rovinnost povrchu	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Tloušťka vrstvy [μm]	1–20	5	0,5	0,16	0,1
Fine Pitch aplikace	Probl.	Ano	Ano	Ano	Ano
Kontaktování	Ne	Ano	Ne	Ano	Ne
Teplotní stres nad 65 °C	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
Údržba lázně	Obtížná	Střední	Snadná	Snadná	Snadná
Řízení procesu	Střední	Obtížné	Snadné	Snadné	Snadné
Náklady	Střední	Vysoké	Nízké	Střední	Nízké
Ekologické aspekty	Špatné	Dobré	Dobré	Dobré	Dobré
Bezolovnatá pájka SnAgCu	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje

Tabulka 5 – Porovnání různých vlastností povrchových úprav [1].

Vlastnosti	HAL	ENIG	OSP	Ponor do Ag	Ponor do Sn
Teplota zpracování (°C)	240–260	80	40	50	70
Počet cyklů přetavení	6	6	2	6	2–3
Skladovací doba (měsíce)	18	24	6	12	6
Relativní cena	1	3	0,7	0,8	0,8
Jemný povrch	ne	ano	ano	ano	ano

Tabulka 6 – Výhody a nevýhody jednotlivých povrchových úprav DPS [1].

Povrchová úprava	Výhody	Nevýhody
HAL	<ul style="list-style-type: none"> + Dobrá smáčivost + Dobrá skladovací doba + Vhodný pro vícenásobné přetavení + Minimální povrchová oxidace + Nízká cena + Kompletní smáčení na celé plošce Cu + Možnost opětovného zpracování + Dobré procesní okno a dobrá přilnavost + Excelentní pájené spoje + Dobrá elektrická testovatelnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Kontrola procesu - Slabá rovinnost - Tmavé pájecí spoje
OSP	<ul style="list-style-type: none"> + Dobrá rovinnost + Minimální oxidace + Možnost opravy + Velmi nízká cena + Dostatečné procesní okno + Dobrá kontrola procesu 	<ul style="list-style-type: none"> - Krátká skladovací doba - Degradace vlivem vysoké teploty - Neschopnost vícenásobného přetavení - Citlivost tavidla - Nízká smáčivost - Nízká přilnavost - Špatná elektrická testovatelnost
Imerzní Ag	<ul style="list-style-type: none"> + Dobrá smáčivost + Dobrá skladovací doba + Dobrá rovinnost + Vhodné pro vícenásobné přetavení + Možnost opravy + Nízká cena + Dobrá kontrola procesu + Dobrá elektrická testovatelnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Musí se balit do bezsírového papíru - Přiměřené procesní okno
Imerzní Sn	<ul style="list-style-type: none"> + Dobrá smáčivost + Dobrá rovinnost + Vhodné pro vícenásobné přetavení + Nízká oxidovatelnost + Nízká cena + Dobrá kontrola procesu + Dobrá přilnavost + Dobrá elektrická testovatelnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Komplexní proces - Přiměřené procesní okno - Možnost cínových whiskerů - Náročné ruční pájení
ENIG	<ul style="list-style-type: none"> + Excelentní smáčivost a rovinnost + Vhodný pro vícenásobné přetavení + Minimální povrchová oxidace + Vynikající doba skladování + Dobrá přilnavost + Dobrá elektrická testovatelnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Přijatelná cena - Komplexní proces zpracování - Nemožnost opětovného zpracování povrchu

4. Tavidla

Tavidlo má při pájení značný vliv na spolehlivost pájeného spoje. Jeho funkce je zabránění oxidace a reoxidace spojovaných povrchů, zlepšení přenosu tepla a odstranění nečistot a reakčních produktů z povrchu, čímž umožní lepší roztékavost pájky. Může se vyskytovat v tekutém stavu (živice), tuhém stavu (organické látky) a jako pasta z anorganických solí, kyselin a zásad. Při zahřátí tavidlo reaguje s oxidy a způsobí snížení povrchového napětí a lepší rozložení teploty po celé ploše pájeného spoje, čímž se zlepší smáčivost.

Vlastnosti, které jsou požadované od pájeného spoje, mohou být ovšem tavidlem narušeny. Proto se u některých typů tavidla doporučuje jeho odstranění po dokončení procesu pájení. Požadovanými vlastnostmi je vysoká elektrická vodivost, odolnost vůči korozi, pevnost v tahu, smyku a při dynamickém namáhání. Špatná elektrická vodivost může být způsobena trhlinami, voidy, zanesením tavidla do spoje, mosty atd. Další důležitá vlastnost, odolnost proti korozi, může být neodstraněným tavidlem také do značné míry ovlivněna. Tavidlo totiž může v určitém prostředí začít reagovat a mohou vznikat agresivní elektrolyty nebo může přímo obsahovat agresivní aktivační látky. Proto je trendem vyrábět bezoplachová tavidla na bázi syntetických živic, bez halogenů a s nízkou teplotou tání.

Při nanášení tavidla na DPS se používají tekutá tavidla a aplikace se obvykle provádí napěněním, stříkáním nebo vlnou. Při použití metody pájení přetavením, je tavidlo již obsažené v pájecí pastě, kde představuje zhruba 10 % - 15 % její hmotnosti.

Tavidlo tedy volíme vzhledem ke:

- způsobu nanášení,
- pájitelnosti součástek a DPS,
- vlastnostem pájecího zařízení,
- zvolené metodě pájení,
- složitosti odstranění zbytků po procesu pájení (při odstraňování),
- stabilitě ponechaných zbytků tavidla na DPS (při jejich ponechání na DPS) [1], [2].

4.1. Rozdělení tavidel dle norem

Tavidla můžeme dělit dle několika základních norem, kde se každá norma zabývá rozdělením dle určitých vlastností podle „International Standard Organisation“.

4.1.1. Rozdělení podle vojenské americké normy MIL-F-14256

Tato norma je vzhledem ke svému vojenskému zařazení a staršímu datu vydání poměrně neaktuální. Protože se s ní ovšem stále můžeme setkat, byla do těchto rozdělení zařazena.

Podle této normy se tavidla dělí dle jejich typu, složení, aktivace, formy a způsobu aplikace na následující kategorie:

1. **Oplachová** – po procesu pájení je nutné tavidlo odstranit, protože zanechává zbytky, které způsobují korozi.
2. **Bezoplachová** – tato tavidla nezpůsobují korozi a mohou dokonce pájený spoj chránit před vlivem prostředí [1]. Povlak, který okolo pájeného spoje vzniká, zabraňuje absorpci vlhkosti, která může způsobit růst dendritů, proudový svod nebo korozi. Bezoplachová tavidla musí splňovat následující podmínky – nesmí zanechávat korozivní zbytky, nesmí zanechávat lepivé zbytky, nesmí zhoršovat stav pájeného zařízení, musí zajišťovat vynikající pájitelnost, musí umožňovat přístup měřících jehel na testování, musí vyhovovat předpisům o ochraně zdraví a bezpečnosti. Možnost zanechání zbytků po procesu pájení je ale podmíněna sublimací reaktivních prvků z tavidla při procesu přetavení. Oproti běžným tavidlům, kde je jejich zastoupení okolo 40 %, je obsah těchto látek u bezoplachových tavidel snížen na 1 % – 5 % koncentrace, čímž je riziko značně sníženo. I přes tyto vlastnosti ovšem může nastat situace, kdy tyto zbytky budeme muset odstranit. To je obvykle nutné provést při použití ve zhoršených klimatických podmínkách, kde izolační vlastnosti zbytků nebudou dostačující. Dále pak při vyšších nárocích na estetiku výrobku [3].
3. **Anorganická tavidla** – způsobují korozi, je tedy třeba je po procesu pájení odstranit. Mají formu pasty nebo roztoku a jedná se o halogenové soli nebo soli bez halogenů.
4. **Organická tavidla** – obvykle se jedná o kapaliny nebo pasty a dělí se na:
 - **Rozpustná ve vodě** – neaktivovaná tavidla, aktivovaná tavidla bez halogenů a halogenová tavidla.
 - **Rozpustná v rozpouštědle** – na bázi kalafuny nebo syntetická tavidla.
5. **Živcová tavidla** – tavidla na bázi kalafuny, které se dle úrovně aktivace dělí na:
 - **R (Resin)** – tavidlo s nejnižší aktivitou, které vzniká rozpuštěním bílé pryskyřice v rozpouštědle. Vlivem slabé čisticí schopnosti se hodí pro pájení dobře pájených povrchů jako je měď, mosaz, stříbro a nikl. Příliš se nehodí pro pájení oceli. Díky velmi nízké aktivitě při pokojové teplotě není nutné tento typ tavidla po procesu pájení odstraňovat.
 - **RMA (Resin Middle Activated)** – tavidlo skládající se z pryskyřice, rozpouštědla a malého množství aktivátorů, jako jsou kyseliny a halogenidy. Oproti tavidlu typu R má aktivitu vyšší. Ta je ovšem stále poměrně nízká a hodí se pro pájení dobře pájitelných povrchů, jako je měď. Obvykle není nutné tavidlo odstraňovat. Pokud ale ke korozi dojde, je odstranění nezbytné.

- **RA (Resin Activated)** – tavidlo skládající se z pryskyřice, rozpouštědla a velmi agresivních a účinných aktivátorů. V důsledku své vyšší aktivity se hodí pro pájení mírně oxidovaných a špatně pájitelných povrchů. Při použití způsobí velmi rychlé smáčení pájených povrchů, čímž dojde k redukci defektů. Po procesu je toto tavidlo nutné vždy ihned odstranit, protože způsobuje korozi.
 - **RSA (Resin Strong Activated)** – tavidlo RSA má obdobné parametry jako tavidlo RA, ale je ještě více aktivováno. Podobně jako u tavidla RA je jeho zbytky vždy nutné odstranit.
6. **NC (No-Clean)** – již podle názvu není nutné zbytky těchto tavidel odstraňovat. Jedná se o tavidla bezoplachová. Hodí se převážně pro snadno pájitelné povrchy a zbytek na DPS zůstane čistý, tvrdý a nekorozivní. Pokud chceme tento zbytek například z estetických důvodů odstranit, je nutné použít vhodné rozpouštědlo.
 7. **WS (Water Soluable)** – tato tavidla mají tu vlastnost, že jsou rozpustná ve vodě. Skládají se z rozpouštědla, organických kyselin a tixotropních sloučenin a vykazují poměrně vysokou aktivitu. Lze je tedy využívat na velmi zoxidované a těžce pájitelné povrchy. Zbytky po procesu pájení je nutné vždy odstranit, protože jsou velmi agresivní. Jejich odstranění probíhá oplachem vodou o teplotě například 40 °C.
 8. **Podle použité metody pájení** – pro pájení přetavením, vlnou nebo umístění do jádra drátů [1].

4.1.2. Rozdělení podle normy DIN EN 61190-1-1

Následující tabulka č. 7 ukazuje rozdělení tavidel podle uvedené normy, která vychází z chemického složení a úrovně aktivity.

Tabulka 7 – Klasifikace tavidel dle normy DIN EN 61190-1-1 [1].

Složení	Aktivita tavidla (% halogenidu)	Označení aktivity tavidla	Klasifikace tavidla podle IEC	Klasifikace tavidla podle ISO
Přírodní pryskyřice (Rosin-RO)	nízká (0%)	L0	ROL0	1.1.1
	nízká (<0,5%)	L1	ROL1	1.1.2.W, 1.1.2.X
	mírná (0%)	M0	ROM0	1.1.3
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	ROM1	1.1.2.Y, 1.1.2.X
	vysoká (0%)	H0	ROH0	1.1.3.X
	vysoká (0>2%)	H1	ROH1	1.2.2.Z
Pryskyřice (Resin-RE)	nízká (0%)	L0	REL0	1.2.1
	nízká (<0,5%)	L1	REL1	1.2.2.W, 1.1.2.X
	mírná (0%)	M0	REM0	1.2.3
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	REM1	1.2.2.Y, 1.1.2.X
	vysoká (0%)	H0	REH0	1.2.3.X
	vysoká (0>2%)	H1	REH1	1.2.2.Z
Organické (Organic-OR)	nízká (0%)	L0	ORL0	2.2.1., 2.2.3.E
	nízká (<0,5%)	L1	ORL1	/
	mírná (0%)	M0	ORM0	/
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	ORM1	2.1.2, 2.2.2
	vysoká (0%)	H0	ORH0	2.2.3.0
	vysoká (0>2%)	H1	ORH1	2.2.2
Anorganické (Inorganic-IN)	nízká (0%)	L0	INL0	Neaplikovatelné
	nízká (<0,5%)	L1	INL1	
	mírná (0%)	M0	INM0	
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	INM1	
	vysoká (0%)	H0	INH0	
	vysoká (0>2%)	H1	INH1	

4.1.3. Rozdělení podle normy ISO 9454-1 Soldering Fluxes

Tabulka č. 8 zobrazuje poslední rozdělení podle složení tavidel dle „International Standard Organisation“.

Tabulka 8 – Dělení tavidel podle normy ISO 9454-1 Soldering Fluxes [1].

Typ tavidla	Základ	Aktivátor	Forma
1. Pryskyřičná	1. Pryskyřice	1. Bez aktivátorů	A tekutá
	2. Jiné pryskyřice	2. Halogeny	
		3. Nehalogenové aktivátory	
2. Organická	1. Vodou ředitelná	1. Bez aktivátorů	B pevná
	2. Vodou neředitelná	2. Halogeny	
		3. Nehalogenové aktivátory	
3. Anorganická	1. Soli	1. S chloridem amonným	B pevná
	2. Kyseliny	2. Bez chloridu amonného	
		3. Alkálie	1. Kyselina fosforečná
	2. Jiná kyselina		
		1. Aminy nebo amoniak	

4.2. Tavidla pro bezolovnaté pájení

Bezolovnaté pájecí slitiny vykazují vyšší povrchové napětí a vyšší potřebnou teplotu k přetavení. Zásadním úkolem tavidla je tedy zlepšit jejich smáčivost a vydržet vyšší teploty, aniž by se zvýšila jejich výparnost. Z tohoto důvodu se obvykle používají velmi aktivní tavidla, jejichž zbytky je nutné po procesu pájení odstranit. Ideální se jeví vodou oplachovatelná tavidla nebo tavidla, jejichž zbytky není nutné odstraňovat.

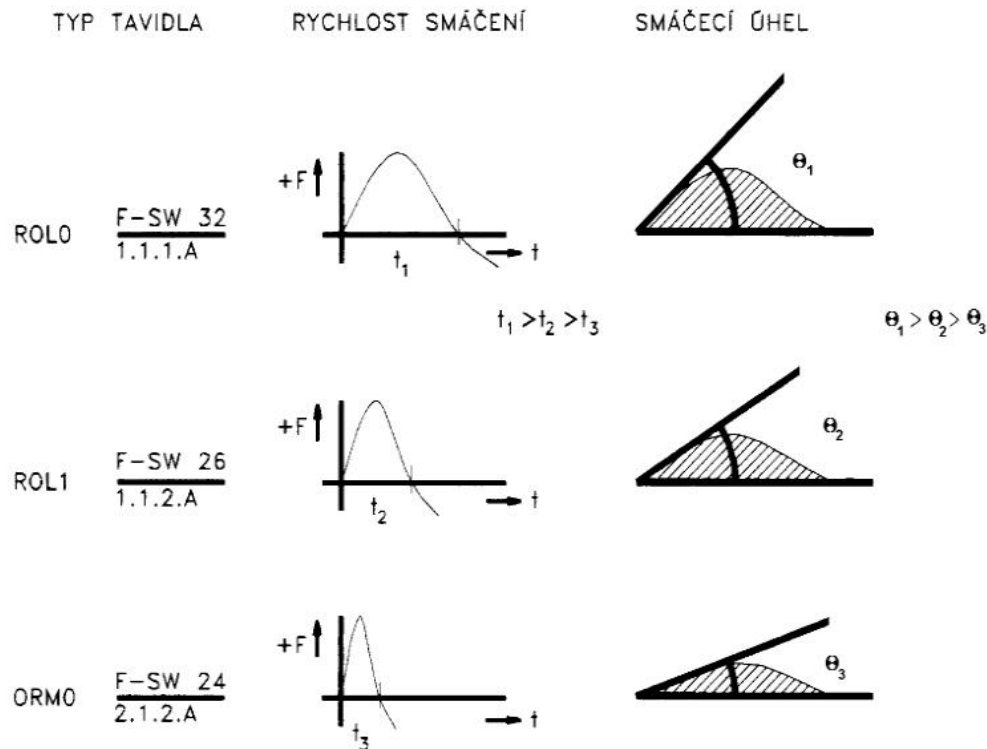
Jako vhodná se ukázala tavidla VOC-free (Volatile Organic Compounds-free), což jsou tavidla, ze kterých neunikají organické složky. Obsahují podíl pevné složky okolo 4 % – 15 %, nejsou tak těkavá a hůře se ukládají na desku. Jako vhodný aktivátor se pro ně jeví pryskyřice, které mají dobré chemické i fyzikální vlastnosti (zlepšují smáčivost, čistí povrch a celkově tedy zlepšují elektrické a mechanické vlastnosti spoje). Další velkou výhodou tavidla na pryskyřicové bázi je, že působí hydrofobně. Tím slouží jako ochrana proti korozi ve vlhkých prostředích. Pro pájení přetavením se jeví jako vhodné tyto dva typy tavidel:

- VOC-free tavidlo s diskarbolickými kyselinami (pro snížení výparnosti)
- VOC free tavidlo s pryskyřicí vázanou ve vodě [1].

4.3. Srovnání kvality tavidel

Kvalita tavidla se porovnává podle několika základních vlastností. Podle vodivosti tavidla, podle korozivních vlastností, podle vodivosti tavidlového zbytku a dle smáčecí schopnosti v kombinaci s pájkou.

Porovnání se pak provádí na základě měření smáčecích úhlů, sledováním roztékavosti pájky a pomocí meniskografu [2].



Obrázek 5 – Porovnání různých typů tavidel [2].

4.3.1. Test na měděné zrcátko

Při tomto testu se určuje vliv tavidla na povrch měděné vrstvy, která je napařená na skleněné destičce. Testování probíhá při teplotě 25 °C, při 50 % relativní vlhkosti. Tavidlo se nanese a nechá působit po dobu 24 hodin. Následně se opláchne a pozorujeme úroveň poškození zrcátka. Při tomto testu se také obvykle aplikuje srovnávací tavidlo pro porovnání výsledků [2].

4.3.2. Test na obsah halogenidů

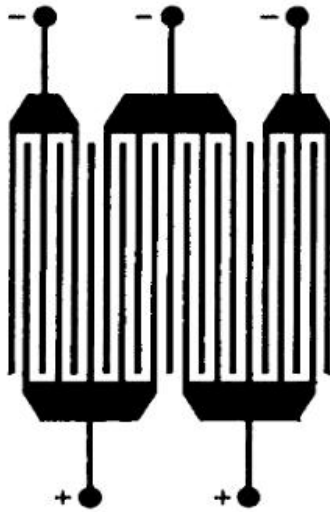
Testování na obsah halogenidů, jako jsou chloridy, bromidy a jodidy, se provádí na stříbro chromátovém papíru. Tavidlo se nanese na papír a přítomnost halogenidu se indikuje jeho zbarvením [2].

4.3.3. Test na ionizovatelné nečistoty

Měření se provádí dle MIL-C-28809B a IPC-TM-650 metodou vodního výluhu [2].

4.3.4. Test povrchového izolačního odporu

K testování povrchového izolačního odporu se používají testovací obrazce dle IPC-B-25 [2].



Obrázek 6 – Měření povrchového izolačního odporu [2].

4.3.5. Korozní test

Při tomto testu se na čistý vzorek plátovaného základního materiálu nanese tavidlo, přidá se pájka a kontaktně se přetaví. Vzorek se dále vloží do klimatické komory na 10 dnů, při nastavení komory na teplotu 50 °C a 65 % relativní vlhkosti. Následně se pozoruje úroveň koroze [2].

4.3.6. Elektromigrace

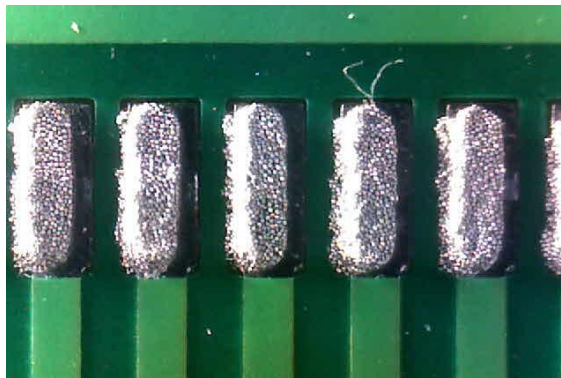
V prostředí s teplotou 85 °C, relativní vlhkostí 85 % a při 10 V stejnosměrného napětí se podrobí připravené vzorky stárnutí po dobu 500 hodin. Následně se sleduje změna povrchového izolačního odporu a nárůst šířky vodičů v důsledku elektromigrace při připojení 50 V stejnosměrného napětí [2].

5 Chyby při pájení

Kvalitu a spolehlivost pájeného spoje ovlivňuje velké množství faktorů. V této kapitole jsou uvedeny některé základní chyby vznikající při pájení. Vzhledem k obsahu praktické části je důraz kladen na dutiny v pájených spojkách.

