

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kontaktování polovodičových čipů metodou sintrování

Bc. Pavel Němec

Plzeň 2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel NĚMEC**
Osobní číslo: **E17N0020P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Kontaktování polovodičových čipů metodou sintrování**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište prakticky používané metody pro připojování a kontaktování polovodičových čipů na keramických substrátech.
2. Vyhledejte dostupné sintrovací materiály použitelné pro připojování a kontaktování polovodičových součástek.
3. Porovnejte nalezené sintrovací materiály z hlediska parametrů a ceny.
4. Navrhněte vhodné testovací postupy pro ověření kvality sintrovaného spoje.
5. Na dodaných vzorcích proveďte vybrané testy a kriticky zhodnoňte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Kewei Xiao, Susan Luo, Khai Ngo, G-Q. Lu, "Low-temperature sintering of a nanosilver paste for attaching large-area power chips", *Advanced Packaging Materials (APM) 2013 IEEE International Symposium on*, pp. 192-202, 2013, ISSN 1550-5723
2. Hanguang Zheng, David Berry, Jesus N. Calata, Khai D. T. Ngo, Susan Luo, Guo-Quan Lu, "Low-Pressure Joining of Large-Area Devices on Copper Using Nanosilver Paste", *Components Packaging and Manufacturing Technology IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 915-922, 2013, ISSN 2156-3950
3. M. Knoerr and A. Schletz, "Power semiconductor joining through sintering of silver nanoparticles: Evaluation of influence of parameters time, temperature and pressure on density, strength and reliability," *2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, Nuremberg, 2010, pp. 1-6
4. Elektronické informační zdroje (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Wiley Online Library, AIP Scitation, Google Scholar, ResearchGate, Mendeley ...)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Řeboun, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku kontaktování polovodičových čipů metodou sintrování. Obsahem první kapitoly jsou dostupné metody kontaktování, jejich princip a výhody/nevýhody. V této kapitole je nejdůležitější podkapitola sintrování, kterým se zabývá tato práce. Druhá kapitola popisuje průběh sintrování a metody nanášení sintrovací pasty. Dále jsou zde rozebrány dostupné sintrovací pasty a jejich výrobci a poslední část této kapitoly je zaměřena na porovnání vlastností vytvořených spojů. Tím je myšleno porovnání vlastností sintrovaného spoje s pájeným nebo lepeným spojem. Třetí kapitola se soustředí na existující motivy používané pro testování sintrovaných spojů a na výběr hodnocení sintrovaných spojů. Na základě informací z této kapitoly byl následně navržen vlastní motiv umožňující testování sintrovaného spoje. Následně byly vybrány testovací postupy, kterými se vytvořený spoj vyhodnotil. Poslední čtvrtá kapitola je zaměřena na experimentální část, ta je dále rozdělena do čtyř hlavních podkapitol. Příprava na testování, která obsahovala návrh vzorků, výběr sintrovací pasty a výběr metody nanášení sintrovací pasty. Další podkapitolou bylo testování zkušebních vzorků pro zjištění nejvhodnějšího postupu pro vytvoření kvalitního spoje. Třetí podkapitolou bylo samotné testování finálních vzorků podle nejvhodnějšího postupu z předchozí podkapitoly. Poslední podkapitola obsahuje krátké zhodnocení průběhu testování. Vzorky pro praktickou část byly navrženy částečně dle vzorků využívaných v použité literatuře a částečně dle potřeb tohoto experimentu. Následně bylo vytvořeno 243 vzorků s Ag motivem a 243 vzorků s Cu motivem. Poté byly vzorky podrobeny třem klimatickým testům. První skupina testovaných vzorků byly bez stárnutí, druhá skupina vzorků byla vložena do pece na stárnutí suchým teplem a třetí skupina vzorků byla vložena do šokové komory. Po dokončení klimatických testů byly všechny vzorky použity na destruktivní zkoušku shear testu. Nejlépe dopadla skupina vzorků, která byla vložena do pece. Ty dosahovaly hodnot okolo 500 N, zatímco skupina, která byla vložena do šokové komory obsahovala i vzorky s nejnižšími hodnotami kolem 44 N.

Klíčová slova

Sintrování, sintrovací pasta, sítotisk, šablonový tisk, dispenzing, rentgen, SEM mikroskop, shear test, klimatické testy

Abstract

The presented thesis is focused on the issue of contacting semiconductor chips by sintering. The first chapter contains available methods of contacting, their principle and advantages / disadvantages. In this chapter, the most important is the sintering subchapter that is dealt with in this work. The second chapter describes the course of sintering and methods of applying sintering paste. Furthermore, available sintering pastes and their manufacturers are discussed and the last part of this chapter is focused on comparing the properties of the joints created. This means comparing the properties of the sintered joint with the soldered or bonded joint. The third chapter focuses on the existing motive used to test sintered joints and on the selection of sintered joints. Based on the information in this chapter, a custom motive was subsequently designed to allow sintering to be tested. Subsequently, the test procedures were chosen to evaluate the created joint. The last fourth chapter is focused on the experimental part, which is further divided into four main subchapters. Preparation for testing, which included sample design, selection of sintering paste and selection of sintering paste application method. Another subchapter was the testing of test samples to determine the most appropriate procedure for creating a quality joint. The third subchapter was the actual testing of the final samples according to the most appropriate procedure from the previous subchapter. The last subchapter contains a brief evaluation of the testing process. The samples for the practical part were designed partly according to the samples used in the used literature and partly according to the needs of this experiment. Subsequently, 243 samples with Ag motive and 243 samples with Cu motive were created. The samples were then subjected to three climatic tests. The first group of samples tested was non-aging, the second group of samples was placed in a dry-heat aging furnace, and the third group of samples was placed in a shock chamber. After climatic tests were completed, all samples were used for destructive shear test. Preferably, a group of samples that were placed in the furnace fell. These reached values of around 500 N, while the group that was inserted into the shock chamber also contained samples with the lowest values around 44 N

Key words

Sintering, sintering paste, screen printing, stencil printing, dispensing, x-ray, SEM microscope, shear test, climatic tests

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 30.05.2019

Pavel Němec

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Řebounovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce, ochotu a trpělivost.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 METODY KONTAKTOVÁNÍ	11
1.1 KONTAKTOVÁNÍ EUTEKTICKÝMI SLITINAMI (PÁJENÍ)	12
1.2 NEVODIVÉ LEPENÍ	13
1.3 VODIVÉ LEPENÍ	14
1.3.1 Izotropní lepidla	14
1.3.2 Anizotropní lepidla	15
1.4 SINTROVÁNÍ	16
1.5 PŘÍMÉ METODY KONTAKTOVÁNÍ	16
1.5.1 COB – Chip On Board	16
1.5.2 Flip Chip	18
2 SINTROVÁNÍ	21
2.1 METODY NANÁŠENÍ PASTY	22
2.1.1 Šitotisk	22
2.1.2 Šablonový tisk	23
2.1.3 Dispensing	24
2.2 SINTROVACÍ PASTY	26
2.2.1 NBE Tech	28
2.2.2 Henkel	29
2.2.3 Heraeus	31
2.2.4 Kyocera	32
2.3 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ KONTAKTOVÁNÍ	33
3 TESTOVACÍ MOTIVY A VÝBĚR HODNOCENÍ SINTROVANÝCH SPOJŮ	35
3.1 TESTOVACÍ MOTIVY	35
3.2 HODNOCENÍ KVALITY SPOJE	35
3.2.1 Rentgen	35
3.2.2 Výbrusy	36
3.2.3 Měření adheze	37
3.2.4 Klimatické testy	39
3.2.5 Proudové zatížení	40
3.2.6 Tepelná vodivost	40
4 TESTOVÁNÍ A ZHODNOCENÍ	42
4.1 PŘÍPRAVA NA TESTOVÁNÍ	42
4.1.1 Návrh vzorků	42
4.1.2 Výběr sintrovací pasty	43
4.1.3 Výběr metody nanášení sintrovací pasty	43
4.2 TESTOVÁNÍ	44
4.3 FINÁLNÍ TESTOVÁNÍ VZORKŮ	53
4.3.1 Beztlaké sintrování – dvě keramické destičky	55
4.3.2 Beztlaké sintrování – Keramická destička + čip	64
4.4 ZHODNOCENÍ	71
ZÁVĚR	72
SEZNAM LITERATURY	74

Seznam symbolů a zkratek

Ag	Stříbro
Al	Hliník
Al ₂ O ₃	Oxid hlinití
AMB	Active metal brazing
Au	Zlato
BaTiO ₃	Titaničitan barnatý
CCB	Controlled collapse bonding
COB	Chip on board
COF	Chip on flex
COG	Chip on glass
DBC	Direct bonded copper
DPS	Deska plošných spojů
ECA	Electrically conductive adhesives
FCOB	Flip Chip on board
IC	Integrated circuit
IMS	Insulated metal substrate
LTJT	Low temperature joining technique
Mo	Molybden
NCA	Non conductive adhesives
Pd	Paladium
Pt	Platina
RTG	Rentgen
RuO ₂	Oxid rutheničitý
SAC	slitina cínu (Sn), stříbra (Ag) a mědi (Cu)
SEM	Scanninc electron microscope
TPC	Thick printed copper
T _s	Mez pevnosti

Úvod

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na sintrovací pasty a jejich aplikaci. Zabývá se konkrétně sintrovacími pastami založenými na bázi stříbra. Tento druh materiálu (Ag sintrovací pasta) se v elektronice využívá stále v hojnějším počtu a nahrazuje dříve používané olovnaté pájky, které nevyhovují aktuálním normám z ekologického hlediska. Sintrovaný spoj má oproti pájenému mnoho výhod, mezi které se řadí například mnohem nižší elektrická rezistivita, delší životnost, vyšší bod tání a mnohem vyšší tepelná vodivost. Posledních dvou výhod je využíváno hlavně ve výkonové elektronice. Vyššího bodu tání se využívá z hlediska možnosti využití sintrovacího materiálu při vyšších pracovních teplotách a lepší tepelné vodivosti spoje z hlediska protékání proudů, které více zahřívají součástku a je potřeba ztátové teplo lépe odvádět.

Sintrovaný spoj je tvořen Ag vrstvou ze sintrovací pasty, která je složena právě z mikrometrových a nanometrových Ag částic a rozpouštědla, díky kterému je v tekuté formě. Při zvýšené teplotě dochází k difuzi těchto částic a odpaření rozpouštědla z pasty a tím vytvoření pevné Ag vrstvy.

Záměrem diplomové práce je shrnutí základních vlastností kontaktních metod a uvedení čtenáře do problematiky metody sintrování. Hlavním cílem této práce je nalézt nejvhodnější způsob kontaktování součástky na keramický substrát. S tím je spojena kvalita sintrovaného spoje, která se odvíjí od mnoha faktorů. Jako je výběr sintrovací pasty, doba zasušení pasty, tlak při sintrování, to vše má velký význam na kvalitu sintrovaného spoje. V práci je uveden návrh testovaného substrátu a testovaného motivu, v návaznosti je vybrána nejvhodnější testovací metoda pro výsledný přípravek. V závěru práce jsou otestovány finální přípravky vybranými testovacími metodami.

1 Metody kontaktování

Realizace kvalitního propojení elektronických součástek na substrát je nezbytným předpokladem pro vytvoření funkčního a spolehlivého elektronického zařízení. Vytvořený spoj musí splnit tři základní parametry. Mechanickou fixaci, elektrické propojení a dostatečný odvod tepla. Mechanickou fixací je myšleno připojení holého čipu k substrátu (v tomto případě keramickému). Zároveň nejdůležitějším parametrem je elektrické propojení pro kvalitní přenos ať už energie, signálu nebo dat. A v neposlední řadě odvod tepla, který je využíván zejména u výkonových součástek, kde prochází součástkami mnohem větší proud a tím generují mnohem více ztrátového tepla. Funkce kontaktu také závisí na rozmístění plošek kontaktů, správném návrhu a čistotě daného spoje. Jakákoliv nečistota může způsobit degradaci jednoho ze tří základních parametrů. Čip je možné připojit k substrátu v zapouzdřené formě, která slouží jako ochrana před vnějšími vlivy a případně napomáhá správné funkci čipu.

Jak je již výše zmíněno, důležitou funkcí je odvod tepla a ten jako takový představuje velký problém při dnešním neustálém zmenšování komponentů. Teplo se neodvádí jen pomocí pouzdra, ale zejména pomocí substrátu, na kterém je čip upevněn. Existují čtyři typy substrátů:

- IMS (Insulated Metal Substrate)
- DBC (Direct Bonded Copper)
- AMB (Active Metal Brazing)
- TPC (Thick Printed Copper) [1]

Posledním zmíněným se bude zabývat tato práce. AMB substráty kombinují keramickou složku ve spojení s vodivou vrstvou stejně jako u DBC substrátů. Rozdíl tohoto spojení je v eutektické vrstvě. U AMB není eutektikum tvořeno na povrchu měděné folie, ale je samostatnou vrstvou, která je vkládána mezi keramiku a měď. Na složení této vrstvy záleží celková odolnost substrátu. DBC a TPC jsou si oproti IMS velmi podobné, rozlišují se ve výrobním procesu nanesení měděné vrstvy na keramiku. DBC substráty využívají intermetalické vrstvy, která zajišťuje připevnění měděné folie ke keramickému substrátu. Naproti tomu u TPC substrátů se využívá sítotisku, kde se pomocí motivu v sítu nanese měděná pasta na substrát a následně se nechá vypálit v peci při teplotě cca 900 °C. Důležité je, že v peci musí být dusíková atmosféra, která zajišťuje ochranu proti oxidaci mědi. [2][1]

Výhod TPC oproti DBC je celá řada, například díky tomu, že se jedná o aditivní technologii, nemusí se zde využívat náročného procesu leptání. Dále díky sítotisku tato metoda nabízí vysoké rozlišení tisku, úsporu materiálu a možnost selektivního tisku až do tloušťky 300 μm . [2]

1.1 Kontaktování eutektickými slitinami (Pájení)

Pájení je způsob spojování dvou dílů metalurgickým způsobem. Jedná se o tavení přídavného materiálu (pájecí slitina) na rozdíl od svařování, kde se taví spojované díly. Tím vzniká podmínka, že tavící teplota pájecí slitiny musí být nižší než tavící teplota daných dílů. Tavící teplota pájecí slitiny rozděluje pájky na tvrdé a měkké pájení. V elektronice se využívá měkké pájení, které se vyznačuje teplotou tavení do 450 °C. Naopak tvrdé pájení má bod tavení od 450 °C a výše.

- **Měkké pájky** se vyznačují teplotou tavení do 450 °C a jsou tvořeny slitinami kovů jako jsou cín, olovo, měď, bismut a jiné. Nejznámější slitinou v minulosti byla Sn60Pb (60% cín a zbytek olovo), ta se vyznačuje teplotou tání ve 183 °C. Ovšem vzhledem k novým normám a směrnicím se nesmí v pájkách používat olovo, a proto se v dnešní době značně využívá třísložková slitina SAC (Sn, Ag, Cu). [3]
- **Tvrdé pájky** mají naopak teplotu tavení vyšší než 450 °C a využívají se ke spojení dvou nepodobných kovů jako jsou hliník, stříbro, měď, zlato a nikl. Tyto kovy se spojují ohřátím těchto kovů a roztavením přídavného materiálu (slitiny), která naváže na oba kusy a spojí je. Zde se jako u měkkého pájení používá tavidlo pro odstranění oxidů z míst určených k pájení, to zabraňuje jejich novému vzniku během pájení nebo zlepšuje smáčení a roztékání roztavené pájky po pájeném místě.[3] [4]

Pájení může probíhat dvěma způsoby, buďto ruční nebo strojní. U ručního pájení nastává problém při sériové výrobě, kde je kladen důraz na stejný pájený spoj několikrát v řadě. Pracovník není schopen dodržet pokaždé stejnou dobu zahřívání, způsob přiložení hrotu atd. S tím je spojena určitá chybovost a tento problém řeší strojní pájení, kde jsou veškeré operace prováděny automaticky a pracovník do pájení vůbec nezasáhne. Mezi nejznámější strojní pájení patří metoda pájení vlnou, přetavením, v parách a jiné. [3]

Dalším důležitým rozdělením je forma pájky a způsob její aplikace na substrát. Mohou být buďto v pevné formě (preforma) nebo mohou být v pastovité formě (nanášení pasty například pomocí šablonového tisku). Rozdělujeme také způsob pájení podle ohřevu. Buďto se jedná o lokální ohřev což je ruční pájení pomocí páječky nebo celo-objemový ohřev (např. pájení přetavením).

Při výrobě pájeného spoje probíhají složité fyzikálně-chemické pochody a jedním z nich je difuze. Difuze je ve zkratce proces, kde látky mají tendenci přecházet z prostředí s vyšší koncentrací do prostředí s nižší koncentrací. [3]

- **Bezdifuzní pájení**

Tento typ pájení je založen na předčasném ukončení ohřevu ve stádiu tvoření chemických vazeb. A právě difuze v tomto objemu spoje je zanedbatelná. [3]

- **Difuzní pájený spoj s rozpouštěním**

Zde kromě difuze dochází zároveň i k rozpouštění, a to vše při delším smáčení základního materiálu tekutou pájkou a na základě použitých materiálů vzniká rozpouštění omezené, neomezené nebo se tvoří eutektické slitiny. [3]

- **Disperzní pájený spoj**

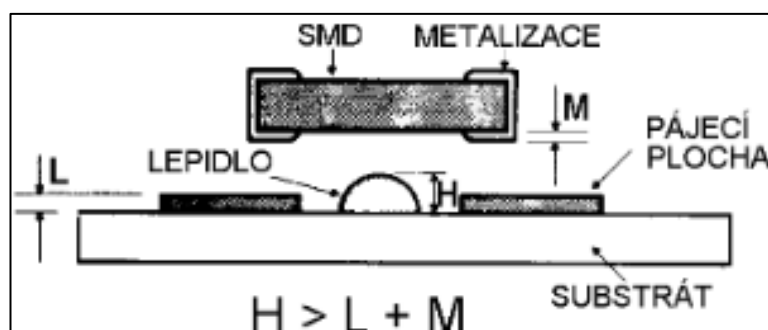
Při pájení vznikají mikroskopické kapiláry (velmi úzké „trubičky“) v tuhém tělese, do kterého zatékají lehčeji tavitelné komponenty. Tím jsou například wolfram – měď, železo – olovo. To jsou spoje, které netvoří vzájemné slitiny nebo se nijak zvlášť chemicky neváží. [3]

1.2 Nevodivé lepení

Nevodivé lepení (NCA – *Non-Conductive Adhesives*), jak už název napovídá, využívá vlastností nevodivých lepidel. Ty jsou tvořeny pouze epoxidovou pryskyřicí a neobsahují plnivo (vodivou složku), tudíž slouží pouze k přichycení čipu na substrát. Nevodivých lepidel se využívá z dvou hlavních důvodů. Tím prvním je jejich vlastnost vnitřního pnutí, což zaručuje spoj, který je dlouhodobě bez ztráty vlastností. Pokud k sobě přiložíme dvě kontaktní plošky a ty zalijeme lepidlem, které je následně vytvrzeno, pak tento spoj zůstává dlouhodobě vodivý. Vnitřní pnutí poskytuje dostatečnou přitlačnou sílu, kterou působí na elektrický spoj mezi dvěma kontaktními ploškami. Jako výhoda nevodivých lepidel se dá určitě považovat jejich stálost, co se týče kontaktního odporu, který se s časem nemění nebo jen minimálně. Kontaktní

odpor je zároveň velmi malý, což značí možnost přenosu většího proudu ve srovnání se stejně velikým spojem lepeným pomocí anizotropního vodivého lepidla. Další výhodou je, že pokud se nepovede nanést lepidlo na přesně určené místo a vyteče menší množství na DPS, tak nehrozí žádný zkrat díky tomu, že tyto lepidla neobsahují právě již zmíněné plnivo. Tudíž to nemá na funkci DPS příliš velký dopad. [5][6]

Způsob nanášení tohoto druhu lepidel probíhá buďto sítotiskem, šablonovým tiskem, dispenserem a nebo kapkovou metodou. Z těchto uvedených metod je nejrozšířenější metoda pomocí dispenseru. Vytvrzování lepidla se provádí pomocí UV záření, tepla nebo kombinací těchto dvou metod. [5] Připojení pomocí nevodivého lepidla je naznačeno na obrázku 1.