5.1. Nedostatečné přetavení

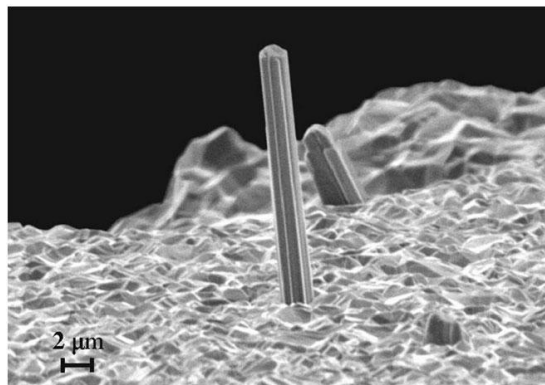
Při procesu pájení může nastat situace, kdy nedojde ke správnému přetavení pájecí pasty. Příčina tohoto problému může být nízká maximální teplota pájecího profilu, dlouhá doba mezi nanesením pájecí pasty a přetavením nebo celkově špatně zvolený profil přetavení [1].



Obrázek 7 – Nedostatečné přetavení pájecí pasty [8].

5.2. Whiskery

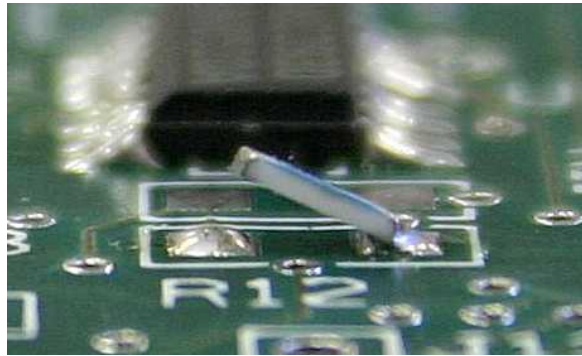
Whisker je elektricky vodivá krystalická struktura, která může vyrůstat z povrchu kovu. Vlivem zavedení bezolovnatého pájení je riziko růstu whiskerů z pájených spojů mnohem vyšší, protože cín je pro tuto vadu typický. Dalším rizikovým faktorem je snížení vzdáleností mezi pájenými spoji. Problematika vzniku whiskerů není zcela jasná a do značné míry se výsledky výzkumů liší. Předpokládá se ale, že whisker vzniká působením tlakové síly na cín, čímž začnou klouzat krystalová zrna podél jejich hranic a v krystalové mřížce se vytvoří volná místa. Ta jsou následně vyplněna atomy ze sousedního krystalového zrna [10].



Obrázek 8 – Cínový whisker [9].

5.3. Zdvihnutí součástky (Thombstone)

Efekt „náhrobního kamene“ znamená zvednutí části SMD součástky během pájení. Tento jev může nastat při nerovnoměrné distribuci tepla nebo nerovnoměrném smáčení součástky. Povrchové napětí roztavené pájky pak způsobí různé rozložení momentů na obě strany [1], [12].

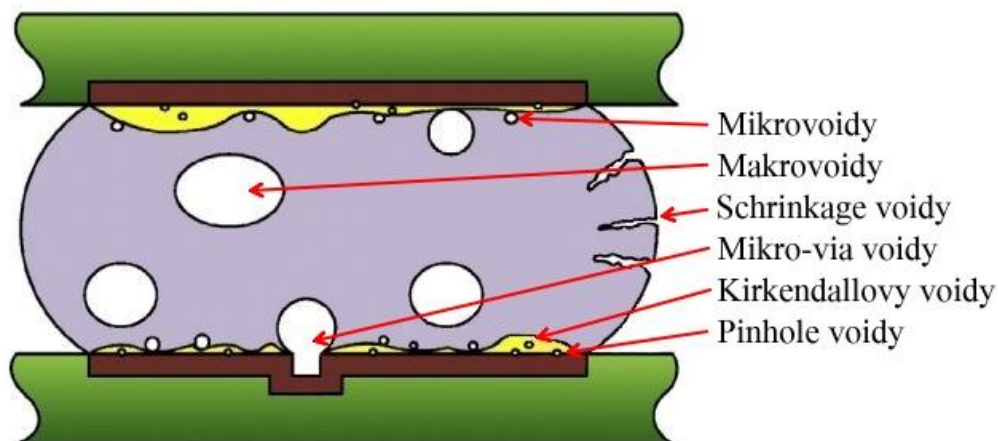


Obrázek 9 – Efekt náhrobního kamene [11].

5.4. Voidy

Voidy neboli dutiny v pájených spojích, můžeme podle IPC A610 a IPC 7065 charakterizovat jako procesní anomálie, defekt pájení nebo procesní indikátor a jsou typické pro reflow pájení. Uvnitř dutin se mohou vyskytovat plyny, nekovové materiály, vakuum nebo jiné zbytky. Při jejich velkém množství (norma IPC-A-610D uvádí při více než 25 % z celkové plochy pájeného spoje [28]) mohou snižovat spolehlivost zařízení, což je velký problém hlavně u zařízení vysokých výkonů, kde obvodem protéká velký proud. Dále zužují vodivé cesty, což vede ke zvýšení elektrického odporu. Snižují také odolnost proti mechanickému namáhání.

Voidy lze rozdělit do několika základních kategorií, kterými jsou mikrovoidy, makrovoidy, micro – via voidy, shrinkage voidy, kirkendallové voidy a pinhole voidy [13], [14]. Tvary a lokace voidů ve spoji ukazuje následující obrázek č. 10.

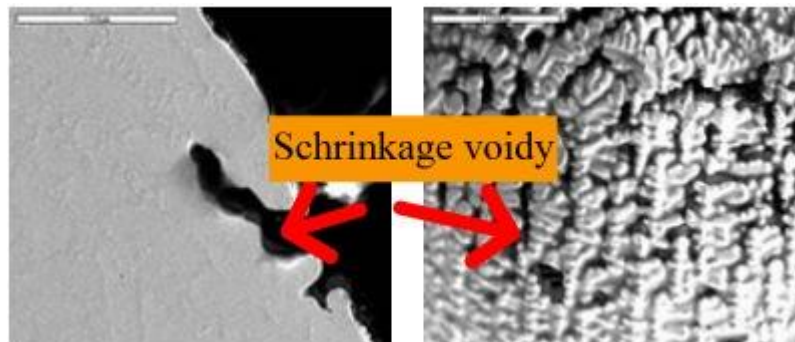


Obrázek 10 – Umístění a typy voidů v pájeném spoji [14].

5.4.1. Shrinkage voidy

Shrinkage voidy nejsou typickým zástupcem dutin v pájeném spoji. Nemají totiž obvyklý kruhový tvar. Jedná se o lineární praskliny, které vstupují z povrchu do pájeného spoje.

Proces jejich vzniku je přisuzován smrštění pájecí slitiny při tuhnutí. Lze jim tedy předejít řízeným procesem ochlazování. Typicky se vyskytují u pájecích slitin typu SAC. Na rozdíl od ostatních dutin významně neovlivňují spolehlivost pájeného spoje [13].

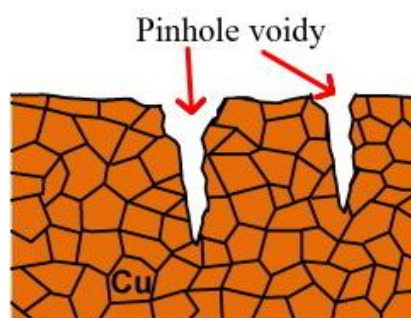


Obrázek 11 – Shrinkage voidy [16].

5.4.2. Pinhole voidy

Pinhole, neboli dírkové voidy, typicky vznikají u měděné povrchové úpravy přímo na DPS. Jejich velikost se pohybuje od 1 μm do 3 μm .

Příčina jejich výskytu je nemožnost úniku chemikálií při procesu pokovení DPS. Je možné je pozorovat elektronovým mikroskopem ještě před procesem pájení přímo na pájecích ploškách desek plošných spojů [13], [19].

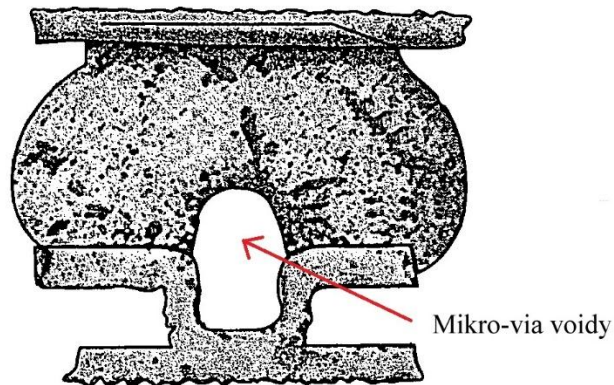


Obrázek 12 – Pinhole voidy [17].

5.4.3. Mikro-via voidy

Tyto voidy vznikají při úniku plynu z otevřených nebo zakrytých mikro-via otvorů. Pájecí pasta se při nanášení nedostane do celého spoje. Tím vznikne plynová kapsa, která se rozpíná. Tyto otvory se používají při použití více-vrstvých DPS, kde slouží jako vodivé propojení mezi jednotlivými vrstvami.

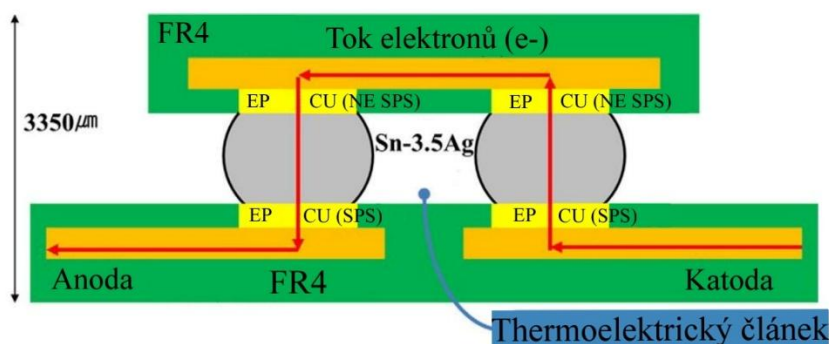
Velikostně bývají dutiny větší, než 100 μm . Záleží ovšem na typu a velikosti mikro propojů. Pro předejití jejich výskytu je možné použít vícenásobný tisk pájecí pasty, použití pasty s menšími zrny, zvýšit aktivitu tavidla nebo změnit složení tavidla. Při výskytu těchto voidů dochází k namáhání pájeného spoje, a tím klesá jeho spolehlivost [13], [19].



Obrázek 13 – Mikro-via voidy [18].

5.4.4. Kirkendallové voidy

Tento typ dutin vzniká v intermetalické sloučenině na hranici pájka – povrchová úprava součástky a pájka – DPS. Voidy nevznikají při samotném procesu pájení, ale až při tepelném stárnutí a elektromigraci. Jev je způsobený nerovnoměrným procesem difúze pájky a povrchové úpravy. Při elektromigraci dochází k toku materiálu, a tím ke zvýšení tlakového namáhání směrem k anodě. Tímto procesem se vytvoří větší vrstvy intermetalických slitin na rozhraní. Kirkendallové voidy způsobují degradaci pájeného spoje a značně snižují spolehlivost [13].



Obrázek 14 – Kirkendallové voidy způsobené elektromigrací [13].

5.4.5. Mikrovoidy

Dutiny menší než 25 μm se obvykle klasifikují jako planární mikrovoidy. Vyskytují se na rozhraní pájka – povrchová úprava DPS. Typickou povrchovou úpravou, kde se tyto dutiny vytváří je imerzní stříbro. Obvyklý výskyt je ale i u ENIG nebo OSP.

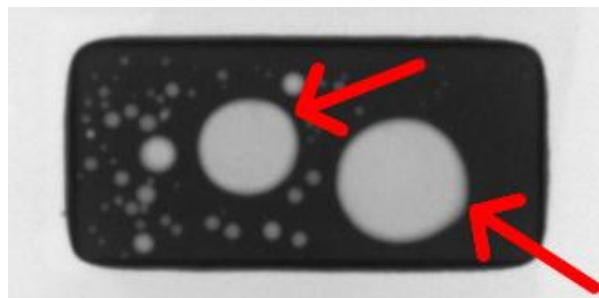
Předpokládá se, že hlavní příčina jejich vzniku je chybně vyrobená povrchová úprava, kdy následně během procesu pájení dojde k uvolnění plynů a vytvoření voidů. Tyto voidy není možné prakticky ihned po přetavení detekovat. Mají ovšem velký vliv na spolehlivost pájeného spoje [13].



Obrázek 15 – Mikrovoidy [13].

5.4.6. Makrovoidy

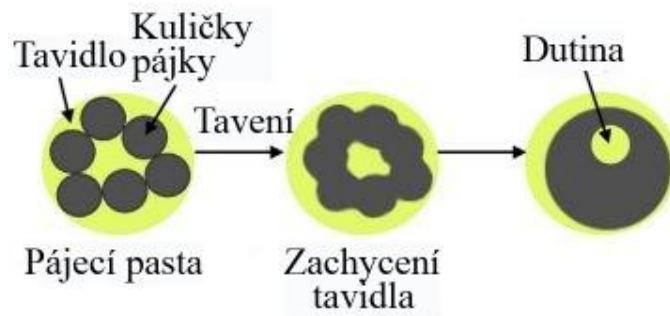
Jako makrovoidy (procesní voidy), se obvykle klasifikují dutiny větší, než 100 μm v průměru. Jejich přítomnost má vliv na spolehlivost pájeného spoje, a to jak mechanicky, tak i elektricky. Při jejich výskytu není nejzásadnější množství ani velikost, ale jejich umístění. Rizikovější je výskyt na straně součástky, která je náchylnější na praskliny, než DPS [13].



Obrázek 16 – Makrovoidy [15].

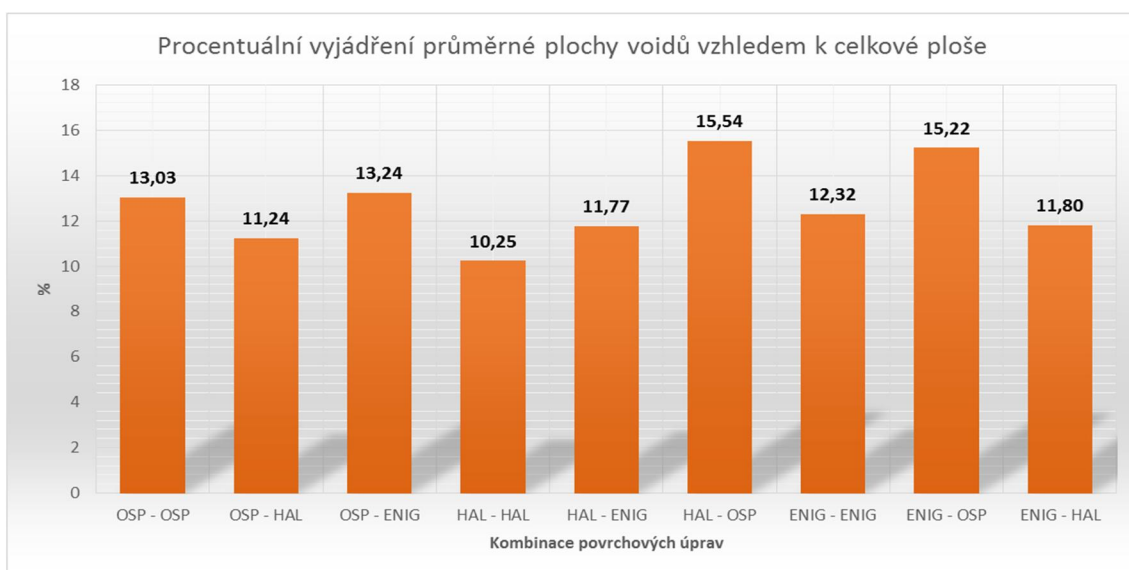
Makrovoidy obvykle vznikají vlivem několika faktorů. Nejzásadnější je reakce tavidla při procesu pájení, jehož některé části přejdou do plynné fáze. Pokud není doba, kdy je pájka roztavená dostatečně dlouhá, nemohou těkavé složky opustit pájený spoj.

Dalšími faktory jsou velikost zrn pájky a jejich oxidace, viskozita a složení tavidla, použité rozpouštědlo, aktivační teplota tavidla, geometrie pájeného spoje, oxidace povrchové úpravy u vývodů součástek, proces tisku pájecí pasty a teplotní profil při přetavení [13], [19].

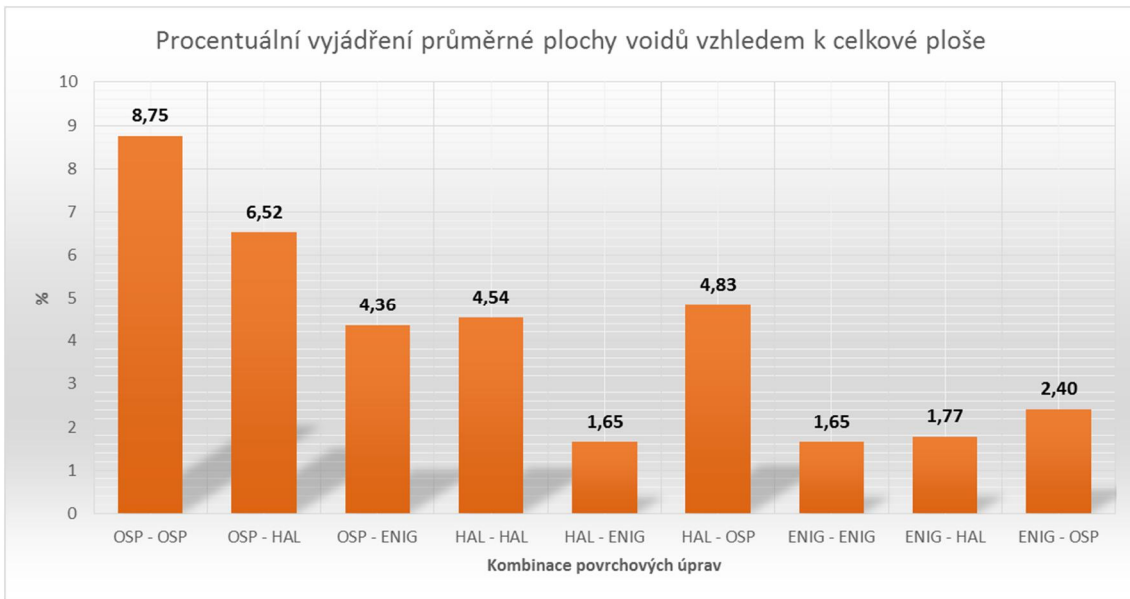


Obrázek 17 – Proces vzniku makrovoidů [14].

Jako zásadní se kromě složení pájecí pasty také jeví typ použité povrchové úpravy, což ukazují následující dva grafy, které vychází z výsledků mé bakalářské práce. První z nich ukazuje průměrnou plochu voidů při použití pájecí pasty Sn99,3/Cu0,7 a druhý graf pro pájecí pastu Sn42/Bi58. Pro porovnání zde bylo použito několik kombinací povrchových úprav [15].



Graf 1 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty Sn99,3/Cu0,7 [15].

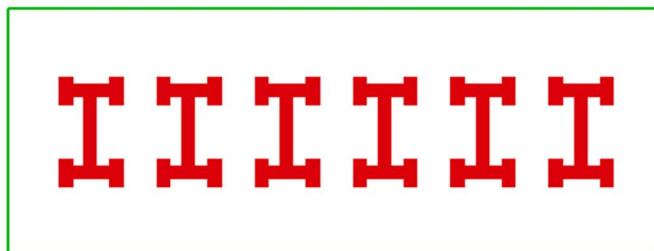


Graf 2 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty Sn42/Bi58 [15].

II. Praktická část

1. Návrh a příprava vzorků

Pro testování byla navržena DPS o rozměrech 15 mm x 40 mm v programu Eagle 7.3.0. Dále bylo zvoleno, že deska plošných spojů bude osazena rezistory pomocí SMT montáže o velikosti pouzdra 1206. Tomu byl přizpůsoben motiv na DPS, kde lze na jednu testovací desku umístit 10 kusů rezistorů.



Obrázek 18 – Návrh DPS.

Pro výrobu DPS byl zvolen materiál FR4 (tkanina skelných vláken spojených epoxidovou pryskyřicí) o síle 1,55 mm, šířka plátování mědi 35 μm a zelená nepájivá maska. Povrchové úpravy jsme zvolili HAL bez olova, ENIG, OSP, Galvanický Sn (vzhledem k technologii nanášení této povrchové úpravy na DPS, jsou tyto kusy dodány bez nepájivé masky). Povrchová úprava OSP byla realizována pomocí lázně Gliccoat SMD (E3), která byla nanášena ponorem na 40 sekund do lázně o teplotě 38 °C. Jako aktivní složka je zde použit Alkyl benzimidazol a vyznačuje se poměrně krátkou dobou expozice a snadnou údržbou [20].