Obrázek 1 - Nevodivé lepení (převzato z [5])

1.3 Vodivé lepení

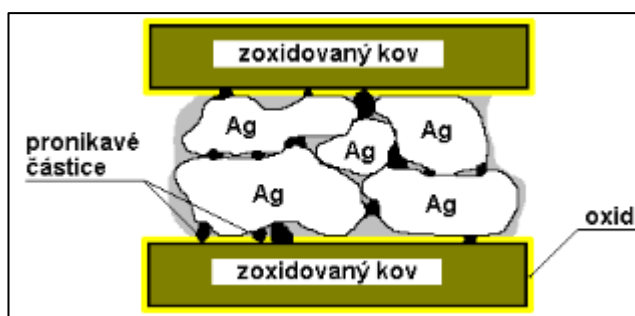
U vodivého lepení (ECA – *Electrically Conductive Adhesives*) se oproti nevodivému lepení využívá jak epoxidové pryskyřice (která může být nahrazena silikonovými nebo polyimidovými pryskyřicemi), tak právě zmíněného plniva, které je tvořeno buď stříbrnými, niklovými, paladiovými nebo měděnými pocínovanými částicemi. Důležitou roli zde hraje tvar těchto částic (kuličky, lupínky), který může velmi ovlivnit vlastnosti lepeného spoje. [3]

Základní rozdělení vodivých lepidel z hlediska jejich vodivosti se dělí na izotropní a anizotropní. [3][7]

1.3.1 Izotropní lepidla

Zde se využívá všesměrové vodivosti podobně jako u pájek. Částice mají ve většině případů tvar kuliček.[3] Zde je největší problém se změnami teplot a oxidací povrchu vodivých částic. Tím vznikají izolační bariéry a následně se zhoršuje vodivost lepidla. Tento problém se

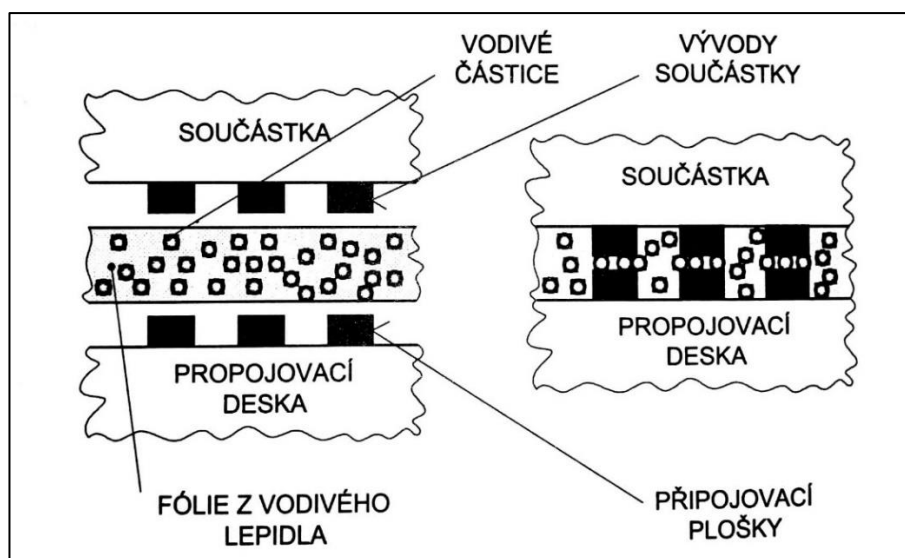
dá řešit pomocí elektricky vodivého oxidu jako pojiva – pronikavé částičky jako pojivo. [7]
Spojení pomocí izotropního lepidla je znázorněno na obrázku 2.



Obrázek 2 - Vodivé Izotropní lepení (převzato z [7])

1.3.2 Anizotropní lepidla

Anizotropní lepidla se dělí ještě na dvě menší podskupiny, a to dle metody výroby. Jednou z nich je výroba ve formě past a druhá výroba ve formě anizotropního filmu. První zmíněná využívá vlastnosti elektrické vodivosti pouze ve směru kolmém na rovinu základní desky a ve směru rovnoběžném je nevodivá. Jednoduše řečeno, anizotropní lepidla vedou pouze v jednom směru, a to díky tvaru částic, které jsou ve tvaru lupínků. Druhá zmíněná metoda ve formě anizotropního filmu spočívá ve výrobě tenkých folií s krycí vrstvou na povrchu. Nanášejí se za zvýšené teploty a tlaku obdobně jako fotorezisty, tj procesem laminace. Montáž se uskutečňuje ihned po odstranění krycí ochranné vrstvy za zvýšené teploty a působení tlaku. [3][7] Vodivé anizotropní lepení je znázorněno na obrázku 3.



Obrázek 3 - Vodivé Anizotropní lepení (převzato z [7])

1.4 Sintrování

Jedná se v podstatě o tepelně zpracovaný práškový materiál, který využívá difuze k dosažení vyšší pevnosti a integrity. Hlavním rozdílem v procesu pájení a sintrování je aplikování tepla a chemických procesů při spojování dvou materiálů. Pájení využívá bodu tání, kdy pájka „roztaje“ a následně spojí materiály k sobě, vychladne, ztuhne a tím vznikne elektrický a mechanický spoj. Sintrování využívá tepla ke zhuštění a částečnému spojení sintrovacích částic v materiálu. Díky malým rozměrům těchto částic je možné výpal provádět při nižších teplotách a zároveň se zrna stříbra zvětšují, což má za následek silnější vazbu mezi dvěma materiály. Tomuto celkovému procesu se říká „necking“. Hlavní výhodou sintrování oproti pájení je jeho možnost využití u výkonové elektroniky, která je náročná na stále vysoké teploty, které už pájený spoj nemusí vydržet. S tím je spojená až 4x vyšší tepelná vodivost, 10x vyšší spolehlivost a samozřejmě delší životnost.

Díky stříbru obsaženému v pastě v podobě malých částic má sintrovaný spoj bod tání 961 °C. Zatímco pájený spoj má bod tání buď do 450°C (měkké pájky) nebo nad 450°C (tvrdé pájky). Přitom se nejčastěji pro hromadné pájení využívá teplota tání 260°C. [3]

Sintrování je velmi slibná alternativa k pájení, která je v mnoha aspektech lepším řešením. Například z pohledu přenosu tepla, lepší vodivosti a mnoha dalších. Nicméně i tato metoda má své nevýhody, a to svou komplikovaností přípravy a nanášení materiálu. Zatímco pájení se dá provádět za jakýchkoliv podmínek a mnoha metodami, u sintrování se nedá využít tak široká škála nanášení pasty jako u pájení. Pájet se dá například pomocí vlny, což u sintrování není možné. [3]

1.5 Přímé metody kontaktování

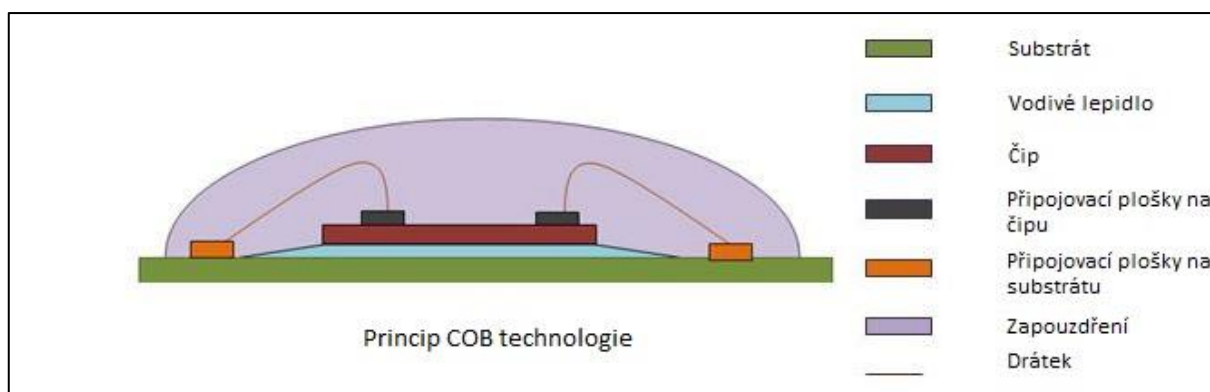
Zde se jedná pouze o metody připojení nezapouzdřeného čipu na substrát, které lze realizovat jak lepením, pájením tak i sintrováním.

1.5.1 COB – Chip On Board

Metoda Chip on board (COB) využívá technologie přímého kontaktování čipu na daný substrát. Nevyužívá tedy klasického pouzdření jako IC. Díky této technologii je urychlen a zjednodušen celý proces navrhování a výroby finálního produktu. Výkonnost takto připojeného

čipu je vyšší, jelikož má kratší propojovací cesty mezi čipem a substrátem jako je tomu u technologie flip chip. [8][9]

Obecně tedy platí - COB rovná se "přímé připojení čipu na substrát". Jako substrát se u této technologie používá mnoho typů organických, tak i anorganických materiálů. Z anorganických materiálů jsou to například keramické a skleněné substráty, které vykazují výborné dielektrické a tepelné vlastnosti. Organické materiály se využívají hlavně z hlediska menší váhy a cenové nákladnosti na produkt. Za zmínku určitě stojí také flexibilní substráty, které se mohou ohýbat. Díky těmto možnostem použití substrátu se metodě COB také přezdívá COG (Chip on glass) nebo COF (Chip on flex), atd. Na obrázku 4 je znázorněna metoda COB [8][9][10]



Obrázek 4 – Chip on Board (převzato z [10])

Celý proces COB se skládá ze tří hlavních kroků.

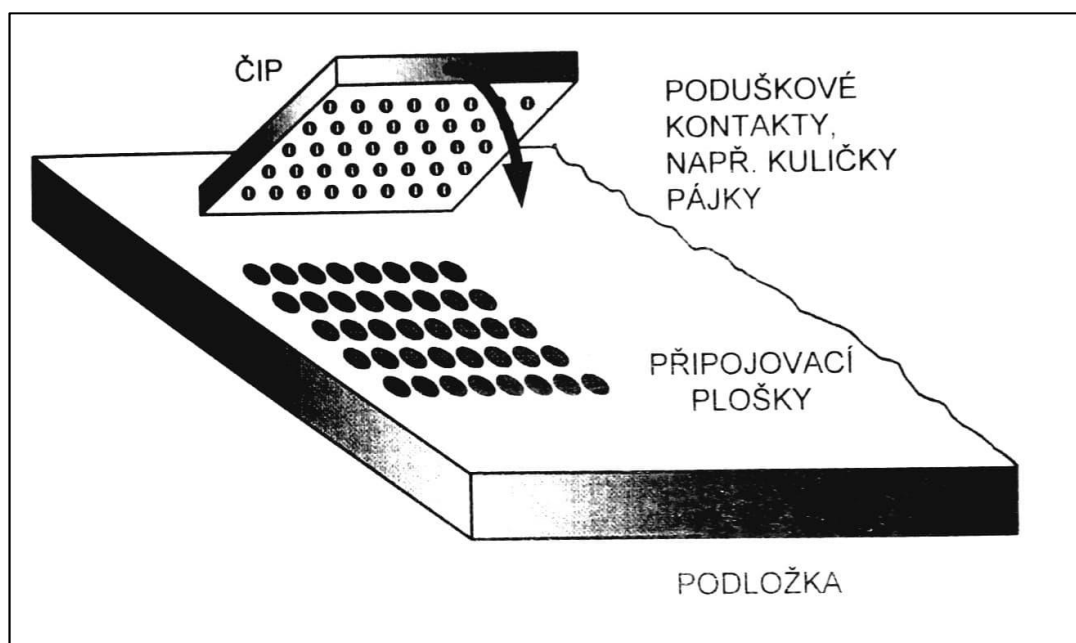
- 1) připevnění čipu na substrát,
- 2) drátové propojení,
- 3) zapouzdření čipu a drátů.

Druhý krok z procesu je možné vynechat a to tehdy, když je použita FCOB technologie. Ta využívá hlavního principu flip chip technologie (viz kapitola níže) a tím pádem odpadá drátové připojení a tím se zlepšuje výkonnost. Jako u flip chip metody se zde i kromě klasického zapouzdření musí použít tzv metoda "underfil" flip chipu pro ochranu jeho aktivního povrchu a vlivů z termomechanického a chemického poškození.[8][9]

Mezi hlavní výhody, proč je tato metoda montáže čipů využívána, patří například nižší výrobní náklady, flexibilita návrhu nebo nižší tepelné poškození. [10]

1.5.2 Flip Chip

Flip chip je metoda kontaktování, kdy je čip připojený k substrátu svojí aktivní vrstvou. Na této vrstvě se nachází poduškové vývody, které jsou tvořeny pájkou. [3][11] Ta, jak je popsáno může mít různé složení a poté i jiný bod tání. Na základě právě bodu tání se vybírá pájka pro daný substrát a v případě keramiky se jedná například o olovnaté pájky Pb95Sn5 nebo Pb97Sn3 s teplotou tání kolem 315 °C. Z hlediska nových norem se ale musí využívat bezolovnaté pájky, například SAC305 (Sn96,5 % + Ag3 % + Cu0,5 %) s teplotou tání 370 °C, -425 °C. Na obrázku 5 je naznačena metoda flip chip a znázornění poduškových vývodů ve tvaru kuličky.



Obrázek 5 – Flip chip lepení (převzato z [3])

Tato metoda je hodně rozšířená po celém světě a díky tomu existuje i vícero názvů jako jsou C4, C⁴ nebo CCB (Controlled collapse bonding).

Technika připojení čipů spočívá v připojení čipu, který má aktivní stranu pokrytou pájkou a ta je přiložena na substrát s předem určenými ploškami pro kontaktování. Aby nedocházelo k roztékání pájky na jiná místa, než je požadováno, připravená ploška na substrátu je ohraničena

nepájivou maskou (nejčastěji tlustá skleněná vrstva). Dále se celý přípravek vloží do pece, kde se roztaví pájka a dojde k připojení všech vývodů čipu najednou.

Poduškové vývody mají velikost od 100 μm do 250 μm a na jednom čipu se jich může nacházet 700 a více. Tyto vývody se připravují různými technologiemi.

U této metody existuje mnoho nevýhod, jako například nemožnost vizuální kontroly pájeného spoje, chyby vzniklé při takovém pájení se velmi obtížně opravují, vzniká zde problém s chlazením čipu, protože odvod tepla je realizován pouze přes poduškové vývody. Kvůli právě zmíněnému teplu se využívá tepelně vodivého lepidla pro lepší odvod tepla tzv. „underfil“ lepidla. Jako poslední nevýhodou je nutná stejná rovinnost základny pouzdra a výška poduškových vývodů. [3]

Poduškové vývody se mohou připravovat dvěma způsoby, které jsou popsány níže.

- **Vakuové napařování**

Technologie výroby vakuovým napařováním byla první vynalezenou metodou pro přípravu poduškových vývodů a zároveň je používána dodnes. Jelikož se jedná o první technologii, tak je postup poměrně složitý. Na substrát, který je pokrytý pasivní vrstvou s vyleptanými dírami nad Al vrstvou, která spojuje aktivní oblast čipu, je přichycena kovová maska (Mo planžeta s vyleptanými otvory). Důležitá část této metody je, aby kontakt byl co nejvíce čistý a k tomu se využívá čištění v Ar plasmě. To zajistí co nejmenší odpor poduškových vývodů (do 10 $\text{m}\Omega$). Po čištění přichází na řadu napařování dalších vrstev neustále pod vlivem vakua. [3]

Jako první se napaří vrstva Cr, ta zajistí dobrou adhezi poduškového vývodu k této vrstvě a zároveň tvoří bariéru, která brání reakci pájky s Al vrstvou. Pak je napařena vrstva Cu, za kterou prakticky okamžitě je napařena velmi tenká vrstva Au, která zajišťuje lepší smáčitelnost Cu vrstvy s PbSn pájkou. Zároveň působí jako ochrana před oxidací Cu vrstvy. Další krok představuje nanesení PbSn pájky a následně probíhá přetavení v H_2 atmosféře. To zároveň zajistí kulový tvar poduškových vývodů. Tento způsob přípravy poduškových vývodů je složitý na výrobu a zároveň je cenově nákladný. Z toho důvodu je dnes zaměřováno spíše na jiné metody. [3]

- **Fotolitografie a galvanické pokovení**

Hlavní výhodou této technologie je její výrobní cena, která je mnohem nižší než u vakuového napařování. Nicméně to není jediný důvod zavedení této technologie, dalším důvodem je například neustálé zmenšování velikosti poduškových vývodů a s tím i čipů.

Tato technologie využívá fotoprocesu a konkrétně přímých fotoresitových masek. Ty slouží k vytvoření masek z fotoresistu přímo na substrátu. Dále jsou jednotlivé kovové vrstvy vytvářeny pomocí galvanického nanášení. U této technologie se využívá více modifikací této metody, ale mají společný princip.

2 Sintrování

Tato metoda spojování dvou materiálů využívá tzv. koalescence, což znamená spojování dvou a více částic do jednoho celku. Toho je dosaženo při určité teplotě procesu, která nesmí přesáhnout teplotu tání. Zároveň, ale musí být dosaženo takové teploty, aby došlo k difuzi mezi částicemi.

Jsou zde důležité parametry, které mají vliv na výsledný sintrovaný spoj. Jedním z nich je čas, po který se pasta nechá předsušit, ať už na vzduchu nebo v peci při určité teplotě. V experimentální části v této práci bylo nevhodnější nechat pastu zasušit 24 hodin na vzduchu při pokojové teplotě (více v experimentální části). Dalším parametrem je tlak, který působí na sintrovaný spoj, konkrétně na částice v pastě, které mají tendenci se roztahovat a tím vyplnit mezery mezi sebou. Tímto dojde ke zhuštění struktury a případnému zlepšení vlastností pasty. V experimentální části bylo využíváno 1 kg, 4 kg a 10 kg závaží (viz experimentální část). Důležitou roli hrají i viskozita pasty, stáří pasty, které může změnit vlastnosti pasty a v neposlední řadě teplotní profil při kterém je sintrovaný spoj realizovaný. Všechny tyto parametry mají velký vliv na výsledný spoj. Důležité, co tyto parametry udává, je složení sintrovací pasty, které bude rozebráno v kapitole níže.

Samotné sintrování se pak nechá rozdělit do čtyř základních kroků a dvou postupů se zasušením a bez zasušení.

Postup s předzasušením: Prvním krokem u tohoto postupu je nanesení pasty a následné zasušení. Zde je důležitý parametr smáčivost pasty, která po zasušení už není tak vysoká a součástka (v případě této práce holý čip) do pasty nemusí být dobře umístěna. Třetí krok je umístění součástky do zasušené pasty a následné další možné zasušení. Kvalitní zasušení pasty je důležitý krok při výrobě sintrovaného spoje. Nekvalitně zasušená pasta způsobuje ve výsledném spoji odplyňovací kanálky, které jsou nežádoucí. Tyto kanálky vznikají na základě ředidla obsaženého v pastě, které pokud není dostatečně vypařeno pomalým zasušením, vytvoří právě tyto odplyňovací kanálky. Čtvrtým a zároveň posledním krokem je samotné sintrování, které probíhá za určité teploty a času, podle vlastností dané pasty. Nejčastěji se sintrování provádí při teplotě kolem 200 °C až 250 °C a v čase 30 minut. Výrobce většinou udává ve svých katalogových listech teplotní profily nevhodnější pro danou pastu.

Postup bez předzasušení: Prvním krokem u tohoto postupu je také nanesení pasty, ale bez následného zasoušení. Proto je zde jako druhý krok umístění součástky do „mokrě“, právě nanesené pasty. Třetím krokem je samotné zasoušení pasty s již vloženým čipem po 24 h při laboratorních podmínkách, aby proběhlo dostatečné odpaření ředidla z pasty. Následuje čtvrtý, poslední krok sintrování, které probíhá stejně jako v předchozím postupu.

Sintrování má spoustu předpokladů (výhod) oproti klasickému pájení. Lepší tepelná vodivost, delší životnost nebo provozuschopnost při vyšších teplotách oproti pájce, kde při vyšších pracovních teplotách dochází k degradaci vlastností pájky.

2.1 Metody nanášení pasty

Sintrovací pastu lze nanášet třemi způsoby. Metodu, výhody a nevýhody dané technologie nanášení budou popsány v následujících kapitolách. Zde jsou tři metody, kterými lze nanášet sintrovací pastu na substrát.

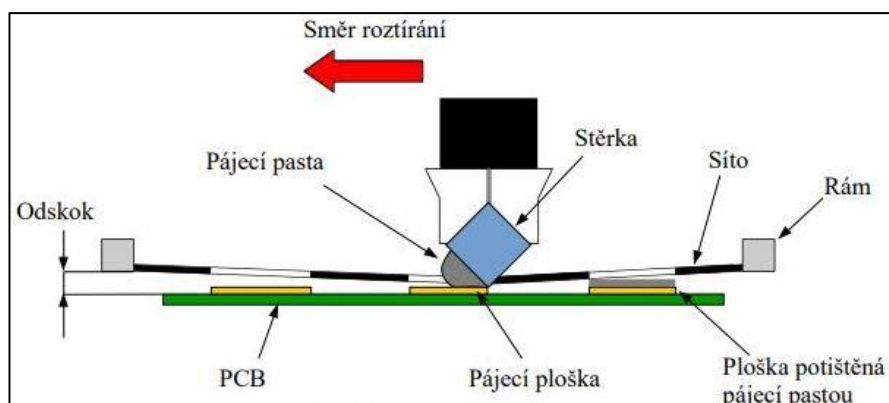
- Sítotisk
- Šablonový tisk
- Dispensing

2.1.1 Sítotisk

U sítotiskové metody je důležité rozlišovat využití této metody. Pro klasické, levné, ruční zařízení s přípustnou přesností se využívá jednoduché konstrukce a jednoduchého postupu nanášení. Důležitým prvkem je, aby konstrukce byla co nejpevnější a masivní z důvodu nutnosti stálé paralelnosti síta k substrátu. Dále musí být umožněno nastavení přesně výšky síta nad substrátem o tzv. odtrh. Při samotném tisku pak dochází ke kontaktu se substrátem pouze v místě, kde na něj tlačí těrka, což je hlavní rozdíl od šablonového tisku. Složitější zařízení pro sítotisk jako jsou poloautomatické a automatické stroje musí kromě již zmíněných vlastností splnit i možnost nastavení rychlosti a přítlaku těrky, snadnou výměnu rámu a snadné nastavení umístění obrazce. [12][3]

Princip této metody spočívá v tom, že je v sítu vytvořen obrazec s určitým motivem, skrze který je nutno přenést pastu na substrát. Tloušťku nanášené vrstvy na substrát určují dva parametry. Tloušťka síta společně s hustotou síta a vrstvou emulze EOM pod sítem. Následně se na začátek síta, kde není žádný motiv, nanese pasta, která se pomocí těrky rozetře jedním

tahem po celém sítu a skrze motiv vytvořený v sítu se pasta protlačí na substrát pod sítem. Princip této metody je znázorněn na obrázku 6. [12]



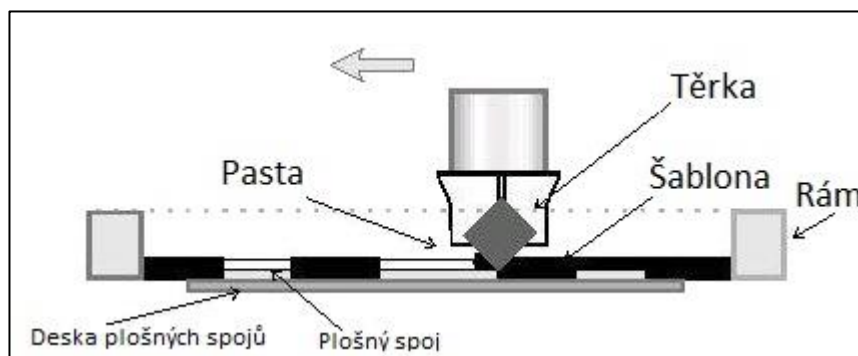
Obrázek 6 - Sítotisk (převzato z [13])

Jelikož sítotisk není cenově nákladný a je relativně nenáročný na obsluhu, tak je stále hodně používanou metodou, kterou se nechá tisknout na mnoho povrchů. Například na flexibilní nebo válcové substráty, samozřejmostí jsou tvrdé substráty. Další výhody jako je velmi dobré rozlišení, vysoká přesnost tisku i vícevrstevných struktur, podporují využívání této metody a tím je velice vhodná i pro velkoobjemovou produkci. Mezi nevýhody patří horší a zdouhavá výměna tiskového motivu. [13][12]

2.1.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk je víceméně porovnatelný se sítotiskem. Hlavní rozdíl u této metody je, že se místo síta používá tenká folie například z plechu, do kterého jsou vytvořeny otvory, skrze které dochází k protlačení pasty na substrát. Dalším rozdílem mezi těmito metodami je, že mezi folii a substrátem není prakticky žádná mezera a tloušťku natištěné vrstvy nám určuje tloušťka folie. Folie je tvořena například z mosazi, nerezové oceli nebo mědi. Možností je více a v dnešní době se začínají využívat také plasty. Do takovéto folie se pak vytváří motivy pomocí leptání, řezání laserem nebo galvanoplastikou.

Proces šablonového tisku probíhá přiložením folie na substrát, následně se na danou folii nanese pasta a pomocí těrky se skrze otvory protlačí přes folii na předem připravené plošky na substrátu. Princip je znázorněn na obrázku 7.



Obrázek 7 – Šablonový tisk (převzato z [3])

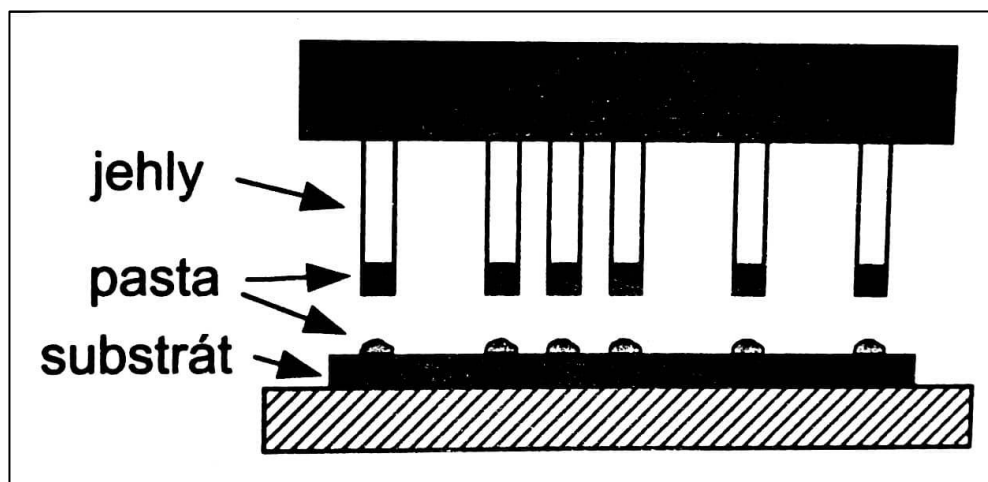
U této metody existuje tzv. μ -Screen metoda, která umožňuje tisknout s vysokým rozlišením až 50 μm a tím redukovat velikost obvodu i počet vrstev bez pomoci fotoprocessu. Zde je šablona vyrobena z nerezové oceli.

Hlavní výhodou šablonového tisku oproti sítotisku je možnost větší tloušťky nanesené vrstvy a dále má folie lepší rozměrovou stabilitu, přesnost a tím odpadají některé problémy s vytvářením obrazce. Jako nevýhoda se dá považovat pružnost folie, která je nižší. Další nevýhoda je, že se do folie špatně vyřezávají složitější obrazce, pak tedy lze tisknout jen jednoduché a uzavřené tvary.

2.1.3 Dispensing

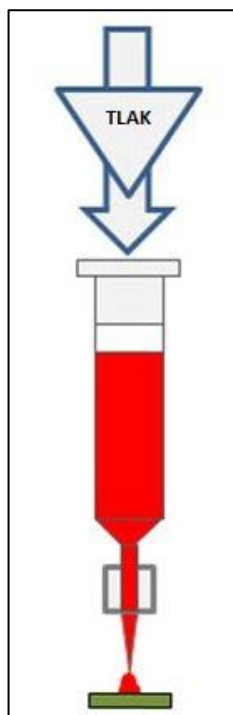
Dispensing je asi nejjednodušší metoda ze všech tří zde uváděných. Jedná se pouze o nanesení pasty dotykem nebo vytlačení pasty ze zásobníku. K tomu slouží buď duté nebo plné jehly. [3]

Nanášení pasty pomocí plných jehel je jednodušší metodou. Jehly různých tvarů, které jsou na držáku se ponoří do pasty a následně se přesunou na určené místo pro nanesení, kde se dotknou substrátu. Tvar následně ovrstvené plochy závisí na sikožitě pasty, tvaru jehly a hloubce ponoření při nabírání pasty. Takto se dá nanášet buď jednou, nebo více jehlami najednou, aby se urychlila celková výroba DPS, protože nános pasty probíhá na více místech ve stejnou chvíli. Více jehlami se dají pokrýt všechny potřebné body pro nanesení pasty na celou plochu DPS. [3] Obrázek 8 znázorňuje metodu plné jehly.



Obrázek 8 – Dispensing pomocí plné jehly (převzato z [3])

Druhá metoda nanášení pasty pomocí dispensingu je využití duté jehly. Tato metoda je obvyklejší a hlavně přesnější, protože je možné předem stanovit množství vytlačené pasty dutou jehlou. Mezi hlavní parametry se řadí viskozita pasty, přesnost nanášení a výška jehly nad substrátem, což je hlavním rozdílem oproti metodě nanášení pomocí plné jehly. Využívá se zde zásobníku tzv „kartuše“, ve tvaru injekční stříkačky a pro vytlačení pasty se využívají dva způsoby, tlakem vzduchu pístové pumpy nebo tlakem pístu šroubové pumpy. Obrázek 9 znázorňuje metodu duté jehly.



Obrázek 9 – Dispensing pomocí duté jehly (převzato z [14])

S neustálým vylepšováním a vývojem technologií, je i u metody dispensingu snaha urychlit nanášení materiálu a k tomu slouží tzv. bezkontaktní dispensing. Ten se využívá zvláště pro aplikaci lepidel pro povrchovou montáž. Výhod této metody je spousta, například eliminace jehel, konstantní výška nad substrátem, pasta v zásobníku se může předeheřívát a tím se může určovat viskozita pasty. Hlavní výhodou je zrychlení procesu o 5 %, zlepšení opakovatelnosti, jednodušší údržba a tím i snížení nákladů.

2.2 Sintrovací pasty

Sintrovací pasty se dají rozdělit do dvou hlavních skupin. Pasty, které se využívají pro vytvoření vodivých motivů a pasty pro vytvoření spoje mezi substrátem a součástkou (těmi se zabývá tato práce). Mezi těmito pastami je jeden hlavní rozdíl, a to podíl Ag částic v pastě. U sintrovacích past využívaných pro vytváření vodivých cest je podíl Ag částic nad 50 % a ve většině případů kolem 80 %. Naproti tomu u sintrovacích past pro vytvoření spoje je požadavek na obsah Ag částic po sintrování ideálně 100 %. [15] Proto do těchto past je kromě Ag prášku přidáváno pouze rozpouštědlo, aby pasta měla tekutý charakter a bylo možné ji nanášet na substrát. V některých případech je v těchto pastách obsaženo organické pojivo, které je navázáno na částičky Ag a zabraňuje jejich koalescenci ještě před sintrováním. Dále napomáhá k lepšímu uskladnění pasty, která díky tomu nemusí být skladována při nízkých teplotách (například $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) a může být skladována mnohem déle. Toto pojivo je v průběhu procesu odstraněno teplotou sintrování, poté může dojít ke koalescenci Ag částic a nemá již další vliv nebo úlohu v pastě. Výše zmíněné rozpouštědlo je z pasty také ve většině případech odstraněno, a to pouhým zasoušením pasty na vzduchu, kdy dochází k jednoduchému odpaření tohoto aditiva z pasty. Rozdíl těchto past je popsán níže v této kapitole.

Sintrovací pasty pro vytvoření vodivých motivů

Jak již bylo zmíněno, na složení pasty závisí její vlastnosti při sintrování a celkové přípravy procesu. Sintrovací pasta se skládá ze tří základních složek. [16]

- Funkční složka.
- Pojivová složka.
- Organická složka (rozpouštědlo).[16]

Funkční složka určuje charakter pasty, tzn. jestli bude vodivá, dielektrická nebo odporová. U vodivých past se využívají částice drahých kovů jako jsou Ag, Au, Pt, Pd a jiné. Dielektrické pasty využívají materiály typu Al_2O_3 , BaTiO_3 , sklo olovnatoboritokřemičité atd.

Poslední zmíněná odporová složka využívá materiálů, které mohou tvořit směsi drahých kovů (PdAg) nebo oxidy (RuO_2). Obsažení této složky v pastě je v rozmezí 76 % až 84 %.

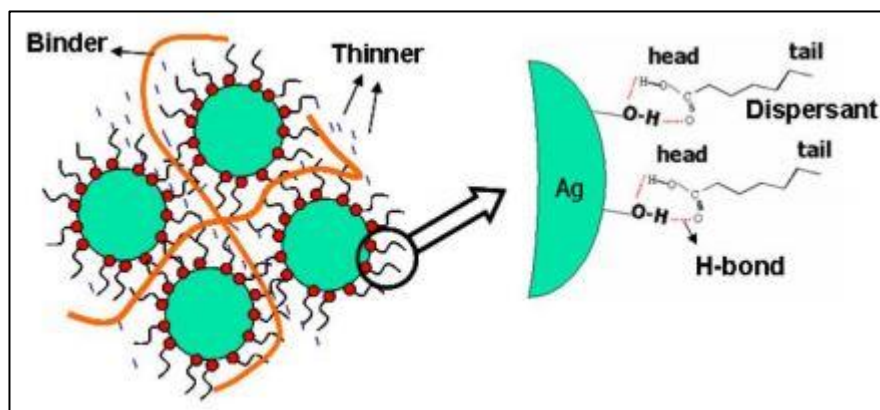
Pojivová složka ve formě skleněného prášku je používána jako adhezivní pojivo, které podporuje tvorbu lepší vazby pasty se substrátem. Skládá se z malých částic skla jako je olovnatoboritokřemičité, bismutitokřemičité nebo hlinitokřemičité sklo. Podíl této složky v pastě je v rozmezí 1 % až 9 %.

Organická složka neboli organický nosič, který rozptýlí kovové (funkční) a skleněné (pojivové) částičky tak, aby bylo dosaženo dobrých tiskových vlastností. Tato složka se dělí ještě na dvě menší části, polymerní a rozpustidlovou. Polymerní část zastupují materiály jako polyvinylalkohol. Rozpustidlovou část tvoří například xenylén nebo terpentýn. Podíl této složky je v pastě stabilní na 15 %.

Všechny uvedené složky se v sintrovací pastě nachází v určitém poměru a tím mění její vlastnosti a výkonost. Tyto vlastnosti se projevují pokaždé jinak při různých teplotách. Nejlepší vlastnosti pasta vykazuje při poměru 80:5:15 (Funkční složka, Pojivová složka, Organická složka). Na trhu je velké zastoupení past s různými vlastnostmi a podmínkami sintrování. Z důvodu možností laboratorních podmínek byly do této práce zvoleny čtyři sintrovací pasty pro beztlaké sintrování. Jedná se o pasty od firem NBE Tech, Henkel, Heraeus a Kyocera.

Sintrovací pasty pro vytvoření vodivých spojů

Pasta před sintrováním je pro tyto účely tvořena z 75 až 91 % Ag částicemi a zbylá procenta jsou rozdělena do dvou aditiv. Thinner, v roli rozpouštědla a případně dispersant v roli materiálu, který zabraňuje styku Ag částic, než dojde k sintrování. Tento materiál zároveň usnadňuje skladování takovýchto past. Po sintrování je důležité, aby byla všechny aditiva z pasty odstraněna a spoj byl tak tvořen pouze stříbrem. Což se ne vždy podaří a spoj je tvořen například z 99 % ze stříbra a zbylé jedno procento je pozůstatek ředidla nebo dispersantu. Znázornění takovéto pasty je na obrázku 10.



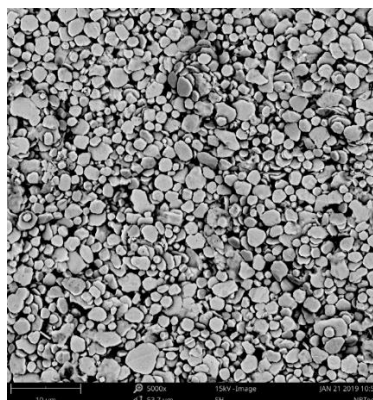
Obrázek 10 – Chemické uspořádání sintrovací pasty pro vytvoření spoje

2.2.1 NBE Tech

Firma NBE Tech byla založena v roce 2005. Společnost má velkoobjemové výrobní zařízení ve výzkumném středisku Virginia Tech Corporate Research Center v Blacksburgu ve Virginii. Dále vlastní výlučné právo používat produkt nanoTach® a vyrábí stejnojmenné sintrovací pasty z nanočástic stříbra. S postupem času a inovacemi se vyvíjela nová technologie jako například LTJT (*Low Temperature Joining Technique*), která nahrazuje metodu pájení nebo vytvrzování epoxidem. Tato metoda je založena na sintrování stříbra. Velká nevýhoda této metody je, že vyžaduje velkou sílu přitlaku, aby se snížila teplota. Je zapotřebí použít až 300 kg na 1 cm x 1 cm čipu. Použitím NBE nanoTach®, kterou lze sintrovat při nižší teplotě bez tlaku je proces LTJT velmi zjednodušen. Tato technologie byla oceněna v roce 2007 za jedna z nejnovativnějších myšlenek roku.[17]

- **NanoTach® (nanosilver paste): X Series**

Pasta ze stříbrných nanočástic v organické formulaci pojiva. Na obrázku 11 je znázorněna zmíněná pasta vysušená na vzduchu. Bližší parametry jsou popsány v tabulce 1.



Obrázek 11 – SEM snímek pasty NBE Tech

Základní vlastnosti:

- Možnost využití dispensingu, sítotisku i šablonového tisku
- Nízká teplota sintrování <260 °C
- Vynikající sintrovací vlastnosti
- V souladu se směrnicemi RoHS

Tabulka 1: Parametry sintrovací pasty od firmy NBE Tech

Fyzikální data před sintrováním		Fyzikální data po sintrováním	
Barva	Tmavě šedá	Porozita	< 30 %
Obsah pevných látek	71 - 91 %	Hustota	> 7,9 g/cm ³
Hustota	> 3,0 g/cm ³	Teplotní součinitel roztažnosti	19,6 um/m °C
Viskozita	150 000 - 600 000 cps	Bod tání	961 °C
Sintrovací teplota	< 260 °C	Elasticita	10 - 30 Gpa
Skladovatelnost	Přibližně 12 měsíců	Elektrický odpor	2,6*10 ⁻⁶ Ω/cm
		Tepelná vodivost	> 2 W/mK
		Síla lepeného spoje	> 25 MPa

Aplikace pasty je celkem široká. Může se využívat pro lepení malých a velkých čipů (přes 10 mm x 10 mm) pro výkonová zařízení, vysoce výkonné a vysoce jasné LED lampy, výkonové diodové lasery a vysokofrekvenční napájecí zařízení.

2.2.2 Henkel

Loctite Ablestik SSP 2020 je od firmy Henkel, která byla založena roku 1876 v Düsseldorfu v Německu panem Fritzem Henkelem. Firma se rozděluje do tří hlavních odvětví, jimiž jsou: Adhesives Technologies (Lepidla a technologie), Beauty Care (Kosmetika), a Laundry and Home Care (Prací a čistící prostředky). Adhesives Technologies se rozděluje do pěti podskupin mezi které se řadí právě Loctite. Loctite jako takový byl založený roku 1963 a zabývá se hlavně lepidly, ale i sintrovacími pastami jako je zmíněný Ablestik SSP 2020. [18][19]

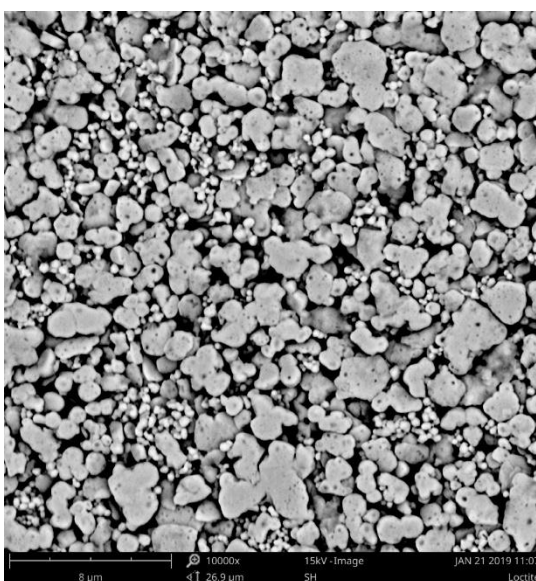
- **Ablestik SSP 2020**

Sintrovací pasta na bázi stříbra, která je určena pro aplikace, kde je kladen důraz na vyšší tepelnou i elektrickou vodivost. Zároveň udržuje vysokou adhezi i při vyšších provozních teplotách až 260 °C. U této pasty se může využívat jak sintrování pod tlakem, tak i beztlakého sintrování. Pasta se dá nanášet pomocí šablonového tisku nebo dispensingu a její zasušená

forma na vzduchu je znázorněna na obrázku 12. Bližší parametry jsou popsány v tabulce 2. [18][19]

Výhody:

- Ideální pro vysoce výkonná zařízení.
- Poskytuje robustní intermetalickou vazbu mezi povrchy.
- Mnohem vyšší tepelná a elektrická vodivost než u jiných.
- Silná přilnavost - pevnost ve smyku.
- 10x lepší tepelný a výkonový cyklus než pájení.



Obrázek 12 – SEM snímek Loctite

Tabulka 2: Parametry sintrovací pasty od firmy Henkel

Loctite Ablestik SSP 2020	
Barva	Stříbrná
Proces nanášení	Dispensing, šablonový tisk
Sintrování na vzduchu/N2	Ano
Sintrovací teplota	> 250 °C
Elasticita	5,5 - 12,4 Gpa
Tepelná vodivost	> 100 W/mK
Elektrický odpor	$4,8 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$
Optimální teplota skladování	< -40 °C
Porozita	< 15 %

2.2.3 Heraeus

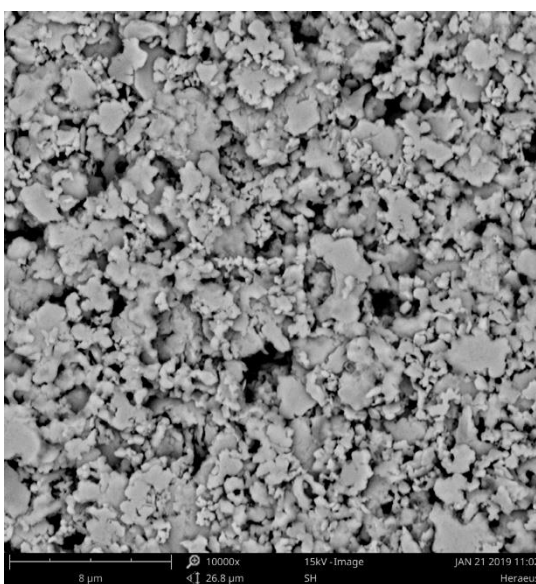
Heraeus je společnost zabývající se oblastí životního prostředí, energetiky, elektroniky, zdravotnictví, mobility a průmyslových aplikací. V roce 1851 Wilhelm Carl Heraeus jakožto lékárník a chemik, převzal lékárnu svého otce v německém Hanau a je považován za zakladatele dnešní firmy Heraeus. Tato společnost nabízí ve svém portfoliu pastu mAgic Sinter Paste, která slouží pro výkonovou elektroniku. [20]

- **mAgic Sinter Paste**

Tato pasta nabízí jako Loctite Ablestik vyšší provozní teplotu, pasta je vyrobena ze stříbrných částic, což nabízí bezolovnatou alternativu k pájecím pastám. To vede k delší životnosti až o desetinásobek. Pasta je vhodná pro energetické aplikace na DCB (sintrování pod tlakem) a také pro pouzdření čipů (beztlaké sintrování). Pro sintrování pod tlakem je vhodná například pasta mAgic ASP 043 a naopak pro beztlaké sintrování je vhodná mAgic ASP 295. [20] Struktura zasušené pasty na vzduchu je vidět na obrázku 13 a přehledné informace v tabulce 3.