1.1. Počet vzorků

Počet kusů DPS s jednotlivými povrchovými úpravami se odvíjel od počtu testovaných pájecích past. Celkově tedy bylo objednáno 8 kusů desek s povrchovou úpravou HAL bez olova, ENIG, OSP a Galvanický Sn. Dále pak 24 kusů desek plošných spojů bez povrchové úpravy. Jejich počet byl ztrojnásobený kvůli testování stárnutí na ovlivnění voidovitosti.

1.2. Stárnutí vzorků

Jak již bylo zmíněno, DPS bez další povrchové úpravy byly objednány ve větším množství kvůli stárnutí. Sada byla rozdělena na tři dílčí podsady, kde první byla zapájena ihned s ostatními vzorky, druhá podléhala stárnutí 744 hodin (1 měsíc) a třetí 1488 hodin (2 měsíce). Vzorky byly po uvedené dobu umístěny do držáku ve skleněném exsikátoru, kde byla na dně voda. Teplota uvnitř nádoby odpovídala teplotě v místnosti, což bylo průměrně 22 °C.

2. Zapájení rezistorů na DPS

2.1. Pájecí pasty

K vytvoření vzorků byly použity čtyři pájecí pasty s různými vlastnostmi. Všechny byly bezolovnaté typu SAC. Lišily se velikostí kovových částic, přičemž byly využity pasty se zrnitostí T3 a T4, a dále v použitém tavidle, kde byla využita tavidla s aktivitou ROL0 a ROL1. Kompletní přehled a specifikace použitých pájecích past je uveden v následující tabulce č. 9.

Tabulka 9 – Parametry a vlastnosti použitých pájecích past [21], [22], [23].

Výrobce	AIM	AIM	AIM	AIM
Typ	Bezolovnatá	Bezolovnatá	Bezolovnatá	Bezolovnatá
Označení	M8	M8	NC257-2	NC254
Složení	SAC305	SAC305	SAC305	SAC305
Obsah částic kovu	88,5%	88,5%	88,5%	88,5%
Velikost částic kovu	T4: 20 μm - 38 μm	T3: 25 μm - 45 μm	T4: 20 μm - 38 μm	T3: 25 μm - 45 μm
Typ tavidla	Přírodní pryskyřice (R) – ROL1	Přírodní pryskyřice (R) - ROL1	Přírodní pryskyřice (R) - ROL0	Přírodní pryskyřice (R) - ROL0
Teplota přetavení	230 °C - 245 °C	230 °C - 245 °C	230 °C - 245 °C	230 °C - 245 °C
Viskozita	500 – 1000 Kcps	500 – 1000 Kcps	500 – 900 Kcps	300 – 900 Kcps

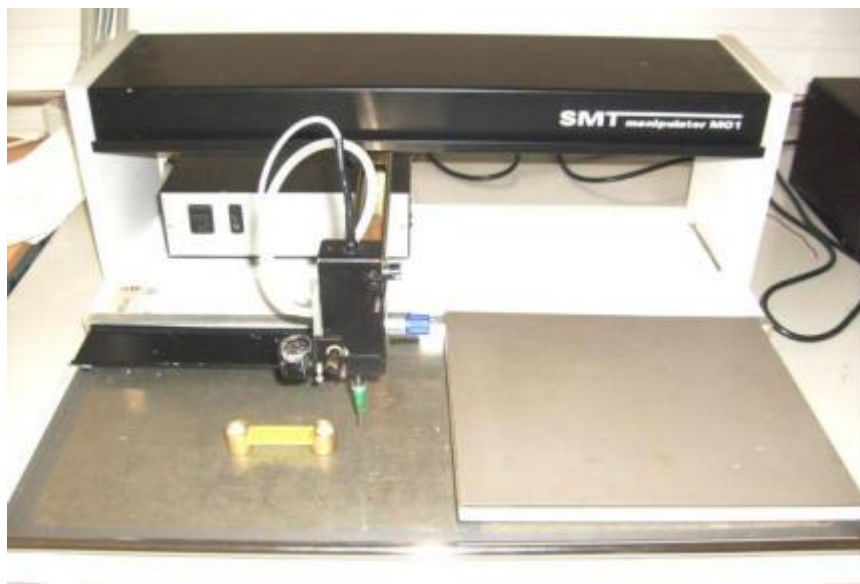
Typ tavidla v našich pájecích pastách je určen pomocí normy IPC-J-STD-004 B, což bylo konzultováno s experty z firmy AIM. Přesné složení tavidla není známo, neboť se jedná o výrobní tajemství.

Abychom dosáhli vhodného množství vzorků na testování, byla každá pájecí pasta nanášena na dvě DPS se shodnou povrchovou úpravou. Celkem tedy bylo každou kombinací pájecí pasty s jednou povrchovou úpravou zapájeno dvacet rezistorů.

Nanášení pájecí pasty bylo realizováno pomocí třerky přes šablonu, která byla uchycena v zařízení pro sítotisk SAB 06. Vzhledem k optimálnímu nánosu pasty byla šířka šablony zvolena 0,15 mm. Tomu odpovídá při velikosti pájecí plošky 2 mm x 1 mm objem nanášené pájecí pasty 0,3 mm³. Aby nedošlo ke kontaminaci dalších vzorků, šablona byla po nánosu každé pasty důkladně vyčištěna.

2.2. Osazení DPS

Osazení rezistory bylo realizováno pomocí podtlakového manipulátoru, který umožňuje součástku zachytit v trysce. Dále byla součástka poměrně hladce přemístěna ve vertikální rovině k DPS. Tento manipulátor také umožňuje rotaci součástky, což nám velmi usnadnilo práci. V poslední řadě byla součástka poměrně přesně a kolmo k DPS umístěna pohybem v horizontální rovině.



Obrázek 19 – Manipulátor [24].

2.3. Přetavení vzorků

Přetavení pájecí pasty na osazených DPS probíhalo v průběžné peci Mistral 260, která umožňuje nastavení tří teplotních zón. Dvě zóny slouží k předehřátí DPS a poslední zóna k přetavení pájecí slitiny.



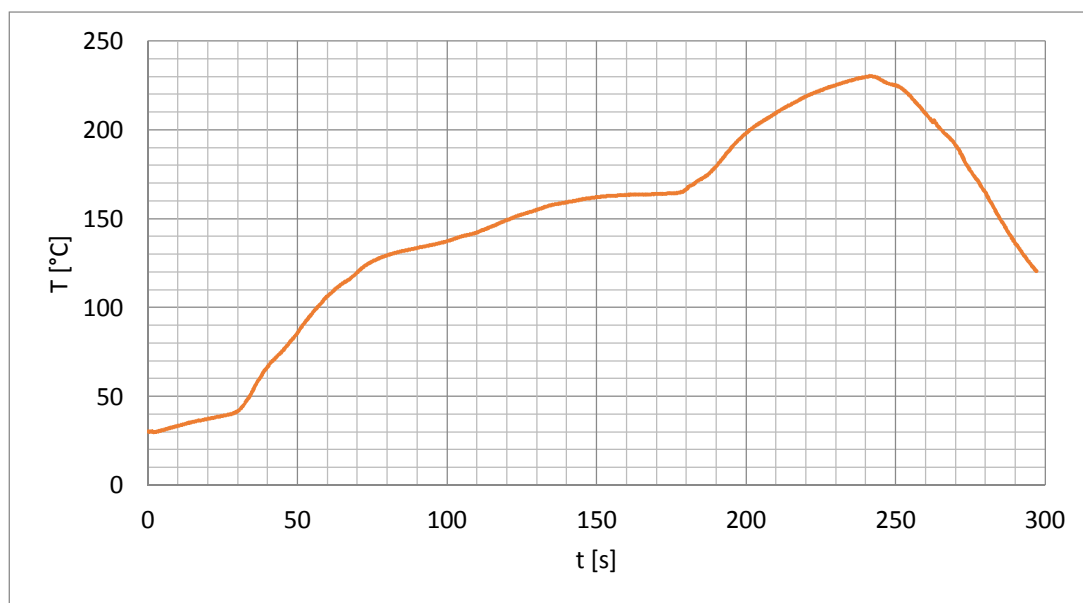
Obrázek 20 – Průběžná pec Mistral 260 [25].

Rychlost dopravníku pece byla nastavena na 15 cm/minutu. Jelikož je teplota přetavení a doporučený teplotní profil pro všechny použité pájecí pasty identický, byly zóny pro všechny vzorky nastaveny následovně:

Tabulka 10 – Nastavení teplotních zón průběžné pece Mistral 260.

Nastavená teplota	Zóna 1 - Předehřev	Zóna 2 - Předehřev	Zóna 3 - Přetavení
	150 °C	170 °C	240 °C

Konkrétní použitý teplotní profil, který byl naměřen, nám vykresluje následující graf:



Graf 3 – Použitý teplotní profil pro přetavení.

3. Analýza dutin v pájených spojích

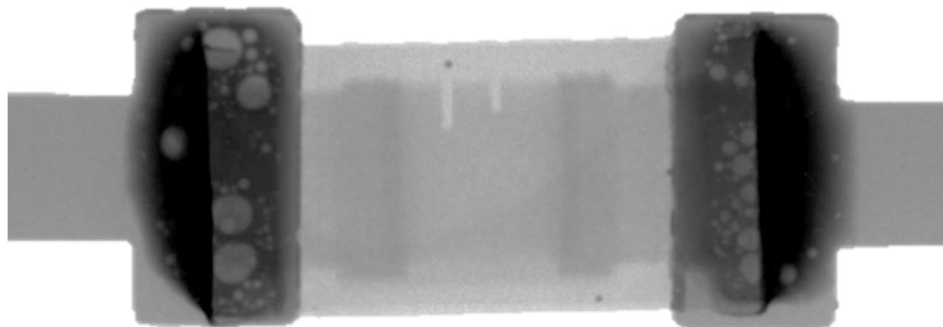
3.1. Rentgenová analýza

Jelikož se dutiny nachází uvnitř pájeného spoje, bylo nutné provést jejich zrentgenování. K tomu jsme využili GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T v laboratoři LVR. Vzorky umístěné do zařízení pak bylo možné rentgenovat pomocí nastaveného maticového algoritmu ve větším množství. Touto metodou jsme tak ušetřili velmi mnoho času.



Obrázek 21 – GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T [26].

Výstupem této analýzy pak byly snímky, na kterých světlá místa reprezentují voidy v pájeném spoji. Důležitou součástí této metody pak bylo třídění jednotlivých vzorků dle použité pájecí slitiny a povrchové úpravy.

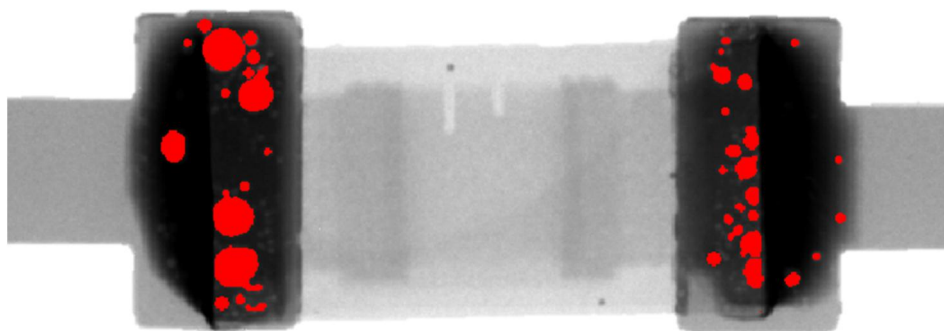


Obrázek 22 – Snímek z rentgenu.

3.2. Jasová analýza

Pořízené snímky byly následně vyhodnocovány pomocí programu NIS Elements. Tento program umožňuje provést obrazovou analýzu na základě odlišení světlých a tmavých míst na obrázku. Světla místa zde označí a následně změří (dle našich požadavků) jejich počet a plochu. Pro zvýšení přesnosti byla u každého snímku provedena kalibrace výchozí vzdálenosti, od které se výpočty odvíjely. Kalibrace je při použití této metody zásadní, kvůli minimalizaci nejistot měření.

Tímto způsobem byly vyhodnoceny všechny vzorky a výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů.



Obrázek 23 – Analýza snímku v programu NIS Elements.

4. Výsledky

V první části vyhodnocení výsledků jsou porovnány jednotlivé typy povrchových úprav vztažené k různým pájecím pastám. Důraz je zde kladen na porovnání použité povrchové úpravy. Vyhodnocen bude průměrný počet voidů a makrovoidů na plošce pájeného spoje, průměrná plocha, kterou voidy vykazují, a nakonec průměrné procentuální zastoupení voidů vzhledem k celkové ploše pájecí plošky. Hranice průměru dutiny pro klasifikaci byla zvolena 100 μm , kde dutiny nacházející se pod touto hranicí klasifikujeme jako mikrovoidy a nad touto hranicí jako makrovoidy. Plocha jedné pájecí plošky vzhledem k použitému návrhu DPS je 2 mm^2 . Celková plocha pájecích plošek je tedy 80 mm^2 .

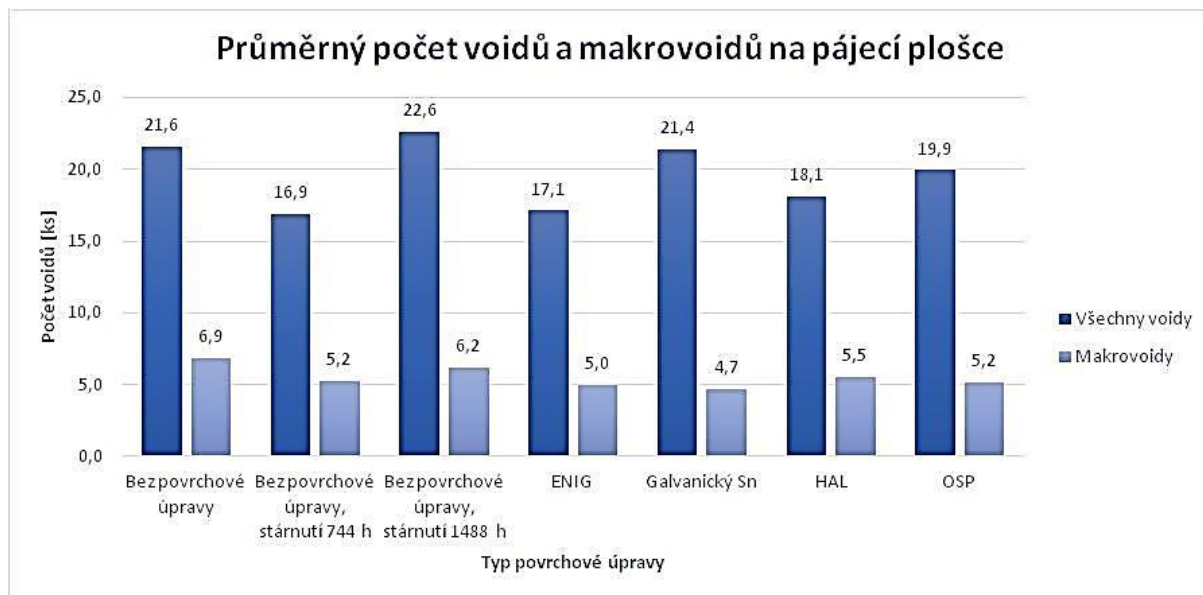
V druhé části budou porovnány výsledky vztažené k jednotlivým typům pájecích past pro každou povrchovou úpravu. Důraz je zde kladen na složení jednotlivých pájecích past a jeho vliv na tvorbu dutin. Vyhodnocovací kritéria budou obdobná jako v první části vyhodnocení.

V poslední části vyhodnocení bude provedeno porovnání našich výsledků s výsledky jiných publikovaných výzkumů.

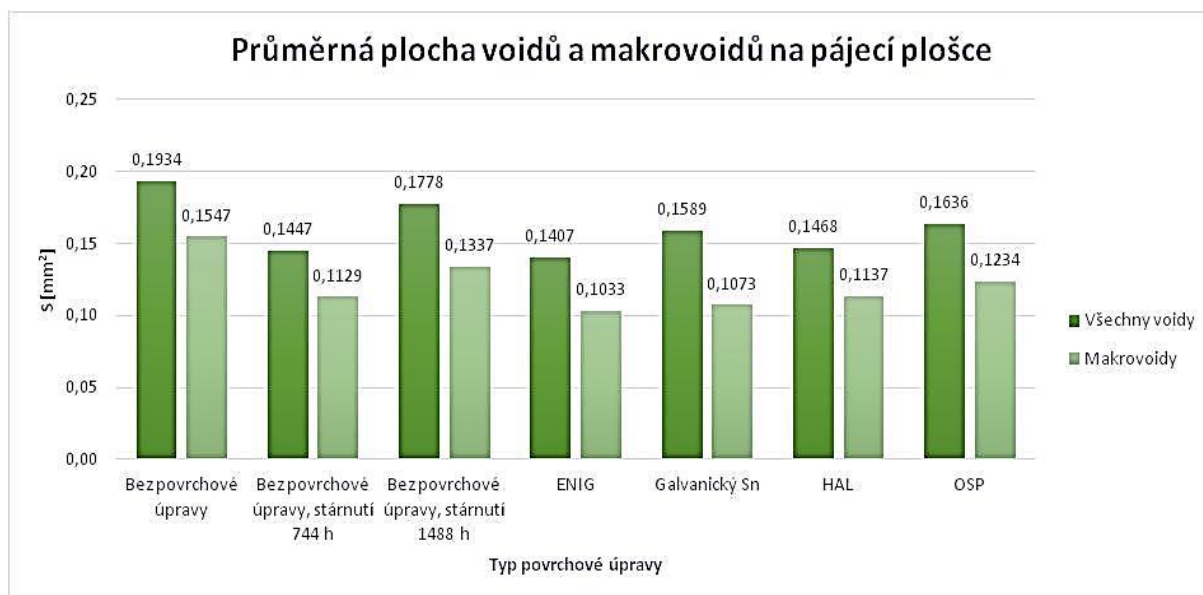
Tabulky použité k vytvoření grafů ve zhodnocení jsou obsaženy v Příloze č. 1 (na přiloženém CD).

4.1. Zhodnocení výsledků vzhledem k použitým povrchovým úpravám

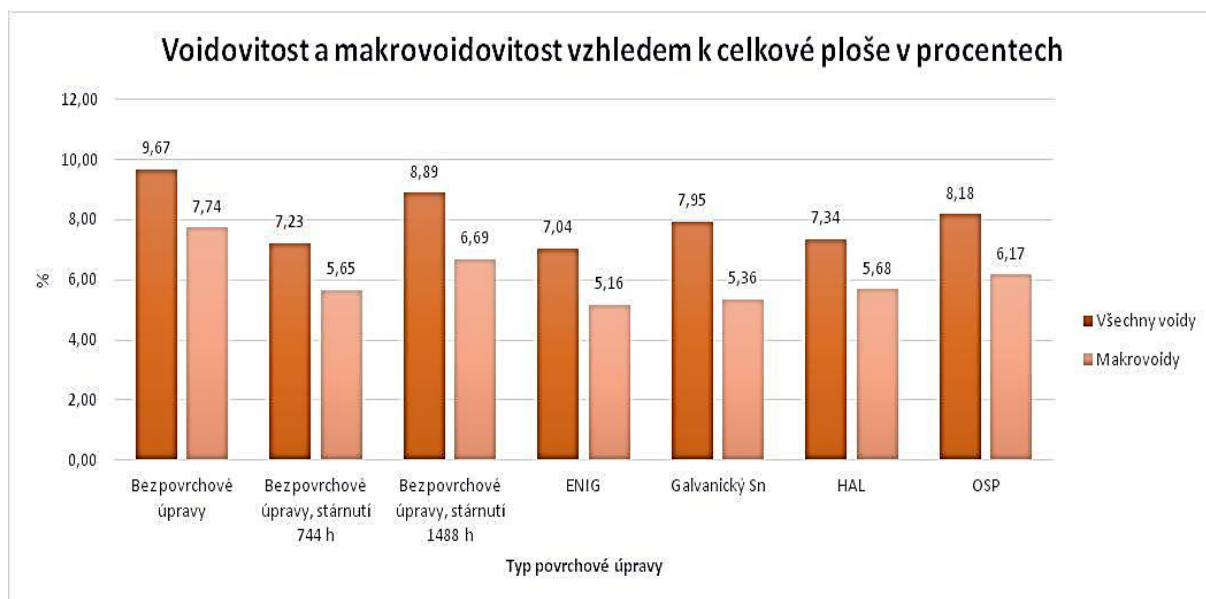
4.1.1. Pájecí pasta M8 – 88,5 – T3



Graf 4 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T3.



Graf 5 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T3.

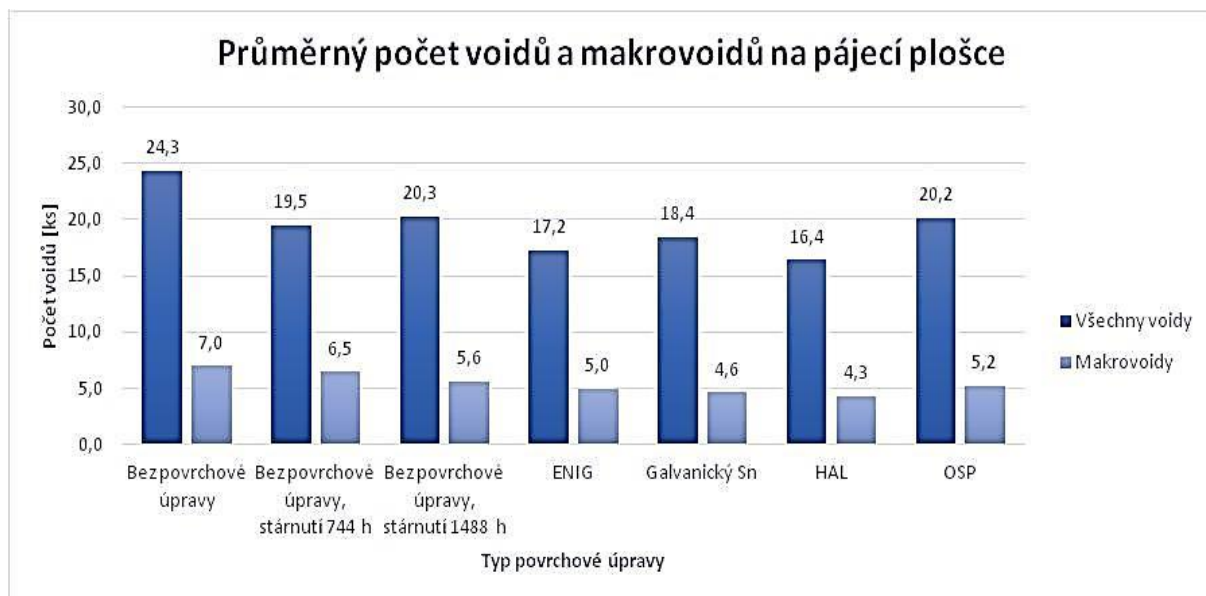


Graf 6 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T3.

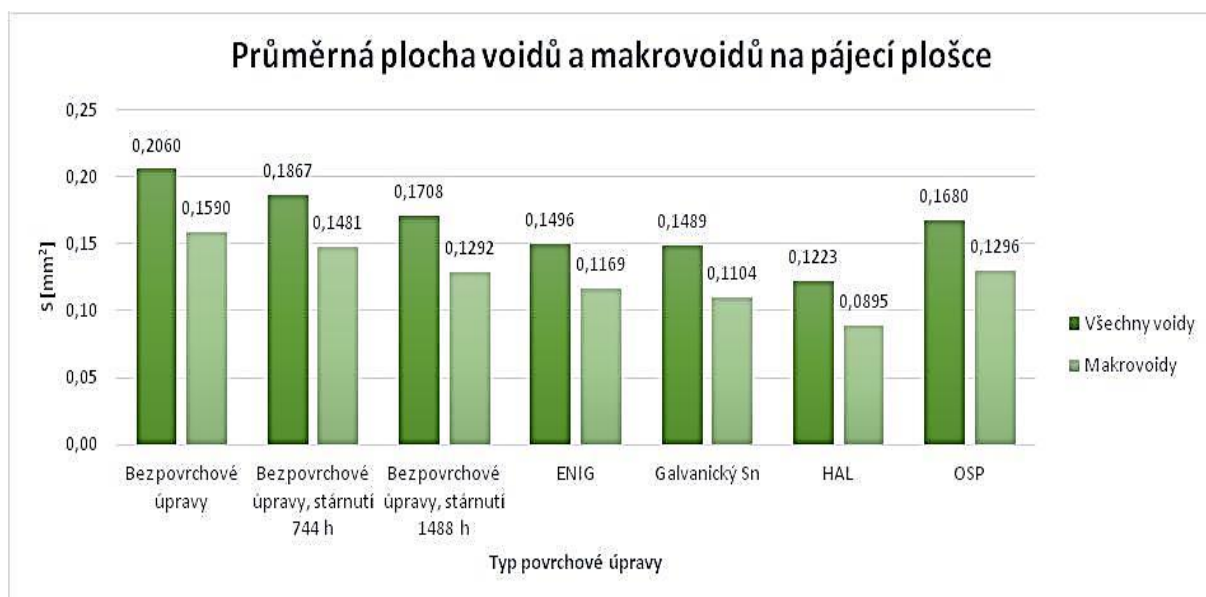
Z uvedených grafů plyne, že nejnižší průměrný výskyt voidů na pájecí plošce byl u plošek bez povrchové úpravy, které podléhaly stárnutí 744 hodin, a u povrchové úpravy ENIG. Výskyt makrovoidů byl nejmenší u povrchové úpravy Galvanický Sn a ENIG. Největší výskyt voidů i makrovoidů v pájeném spoji byl pak u plošek bez povrchové úpravy, které podléhaly stárnutí 1488 hodin a u plošek bez povrchové úpravy, které stárnutí nepodléhaly.

Pro zhodnocení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji jsou výsledky obdobné a pro plošku bez povrchové úpravy se plocha voidů blíží až k deseti procentům. Nejmenší procentuální zastoupení plochy voidů jsme dosáhli u povrchové úpravy ENIG, kde voidy tvořili plochu 7,04 %. Dále je z grafu patrné, že převážnou část plochy voidů v pájeném spoji tvoří makrovoidy.

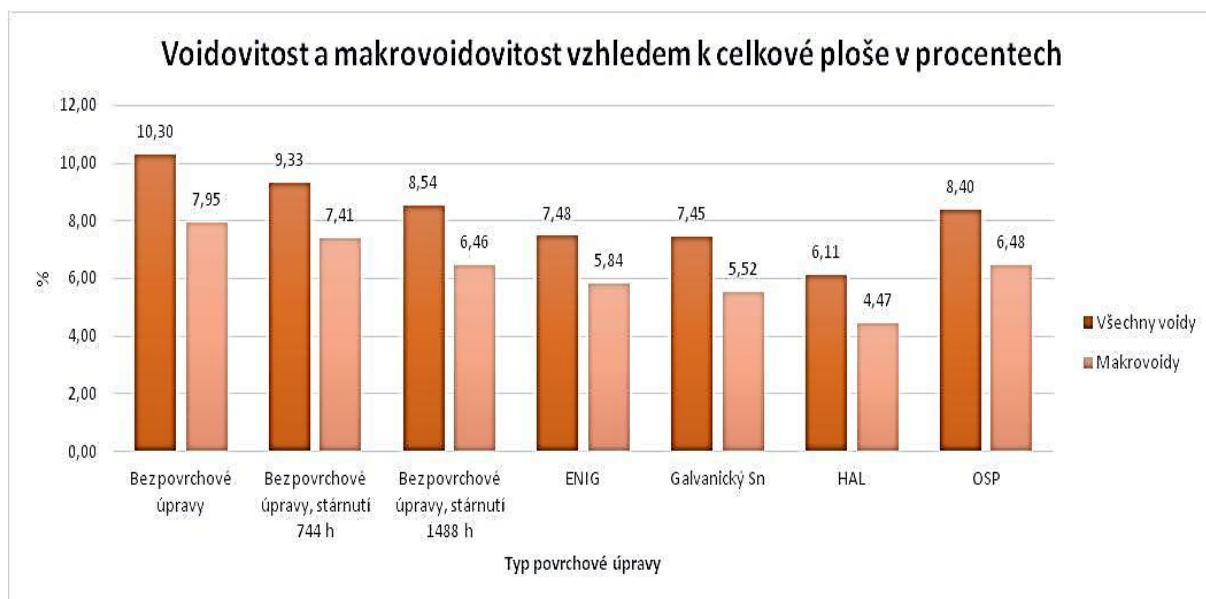
4.1.2. Pájecí pasta M8 – 88,5 – T4



Graf 7 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pasta M8 – 88,5 – T4.



Graf 8 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pasta M8 – 88,5 – T4.

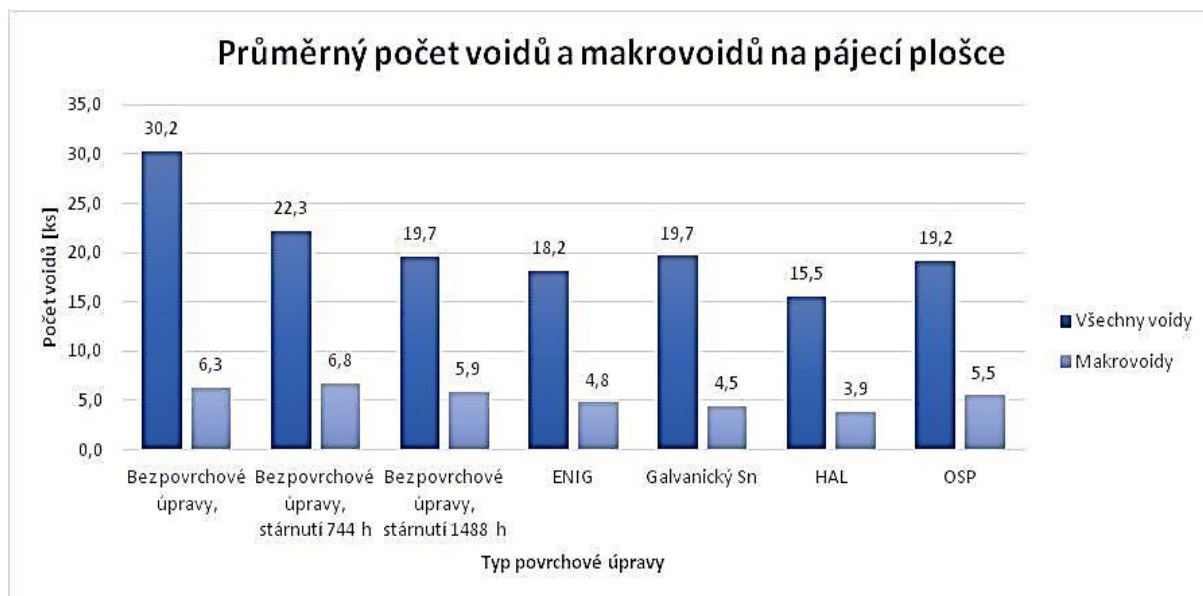


Graf 9 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T4.

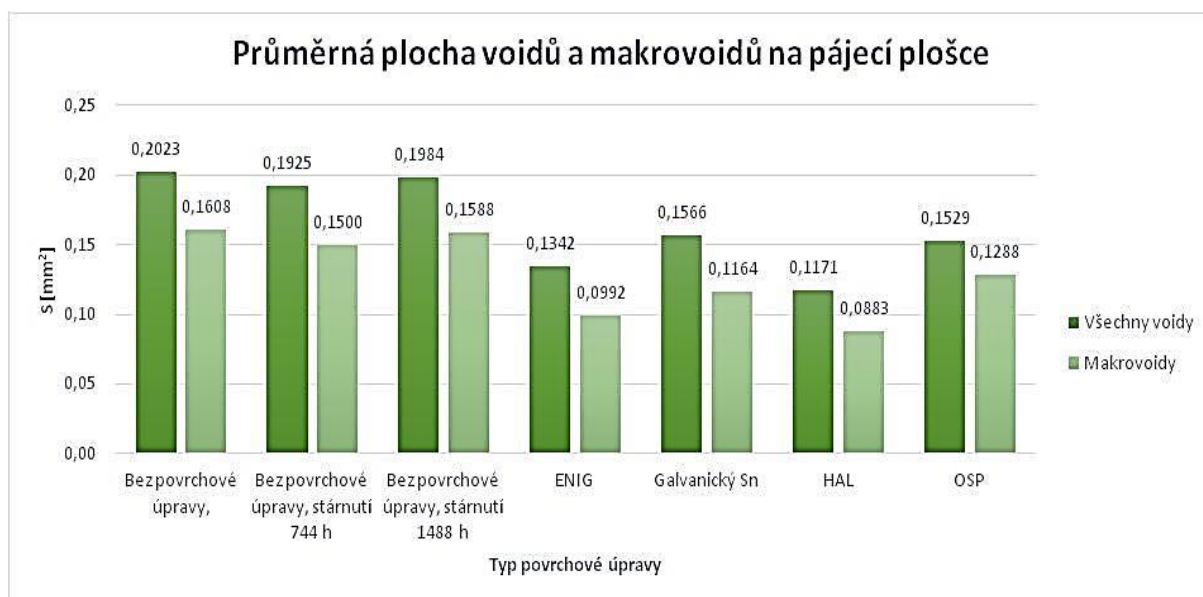
Při použití této pájecí pasty vykazuje nejnižší výskyt voidů povrchová úprava HAL a ENIG. Makrovoidy se nejméně vyskytují u povrchových úprav HAL a Galvanický Sn. Oproti tomu největší průměrný výskyt voidů byl opět u plošek bez povrchové úpravy a OSP.

Plocha voidů je zde s velkým odstupem nejmenší u povrchové úpravy HAL. Špatné výsledky také nevykazují povrchové úpravy Galvanický Sn a ENIG. Nejhorší výsledky jsou zaznamenány u plošky bez použití povrchové úpravy a OSP. Pro zhodnocení makrovoidů vychází výsledky obdobné. Na ploškách bez povrchové úpravy voidovitost dosahuje procentuální zastoupení i přes 10 % celkové pájecí plochy, což je poměrně velké číslo. Oproti tomu u HALu představují pouze 6,11 %. Grafy opět ukazují, že převážná část plochy voidů lze klasifikovat jako makrovoidy.

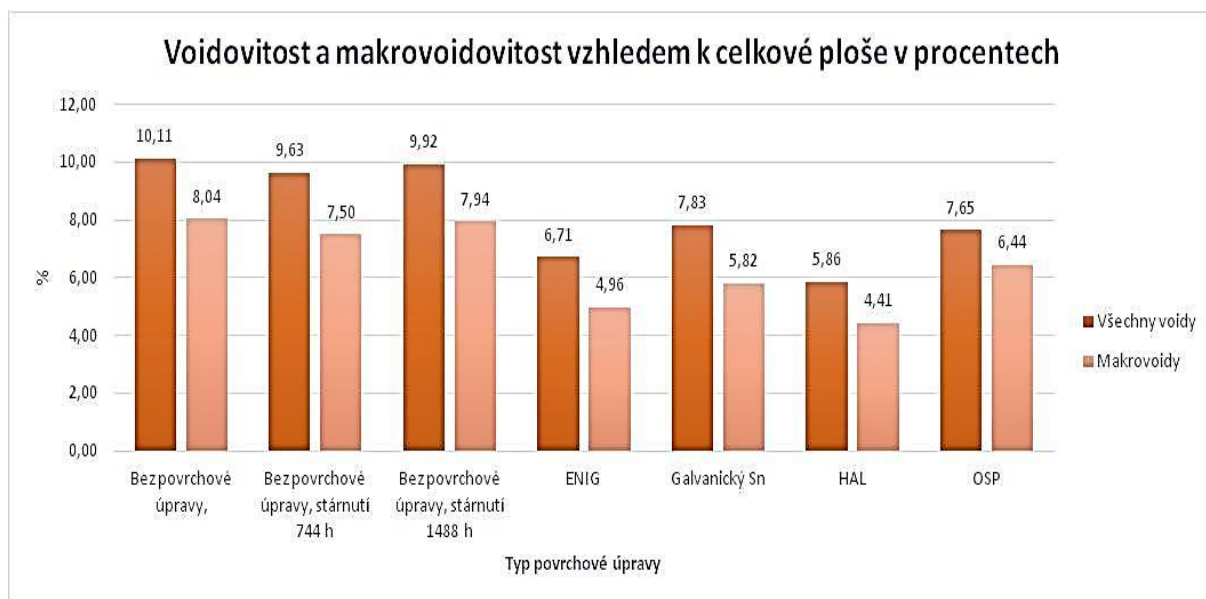
4.1.4. Pájecí pasta NC254 – 88,5 – T3



Graf 10 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC254 – 88,5 – T3.



Graf 11 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC254 – 88,5 – T3.

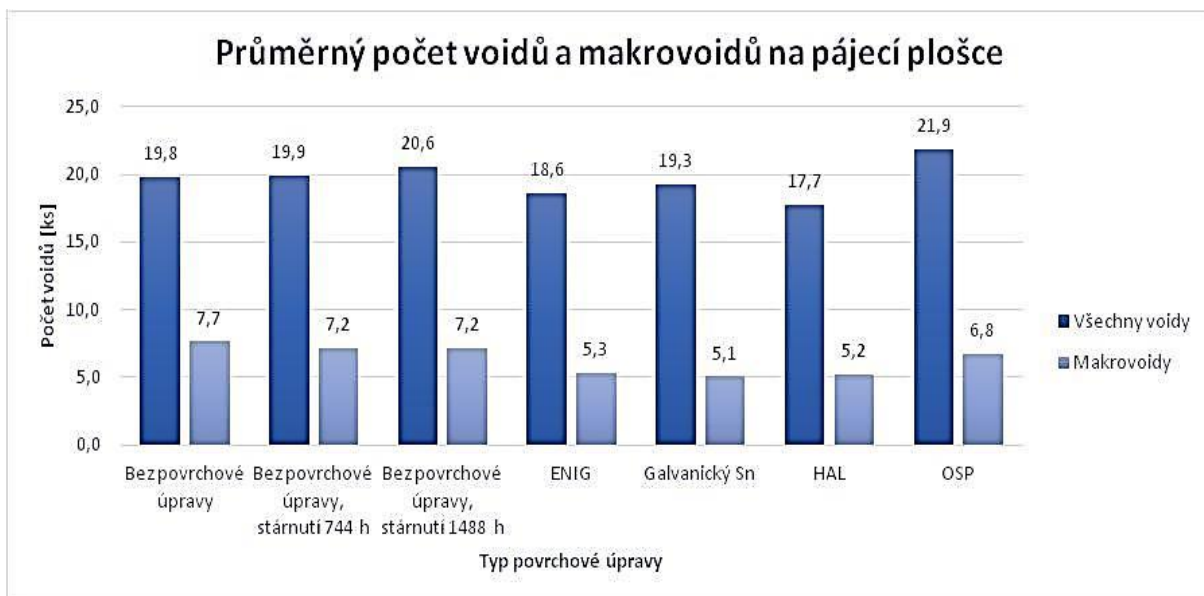


Graf 12 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC254 – 88,5 – T3.

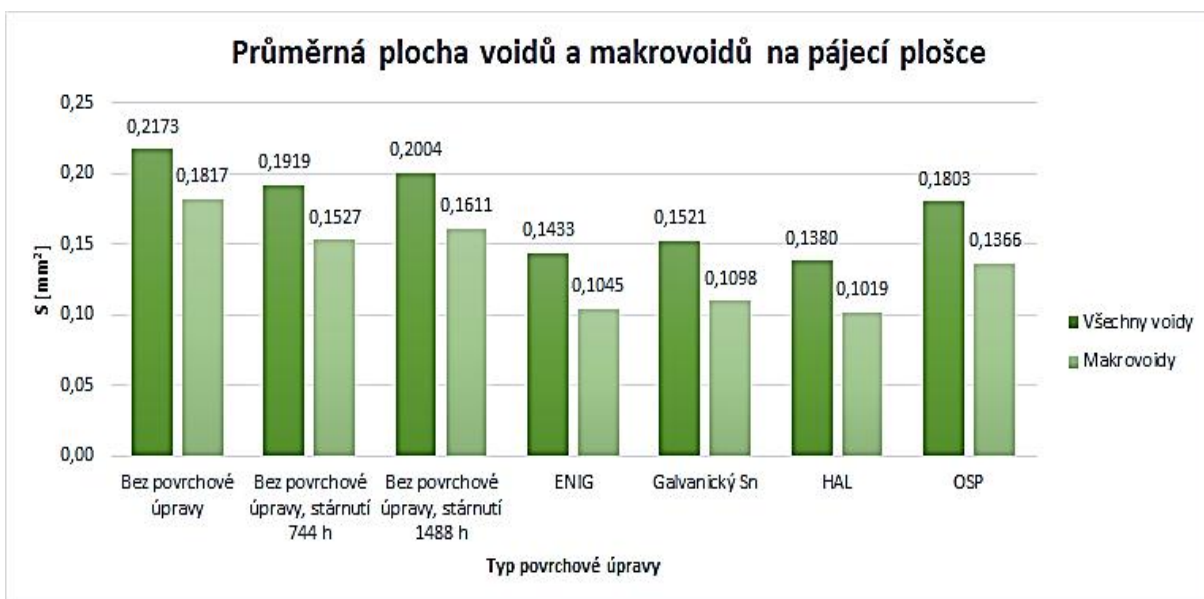
Výše uvedené grafy ukazují, že při použití této pájecí pasty pájecí ploška bez povrchové úpravy, která nepodléhala stárnutí, vykazuje oproti ostatním povrchovým úpravám značný výskyt voidů v pájeném spoji, kde lze převážnou většinu klasifikovat jako mikrovoidy. Oproti tomu nejmenší výskyt voidů je zaznamenán u povrchových úprav HAL a ENIG. Makrovoidy se nejvíce vyskytují u plošky bez povrchové úpravy, která podléhala stárnutí 744 hodin a nejméně u povrchové úpravy HAL.

Plocha voidů je u plošek bez povrchové úpravy téměř srovnatelná (nezávisle na působení stárnutí) a nejvyšší ze všech vzorků u této pájecí pasty. Totéž lze pozorovat i u makrovoidů. Procentuálně se celková plocha voidů ve spoji u těchto povrchových úprav pohybuje okolo 10 %. Nejmenší plochu voidů vykazuje HAL, kde procentuální zastoupení plochy dutin je pouze 5,86 %. Totéž platí i pro makrovoidy, kde jejich plocha je u této povrchové úpravy 4,41 %.