Výhody:

- 10x vyšší životnost ve srovnání s pájecí pastou (u pasty mAgic ASP 043).
- Provozní teploty od -55 do 250 °C.
- Zvýšení hustoty výkonu (snížení nákladů) na úroveň celkových nákladů srovnatelnou s procesem pájení.
- Tepelná vodivost 150 W/mK a vyšší.



Obrázek 13 – SEM snímek Heraeus

Tabulka 3: Parametry sintrovací pasty od firmy Heraeus

mAgic Sinter Paste ASP Series	
Barva	Stříbrná
Proces nanášení	Dispensing
Sintrování na vzduchu/N ₂	Ano
Sintrovací teplota	230 -280 °C
Koeficient tep. roztažnosti	≤ 19 ppm/K
Tepelná vodivost	> 200 W/mK
Elektrický odpor	8*10 ⁻⁶ Ω*cm
Optimální teplota skladování	2-10 °C
Kompatibilní povrch. úpravy	Ag, Au

2.2.4 Kyocera

Název společnosti je Kyocera spojením názvu města, ve kterém sídlí (Kyoto v Japonsku) a názvu materiálu, se kterým pracuje (keramika – ceramic). Firma byla založena v roce 1959. Společnost se angažuje v oblasti automobilu, polovodičových komponentů, elektronických zařízení, výzkumu atd. Právě u polovodičových komponentů se řeší problematika připojení čipu k substrátu pomocí sintrovací pasty. Jako sintrovací pastu firma nabízí typ CT2700.

- **CT2700**

Sintrovací pasta CT2700 se skládá z mikro a nanočástic stříbra. Nanočástice stříbra zajišťují lepší spojení, resp. lepší sesintrování mikro částic stříbra. Pasta disponuje vysokou tepelnou vodivostí, konkrétně 200 W/mK a provozní teplotou 200 °C. Nabízí se zde možnost beztlakého sintrování, dále se pasta vyznačuje dlouhou životností.

Tabulka 4: Parametry sintrovací pasty od firmy Kyocera

CT2700R7S	
Barva	Stříbrná
Viskozita	100 Pa*s
Elasticita	21,6 GPa
Tepelná vodivost	> 200 °C
Elektrický odpor	4*10 ⁻⁵ Ω*cm
Sintrování na vzduchu/N ₂	Ano

2.3 Porovnání vlastností kontaktování

V předkládané práci je uvedeno několik způsobů kontaktování. To se však nechá rozdělit do hlavních tří skupin. Pájení, lepení a sintrování. Každá z těchto metod kontaktování má svoje kladné a záporné vlastnosti a v této kapitole budou popsány hlavní rozdíly, výhody a nevýhody dané metody.

- **Pájení x Sintrování**

Pájený a sintrovaný spoj musí splnit tři základní podmínky, kterými je určitá mechanická pevnost, elektrická vodivost a ekologický dopad na životní prostředí. Jelikož dříve používané pájky obsahovaly olovo, které je přítěží pro životní prostředí, tak se firmy zabývaly vývojem bezolovnatých nebo sintrovacích past, které neobsahují olovo. V tabulce 5 jsou znázorněny pro porovnání dříve používané olovnaté pájky, novější bezolovnaté pájky a sintrovací pasty. Z této tabulky je zřejmé, že sintrovací pasta dosahuje lepších výsledků skoro ve všech směrech. Má lepší elektrickou a tepelnou vodivost, vyšší teplotu tání, díky které může být využívána ve výkonové elektronice, kde je provozní teplota mnohem vyšší. Mechanická pevnost v tahu je obdobná. [21] [22]

Tabulka 5: Porovnání pájeného a sintrovaného spoje

	Pájený spoj		Sintrovaný spoj
	SAC305	Sn63Pb37	NanoTach (NBE)
Elektrický odpor [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	13	14,5	2,6
Tepelná vodivost [W/mK]	58,7	50,9	200
Mechanická pevnost [Mpa]	29,7	30,6	> 30
Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]	217-221	183	961
Hustota [g/cm^3]	7,39	8,42	7,9

- **Vodivé Lepení x Sintrování**

U vodivého lepení stejně jako u sintrování se nevyužívá olovo, tudíž je ekologicky příznivé, nicméně je zde několik rozdílných parametrů. Tyto parametry se dají považovat za nevýhody lepení, jimiž je horší mechanická pevnost, horší vodivost a rezistivita lepeného spoje je závislá na čase, čímž je myšleno, že s časem se zvyšuje rezistivita spoje. Tím je myšlen kontaktní odpor, ve kterém je zahrnut elektrický odpor vodivého lepidla, tak i odpor vodivého spojení mezi lepidlem a lepeným povrchem. Jelikož se používají polymery jako pojiva v lepidle, které propouští plyny a vzdušnou vlhkost, dochází tak s časem k oxidaci částic a povrchu lepeného spoje. Tím se zvětšuje kontaktní odpor. [23][7] Z tabulky 6 jsou dle čísel znatelné rozdíly mezi vodivým lepením a sintrováním. Elektrický odpor je u vodivého lepení extrémně vysoký, tepelná vodivost je naopak velmi malá. Procesní teplota je v případě lepení

nízká, a proto se tato technologie používá při montáži součástek citlivých na zvýšenou teplotu. Například lepení na keramiku, polyester, optoelektronika aj. [7]

Tabulka 6: Porovnání lepeného a sintrovaného spoje

	Lepený spoj	Sintrovaný spoj
	Lepidlo (Ag plnivo)	NanoTach (NBE)
Elektrický odpor [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	100 až 500	2,6
Tepelná vodivost [W/mK]	1 až 12	200
Mechanická pevnost [Mpa]	9 až 18	> 30
Destruktivní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	až 150	961
Hustota [g/cm^3]	2 až 3	7,9

3 Testovací motivy a výběr hodnocení sintrovaných spojů

Třetí část diplomové práce je zaměřena na navržení motivu vzorků a testování kvality vyrobených vzorků. Existuje mnoho testovacích motivů umožňujících hodnocení kvality sintrovaných spojů. Pro toto hodnocení se využívají různé metody nebo postupy jako je například rentgen, výbrus, měření adheze aj. Tyto metody budou rozepsány v kapitolách níže. Jako poslední podkapitola z třetí části bude samotný návrh testovaných vzorků.

3.1 Testovací motivy

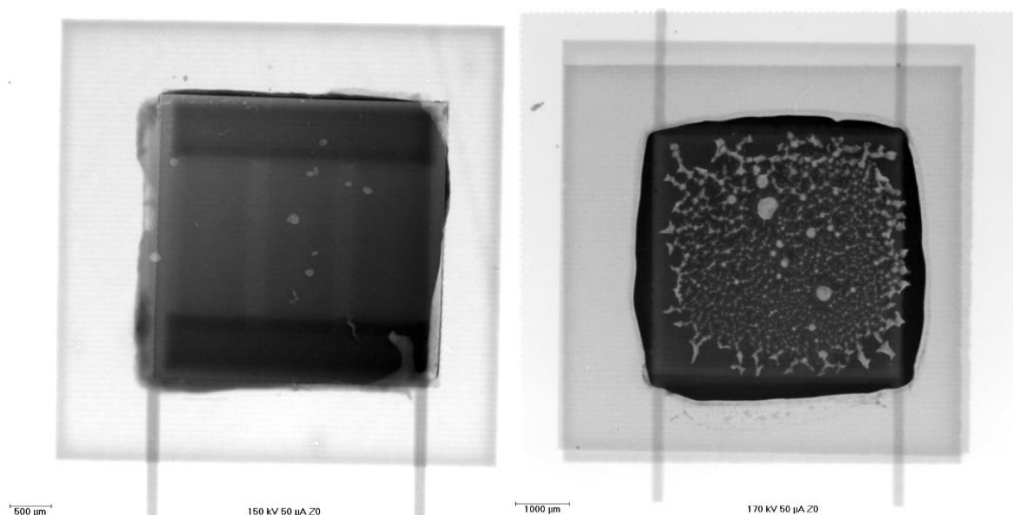
Existuje mnoho testovacích motivů a vzorků, které se používají pro testování sintrovaného spoje. Velikost a tvar vytvořeného motivu může být například kruhový nebo čtvercový a může dosahovat různých velikostí, například 3x3 mm, 5x5 mm nebo 10x10 mm aj. Vlastnosti spoje záleží také na počtu nanesených vrstev sintrovací pasty a následném výpalu. [24] Takto vytvořená tloušťka může dosahovat až 300 μm , přitom jedna nanesená vrstva má tloušťku zhruba 50 μm až 100 μm . [25][26]

3.2 Hodnocení kvality spoje

Hodnocení kvality sintrovaného spoje lze provádět několika způsoby a tím určit nejvhodnější zaměření pasty v průmyslu, a především určit parametry dané pasty. Každé hodnocení je specifické, a ne vždy se dá použít ve všech případech. Například pro měření čtyřbodovou metodou musí mít vzorek připravené vývody.

3.2.1 Rentgen

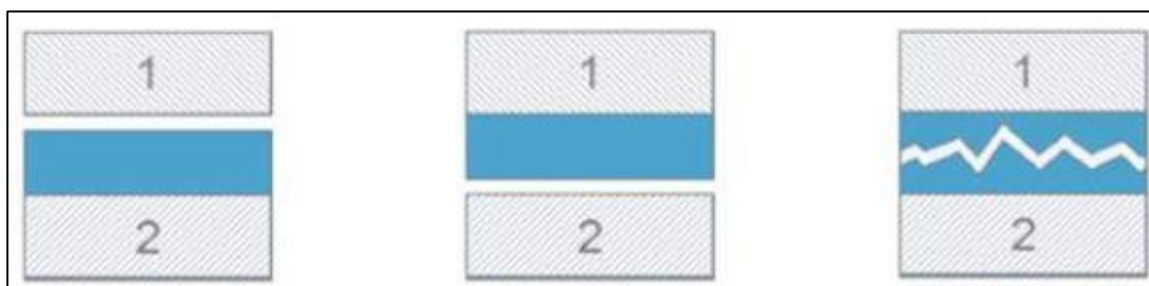
Rentgen je jedna ze základních metod pro hodnocení kvality sintrovaného spoje. Zde je důležité sledovat, aby ve spoji nevznikali tzv. „voidy“ (vzduchové bublinky) nebo odplyňovací kanálky z důvodu odpařování rozpouštědla z pasty. Zároveň se na rentgenu nechá pozorovat tloušťka vrstvy, tak aby byla po celé ploše stejná. To se pozná větším nebo naopak menším ztmavením na ploše kontaktu. Na obrázku 14 je vidět porovnání poměrně kvalitního sintrovaného spoje a špatného spoje s vytvořenými voidy a odplyňovacími kanálky. Voidy a kanálky jsou světlá místa. U kvalitního spoje je vidět, že je na pravé straně více tmavý než na levé, to značí větší tloušťku nanesené pasty. To může být způsobeno nerovnoměrným umístěním součástky do pasty.



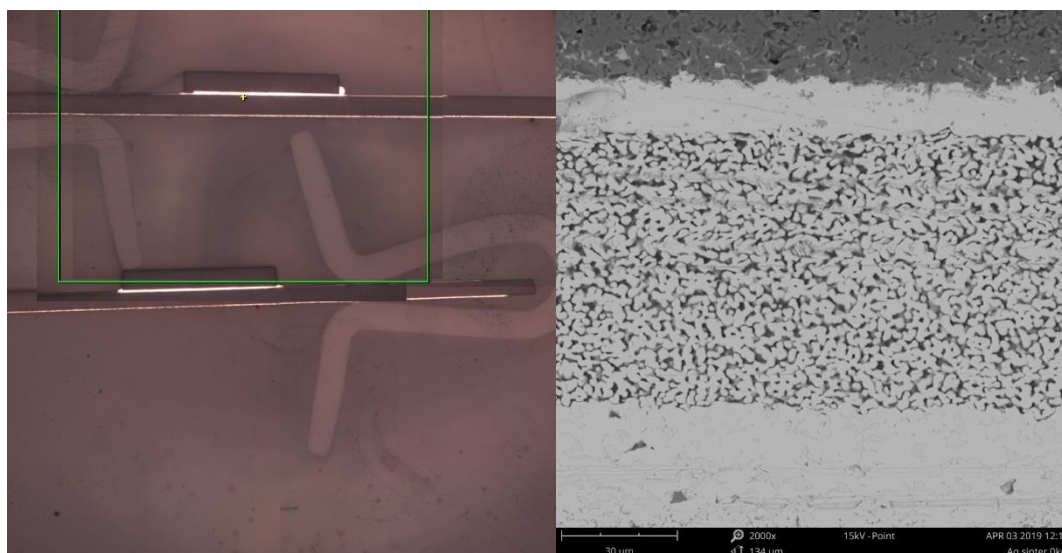
Obrázek 14 – Porovnání poměrně kvalitního spoje (vlevo) se špatně sintrovaným spojem (vpravo).

3.2.2 Výbrusy

Používání výbrusů je důležité z hlediska zjištění morfologie částic pasty. Provádí se hlavně pokud je čip zasintrován pod různými hodnotami tlaku a je potřeba sledovat vlastnosti pasty v porovnání s beztlakým sintrováním. Dále se může provést z hlediska zkoumání voidů, u kterých se zjišťuje, kde vzduchová bublinka vznikla. Protože z rentgenu není poznat, jestli je trhlinka na substrátu, přímo pod čipem a nebo přímo v pastě (viz obrázek 15). Nerovnoměrné rozprostření pasty na substrát způsobuje, že voidy se tvoří nejčastěji přímo pod přiloženým čipem. Na obrázku 16 je znázorněn řez sintrovaným spojem. Vlevo je základní pohled po řezu a vpravo je znázorněn řez v měřítku 30 µm, na kterém je viditelná struktura sintrovací pasty. V tomto případě se jednalo o pastu NanoTach od firmy NBE Tech a bylo zde využito beztlakého sintrování.



Obrázek 15 – Tři možné vznikly trhlin v sintrovací vrstvě (převzato z [27])



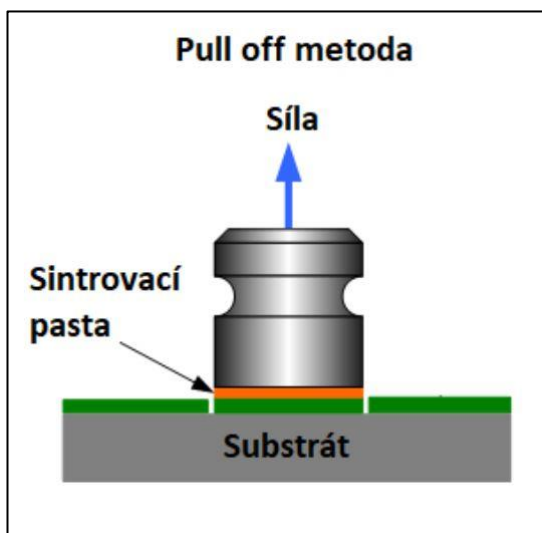
Obrázek 16 – Základní pohled řezem (vlevo), řez s měřítkem 30 µm (vpravo)

3.2.3 Měření adheze

Měření adheze jako takové je pro výsledný výrobek velmi důležitý parametr, který určuje spolehlivost, životnost a funkčnost výrobku. [28] Adheze představuje schopnost dvou různých materiálů k sobě přilnout a měří se tím tedy pevnost tohoto spojení. Tento druh měření se nechá rozdělit do více skupin měření, jako je metoda „Pull off“, „shear“ test a měření adheze ohybem přes kovový válec.

- **Pull off test**

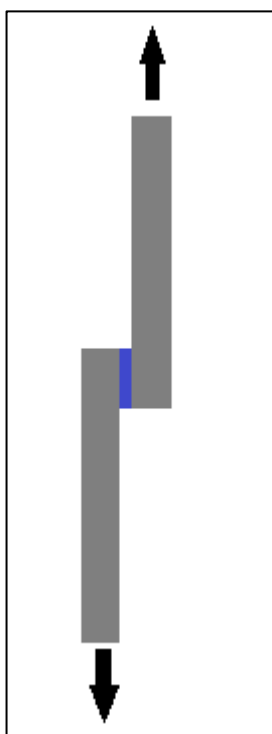
U této metody se využívá horní i spodní strany vzorku. Na obou stranách jsou kontaktní plošky, například na horní straně může být motiv kruhového rozměru o velikosti 3 mm a na spodní straně čtvercový motiv s rozměrem 5x5 mm. Na spodní vrstvu se připájí mosazné šrouby, pomocí kterých je pak vzorek uchycen do čelistí trhacího zařízení. [28] Následně se trhací zařízení nastaví na určitou rychlost posunu a spustí se, poté se při odtržení zařízení zastaví. Na obrázku 17 je znázorněn obecný pull off test.



Obrázek 17 – Obecná metoda Pull off testu

- **Shear test**

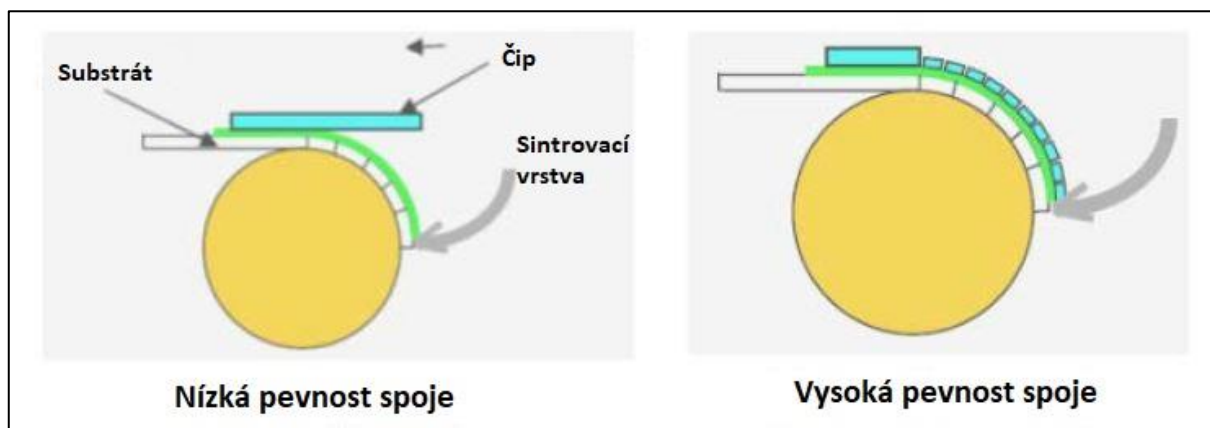
Shear test je metoda podobná metodě Pull off, avšak nedochází zde ke kolmému odtržení, ale testuje se zde pevnost ve smyku, kde je objekt ve směru rovnoběžném s čelem materiálu. U této metody dochází k posouvání vnitřní struktury spojovacího materiálu (lepidla, pájky, sintrovací pasty) proti sobě. V tomto testu je důležité dobře nastavit čelisti pro uchycení materiálu tak, aby byl stále v jedné ose. Metoda shear testu je znázorněna na obrázku 18.



Obrázek 18 – Obecná metoda Shear testu

- **Ohyb**

Zkouška ohybem se využívá k vyhodnocení adheze a spolehlivosti materiálu. Jedná se o kvalitativní test, který je jednoduchý, rychlý a levný, a proto je využíván pro stanovení pevnosti spoje sintrovaných spojů. [27] Na obrázku 19 je schématické znázornění zkoušky ohybu, z kterého je patrné, že čipy s nižší pevností spoje se od substrátu odtrhly, naopak čipy s vyšší pevností spoje mají tendenci se zlomit.



Obrázek 19 – Obecná metoda Bend testu (převzato z [27])

3.2.4 Klimatické testy

Vystavení klimatickým testům může mít po nějakém čase zásadní vliv na kvalitu sintrovaného spoje. Proto se provádí různé klimatické zkoušky a stanovují se teplotní vlivy na tento spoj. Existují dva druhy testování. První možnost je vzorek ponechat určitý čas na určité teplotě, přičemž podmínky testování jsou stanoveny normami v peci a druhá varianta testování je založena na opakovaných změnách parametrů prostředí (teploty, vlhkosti) v testovací komoře. Příkladem je např. šoková komora.