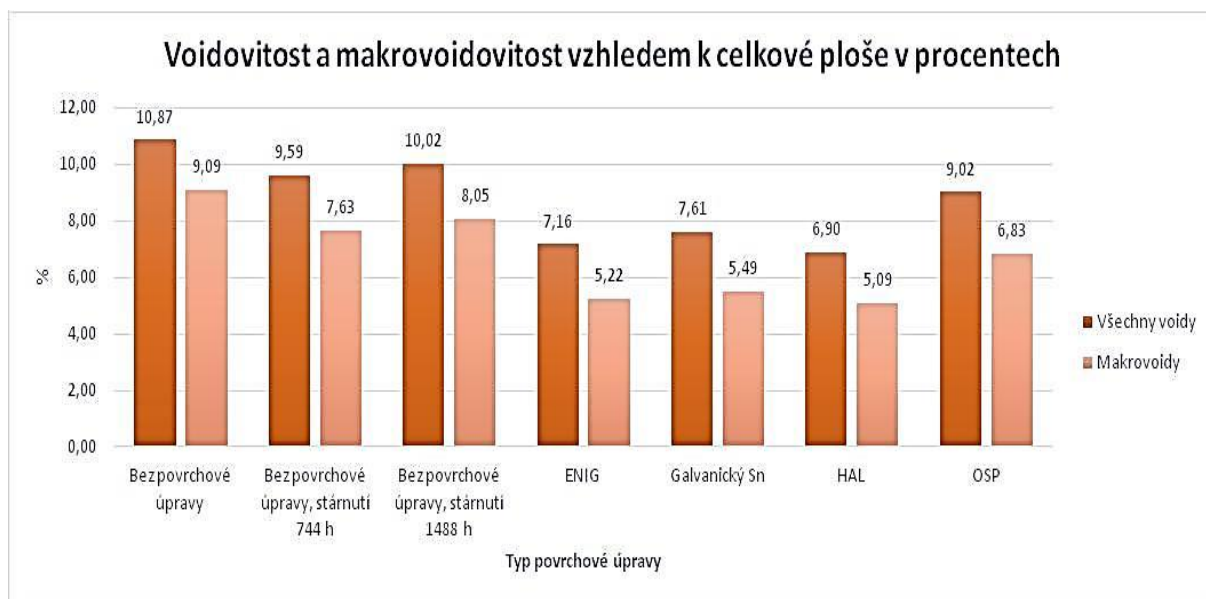
4.1.4. Pájecí pasta NC257-2 – 88,5 – T4



Graf 13 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pasta NC257-2 – 88,5 – T4.



Graf 14 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pasta NC257-2 – 88,5 – T4.



Graf 15 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC257–2 – 88,5 – T4.

Tato pájecí pasta vykazuje téměř srovnatelnou voidovitost pro všechny povrchové úpravy. Liší se pouze v řádu jednotek, kde nejlépe vychází povrchová úprava HAL a nejhůře OSP. Makrovoidy se nejméně vyskytují u povrchových úprav Galvanický Sn a HAL a nejvíce u plošek bez povrchové úpravy a u OSP.

Plocha voidů u této pájecí pasty je nejvyšší u plošek bez povrchové úpravy, které nepodléhaly stárnutí, a dále u těch, které podléhaly stárnutí 1488 hodin. Tyto pájené spoje vykazují voidovitost okolo 10 %. Nejmenší plocha pak vychází u povrchových úprav HAL, ENIG a Galvanický Sn. Obdobná situace je pozorovatelná i u plochy makrovoidů.

4.1.5. Porovnání celkových výsledků povrchových úprav

4.1.5.1. Četnost voidů a makrovoidů v pájeném spoji

Z výsledků uvedených výše lze usuzovat, že z hlediska průměrného celkového výskytu voidů v pájeném spoji nejlépe vychází použití povrchové úprava HAL bez olova, která měla v tomto ohledu nejlepší výsledky pro tři použité pájecí pasty. Výjimku tvoří pouze pájecí pasta M8 - 88,5 - T3, kde byl počet voidů nepatrně vyšší oproti povrchové úpravě ENIG a pájecí plošce bez povrchové úpravy, která podléhala stárnutí 744 hodin. Dále vyšly poměrně malé hodnoty četnosti voidů pro již zmíněnou povrchovou úpravu ENIG, která po HALu vykazuje nejlepší výsledky. Pájené spoje s ostatními povrchovými úpravami obsahovaly poměrně velký počet voidů. Nejhůře pak vyšly vzorky připravené z DPS bez povrchové úpravy společně se vzorky z DPS bez povrchové úpravy, které stárly 1488 hodin, a DPS s povrchovou úpravou OSP. Zajímavým zjištěním zde bylo, že vzorky s DPS bez povrchové úpravy, které podléhaly stárnutí 744 hodin, vycházely podstatně lépe, než ostatní vzorky bez povrchové úpravy. Důvodem může být to, že vytvoření oxidů (ne však velkého množství) na pájecí plošce před procesem pájení vedlo během pájecího procesu k velmi rozdílné reakci tavidla se zoxidovaným povrchem. To mohlo mít za následek snížení počtu voidů v pájeném spoji.

Dále byl vyhodnocen počet makrovoidů z celkového počtu voidů, kde stanovená hranice průměru dutiny byla zvolena 100 μm . Nejlepší výsledky zde byly v průměru dosaženy při použití povrchové úpravy HAL bez olova a u Galvanického Sn. Z tohoto závěru lze usuzovat, že při použití Galvanického cínu, kde výsledky celkové četnosti voidů vyšly spíše průměrně, je většina dutin klasifikovaných jako mikrovoidy. Negativní výsledky zde byly dosaženy pro všechny vzorky vytvořené z DPS bez povrchové úpravy, kde ovšem počet makrovoidů s rostoucí délkou stárnutí klesal. Důvod tohoto jevu je opět nejspíše dán reakcí tavidla s oxidy vytvořenými na mědi pájecí plošky.

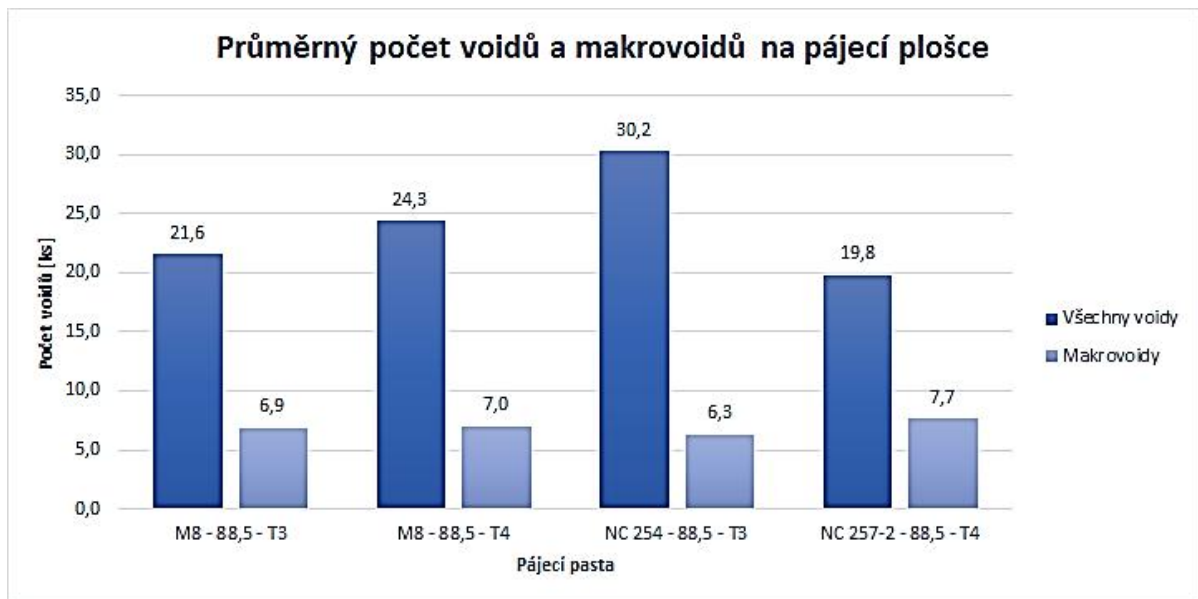
4.1.5.2. Plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji

Dalším zkoumaným hlediskem byla plocha dutin v pájeném spoji. Nejlépe při hodnocení celkové průměrné plochy voidů v pájeném spoji vycházela povrchová úprava HAL bez olova. Následující povrchovou úpravou s dobrými výsledky je ENIG. Jako nevhodné se ukázalo použití DPS bez povrchové úpravy, kde výsledky vycházely přes 10 % z celkové plochy pájeného spoje, což bylo znatelně více než u ostatních povrchových úprav. Opět zde lze pozorovat vliv vzniku oxidů, kde vzorky bez povrchové úpravy, které prošly stárnutím, ukazují lepší výsledky.

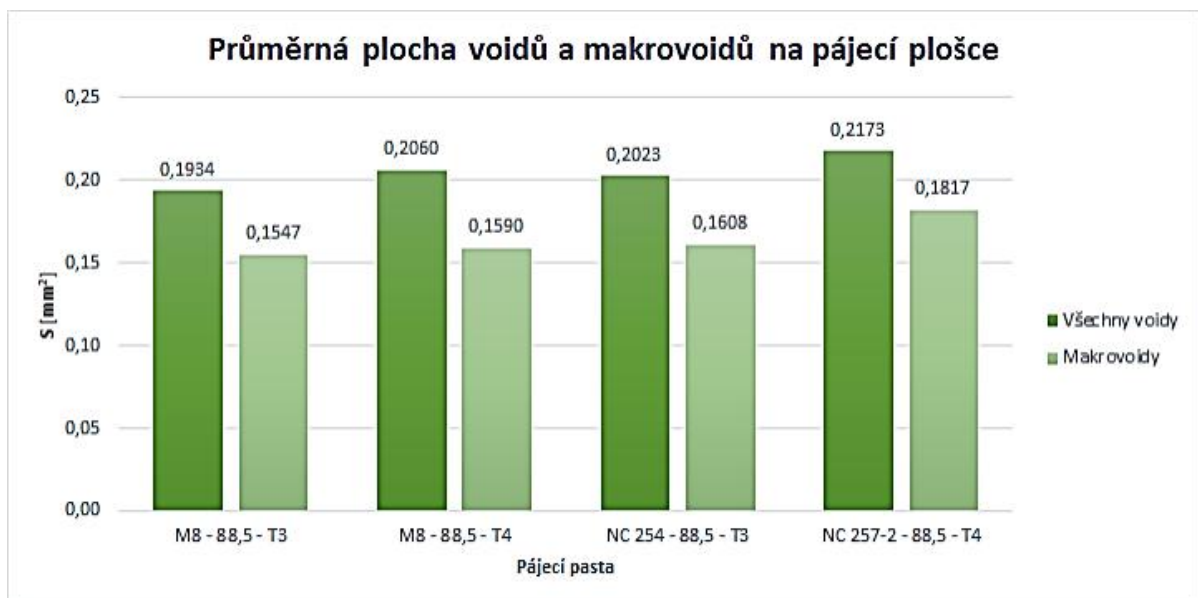
Výsledné grafy ukazují, že převážná většina změřené plochy je tvořena makrovoidy. Jako nejlepší při hodnocení tohoto kritéria se opět ukázala povrchová úprava HAL bez olova společně s ENIGem. Opět z hlediska makrovoidovitosti poměrně slušně vychází i povrchová úprava Galvanický Sn. Jako nevhodné vyšlo použití DPS bez povrchové úpravy společně s povrchovou úpravou OSP.

4.2. Zhodnocení výsledků vzhledem k použitým pájecím pastám

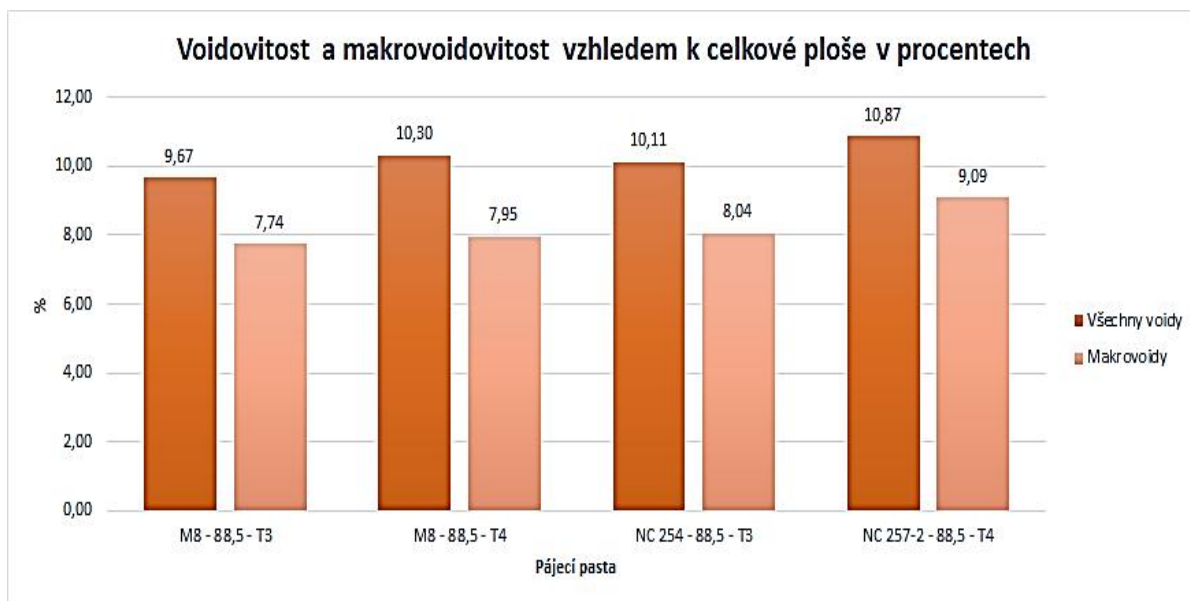
4.2.1. Vzorky bez povrchové úpravy



Graf 16 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy pro různé pájecí pasty.



Graf 17 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy pro různé pájecí pasty.

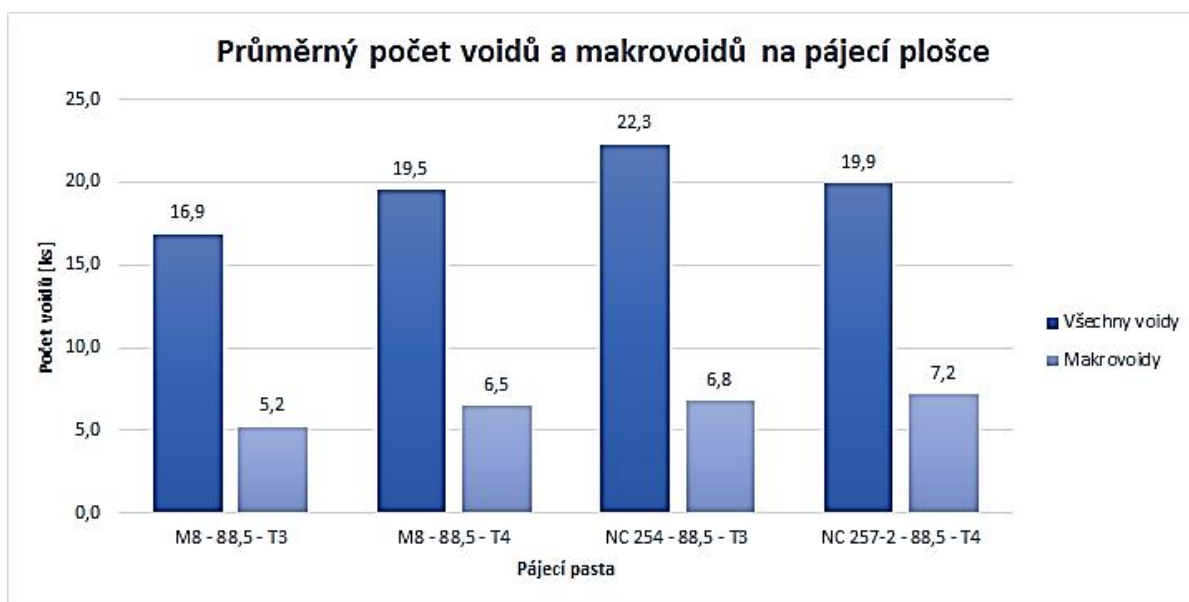


Graf 18 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy pro různé pájecí pasty.

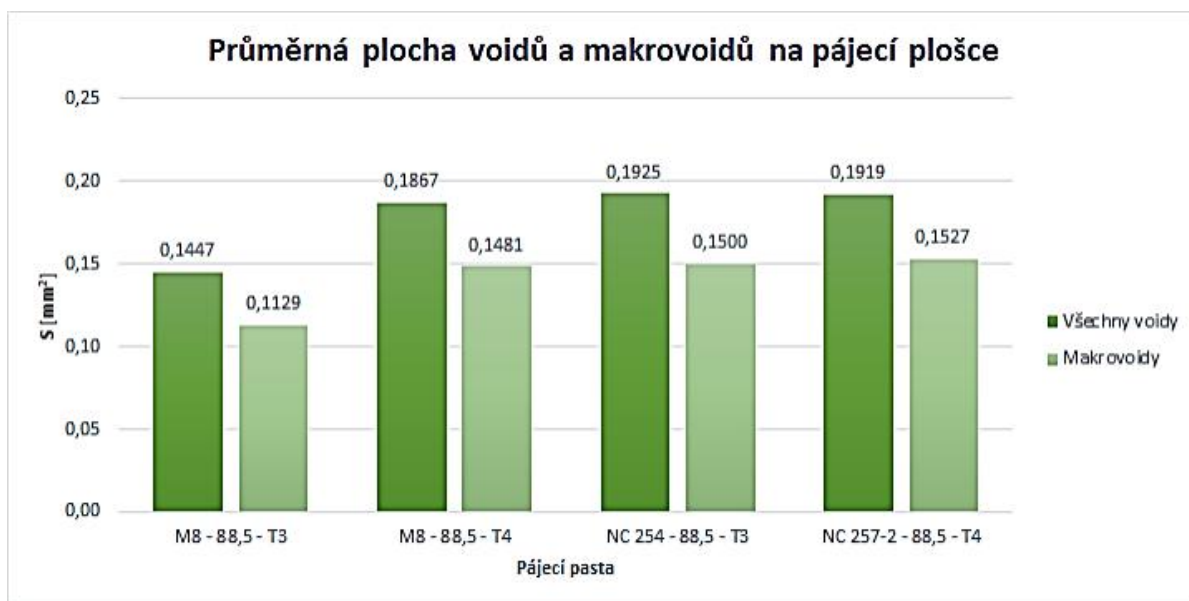
Nejmenší průměrný výskyt voidů při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy je u pájecí pasty NC257-2 – 88,5 – T4 a největší u pájecí pasty NC 254 – 88,5 – T3. Oproti tomu vyhodnocení výskytu makrovoidů vyšlo s přesně opačným výsledkem.

Při vyhodnocení plochy voidů i makrovoidů jsou nejlepší výsledky u pájecí pasty M8 – 88,5 – T3 a nejhorší u NC257-2 – 88,5 – T4. Celkově u této povrchové úpravy vychází procentuální zastoupení voidů v pájeném spoji téměř u všech pájecích past přes 10 %, což je poměrně velká plocha. Převážnou část této plochy tvoří makrovoidy.

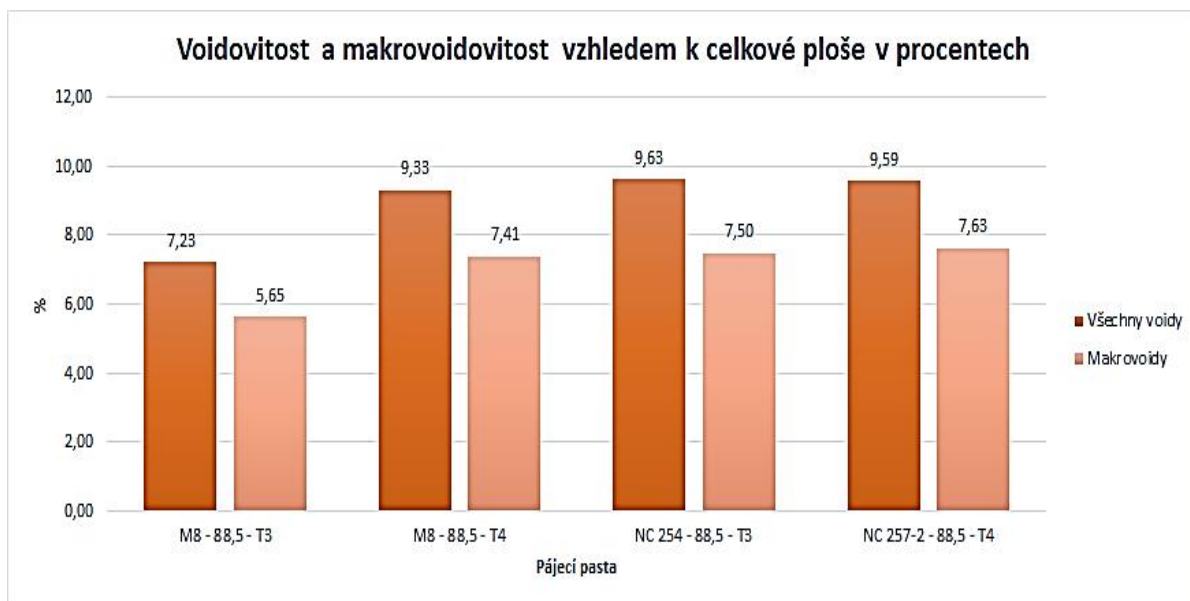
4.2.2. Vzorky bez povrchové úpravy – Stárnutí 744 hodin



Graf 19 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy se stárnutím 744 hodin pro různé pájecí pasty.