- **Suché/vlhké konstantní teplo**

Tato metoda, jak je již zmíněno výše spočívá ve vystavení testovaného vzorku stálé teplotě po určitý čas. Délka testování vzorku v peci a nastavená teplota pece se určují podle předem daných norem. Jedná se konkrétně o normu ČSN EN 60068-2-2 Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo. V této normě jsou rozepsané hodnoty teploty i času pro testování.

- **Šoková změna teploty**

Šoková změna teploty je metoda, kdy je zkoušený vzorek nebo výrobek vystaven rozpětí extrémních vysokých a nízkých teplot. Zde se vzorky testují po cyklech. Vzorky testované touto metodou mívají poté zhoršené vlastnosti, především týkající se mechanické pevnosti.

3.2.5 Proudové zatížení

Hlavním rozdílem mezi výkonovými součástkami a klasickými součástkami je mnohem větší proudové zatížení. S tím je spojené i větší proudové zatížení spoje mezi součástkou a substrátem. To znamená, že proud procházející spojem způsobuje větší generované tepelné ztráty a tím se zahřívá celá součástka. S ohledem na její funkčnost a stabilitu je tento problém nutné řešit. Z toho důvodu je výhodnější používat sintrovací materiál jako spojovací vrstvu, která má mnohem větší proudové zatížení než standartní pájka.

3.2.6 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je úzce spojena s proudovým zatížením. Součástkami prochází větší proudy a tím se více zahřívají a pasta musí plnit funkci výborného odvodu tepla. Čehož sintrované pasty dosahují poměrně dobře. Oproti pájeným spojům minimálně dvojnásobně. Měření tepelné vodivosti může probíhat více způsoby na základě materiálu a jeho tepelných vlastnostech a teplotě média. Obecně se využívají dvě měřicí metody, metoda ustáleného a nestabilního stavu. [29]

Měření při ustáleném stavu provádí testování až tehdy, když je měřený materiál v úplné rovnováze. Měření pomocí této metody je velmi snadné, avšak bere se zde ohled na dosažení požadované teploty, které trvá delší dobu, a to je považováno za nevýhodu. Oproti tomu měření při nestabilním stavu se provádí již při zahřívání a díky tomu je měření poměrně rychlé. Tepelnou vodivost lze změřit pomocí čtyř hlavních typů přístrojů. Pomocí varné desky, horkého drátu, upraveného horkého drátu a difuzivity laserového záblesku (Laser Flash Diffusivity). [29]

Varná deska: Vzorek se umístí mezi dvě destičky, spodní destička se zahřeje a druhá se ochladí nebo zahřeje na menší rozsah. Dále se sleduje teplota destiček, dokud není ustálená. K výpočtu tepelné vodivosti se využívá teplota v ustáleném stavu, tloušťka vzorku a přívod tepla do zahříváné destičky. Schéma této metody je znázorněno na obrázku 20. [29]



Obrázek 20 – Měření pomocí varné desky (převzato z [29])

Horký drát: Do materiálu se vloží zahřátý drát, kterým proudí teplo radiálně do vzorku. Toto měření není vhodné pro měření tepelné vodivosti pevných látek, a proto se využívá modifikovaného horkého drátu, kterým je možné měřit tepelnou vodivost pevných látek. [29]

Laserová difuzivita: Tento princip je založen na laserovém záblesku, který poskytuje krátký puls tepla na přední stranu vzorku a infračervená kamera zaznamenává změny teploty. [29]

Jelikož metoda horkého drátu nepotřebuje kalibraci a nevyžívají se zde ani empirické konstanty, je tato metoda nejvhodnější i díky její malé nepřesnosti při měření pevných látek, která se pohybuje okolo 2 %.

4 Testování a zhodnocení

Poslední kapitola předkládané diplomové práce se bude zabývat samotným navržením vzorků, vybranými testovacími metodami a celkovým zhodnocením výsledků experimentální části diplomové práce. Navržení vzorků je závislé na několika faktorech. Záleží, jaká metoda bude použita pro testování vzorků, dále záleží na velikosti čipu, který bude osazován a v neposlední řadě záleží na šířce vodivých cest, z důvodu velikosti protékaného proudu.

4.1 Příprava na testování

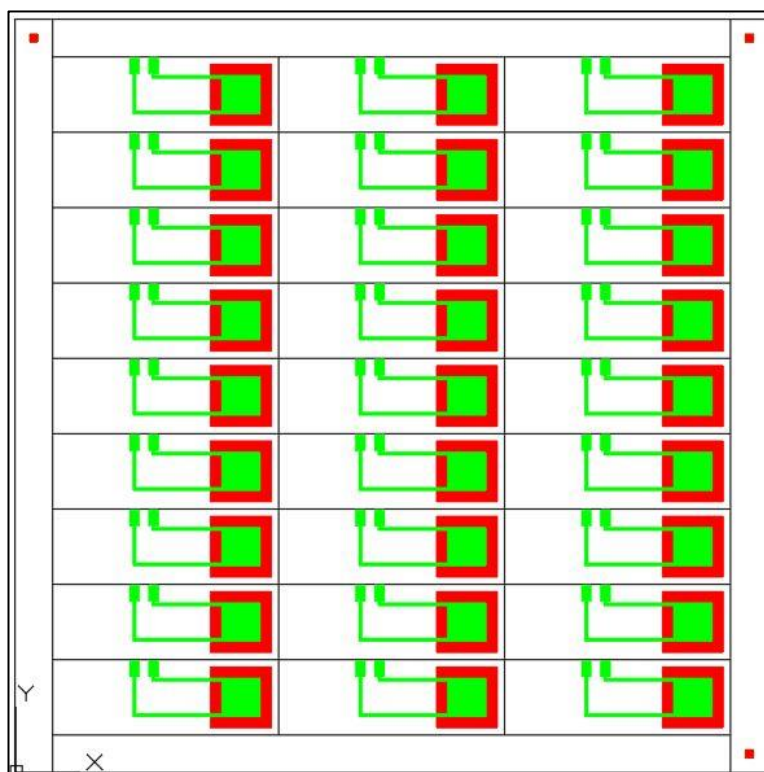
Pro začátek experimentování je zapotřebí udělat pár přípravných opatření, mezi které patří návrh vzorků, výběr sintrovací pasty a výběr metody nanášení pasty.

4.1.1 Návrh vzorků

Návrh vzorků probíhal v programu AutoCad pro jednoduchou úpravu a pozdější zadání vzorků k výrobě. Motiv těchto vzorků je navržen podle motivů využívaných v literaturách zabývajících se testováním sintrovacích past. Pouze je upraven pro rozměry potřebné k testování (velikost čipů) a výběr metod hodnocení kvality spoje použitých v této práci. Vzorky jsou navrženy ve dvou variantách, a to s Ag motivem a Cu motivem. Dohromady je vyrobeno 243 vzorků s Ag a 243 vzorků s Cu vrstvou. Vzorky s Cu motivem byly využívány ze začátku jako testovací vzorky pro vyzkoušení nanášení pasty, různých postupů zasoušení a sintrování.

- **Rozměry**

Vzorky jsou navrženy tak, aby na ně bylo možné osadit čipy o velikosti 5x5 mm. To znamená, že vrchní strana vzorků (zelená barva) má motiv čtverce o velikosti 5x5 mm a vodivé cesty se zakončením ve formě plošek pro měření čtyřbodové metody. Spodní strana (červená barva) obsahuje také motiv ve formě čtverce, ale o rozměrech 8x8 mm, pro případné připájení mosazných trnů, které by byly využity při testování spoje Pull off metodou. Zde by byly šrouby umístěny do kleští trhačímho přístroje a následoval by test. Celkový rozměr vzorku je 30x10 mm s tloušťkou vzorku 0,635 mm a tloušťkou Ag vrstvy zhruba 15 μm . Na jednom keramickém substrátu o rozměrech 100 mm x 100 mm je umístěno 27 motivů, viz obrázek 21.



Obrázek 21 – Návrh kompletní destičky vzorků

4.1.2 Výběr sintrovací pasty

Pro experimentální část bylo nutné vybrat vhodnou sintrovací pastu, a proto bylo zapotřebí vyselektovat sintrovací pasty vhodné pro beztlaké sintrování. Z vyčtené literatury jsem vyčlenil výše zmíněné společnosti a konkrétní pasty od daných společností. Nejvhodnější parametry představovala pasta od NBE Techu. Následovala komunikace ohledně ceny, množství a způsobu dopravy. Zároveň probíhala komunikace i s dalšími firmami, ale neúspěšně. Od firmy NBE Tech tedy bylo objednáno minimální možné množství pasty (50 g). Dále byla k dispozici sintrovací pasta od firmy Henkel Loctite Ablestik SSP 2020. Z důvodu stáří této pasty byla po konzultaci vyřazena z testování. Takováto pasta může mít pozměněnou viskozitu a tím změnit výsledné parametry oproti nové pastě. V práci byla tedy použita pouze pasta NanoTach a byly zjišťovány nejlepší možnosti pro nanášení pasty, aby spoj byl co nejkvalitnější. Tato pasta má několik výhod, proč byla vhodná pro experimentální část. Možnost nanášení sítotiskem, šablonovým tiskem nebo dispenzínem, nízká sintrovací teplota, beztlaké sintrování a splnění norem RoHS jsou důvody proč bylo vhodné pastu testovat.

4.1.3 Výběr metody nanášení sintrovací pasty

Nanášení sintrovací pasty může probíhat třemi způsoby, viz kapitola výše. Pro tento experiment byla zvolena metoda šablonového tisku a částečného dispenzingu. Dispenzing se

využíval při nanášení sintrovací pasty na šablonku skrze kterou byla pasta následně rozetřena. Dále s dispencingem bylo realizováno několik vzorků. Šablonka jako taková měla tloušťku 80 μm a 27 otvorů o rozměrech 5 mm x 5 mm přesně na pozicích pro kontaktní plošky keramické desky. Využívá se tloušťka šablonky i 50 μm , ale zde byla zvolena 80 μm z důvodu lepší manipulace.

Keramické destičky byly vždy nanášeny po jedné, a to z důvodu jednoduššího přenášení výsledného vzorku. Bylo tedy nutné vždy všech 27 destiček vylámat z velké desky a následně se skrze jeden otvor v šablonce nanést sintrovací pasta. Zde bylo velmi důležité, aby šablonka a keramická destička byly v jedné rovině, jinak by došlo k nerovnoměrnému nanesení pasty. Proto byl zrealizován přípravek se stejnou výškou jako keramická destička, do kterého se destička zasadila. Překryl se šablonkou, poté byla na šablonku nanášena sintrovací pasta a skrze otvor rozetřena na keramickou destičku.

4.2 Testování

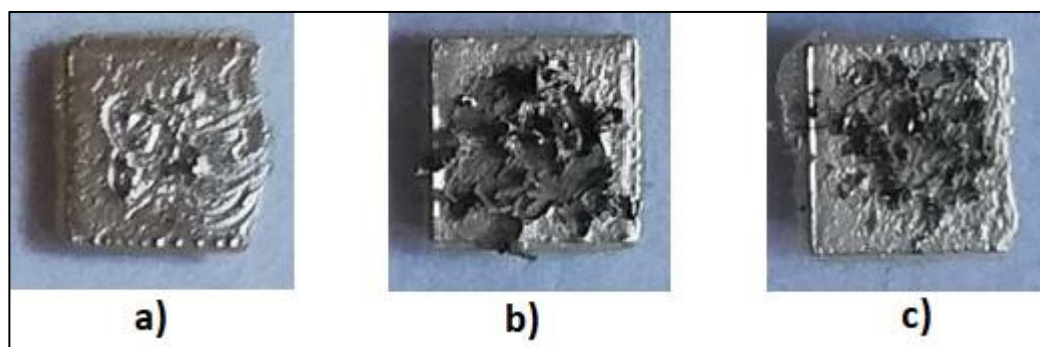
Smyslem testování bylo nalézt co možná nejlepší podmínky pro sintrování, optimalizování vypalovacího profilu a seznámení se sintrovacím procesem. Samotné testování jak vzorků, tak sintrovací pasty probíhalo nejprve na zkušebních vzorcích. Konkrétně na skleněných substrátech, aby byla lépe pozorovatelná tloušťka pasty a případné odplyňovací kanálky (viz obrázek 22).



Obrázek 22 – Zkušební vzorky s odplyňovacími kanálky. Obr. a) pasta před sintrováním, obr. b) pasta po sintrování.

Tento princip testování byl závislý na přitlačení dvou mikroskopových sklíček k sobě, s rozdílným přitlačením se lišila tloušťka pasty a zároveň následující tvorba odplyňovacích kanálek. Zde byla použita metoda nanášení pomocí dispenzingu, kterému odpovídá i vytvořený kruhovitý motiv.

Další postup bylo nanášení sintrovací pasty opět na skleněný substrát, ale již přes šablonku. Pro tento způsob nanášení bylo nutné realizovat přípravek pro vzorky, tak aby šablonka byla v jedné rovině a daný vzorek jí nevychyloval z rovinné osy. Testovalo se zde i následné zasušení pasty, ať už při laboratorní teplotě, nebo při zvýšené teplotě v peci. Sušení pasty probíhalo na třech vzorcích, první vzorek byl sušen na vzduchu a sušení trvalo 30 minut, druhý vzorek byl sušen v peci při teplotě 50 °C po dobu 5 minut a třetí vzorek byl sušen také v peci při teplotě 80 °C po dobu 3 minut. Pasta sušená na vzduchu měla tekutou konzistenci, téměř až původní, druhý vzorek pasty měl tužší konzistenci, ale pasta si stále zachovala spojitou konzistenci a poslední vzorek pasty měl po sušení práškovitou konzistenci. Konzistence past je znázorněna na obrázku 23.



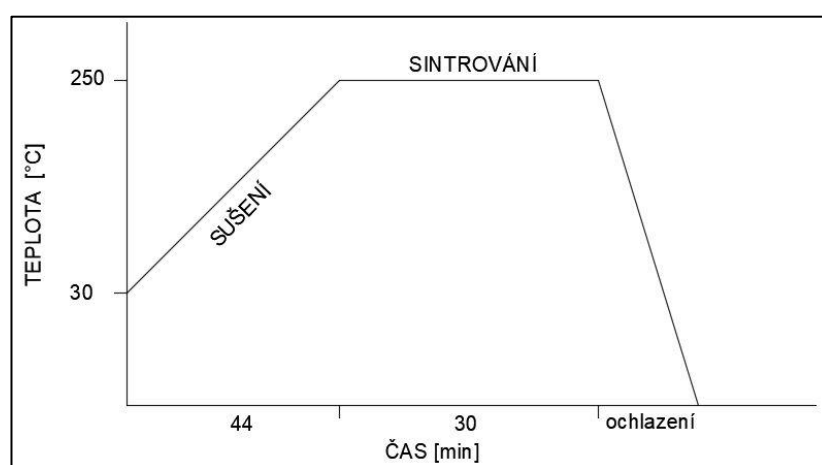
Obrázek 23 – Testování sušení pasty, a) 30 minut na vzduchu

b) pec 50 °C / 5 min c) pec 80 °C / 3 min

S tímto principem sušení byly testovány první zkušební vzorky se sintrováním. Do stejně připravených past, ale na keramickém substrátu s Ag metalizací byly vloženy čipy, které byly následně sintrovány. Poprvé se jednalo o beztlaké sintrování a podruhé sintrování s tlakem (konkrétně s 10 kg závažím, což odpovídá 4 Mpa). Rozdíl mezi zatíženým vzorkem a nezatíženým je znázorněn na obrázku 24. Vše bylo sintrováno podle teplotního profilu pasty NBE Tech (viz obrázek 25).

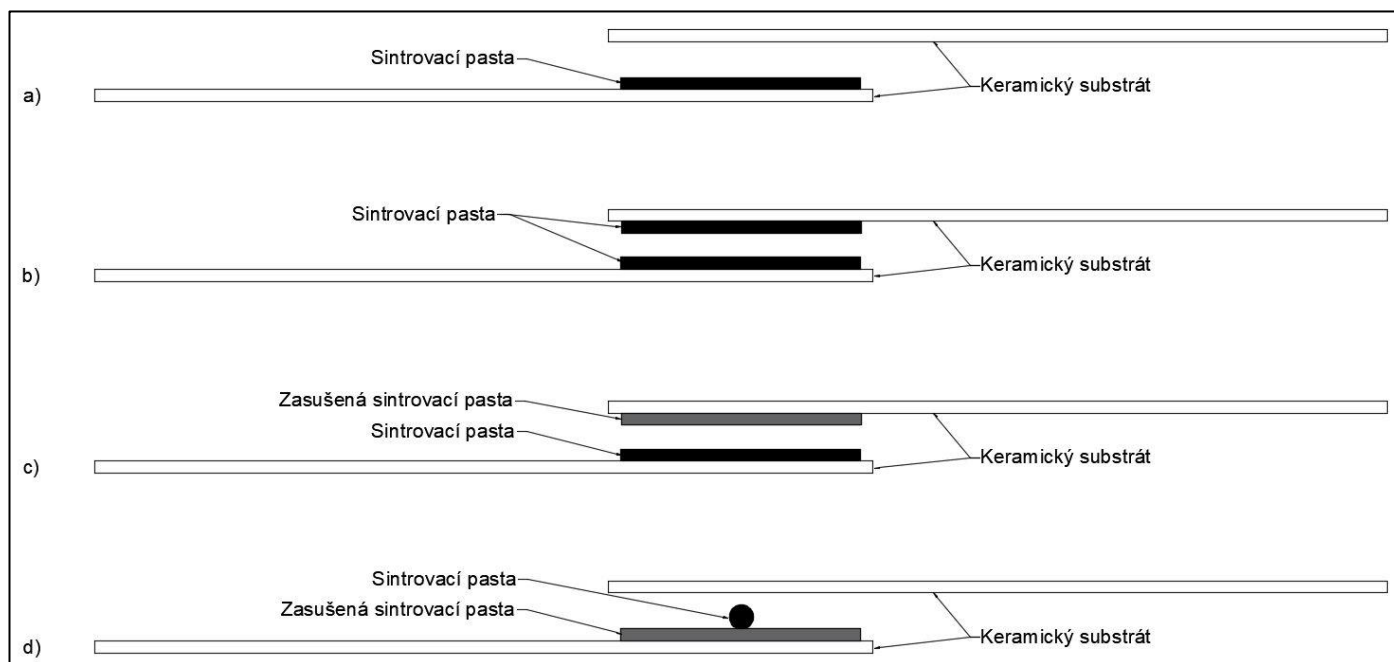


Obrázek 24 – Rozdíl po sintrování se závažím a bez závaží. Na obrázku a) byl vzorek zatížen 10 kg a na obrázku b) nebyl vzorek zatížen.



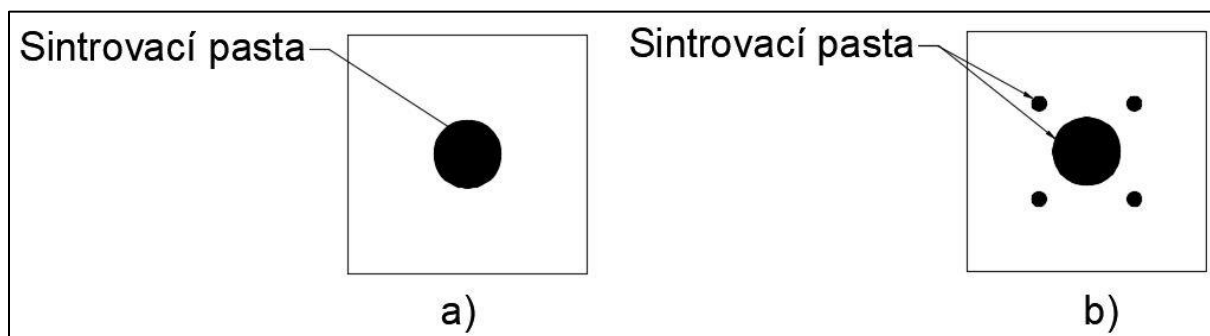
Obrázek 25 – Teplotní profil sintrovací pasty od NBE Tech

Následovalo testování na keramických substrátech, které byly navrženy pro tuto práci. Pro spojení dvou keramických destiček pomocí sintrovací pasty byly vybrány čtyři různé možnosti nanesení pasty. Pro testování byly vybrány celkem čtyři možnosti nanesení pasty. První možností (a) bylo nanést pastu pouze na jednu destičku a následně přiložit ihned druhou destičku. Druhá možnost (b) byla nanést sintrovací pastu na obě destičky a ihned k sobě přiložit. Třetí možnost (c) byla nanést sintrovací pastu taktéž na obě destičky, ovšem na jedné destičce nechat pastu zasušit a následně přiložit druhou destičku s „mokrou“ pastou. Poslední možností (d) bylo nanést pastu na jednu destičku, nechat zasušit a poté na tu samou vrstvu nanést sintrovací pastu pomocí disperzeru. Sušení pasty a následné nanesení „nové“ pasty mělo splnit podmínku, že spoj po zasušení lépe přilne k druhému povrchu a zároveň se zarovná povrch nanesené pasty, tak aby nevznikaly možné voidy (vzduchové bublinky) na povrchu pasty, respektive těsně pod druhou destičkou. Všechny čtyři možnosti jsou znázorněny na obrázku 26. Všechny tyto možnosti spojení byly realizovány na vzorcích s Cu motivem.

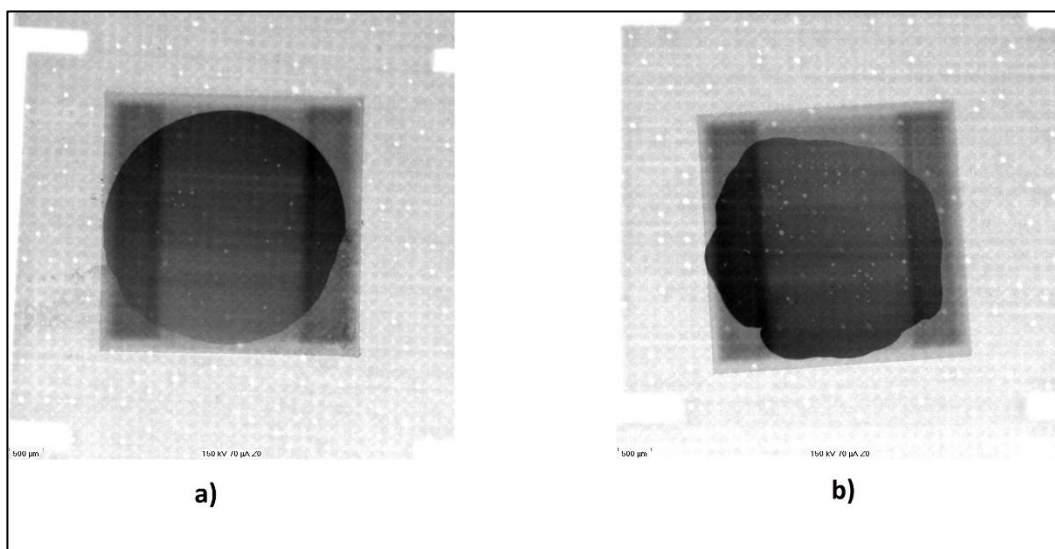


Obrázek 26 – Možnosti spojení dvou vzorků

Při tomto testování bylo další možností vyzkoušet nanášení pasty pouze pomocí metody dispenzingu. To bylo řešeno jednobodovou metodou a na zkoušku se využila pětibodová metoda (obrázek 27). Jednobodová metoda spočívá pouze v nanesení kapičky sintrovací pasty doprostřed substrátu, bohužel nevýhoda této metody je, že nepokryje celou kontaktní plochu, jak je vidět z RTG vzorku (obrázek 28). Proto se využívá pětibodová metoda, která má zajistit lepší rozprostření pasty po substrátu, tato metoda je bohužel velice náročná na přesný objem nanesené pasty a přesné umístění kapiček sintrovací pasty (správný tvar hvězdy). Proto tato metoda dispenzingu nebyla použita pro tuto práci. Má ovšem hlavní výhodu oproti šablonovému tisku a to takovou, že zde se kulička po přitlačení rozlije do stran a vytvoří tak ideální kontaktní spoj (obrázek 28), oproti šablonovému tisku, u kterého vznikají „krátery“, které způsobí nerovnoměrné přilnutí druhého vzorku.

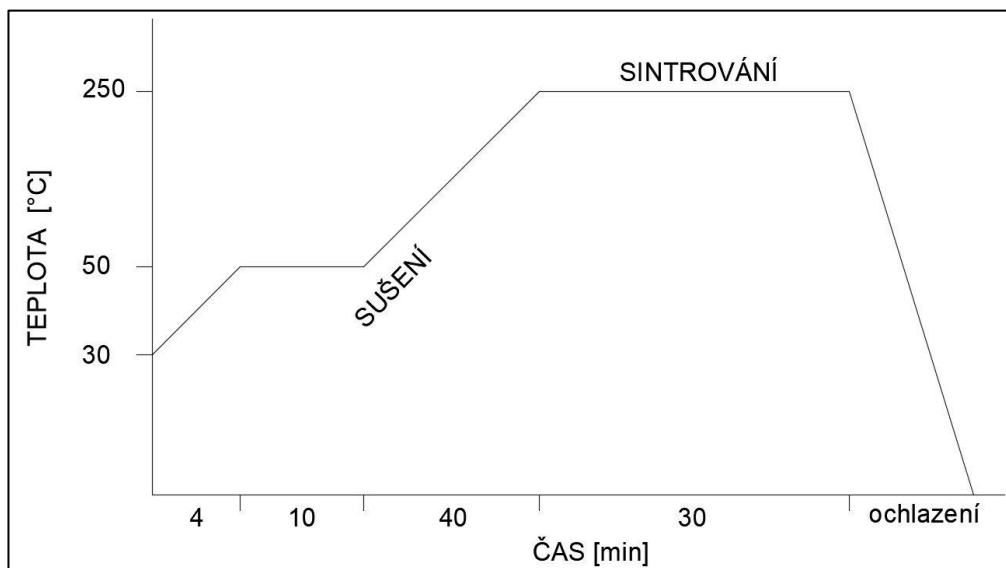


Obrázek 27 – a) jednobodová metoda; b) pětibodová metoda



Obrázek 28 – RTG snímky z a) jednobodové metody a z b) pětibodové metody

Z obrázku 28 je patrné, že nanesení pasty u pětibodové metody je velmi důležitá věc, jinak vzorek může dopadnout ve výsledku hůře než u jednobodové metody. Dále bylo třeba optimalizovat teplotní profil pece pro sintrování (obrázek 29), aby došlo k postupnějšímu, pomalejšímu zasušení pasty a nedocházelo k vytváření odplyňovacích kanálků.

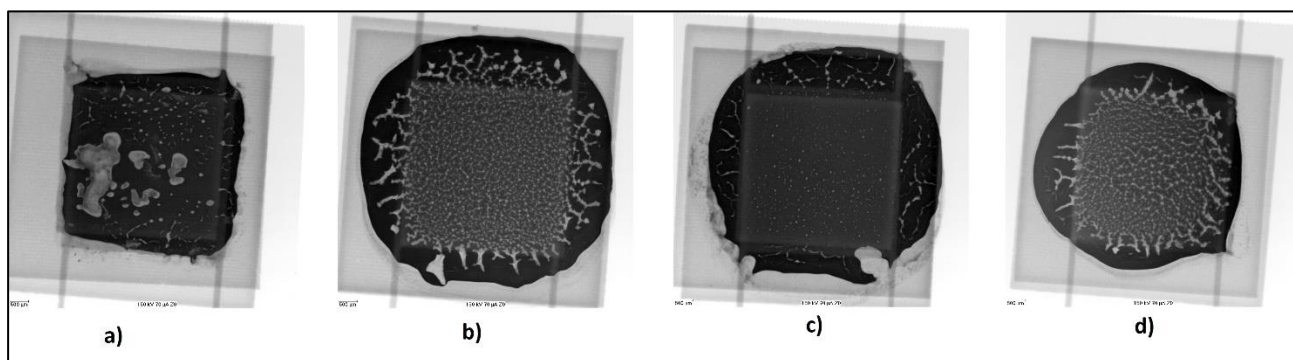


Obrázek 29 – RTG snímky z a) jednobodové metody

Odplyňovací kanálky vznikají díky rozpouštědlu obsaženém v sintrovací pastě. Vznikají při sintrování, pokud nedojde k dokonalému zasušení této pasty. Dají se dobře pozorovat pod RTG, kde mají podobu bílých „krápníků“ nebo kanálků. Jejich eliminace nebo minimalizování

je možné docílit pomocí delší doby zasušení pasty, kdy se rozpouštědlo pozvolna odpaří ze sintrovací pasty. Ta poté při samotném sintrovacím procesu rozpouštědlo již neobsahuje nebo ho obsahuje jen v minimálním množství, které již nevytvoří zmíněné kanálky.

Z výsledků testování a následných RTG vyšly nejlépe vzorky, které se nanášely metodou c). Jejich porovnání je viditelné na obrázku 30, kde jsou názorně vidět odplyňovací kanálky a voidy (bílá místa). Vzorek c) je celistvý, tmavý, což značí dostatečnou tloušťku pasty a kvalitní spoj bez odplyňovacích kanálků a voidů.



Obrázek 30 – RTG snímky v porovnání čtyř různých způsobů nanesení pasty na substrát.

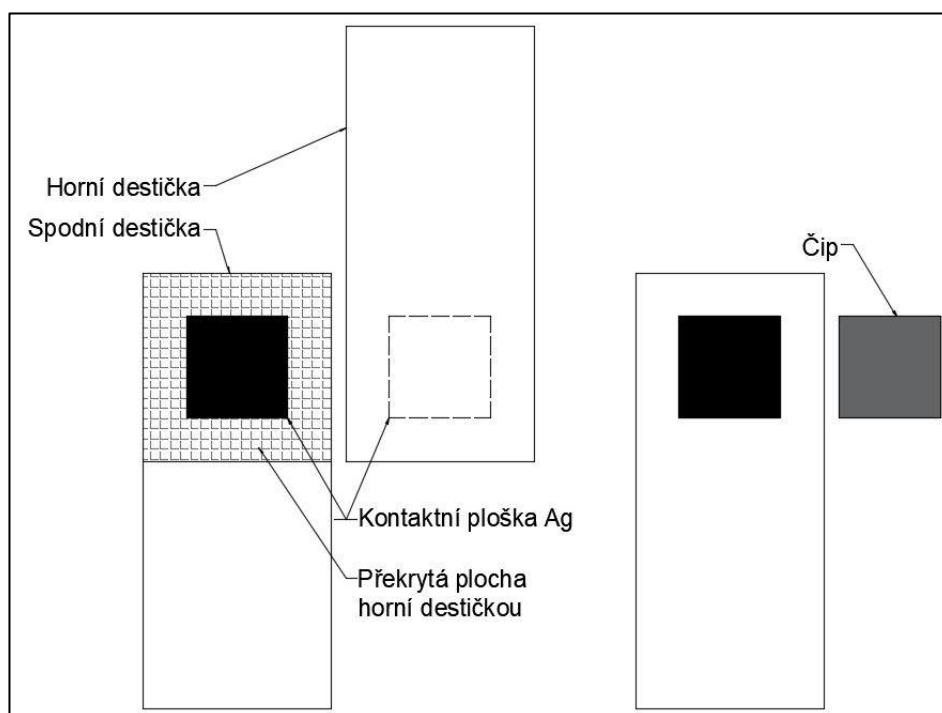
Hlavní nevýhodou u této metody nanášení bylo moc velké množství pasty, stačilo tedy trochu zatlačit a pasta se ihned rozlila i mimo Cu vrstvu na substrátu. Proto se dále testovala síla přitlačení vzorků k sobě.

Tento způsob testování obsahoval tři způsoby podložení keramického substrátu okolo kontaktní plošky, tak aby byl vyšší než nanesená vrstva pasty. Prvním způsobem bylo využití kaptonové pásky s celkovou tloušťkou 100 μm . U této pásky byla výhoda, že vydrží teplotu sintrování, tudíž se mohla na vzorku nechat a mezera mezi substráty byla stále stejná. Druhým způsobem bylo použití 100 μm folie a třetím způsobem bylo použití taktéž folie, ale 180 μm . U těchto folií byla nevýhoda, že nevydrží teplotu sintrování, a proto musely být ze vzorků odstraněny ještě před sintrováním, což způsobilo možné pohnutí vzorků a tím zhoršení kvality sintrovaného spoje.

Všechny tyto způsoby podložení nejenže jsou náročné na přípravu, jsou dále i neefektivní. Vzorky měly stále stejné známky voidů a odplyňovacích kanálků, v některých případech se spoj ani nevytvořil, z důvodu velké vzdálenosti vzorků od sebe.

Z výsledků předchozího testování se tedy ukázalo, že způsob nanášení metodou c) je nejvhodnější co se týče celkově vytvořeného spoje. Proto bylo zapotřebí vyřešit sílu přitlaku tak, aby se pasta nerozlila mimo kontaktní plochu. Tomu velmi napomáhalo zasušení pasty, díky kterému pasta měla pěkný čtvercový motiv. Zde byl ale další problém, co se týče umístění čipu/druhého vzorku do pasty. Když byla pasta příliš zasušena, čip/druhý vzorek do ní nešel osadit nebo velmi obtížně. Z toho důvodu byl navržen další postup osazování čipu/druhého vzorku přímo o „mokrě“ pasty a následně se celý přípravek nechal zasušit. To se již testovalo na vzorcích s Ag motivem.

U nového způsobu testování s Ag motivem se testovalo sintrování jak čipů, tak i sesintrování dvou destiček s Ag motivem. Při stejném způsobu nanášení pasty a stejné době zasušení (1 h na vzduchu při pokojové teplotě) a následném sintrování se na vzorcích připravených ze dvou destiček vytvářely odplyňovací kanálky a voidy v mnohem větším měřítku než u vzorků s čipem. Tento problém byl nejspíš způsobený horní keramickou destičkou, která byla rozměrově větší než kontaktní ploška spodní keramické destičky. A proto docházelo k horšímu odpařování rozpouštědla. Naopak čip byl rozměrově stejný jako kontaktní ploška, tudíž se mohlo rozpouštědlo z pasty lépe odpařit. Rozdíl mezi těmito přípravky je znázorněn na obrázku 31.



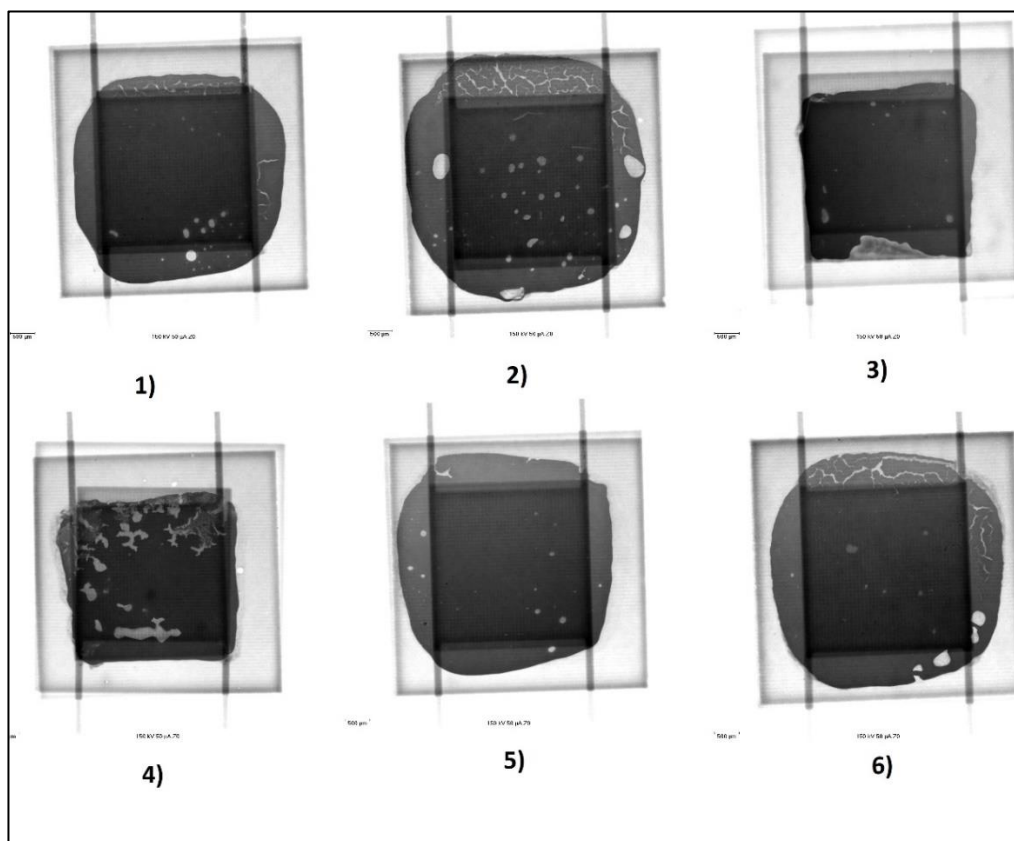
Obrázek 30 – RTG snímky v porovnání

Proto se vzorky se dvěma destičkami dále zkoumaly, co se týče lepšího odpařování rozpouštědla ze sintrovací pasty a vzorky s čipy se mohly dále realizovat tímto způsobem. Bylo vytvořeno celkem 24 vzorků s Ag motivem a s čipy. 12 jich bylo připraveno do šokové komory a 12 do pece na stárnutí suchým teplem. Dále byla pasta nanášena buď šablonovým tiskem nebo dispensingem. Pro lepší přehlednost je rozdělení vzorků znázorněno v tabulce 7.

Tabulka 7: Připravené vzorky na testování

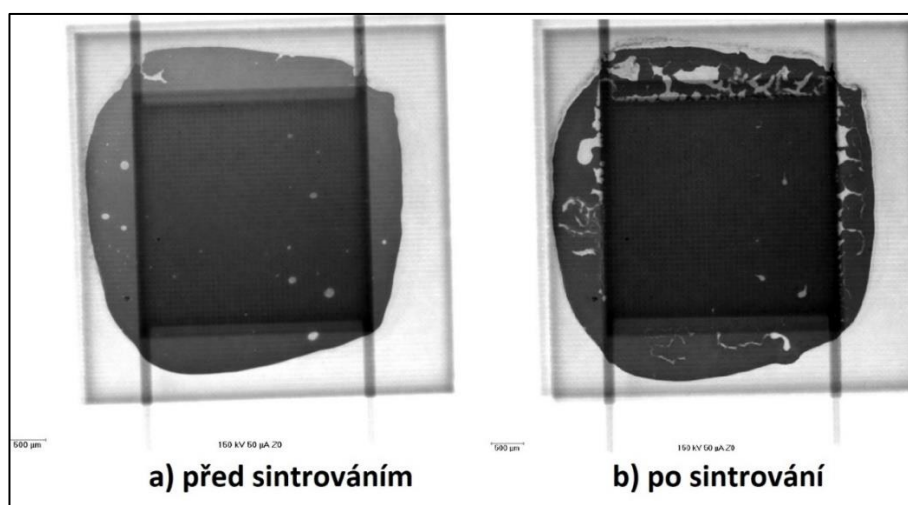
	Stárnutí v peci	Šoková komora
Celkem vzorků	12	12
Šablonový tisk	6	6
Dispensing	6	6

Nyní bylo potřeba najít vhodný postup pro spojení dvou destiček. Proto se zvolila delší doba zasušení pasty tak, aby se pomalým způsobem rozpouštědlo odpařovalo z pasty. Pozvolné zasušení bylo zvoleno tedy na 24 hodin na vzduchu při laboratorních podmínkách. Z důvodu úspory sintrovacího materiálu a menšího roztékání pasty kolem spoje, byl nadále využíván způsob spojení a) z obrázku 26. U takto vytvořených přípravků (6 ks) byl po 24 h zasušení proveden RTG před samotným sintrováním. Snímky jsou na obrázku 31.



Obrázek 31 – RTG snímky šesti zkušebních vzorků po 24 h zasušení bez sintrování

Z RTG snímků je patrné, že až na vzorek 2) a 4) byl tento pokus úspěšný. Následovalo tedy sintrování a porovnání RTG snímků před a po sintrování (obrázek 32). Na RTG snímku je vidět, že po sintrování se vytvořily odplyňovací kanálky, ale mimo vytvořený spoj, což je podstatné. Sintrovaný spoj, vypadá kvalitně, a proto se tento postup aplikoval na vzorky, které byly použity na ostré testování.



Obrázek 32 – RTG snímky vzorku 5, před a po sintrování

4.3 Finální testování vzorků

Z předchozích výsledků různých metod testování nanášení a sušení pasty vyplynula nejlepší metoda pro nanesení a zasušení sintrovací pasty. Sintrovací pastu je nejlepší nanášet pouze na jeden ze dvou spojovaných vzorků a nechat jí alespoň 24 h zasušit na vzduchu při laboratorní teplotě. Tímto způsobem bylo realizováno dohromady 45 vzorků ze dvou keramických destiček (dohromady 90 destiček), 36 vzorků keramických destiček s čipem a dále bylo vytvořeno 6 vzorků pro sintrování pod různým tlakem. Pro lepší přehlednost je vše znázorněno v tabulce 8 a 9.

Tabulka 8: Připravené vzorky na testování (beztlaké)

Typ vzorků	Dvě destičky [ks]	Destička + čip [ks]
Bez stárnutí	15	12
Stárnutí v peci	15	12
Šoková komora	15	12

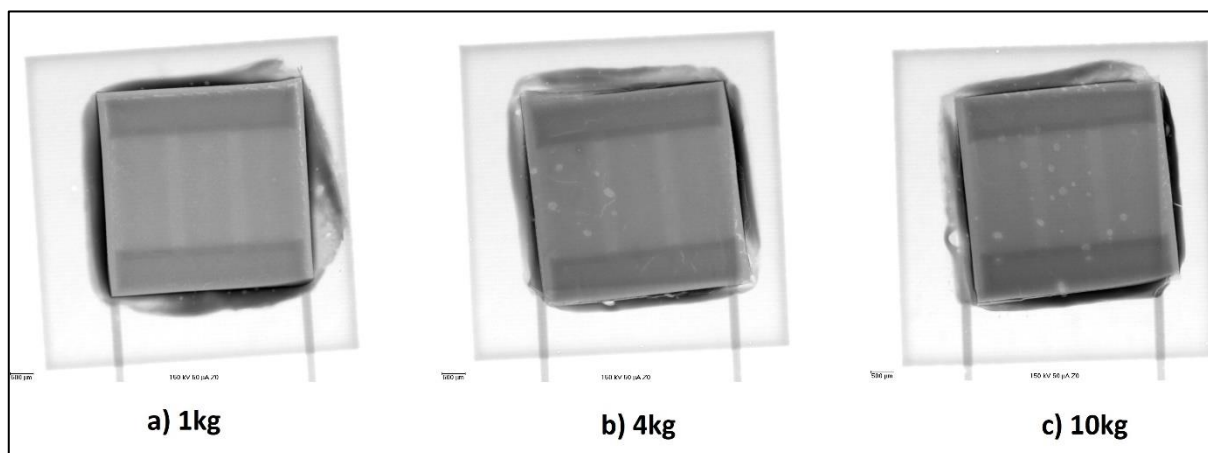
Tabulka 9: Připravené vzorky na testování (se závažím)

Váha (tlak)	Vzorky [ks]
1 kg	2
4 kg	2
10 kg	2

Čipy, které byly určeny pro sintrování pod tlakem, měly stejný výrobní proces jako vzorky pro beztlaké sintrování. S tím rozdílem, že tyto čipy byly ihned po nanesení pasty a umístění čipu vloženy do pece, zatěžkány závažím a následně se nechaly 24 h zasušit. Tento proces byl proveden z důvodu co nejmenší manipulace se zasušenými vzorky, aby nedošlo k poškození struktury spoje. Tyto vzorky byly rozděleny na testování adheze a v řezu, aby bylo možné pozorovat zhuštění sintrovací pasty po zatížení.