Graf 20 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 744 hodin pro různé pájecí pasty.

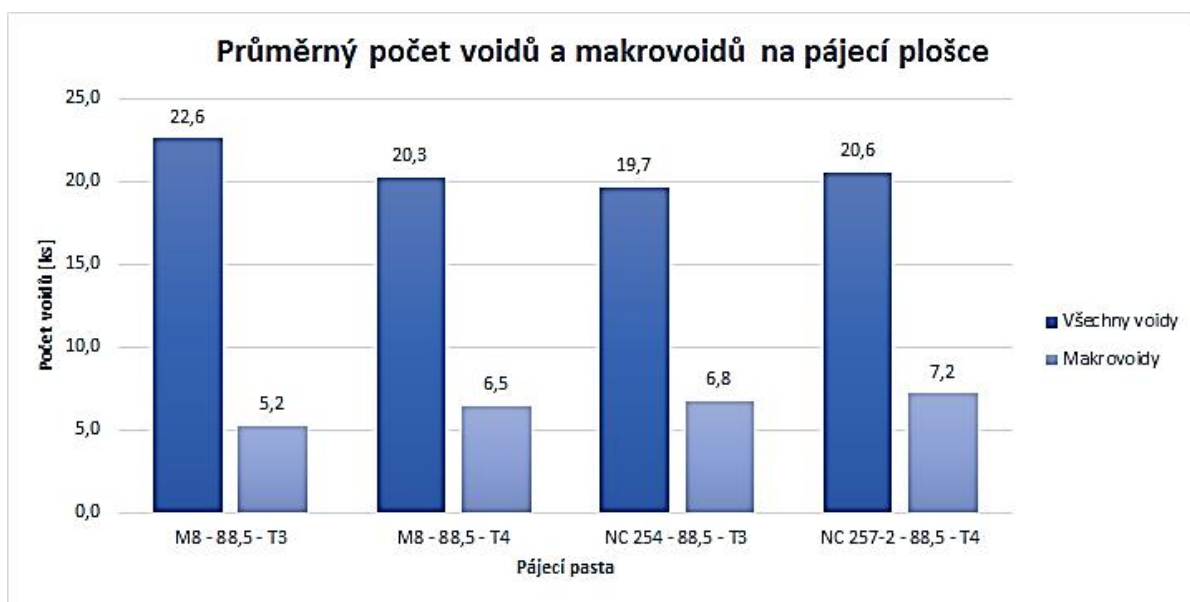


Graf 21 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 744 hodin pro různé pájecí pasty.

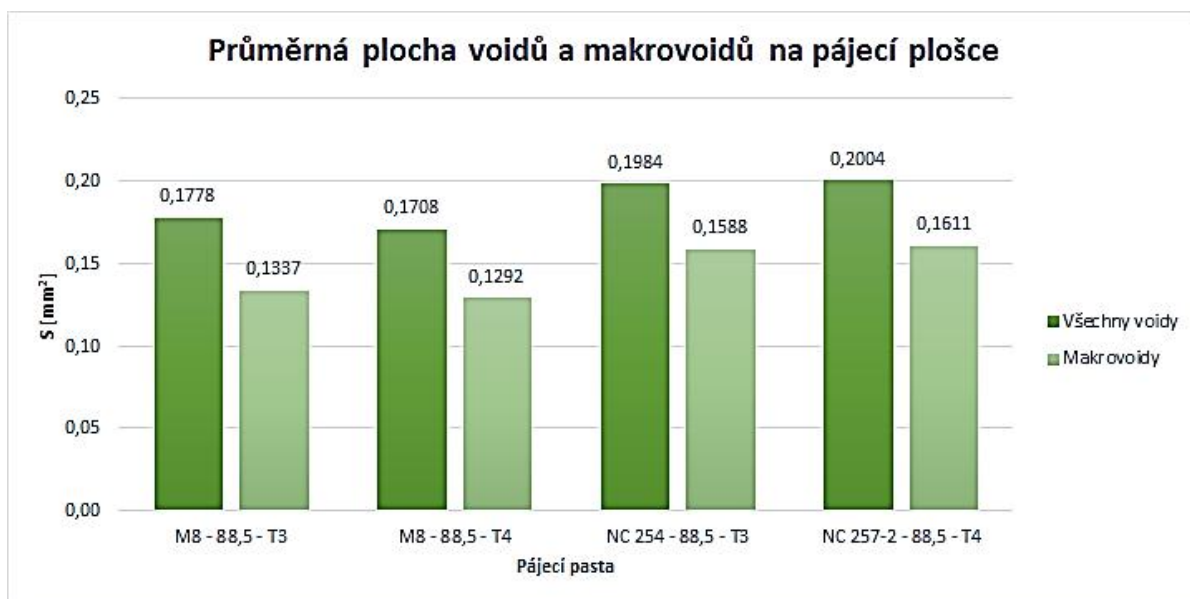
Pájecí plošky bez povrchové úpravy byly u těchto vzorků vystaveny stárnutí na dobu 744 hodin. Při vyhodnocení četnosti voidů a makrovoidů vychází s velmi dobrým výsledkem pájecí pasta M8 – 88,5 – T3. Nejhorší výsledek má pájecí pasta NC 254 – 88,5 – T3.

Při vyhodnocení celkové plochy dutin na pájecí plošce opět vychází nejlépe pájecí pasta M8 – 88,5 – T3. Ostatní pájecí pasty mají srovnatelné výsledky a dosahují téměř 10 % z celkové plochy pájeného spoje.

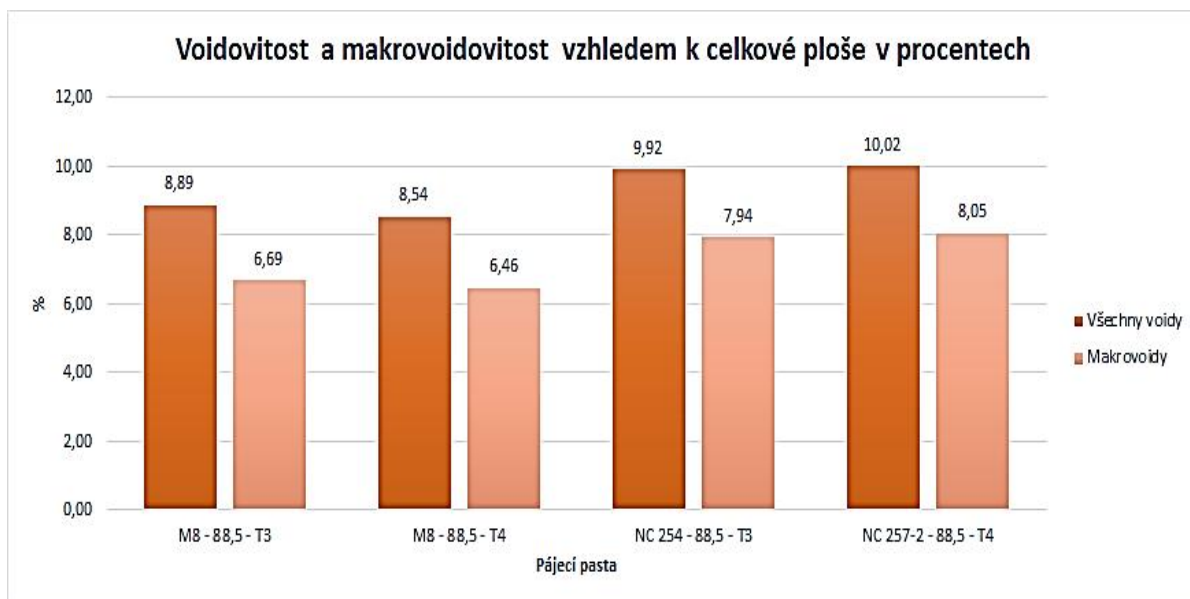
4.2.3. Vzorky bez povrchové úpravy – Stárnutí 1488 hodin



Graf 22 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy se stárnutím 1488 hodin pro různé pájecí pasty.



Graf 23 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 1488 hodin pro různé pájecí pasty.

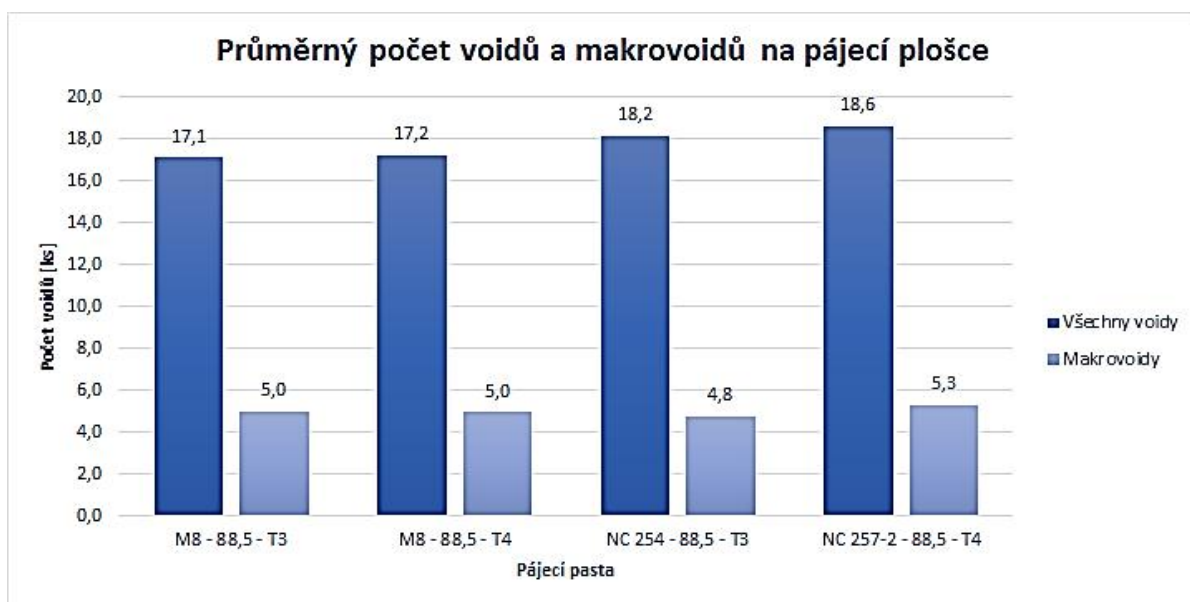


Graf 24 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 1488 hodin pro různé pájecí pasty.

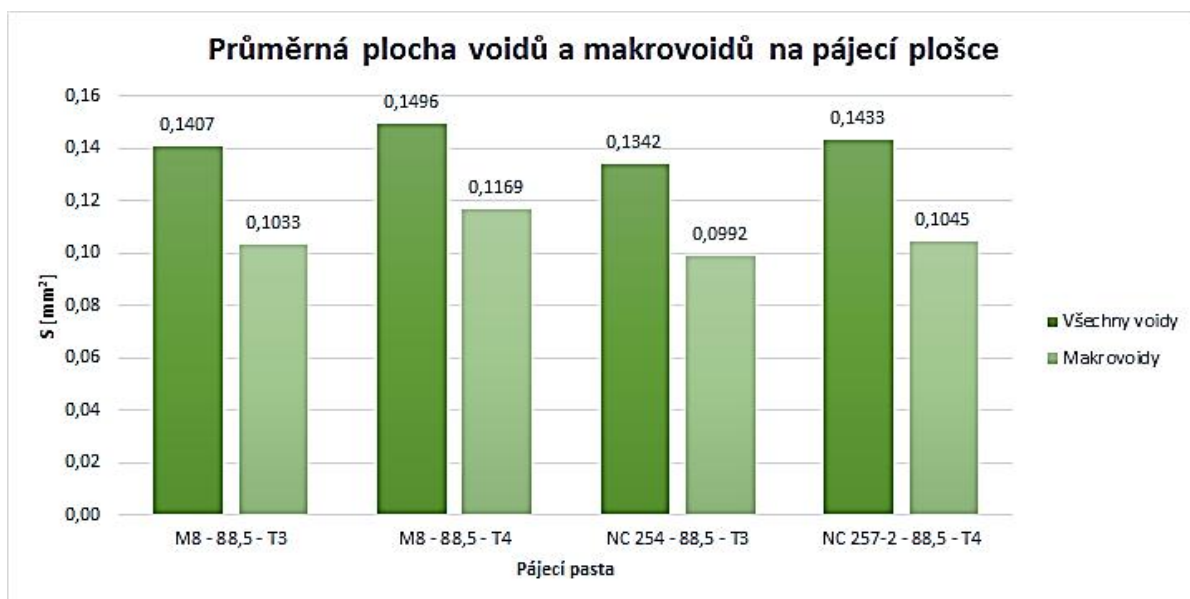
Při vyhodnocení plošek bez povrchové úpravy, které byly vystaveny stárnutí na 1488 hodin, vychází výsledky četnosti voidů téměř srovnatelně pro všechny pájecí pasty. Výjimku tvoří pouze pájecí pasta M8 – 88,5 – T3, která má četnost nepatrně vyšší, ovšem četnost makrovoidů má oproti ostatním nižší.

Z hlediska plochy voidů a makrovoidů vychází s menší plochou pájecí pasty typu M8 oproti ostatním dvěma, kde se plocha pohybuje okolo 10 % z celkové plochy pájecí plošky. Opět je převážná většina plochy tvořena makrovoidy.

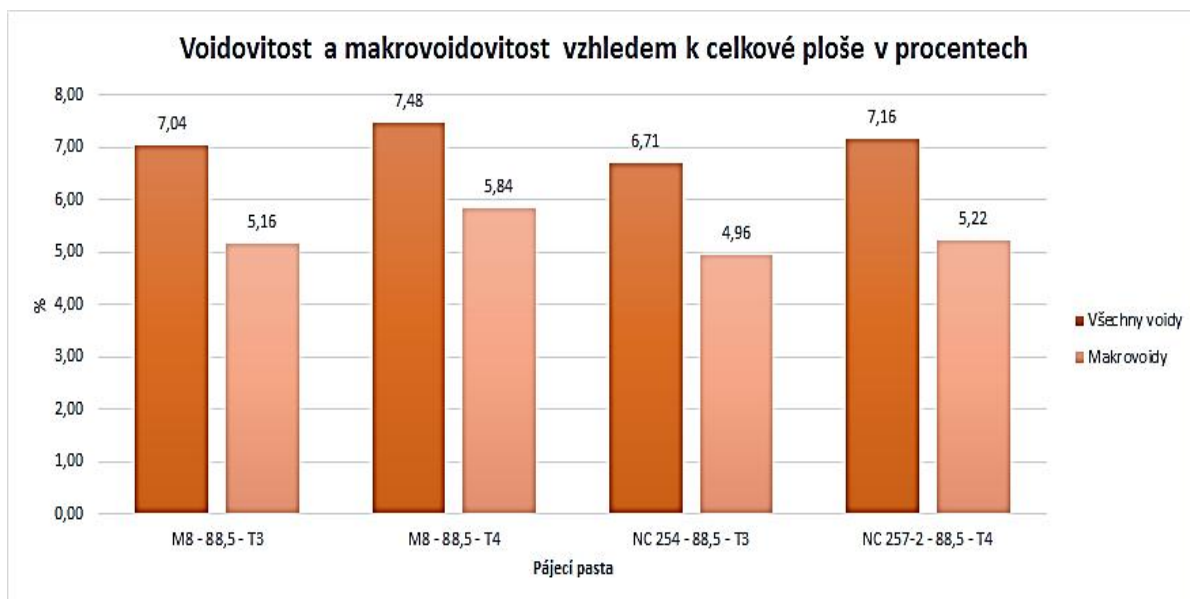
4.2.4. Vzorčky s povrchovou úpravou ENIG



Graf 25 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou ENIG pro různé pájecí pasty.



Graf 26 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou ENIG pro různé pájecí pasty.

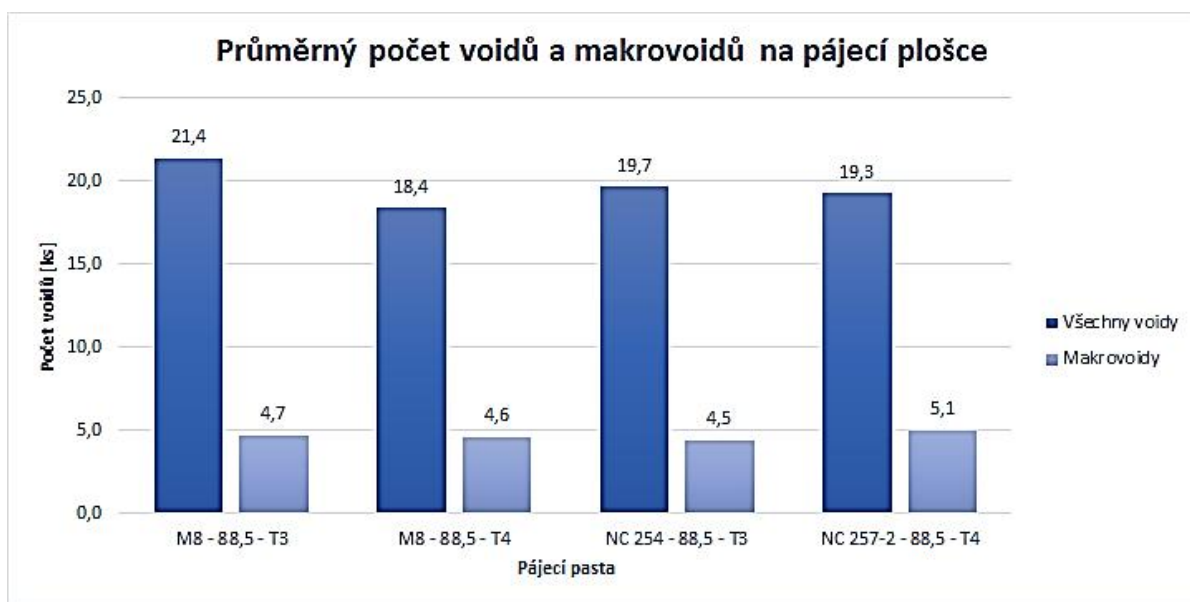


Graf 27 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou ENIG pro různé pájecí pasty.

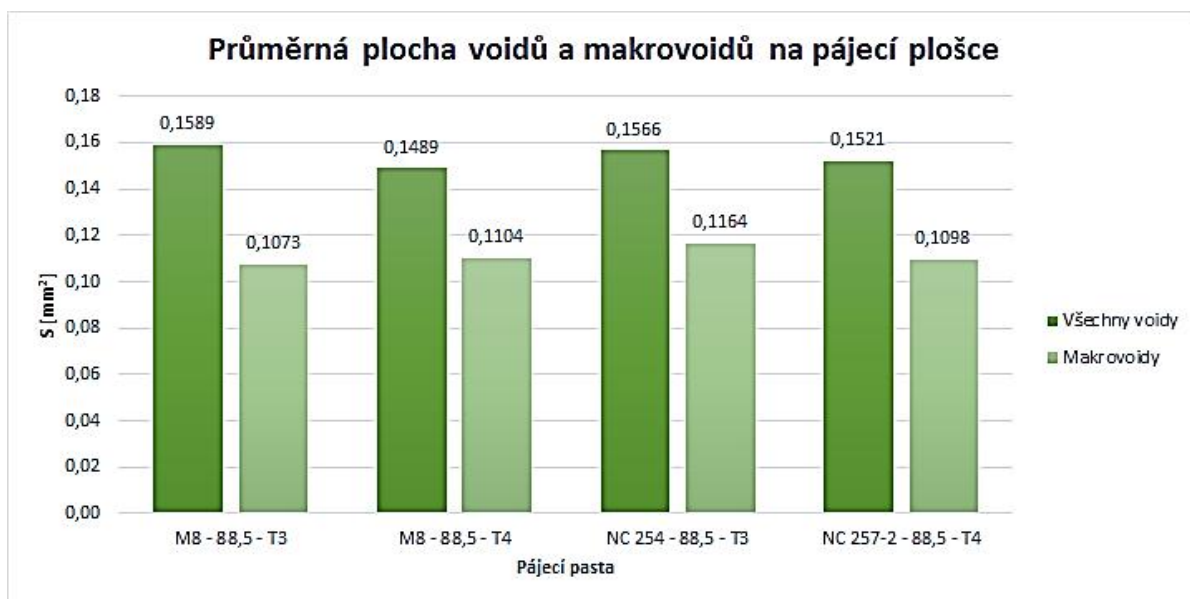
U povrchové úpravy ENIG má z hlediska četnosti voidů nejmenší průměrný počet pájecí pasta M8 – 88,5 – T3 a nejvyšší pájecí pasta NC 257 – 2 – 88,5 – T4. Řádově jsou ovšem výsledky vesměs podobné pro všechny čtyři pájecí pasty, a to i z hlediska makrovoidů.

Pro porovnání plochy voidů oproti četnosti vychází s nejmenší plochou pájecí slitina NC 254 – 88,5 – T3 a nejvyšší M8 – 88,5 – T4. Opět převážnou většinu plochy tvoří makrovoidy a jejich trend je obdobný jako u porovnání celkové plochy voidů.

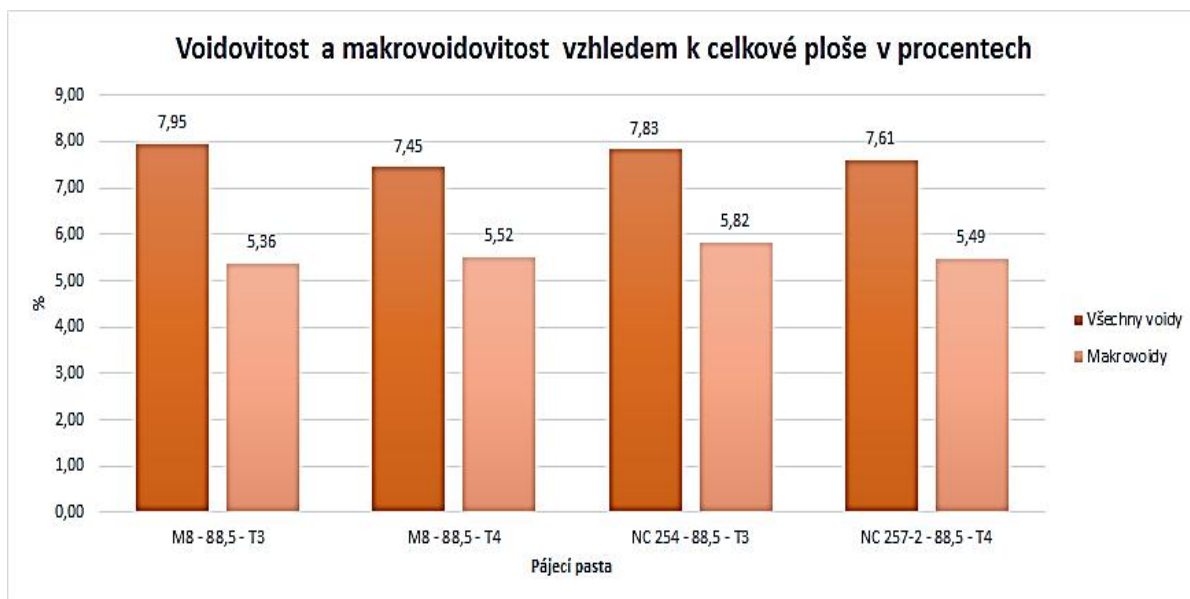
4.2.5. Vzorky s povrchovou úpravou Galvanický Sn



Graf 28 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou Galvanický Sn pro různé pájecí pasty.



Graf 29 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou Galvanický Sn pro různé pájecí pasty.

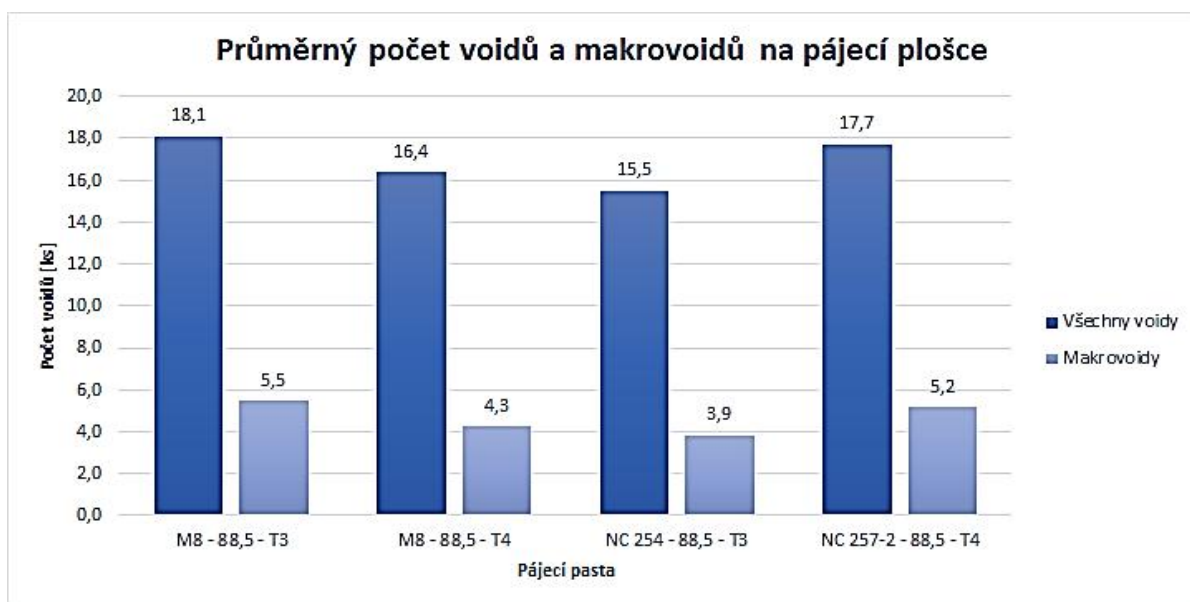


Graf 30 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou Galvanický Sn pro různé pájecí pasty.

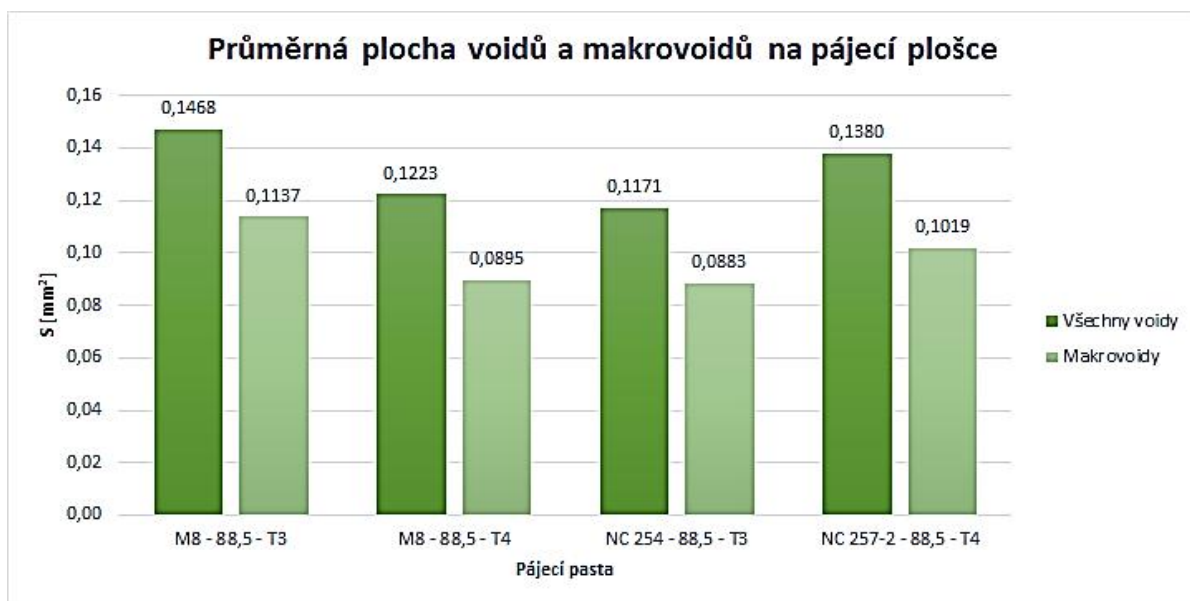
U povrchové úpravy Galvanický Sn jsou výsledky z hlediska četnosti voidů i makrovoidů pro všechny pájecí slitiny téměř srovnatelné. Nejmenší počet voidů má pájecí pasta M8 – 88,5 – T4 a největší M8 – 88,5 – T4. Výsledky se však liší opravdu nepatrně.

Obdobné výsledky lze pozorovat také při zhodnocení plochy voidů a makrovoidů, kde jsou výsledky také do jisté míry podobné. Celkové procentuální zastoupení dutin v pájeném spoji se pohybuje od 7,45 % do 7,95 % z celkové plochy plošky pájeného spoje.

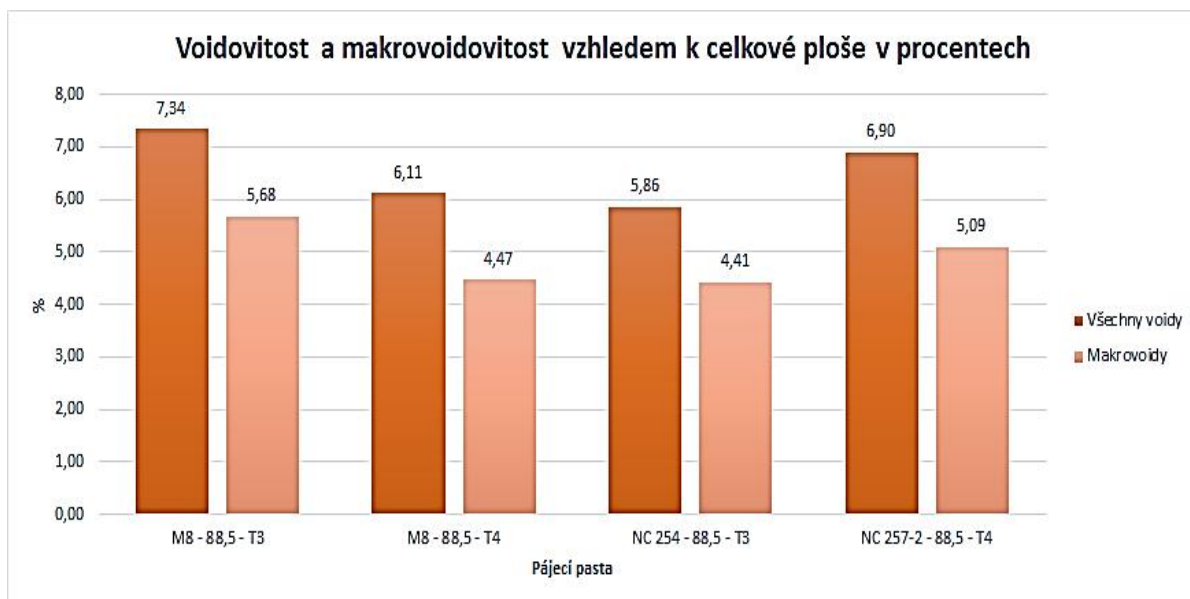
4.2.6. Vzorok s povrchovou úpravou HAL bez olova



Graf 31 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou HAL bez olova pro různé pájecí pasty.



Graf 32 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou HAL bez olova pro různé pájecí pasty.

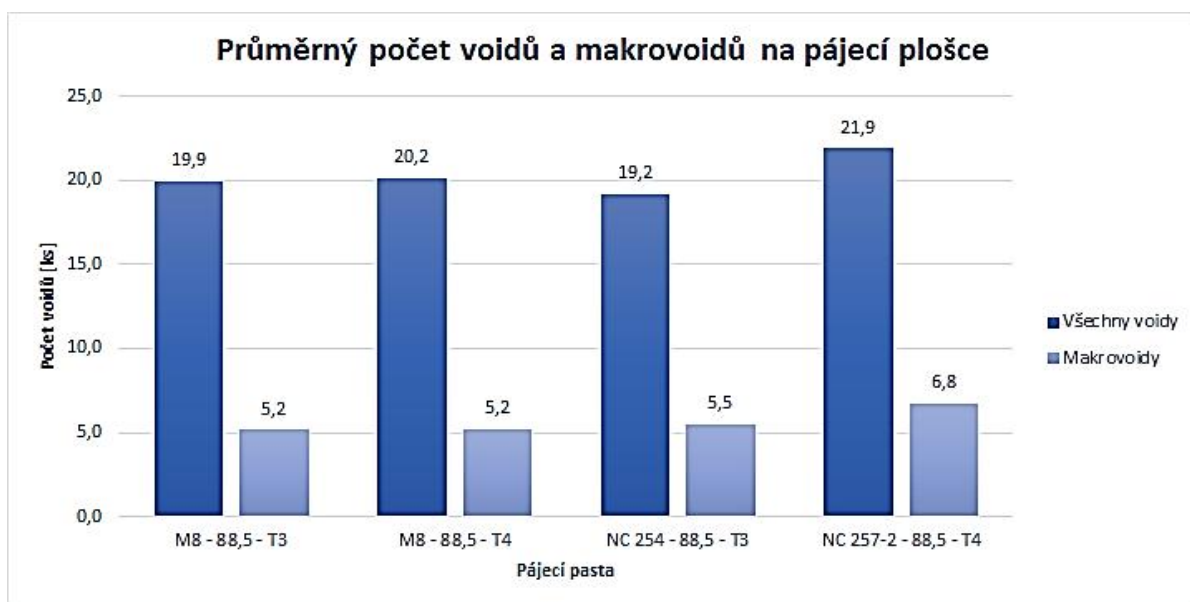


Graf 33 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou HAL bez olova pro různé pájecí pasty.

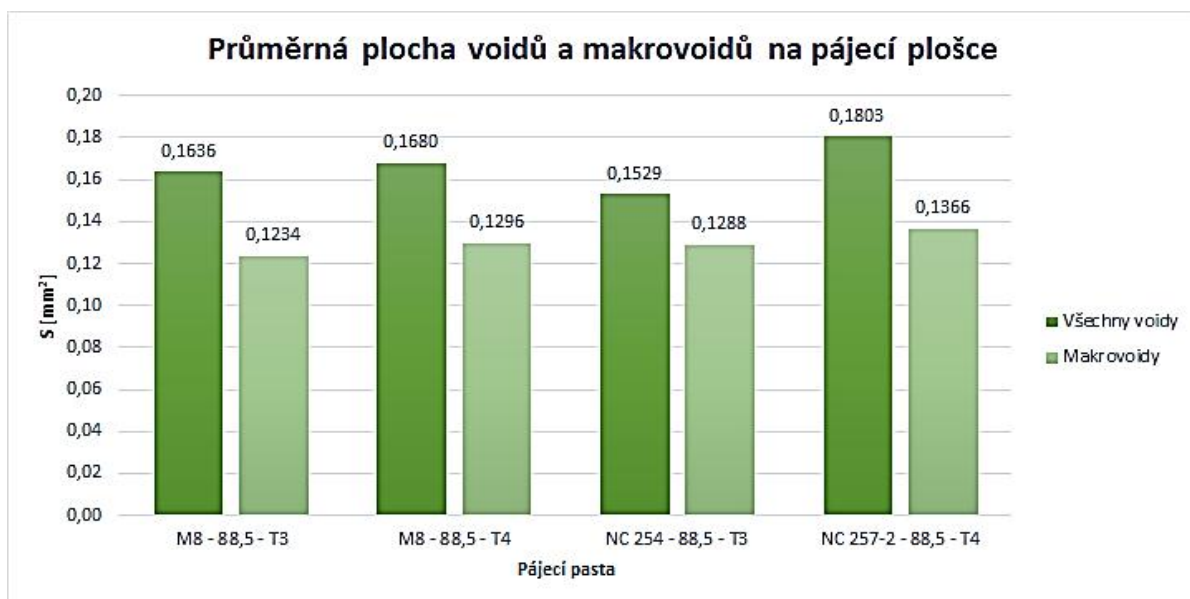
U povrchové úpravy HAL bez olova má při zhodnocení průměrného počtu voidů jejich nejmenší výskyt pájecí slitina NC 254 – 88,5 – T3 a nejvyšší M8 – 88,5 – T3. Obdobné výsledky platí i pro makrovoidy, které jak je z grafu patrné, tvoří vždy asi čtvrtinu z celkového počtu voidů.

Poměrně příznivé výsledky lze pozorovat z grafu pro průměrnou plochu voidů, kde se výsledky pohybují mezi 5,86 % a 7,34 % z celkové plochy pájecí plošky. Nejnižší hodnotu lze pozorovat opět pro pastu NC 254 – 88,5 – T3 a nejvyšší pro M8 – 88,5 – T3.

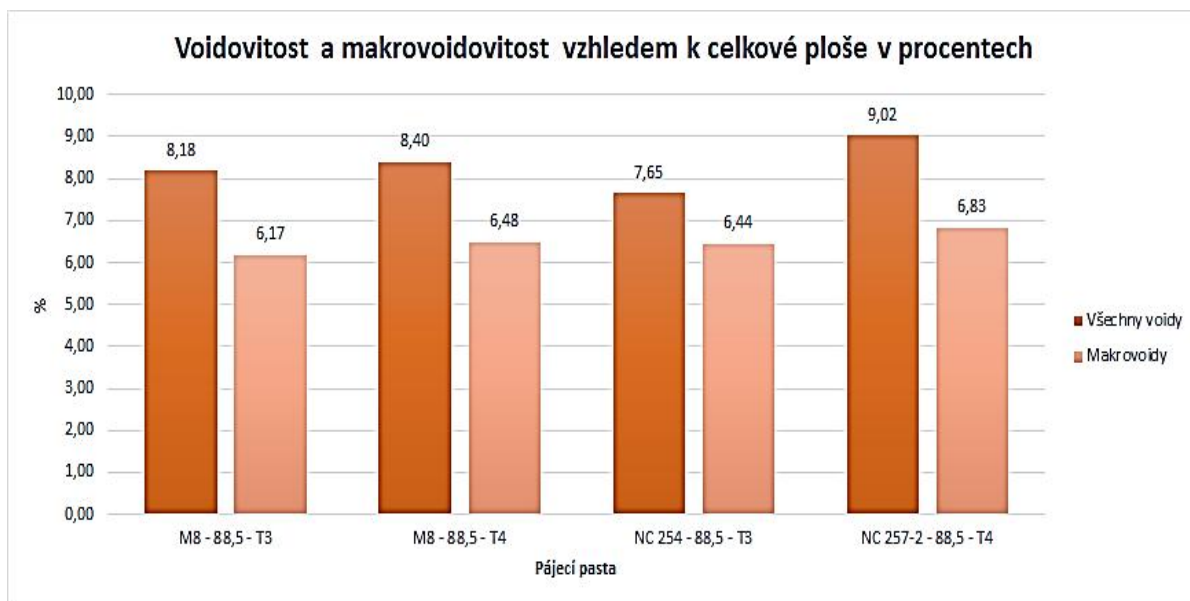
4.2.7. Vzorky s povrchovou úpravou OSP



Graf 34 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou OSP pro různé pájecí pasty.



Graf 35 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou OSP pro různé pájecí pasty.



Graf 36 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou OSP pro různé pájecí pasty.

Povrchová úprava OSP vykazuje téměř podobné výsledky z hlediska výskytu voidů pro všechny použité pájecí pasty. Nepatrně horší výsledek je pouze u pájecí slitiny NC 254-2 – 88,5 – T3. Obdobný trend lze pozorovat i z hlediska vyhodnocení průměrného počtu makrovoidů.

Průměrná plocha voidů v pájeném spoji je u této povrchové úpravy nejnižší u NC 254-2 – 88,5 – T3 a nejvyšší u NC 257-2 – 88,5 – T4. Celkové procentuální zastoupení dutin se v průměru pohybuje okolo 9 % a vysoké procento plochy je tvořeno makrovoidy.

4.2.8. Porovnání výsledků pájecích past

4.2.8.1 Četnost voidů a makrovoidů v pájeném spoji

Při vyhodnocení celkové průměrné četnosti voidů vzhledem k použité pájecí pastě, je patrné, že se výsledky neliší tak razantně jako při porovnání v případě použití jednotlivých povrchových úprav. Výjimku tvoří vzorky vytvořené z DPS bez povrchové úpravy, které neprošly stárnutím a vzorky z DPS bez povrchové úpravy, které stárly 744 hodin. U první zmíněné výjimky se jako nejlepší varianta použití pájecí pasty ukazuje NC 257-2 – 88,5 – T4 a jako nejhorší NC 254 – 88,5 – T3. U druhé se jako vhodná pájecí pasta jeví M8 – 88,6 – T3 a jako zcela nevhodná NC 254 – 88,6 – T3. U ostatních vzorků jsou výsledky téměř srovnatelné pro všechny pájecí pasty. Po provedení celkového vyhodnocení průměrného výskytu voidů v pájeném spoji, vychází s průměrnou nejmenší četností pájecí pasty M8 – 88,5 – T3 a M8 – 88,5 – T4, které obsahují tavidlo aktivity ROL1. Z toho vyplývá, že vyšší aktivita tavidla má pozitivní vliv na snížení počtu voidů v pájeném spoji. Také je z výsledků patrné, že velikost částic pájecí slitiny v pájecí pastě nemá na četnost voidů zásadnější vliv.