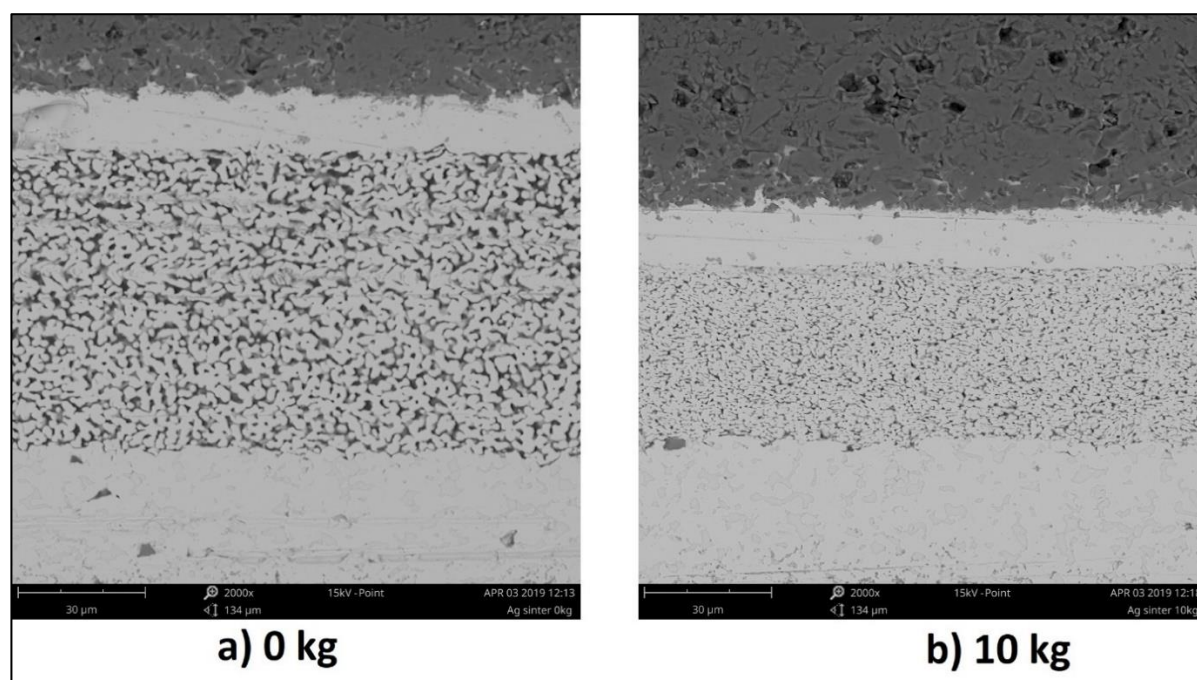
- **Zatížené vzorky – zkoumání v řezu**

Podstata tohoto experimentu je založena na zkoumání sintrovací pasty z hlediska její hustoty. Na to je nejvhodnější metoda řezu, kde se celý vzorek zalije do pryskyřice a následně je vzorek rozříznut, vybroušen a vyleštěn. Vzorek a tím i sintrovací pasta byla pokaždé zatížena jiným závažím a tím se měnila hustota Ag vrstvy. Na obrázku 33 jsou snímky ze SEM mikroskopu všech možností závaží.



Obrázek 33 – Snímky ze SEM mikroskopu zatížených vzorků

Na snímcích ze SEM mikroskopu je patrné, že nejlepší spoj vytvořil vzorek s využitím 1 kg závaží. Vzorek s 1 kg závažím vypadá až ideálně, drží čtvercový motiv, nevytvořily se zde odplyňovací kanálky ani žádné voidy. Vzorek je ale velice světlý, což znamená malou tloušťku sintrovací pasty. Oproti tomu na vzorcích (b) i (c) je viditelná známka voidů (bílé bublinky), nicméně se to dá také považovat za kvalitní spoj. Následovalo využití metody řezu, což je destruktivní metoda. K této metodě se využil vzorek bez závaží a s 10 kg závažím, aby byl zřejmý rozdíl v hustotě Ag vrstvy. Rozdíl mezi těmito vzorky je znázorněn na obrázku 34.



Obrázek 34 – Porovnání hustoty sintrovaného spoje se závažím a bez závaží při stejném zvětšení

Na obrázku 33 je velmi dobře vidět znatelný rozdíl v hustotě Ag vrstvy i tloušťky vytvořeného spoje. U 10 kg vzorku je mnohem menší poréznost sintrovaného spoje. Jelikož se jedná o destruktivní metodu, tak vzorky byly zničeny a nedaly se použít pro další metodu testování, čímž bylo měření adheze spoje.

- **Zatížené vzorky – měření adheze**

Jelikož se nepovedlo kvalitní sintrování u druhého 10 kg vzorku, byly tedy k měření adheze použity pouze vzorky se zatížením 1 kg a 4 kg.

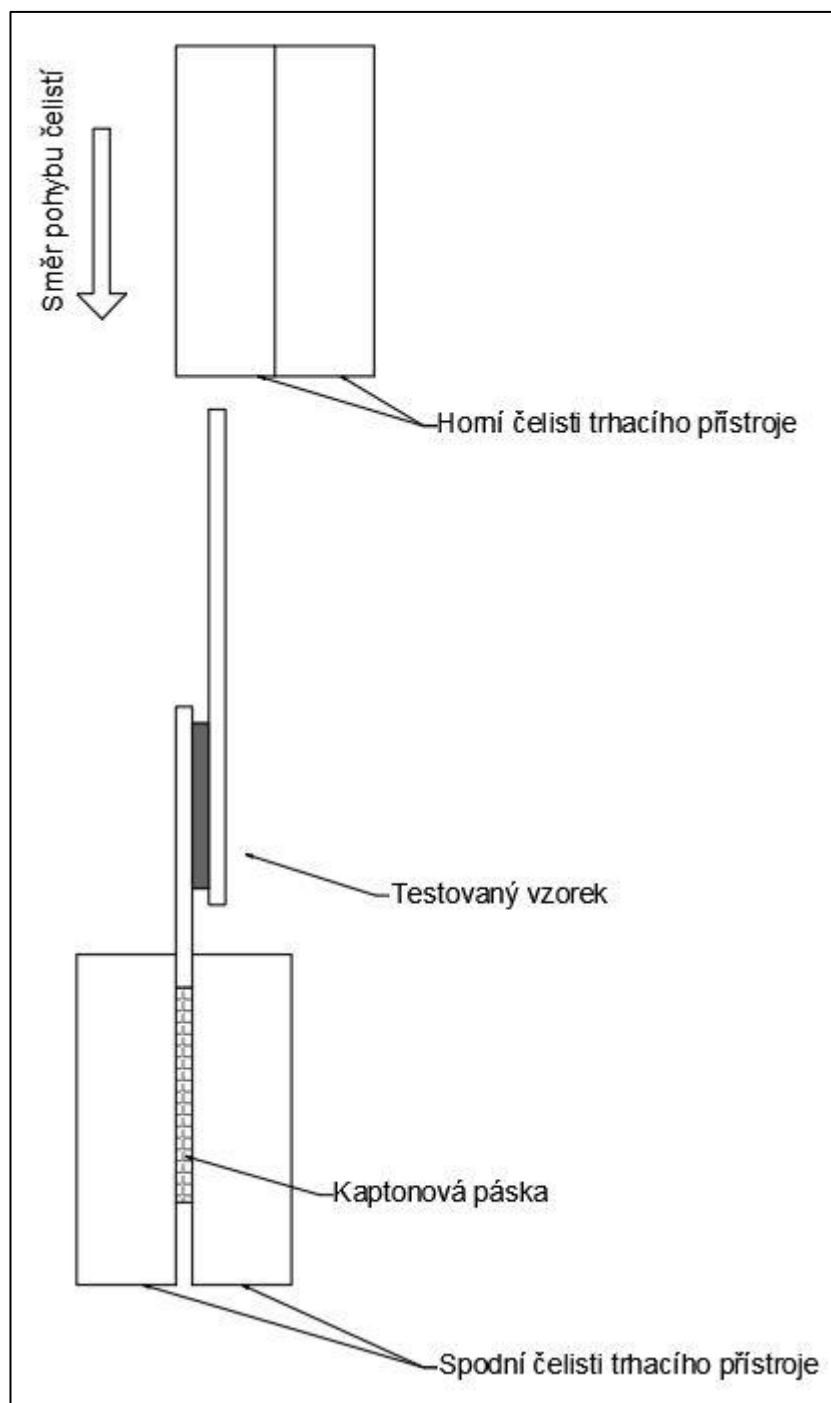
Tabulka 10: Měření adheze zatížených vzorků

Vzorek	Síla F [N/25/mm ²]	τ_s [N/mm ²]
1 kg	155,9	6,2
4 kg	101,6	4

Zde je výsledek očekávaný podle RTG snímků (obrázek 33), kde vzorek zatížený 1 kg nemá žádné voidy ani odplyňovací kanálky. Proto má i vyšší mechanickou pevnost.

4.3.1 Beztlaké sintrování – dvě keramické destičky

U tohoto typu testování bylo vybráno 15 destiček pro měření adheze bez stárnutí, dále 15 vzorků pro měření adheze po stárnutí suchým teplem a 15 vzorků pro měření adheze po stárnutí v šokové komoře. U takového měření adheze nastalo hned několik problémů. Prvním bylo uchycení do čelistí trhacího stroje, kde keramické destičky praskaly, pokud byly čelisti velmi utaženy. Při nedostatečném utažení čelistí vzorek klouzal a nebylo možné adhezi změřit. Proto se testovalo uchycení vzorků do čelistí přes různé pryžové materiály nebo lepicí pásy. Jako nejvhodnější ze všech testovaných metod připadala nejvíce v úvahu kaptonová páska, kde destička sice praskla, ale držela pohromadě díky zmíněné pásce. Z ostatních možností byly všechny neakceptující, protože vzorek z nich stále klouzal ven i při větším utažení čelistí. Bohužel to se dělo i u některých vzorků s kaptonovou páskou, proto by bylo měření irelevantní. Muselo se tedy přijít s jiným řešením, což bylo neposouvat čelisti od sebe, ale naopak k sobě s tím, že na vzorek bylo tlačeno ze shora. Zde bylo nutné vzorek pořádně utáhnout do spodní čelisti, aby neměl tendenci vyklouzávat. Každý zkušební vzorek byl tedy opatřen kaptonovou páskou a následně uchycen do čelistí tak, aby vzorek byl rovnoběžný s horními čelistmi a nedocházelo tak, k nerovnoměrnému působení síly. Znázornění této testovací metody je na obrázku 35.



Obrázek 35 – Obecný model pro testování adheze vzorků

Tento způsob testování se zdál vhodný, a proto se mohlo přejít na testování ostrých vzorků. Nejprve bylo však zapotřebí vzorky připravit. Vzorky bez stárnutí se mohly testovat ihned po sintrování, ale vzorky na stárnutí musely být ještě umístěny na určitou dobu buďto do pece nebo šokové komory. Vzorky umístěné do pece na stárnutí suchým teplem byly vloženy

do pece na 500 h při 100 °C, druhé vzorky na stárnutí umístěné do šokové komory byly testovány dohromady na 1000 cyklů, kde jeden cyklus trval 15 min + 15 min. To znamená, že vzorek byl vystaven po 15 minut teplotě -40 °C, poté se během 10 sekund přesunul do druhé komory kde byl vzorek také po dobu 15 minut, ale při teplotě +125 °C. Celý tento proces byl 1 cyklus. Po tomto klimatickém testování byly vzorky připraveny na testování adheze spoje.

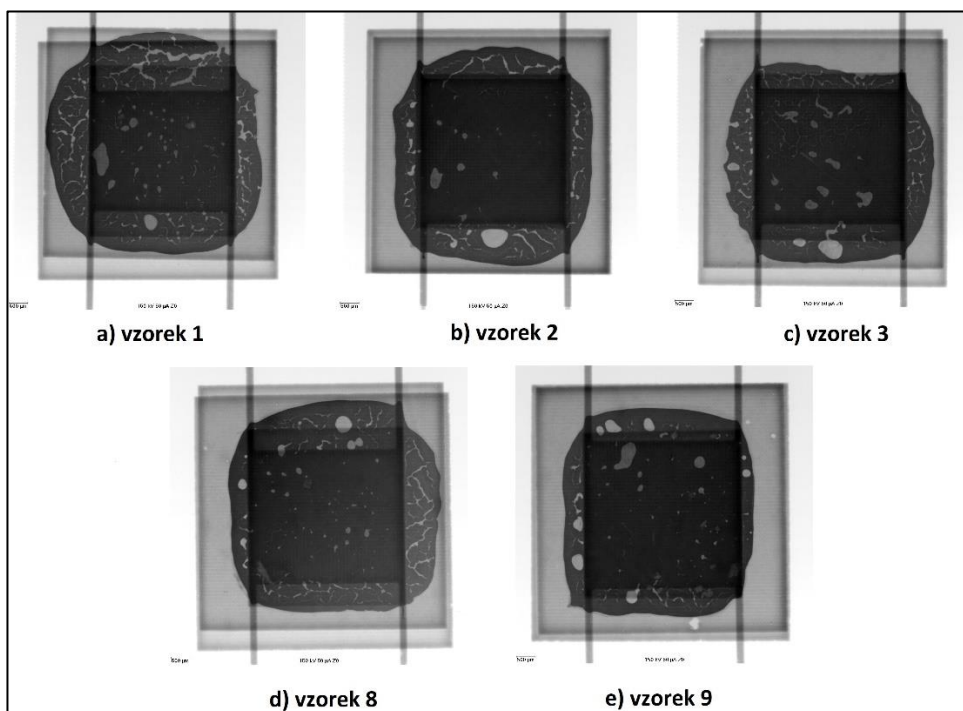
Vzorky bez stárnutí [15 ks]

Z 15 vytvořených vzorků bylo otestováno prvních 10, z důvodu rezervy vzorků pro případné selhání některého testu. Z těchto 10 vzorků bylo vybráno 5 vzorků s největší adhezí a tyto vzorky byly porovnávány s RTG snímky a fotografiemi vytvořenými po měření adheze. Největší adhezí měly vzorky 1, 2, 3, 8, 9. RTG snímky vzorků jsou znázorněny na obrázku 36, porovnání vzorku po odtržení a RTG snímku je na obrázku 37 a typický průběh testování adheze je znázorněn v grafu na obrázku 38.

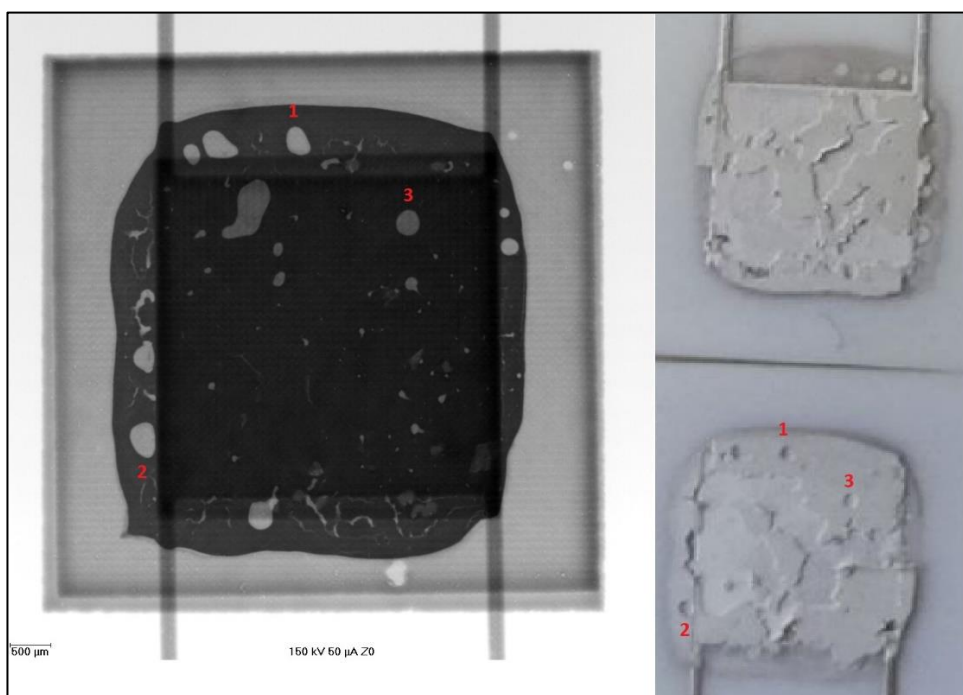
Tabulka 11: Adheze vzorků bez stárnutí

Vzorek	Síla F [N/25mm ²]	T _s [N/mm ²]
1	280,1	11,2
2	430,4	17,2
3	224,4	8,9
4	132,7	5,3
5	119,3	4,7
6	206,7	8,2
7	73,2	2,9
8	301,4	12
9	378,1	15,1
10	120,8	4,8

U těchto vzorků byla změřena nejvyšší hodnota síly 430,4 N konkrétně u vzorku 2, ta se musela dále přepočítat na plochu, která byla využita jako spoj, tudíž 5 mm x 5 mm tzn na 25 mm². Výsledná hodnota tedy byla 17,2 N. Konkrétně u tohoto vzorku (2) a u vzorku 9 je dobře pozorovatelný tmavší RTG snímek spoje než u zbylých tří vzorků. To značí větší tloušťku sintrovací pasty a díky tomu i mechanicky lepší, pevnější spoj. Na těchto vzorcích je oproti zbylým i minimální množství voidů. Oproti tomu u těchto pěti vybraných vzorků, kde byla změřena nejmenší síla, je více voidů a RTG snímky spoje jsou světlejší.

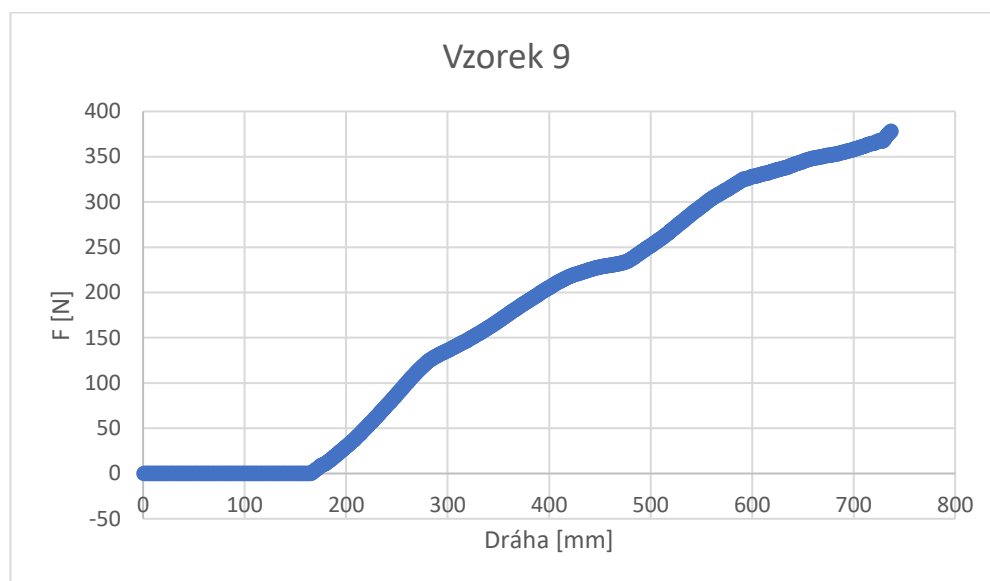


Obrázek 36 – RTG snímky vzorků bez stránutí



Obrázek 37 – Porovnání RTG snímku se sintrovaným spojem (9)

Na obrázku 36 jsou vyznačena tři místa, kde jsou viditelné voidy. Dále je vidět, že smáčivost pasty je k oběma ploškám stejná, nedošlo zde k úplnému odtržení Ag vrstvy od jednoho nebo druhého vzorku.