Z hlediska vyhodnocení počtu makrovoidů v pájeném spoji výsledky ukazují, že téměř u všech povrchových úprav je nejvyšší hodnota četnosti makrovoidů u pájecí pasty NC 257-2 – 88,5 – T4 u ostatních pájecích past jsou výsledky pro téměř všechny povrchové úpravy srovnatelné a s poměrně malým rozptylem.

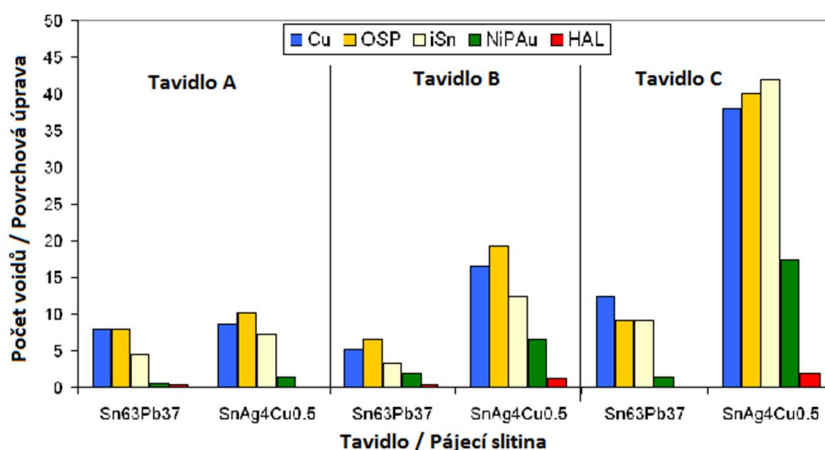
4.2.8.2. Plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji

Při porovnání výsledků průměrné plochy voidů lze usuzovat, že pájecí pasta M8 – 88,6 – T3 vykazuje nejmenší plochu voidů u vzorků s DPS bez povrchové úpravy. U ostatních povrchových úprav kromě Galvanického Sn mají dutiny nejmenší plochu při použití pájecí slitiny NC 254 – 88,5 – T3. U povrchových úprav OSP a ENIG je také možné sledovat vliv velikosti kovových částic v pájecí pastě. Při použití pájecí pasty s velikostí částic T3 lze pozorovat menší plochu dutin než u T4. Tento jev ovšem není markantní. U vzorků s měděnou ploškou, která stárla 1488 hodin, je pozorovatelný vliv použitého tavidla, které u vzorků s aktivitou tavidla ROL1 zajistila nižší plochu voidů.

Makrovoidy v pájeném spoji vždy představují převážnou většinu plochy dutin nezávisle na použité pájecí pastě. V průměru nejmenší plocha makrovoidů vyšla pro pájecí pastu M8 – 88,6 – T3. Výjimku opět tvořily povrchové úpravy ENIG a HAL bez olova, kde vyšla jako nevhodnější z hlediska plochy makrovoidů slitina NC 254 – 88,5 – T3.

4.3. Porovnání výsledků s dalšími výzkumy

Následující graf byl převzatý z výzkumu vzniku voidů při pájení přetavením. Jeho cílem bylo porovnat interakci mezi povrchovými úpravami s pájecími pastami různého složení (obsahem různého tavidla).

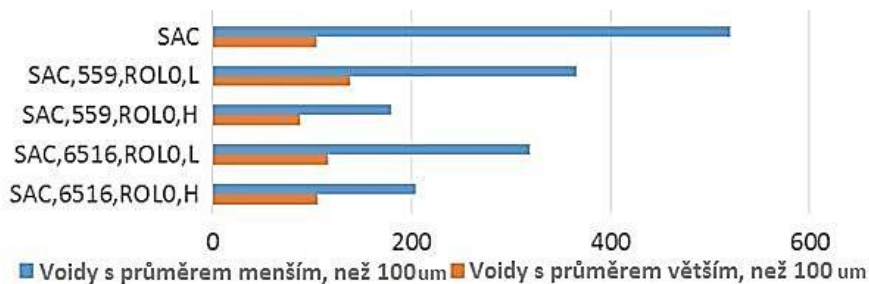


Graf 37 – Porovnání výsledků povrchových úprav a pájecích past z literatury [27].

Z uvedených výsledků je patrné, že naše výsledky vzhledem k použitým povrchovým úpravám se vesměs shodují. Nejnižší počet voidů se zde vyskytuje u povrchové úpravy HAL a následně u ENIG. Zcela nevhodné se jeví použití OSP a plošek bez povrchových úprav (čistá Cu).

Dále z grafu můžeme vypožorovat, že složení pájecí pasty má na voidovitost také zásadní vliv. S našimi výsledky lze porovnat pouze pájecí slitinu SnAg4Cu0.5, protože je bezolovnatá a my jsme v našem výzkumu porovnávali pouze bezolovnaté pájecí pasty. Z grafu 37 je patrné, že použité tavidlo má na počet voidů velice zásadní vliv. Bohužel přesné složení tavidla v práci [27] nebylo uvedeno.

Naše tvrzení o vlivu tavidla na voidovitost také potvrzuje následující graf č. 38, který byl prezentován v jiném odborném článku. Zde byly použity dvě pájecí slitiny s různými tavidly s aktivitou ROL0. Následně bylo pozměněno složení pájecí pasty, kde při značení L bylo do pájecí pasty přidáno 0.4 ml tavidla ROL0 a při značení H bylo do pasty přidáno 0.8 ml tohoto tavidla.



Graf 38 – Vliv složení tavidla na voidovitost [14].

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zkoumání vlivu různých povrchových úprav na vznik dutin v pájených spojích. Použité pájecí pasty ke tvorbě vzorků byly použity čtyři. Všechny byly bezolovnaté a typu SAC. Lišily se v obsahu tavidla s úrovní aktivace ROL0 a ROL1 a dále ve velikosti kovových částic, kde byly použity pájecí pasty se zrnitostí T3 a T4.

Dvě sady vzorků, u kterých nebyla použita povrchová úprava (plošky DPS byly pouze z Cu), byly vystaveny stárnutí ve vlhkém prostředí po dobu 744 hodin a 1488 hodin. Tento experiment probíhal z důvodu testování vlivu oxidace na míru voidovitosti při použití pájecích past s různou aktivitou tavidel.

Pro analýzu bylo nejprve nutné vzorky zrentgenovat a roztřídit. Na snímcích byl následně pomocí jasové analýzy určen počet a plocha dutin v pájených spojích. Voidy s průměrem větším než 100 μm byly klasifikovány jako makrovoidy. Analýza probíhala z pohledu použitých povrchových úprav a z pohledu pájecích past.

Z analýzy použitých povrchových úprav plyne, že povrchová úprava HAL bez olova se u převážné většiny vzorků jeví jako nejvhodnější povrchová úprava z důvodu nejnižšího celkového počtu voidů i makrovoidů a jejich plochy v pájených spojích. Podobné výsledky (ovšem o trochu horší) lze také pozorovat u povrchové úpravy ENIG. Jako nevhodné se jeví použití DPS bez povrchových úprav, a to nezávisle na tom, zda byly vystaveny stárnutí nebo ne, a dále povrchová úprava OSP. Z dat lze také konstatovat, že měděné plošky, které prošly stárnutím a byly tedy pokryté oxidy, lépe reagují s tavidlem než měděné plošky, které nestárly. To má za následek snížení voidovitosti. Pokud ovšem množství oxidů přesáhne určitou mez, tavidlo již s nimi nestačí reagovat a množství a plocha voidů opět roste. Dále lze pozorovat, že Galvanický cín vykazuje poměrně velké množství mikrovoidů oproti ostatním povrchovým úpravám.

Při analýze pájecích past lze pozorovat, že se výsledky neliší tak razantně jako při porovnání různých typů povrchových úprav. Výjimku tvoří pouze několik vzorků, u kterých nebyla použita povrchová úprava. Zde nejspíše docházelo k dobré nebo naopak špatné reakci tavidla s oxidy na pájecí plošce. Jako vhodnější pájecí pasty pro snížení voidovitosti se ukazují ty, které obsahují tavidlo s aktivitou ROL1. Z toho plyne závěr, že s rostoucí aktivitou tavidla se snižuje počet i plocha voidů v pájeném spoji. Dalším zkoumaným faktorem byla různá zrnitost kovových částic v pájecí pastě. Z výsledků lze pozorovat, že tento faktor má oproti ostatním nejmenší vliv na voidovitost. Makrovoidy jsou při porovnání plochy a četnosti vzhledem ke složení pájecích past téměř ve stejném rozložení. Nepatrně lepší výsledky vykazuje pájecí pasta s aktivitou tavidla ROL1.

Dále můžeme konstatovat, že převážná většina z celkové plochy voidů v pájeném spoji je vždy tvořena makrovoidy, nezávisle na použité povrchové úpravě a pájecí pastě.

Celkově z výsledků plyne, že povrchové úpravy mají poměrně velký vliv na četnost i plochu dutin v pájeném spoji. Velkou roli také hraje složení pájecí pasty, kde se zvýšením aktivity tavidla může docílit menší voidovitosti. Uvedené výsledky byly dále porovnány s podobnými výzkumy a lze konstatovat, že jsou obdobné. Z těchto závěrů je patrné, že je nutné hledat vždy nejlepší kombinaci pájecí pasty s povrchovou úpravou.

Z našich dat bych vyzdvihl kombinaci pájecí pasty NC 254 – 88,5 – T3 s povrchovou úpravou HAL bez olova, kde vyšel nejmenší průměrný výskyt voidů i makrovoidů v pájeném spoji a průměrná plocha voidů zde byla 5,86 % z celkové plochy. Makrovoidy zde tvořily 4,41 % z celkové plochy. Naopak bych chtěl zdůraznit, že naše nejhorší výsledky, které vykazovala kombinace pájecí pasty NC 257-2 – 88,5 – T4 a DPS bez povrchové úpravy, která nepodléhala stárnutí, dosahovaly průměrnou plochu dutin pouze 10,86 % z celkové plochy pájeného spoje. Toto číslo se ovšem ani z poloviny neblíží 25 % povolených normou IPC-A-610D [28], což ukazuje na poměrně velkou kvalitu pájených spojů.

Dále bych se chtěl v budoucnu ve své disertační práci zaměřit hlouběji na vliv stárnutí pájecích plošek a použití různých nepájivých masek na tvorbu dutin v pájených spojích a vliv dutin ve spojích na mechanickou odolnost z pohledu jejich četnosti a lokace ve spoji.

Seznam použité literatury

- [1] 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.
- [2] STARÝ, Jiří, KAHLE, Petr. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [3] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Vyd. 1. Pardubice: ABE.TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903-5970-1.
- [4] MĚKKÉ PÁJENÍ V ELEKTRONICE. *Laboratorní cvičení předmětu AIB13VST* [online]. Praha: ČVUT, 2012, 7.3.2012 [cit. 2017-11-1]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf
- [5] ANSI J-STD-005. *Requirements for Soldering Pastes*. 1995.
- [6] ABEL, Martin. *SMT Technologie povrchové montáže*. Vyd.1. Pardubice: Platan, 2000, 246 s. ISBN 8090273319.
- [7] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-010-2392-3.
- [8] *Turtles are here* [online]. U.S.A.: Turtles are here, 2017 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: http://turtlesarehere.com/html/reflow_oven.html
- [9] *Rollback the Lead-Free Initiative* [online]. Houston: Signal Consulting, 2007 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: http://www.sigcon.com/Pubs/news/10_01.htm
- [10] PODZEMSKÝ J., J. URBÁNEK, K. DUŠEK. *Obrazová analýza povrchu bezolovnaté povrchové úpravy zaměřená na indikaci cínových whiskerů*. Electroscopy. 2011, č. 1. 2011 March 21:6 s.
- [11] *Electrical engeneering* [online]. 2011 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/17710/should-i-worry-about-the-risk-of-tombstoning>
- [12] Metallic Resources. *Thombstoning*. [online]. 2012 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://metallicresources.com/documents/Tombstoning%20explained.pdf>
- [13] *Buletin Anotací*. Brno, 21.10.2014, 2014(10) [cit. 2017-12-5]. ISSN 1211-6947.
- [14] BUŠEK D., K. DUŠEK, D. RŮŽIČKA, M. PLAČEK, P. MACH, J. URBÁNEK, J. STARÝ. Flux effect on void quantity and size in soldered joints. *Microelectronics Reliability*. 2016, 6.
- [15] KOZÁK, Martin. *Vliv povrchových úprav na vznik voidů v pájených spojích*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [16] MCKEOWN, Stephen, Stephan MESCHTER, Polina SNUGOVSKY a Jeffery KENNEDY. *SERDP Tin Whisker Testing and Modeling: Whisker Geometric Risk Model Development*. In:

- SlidePlayer [online]. Toronto: BAE Systems Endicott, 2014 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/5762010/>
- [17] Chang-Chih Chen, Cheng-Hui Hsieh, Yu-Wei Lee, Cheng-Hsien Yang, Cheng-En Ho, Formation mechanism of pinholes in electroplated Cu films and its mitigation, In *Thin Solid Films*, Volume 596, 2015, Pages 209-215, ISSN 0040-6090, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.07.063>.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609015007336>
- [18] TANJUNG BUNGAH, Cheng SieW Tay, Pek Chew Tan PRAI, SWee Kian Cheng, KULIM a Eng Hooi Yap BUKIT MERTAJAM. SOLDER PRINTING PROCESS TO REDUCE VOID FORMATION IN A MICROVIA. In: *Patent Application Publication* [online]. SUNNYVALE: BLAKELY SOKOLOFF TAYLOR & ZAFMAN, 2007 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20080099539.pdf>
- [19] RŮŽIČKA, Daniel. *Studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájeném spoji*. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [20] OSP (Organic Solderability Preservative). Shikoku. [online] [cit. 2018-02-14]. Dostupné z: <https://www.shikoku.co.jp/eng/products/chemical/fine-chemical/osp.php>
- [21] NC257-2 NO CLEAN SOLDER PASTE: Technical datasheet. In: *AIM* [online]. USA, [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/nc257-2_solder_paste_tds.pdf
- [22] NC254 NO CLEAN SOLDER PASTE: Technical datasheet. In: *AIM* [online]. USA, [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/nc254_solder_print_paste_tds.pdf
- [23] M8 NO CLEAN SOLDER PASTE: Technical datasheet. In: *AIM* [online]. USA, [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/m8_solder_paste_tds.pdf
- [24] MIKULA, Tomáš. *Vliv teplotního profilu na výskyt voidů v pájených spojích*. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [25] Prototypové pracoviště (K13113.labrework). *WIKI.ORG*. [online], [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://technology.feld.cvut.cz:8080/xwiki/bin/view/K13113/labrework?xpage=print&language=cs>
- [26] Ultra High-Resolution Nanofocus X-ray Inspection System – GE's Phoenix nanomex. *GE OIL & GAS*, [online],[cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/radiography-and-computed-omography/phenix-nanomex>
- [27] Ewald, T., Holle, N., & Wolter, K. (2012). Void formation during reflow soldering. 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, 1677-1683.
- [28] HILL, Mike a kol. IPC-A-610, Revize C. Northbrook, Illinois: IPC, 2000. 420 s. ISBN 1-580982-32-8.

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Intermetalický spoj [3].	10
Obrázek 2 – Smáčení pájeného povrchu pájkou [1].	11
Obrázek 3 – Kvalita smáčení povrchu pájkou v závislosti na kontaktním úhlu [1].	12
Obrázek 4 – Povrchová úprava DPS [1].	20
Obrázek 5 – Porovnání různých typů tavidel [2].	30
Obrázek 6 – Měření povrchového izolačního odporu [2].	31
Obrázek 7 – Nedostatečné přetavení pájecí pasty [8].	32
Obrázek 8 – Cínový whisker [9].	32
Obrázek 9 – Efekt náhrobního kamene [11].	33
Obrázek 10 – Umístění a typy voidů v pájeném spoji [14].	33
Obrázek 11 – Shrinkage voidy [16].	34
Obrázek 12 – Pinhole voidy [17].	34
Obrázek 13 – Mikro-via voidy [18].	35
Obrázek 14 – Kirkendallový voidy způsobené elektromigrací [13].	35
Obrázek 15 – Mikrovoidy [13].	36
Obrázek 16 – Makrovoidy [15].	36
Obrázek 17 – Proces vzniku makrovoidů [14].	37
Obrázek 18 – Návrh DPS.	39
Obrázek 19 – Manipulátor [24].	41
Obrázek 20 – Průběžná pec Mistral 260 [25].	41
Obrázek 21 – GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T [26].	43
Obrázek 22 – Snímek z rentgenu.	43
Obrázek 23 – Analýza snímku v programu NIS Elements.	44

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle ANSI J-STD-005 [5].....	13
Tabulka 2 – Nejpoužívanější povrchové úpravy pájecích plošek [1].	20
Tabulka 3 – Příklad rozpětí tloušťky povrchové úpravy HAL pro konkrétní slitiny [1].	22
Tabulka 4 – Srovnání různých typů povrchových úprav [2].....	23
Tabulka 5 – Porovnání různých vlastností povrchových úprav [1].	23
Tabulka 6 – Výhody a nevýhody jednotlivých povrchových úprav DPS [1].....	24
Tabulka 7 – Klasifikace tavidel dle normy DIN EN 61190-1-1 [1].	28
Tabulka 8 – Dělení tavidel podle normy ISO 9454-1 Soldering Fluxes [1].....	29
Tabulka 9 – Parametry a vlastnosti použitých pájecích past [21], [22], [23].	40
Tabulka 10 – Nastavení teplotních zón průběžné pece Mistral 260.	42

Seznam rovnic

(1) Young – Dupreho rovnice	11
-----------------------------------	----

Seznam grafů

Graf 1 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty Sn99,3/Cu0,7 [15].	37
Graf 2 – Průměrná plocha voidů v pájeném spoji pájecí pasty Sn42/Bi58 [15].	38
Graf 3 – Použitý teplotní profil pro přetavení.	42
Graf 4 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T3.	46
Graf 5 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T3.	46
Graf 6 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T3.	47
Graf 7 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T4.	48
Graf 8 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T4.	48
Graf 9 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu M8 – 88,5 – T4.	49
Graf 10 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC254 – 88,5 – T3.	50
Graf 11 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC254 – 88,5 – T3.	50
Graf 12 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC254 – 88,5 – T3.	51
Graf 13 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC257–2 – 88,5 – T4.	52
Graf 14 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC257–2 – 88,5 – T4.	52
Graf 15 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití různých povrchových úprav pro pájecí pastu NC257–2 – 88,5 – T4.	53
Graf 16 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy pro různé pájecí pasty.	55
Graf 17 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy pro různé pájecí pasty.	55
Graf 18 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy pro různé pájecí pasty.	56
Graf 19 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy se stárnutím 744 hodin pro různé pájecí pasty.	57

Graf 20 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 744 hodin pro různé pájecí pasty.	57
Graf 21 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 744 hodin pro různé pájecí pasty.	58
Graf 22 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy se stárnutím 1488 hodin pro různé pájecí pasty.	59
Graf 23 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 1488 hodin pro různé pájecí pasty.	59
Graf 24 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky bez povrchové úpravy stárnutím 1488 hodin pro různé pájecí pasty.	60
Graf 25 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou ENIG pro různé pájecí pasty.	61
Graf 26 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou ENIG pro různé pájecí pasty.	61
Graf 27 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou ENIG pro různé pájecí pasty.	62
Graf 28 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou Galvanický Sn pro různé pájecí pasty.	63
Graf 29 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou Galvanický Sn pro různé pájecí pasty.	63
Graf 30 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou Galvanický Sn pro různé pájecí pasty.	64
Graf 31 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou HAL bez olova pro různé pájecí pasty.	65
Graf 32 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou HAL bez olova pro různé pájecí pasty.	65
Graf 33 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou HAL bez olova pro různé pájecí pasty.	66
Graf 34 – Průměrný počet voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou OSP pro různé pájecí pasty.	67
Graf 35 – Průměrná plocha voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou OSP pro různé pájecí pasty.	67
Graf 36 – Procentuální zastoupení plochy voidů a makrovoidů v pájeném spoji při použití pájecí plošky s povrchovou úpravou OSP pro různé pájecí pasty.	68
Graf 37 – Porovnání výsledků povrchových úprav a pájecích past z literatury [27].	70
Graf 38 – Vliv složení tavidla na voidovitost [14].	70

Seznam použitých zkratk

DPS	Deska plošného spoje
SMD	Součástka pro povrchovou montáž
THD	Součástka s drátovými vývody
SMT	Technologie povrchové montáže
THT	Technologie montáže součástek s drátovými vývody
T	Teplota
t	Čas
S	Plocha
ENIG	Typ povrchové úpravy (Electroless nickel immersion gold)
OSP	Typ povrchové úpravy (Organic Surface Protectives)
HASL (HAL)	Typ povrchové úpravy (Hot Air Solder Leveling)
Galvanický Sn	Typ povrchové úpravy (Galvanický cín)
IČ záření	Infračervené záření
RTG záření	Rentgenové záření

Přílohy

Příloha 1. – CD s podklady k této diplomové práci.

Obsah CD:

- Elektronická forma této diplomové práce ve formátu PDF
- Gerberová data pro výrobu DPS
- Snímky z rentgenu ve formátu JPG
- Zpracovaná data v tabulkách ve formátu XLSX