Obrázek 38 – Graf měření mechanické pevnosti spoje

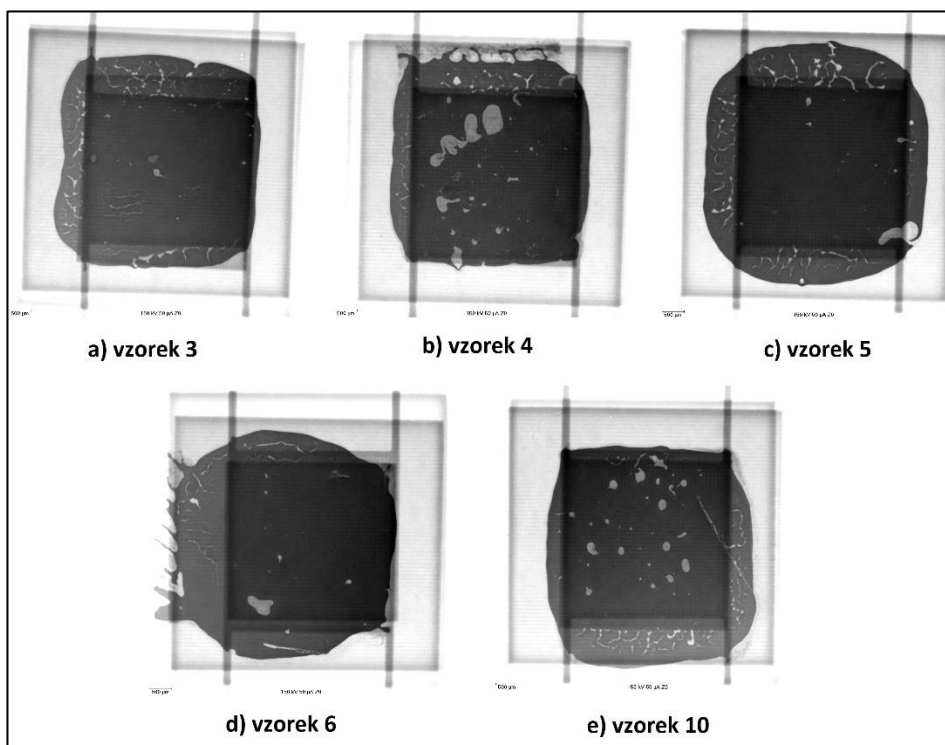
Vzorky, stárnutí v peci [15 ks]

Zde stejným způsobem jako u předchozího testování bylo testováno prvních 10 vzorků, ze kterých bylo následně vybráno 5 vzorků s největší adhezí. Zde byly nejpevněji spojeny destičky 3, 4, 5, 6, 10. RTG snímky vzorků jsou znázorněny na obrázku 39, porovnání vzorku po odtržení a RTG snímku je na obrázku 40 a typický průběh testování adheze je znázorněn v grafu na obrázku 41.

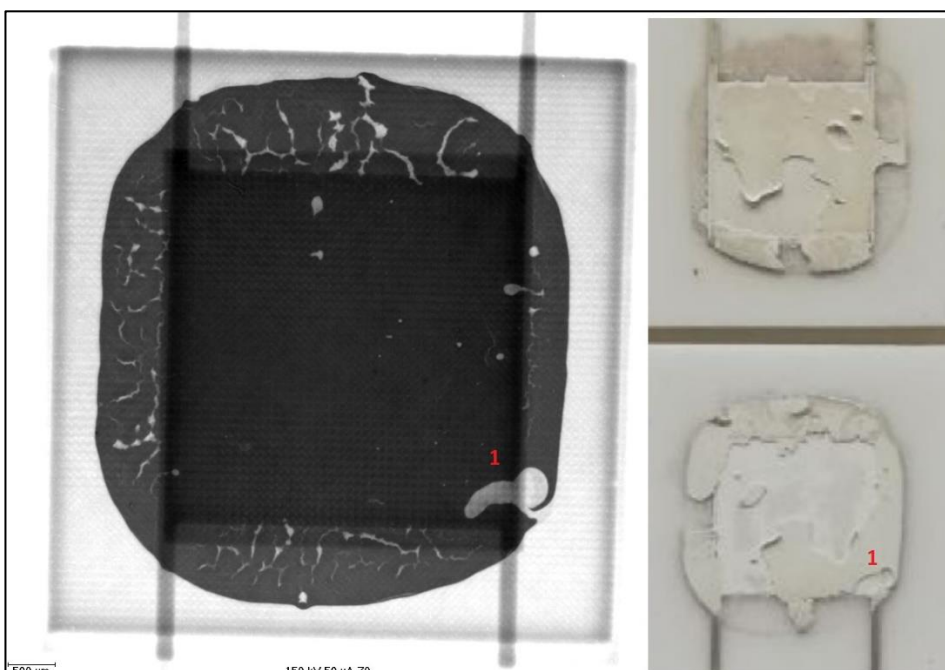
Tabulka 12: Adheze vzorků

Vzorek	Síla F [N/25mm ²]	τ_s [N/mm ²]
1	368	14,72
2	433,67	17,3468
3	515,92	20,6368
4	500,73	20,0292
5	599,18	23,9672
6	471,2	18,848
7	206,18	8,2472
8	315,57	12,6228
9	50,28	2,0112
10	500,26	20,0104

Zde byla naměřena největší hodnota 599,18 N, po přepočtu 23,96 N. Tato hodnota byla naměřena u vzorku 5, na kterém je zároveň vidět, že je nejtmaší ze všech RTG snímků, což opět značí větší tloušťku sintrovací pasty a tím větší mechanickou pevnost. Dále je to vzorek s nejmenším počtem voidů, což podporuje výsledek.

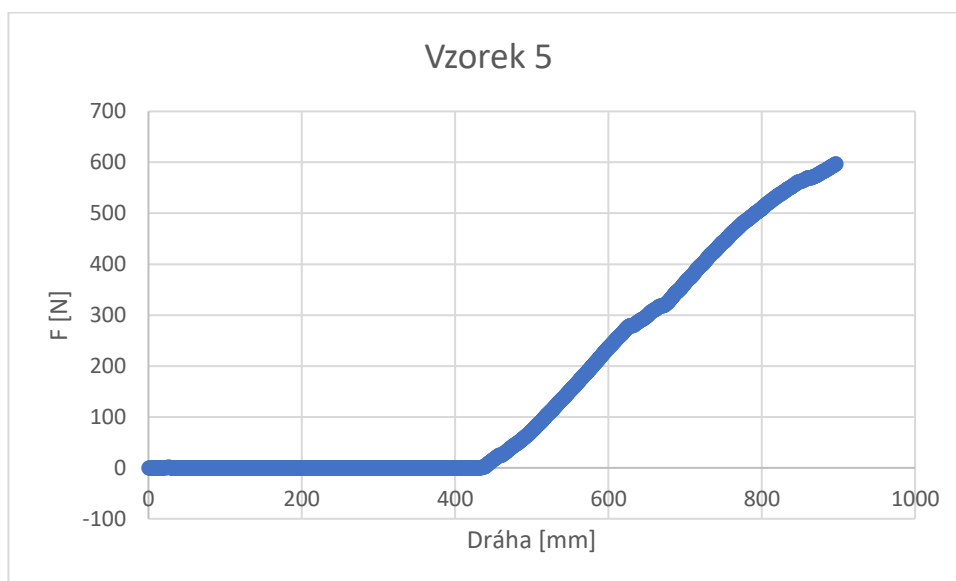


Obrázek 39 – RTG snímky vzorků po stárnutí v peci



Obrázek 40 – Porovnání RTG snímku se sintrovaným spojem (5)

U těchto vzorků se projevuje tzv. dosintrování. To je způsobeno stárnutím vzorků v peci při konstantní vyšší teplotě (100 °C) po určitý čas (500 h). Tento čas, a hlavně teplota způsobí další vzájemnou difuzi částic Ag a tím i kvalitnější, pevnější spoj. Což je vidět z výsledků testování, kde u této metody je síla větší o zhruba 66,6 %.



Obrázek 41 – Graf měření mechanické pevnosti spoje

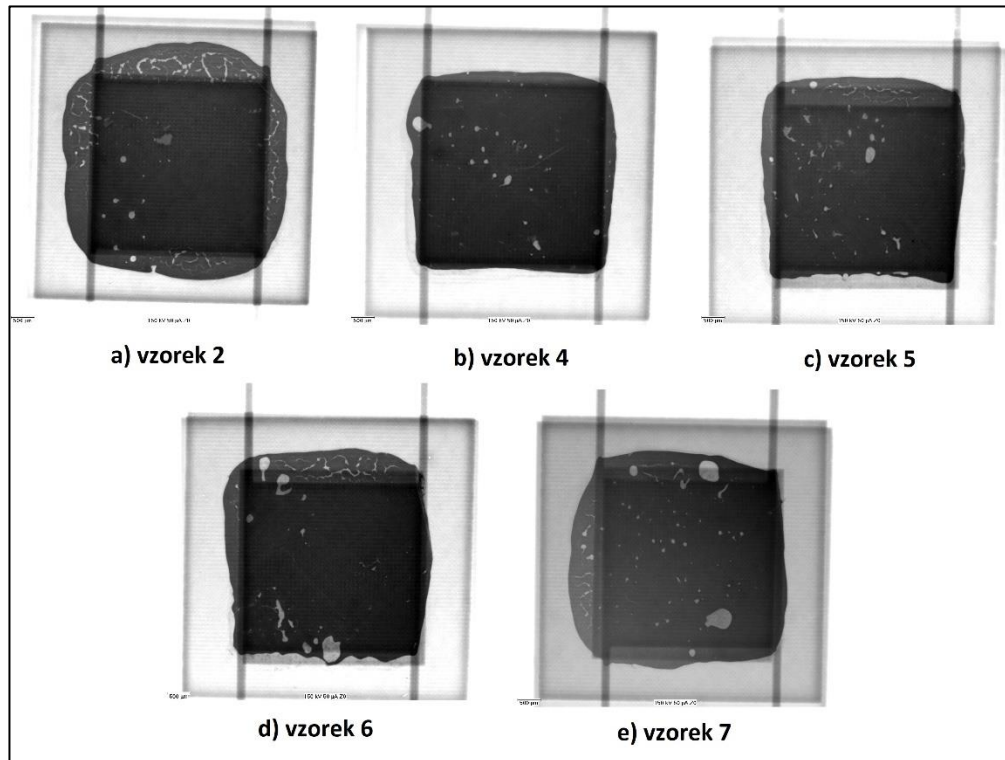
Vzorky, stárnutí v šokové komoře [15 ks]

U těchto vzorků platí stejné podmínky jako u předchozích dvou experimentů. Byly zde očekávány špatné výsledky z důvodu prudkých změn teplot. Největší mechanickou pevnost měly vzorky 2, 4, 5, 6, 7. RTG snímky vzorků jsou znázorněny na obrázku 42, porovnání vzorku po odtržení a RTG snímku je na obrázku 43 a typický průběh testování adheze je znázorněn v grafu na obrázku 44.

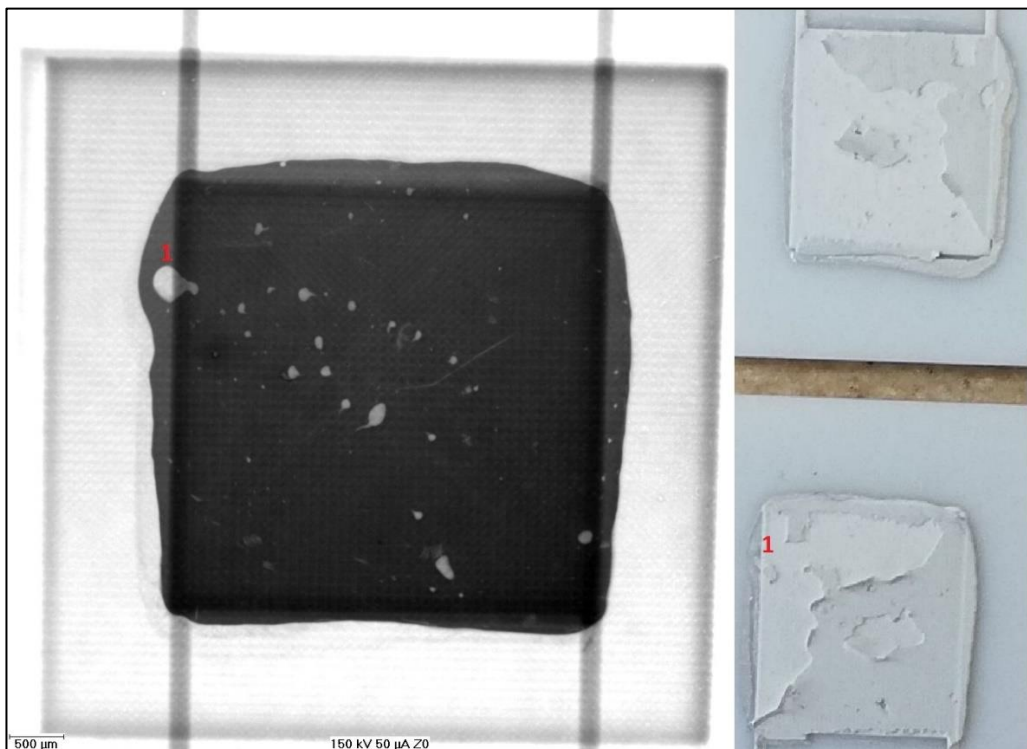
Tabulka 13: Adheze vzorků

Vzorek	Síla F [N/25mm ²]	τ_s [N/mm ²]
1	59,7	2,3
2	119,9	4,7
3	84,9	3,3
4	374,9	14,9
5	357,6	14,3
6	227,7	9,1
7	238,2	9,5
8	64,8	2,5
9	74,3	2,9
10	44,2	1,7

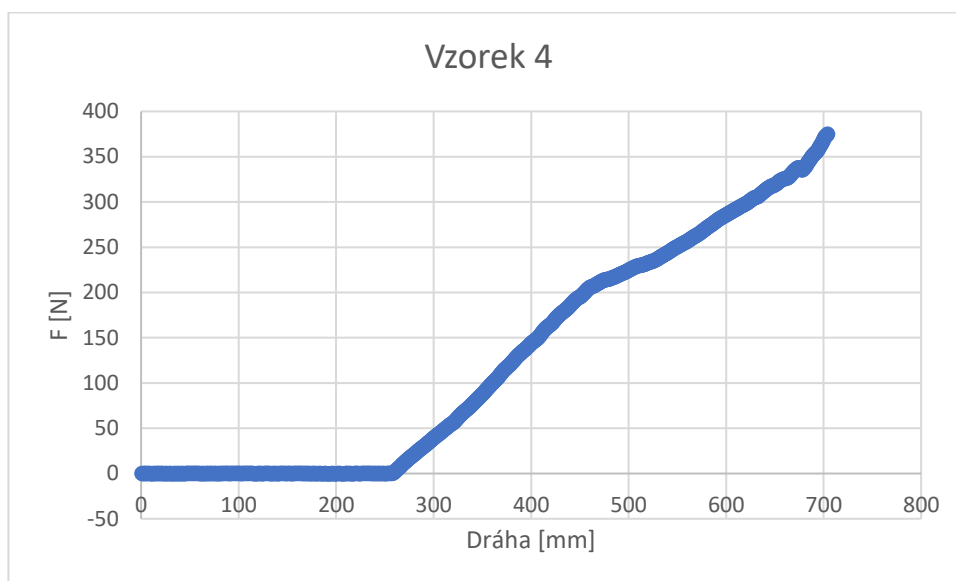
Podle RTG snímků je opět viditelné, že vzorek 4, který má největší mechanickou pevnost, je zároveň nejlépe sesintrovaný. Čtvercový motiv, minimum voidů, žádné odplyňovací kanálky, to vše přispívá k vytvoření kvalitního spoje.



Obrázek 42 – RTG snímky vzorků po stárnutí v šokové komoře

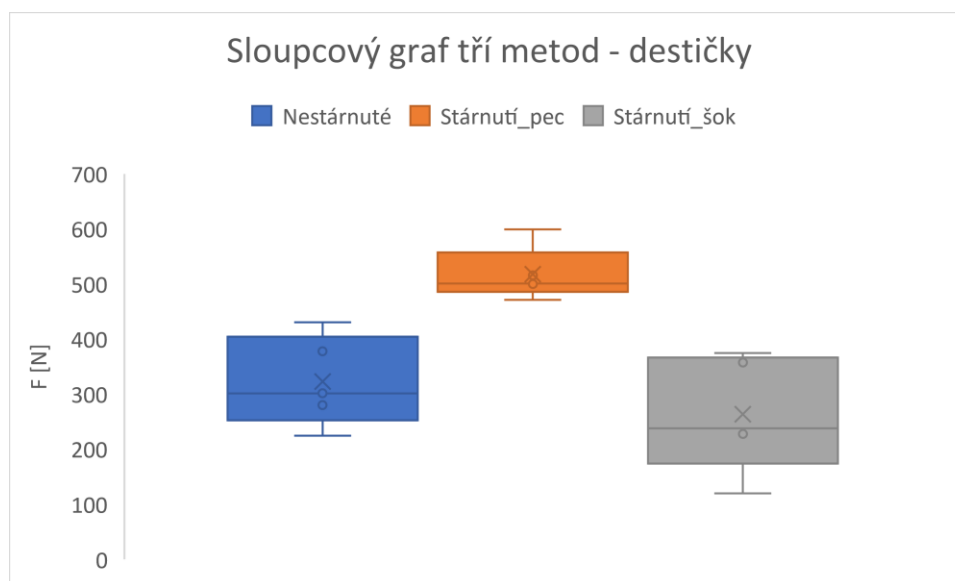


Obrázek 43 – Porovnání RTG snímku se sintrovaným spojem (4)



Obrázek 44 – Graf měření mechanické pevnosti spoje

U tohoto experimentu se dle výsledků potvrdil předpoklad pro nejhorší mechanickou pevnost spoje. Rychlé změny extrémních teplot mají negativní vliv na sintrovaný spoj.

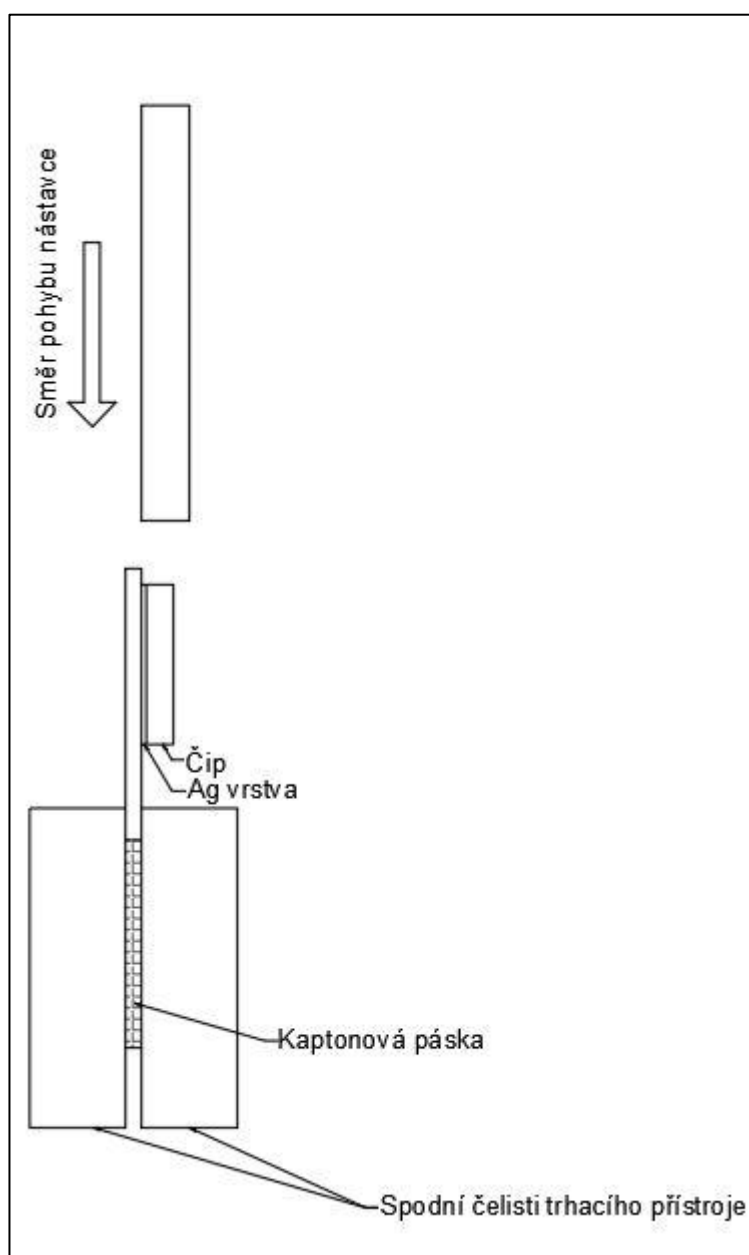


Obrázek 45 – Sloupcový graf tří metod testování vzorků

Souhrn: Z těchto tří experimentů na mechanickou pevnost dosáhly nejlepších výsledků vzorky po stárnutí v peci, kde se mechanická pevnost spoje pohybovala okolo 500 N. Naopak nejhůře dopadly vzorky po stárnutí v šokové komoře, kde ze všech testovaných vzorků se mechanická pevnost spoje pohybovala v průměru okolo 65,5 N.

4.3.2 Beztlaké sintrování – Keramická destička + čip

Pro tento experiment se připravilo celkem 36 vzorků. 12 pro experiment bez stárnutí, 12 pro experiment stárnutí v peci a 12 pro experiment stárnutí v šokové komoře. Vzorky bez stárnutí byly všechny připraveny šablonovým tiskem a vzorky na stárnutí byly připraveny šablonovým tiskem (6 ks) a dispenzingem (6 ks) pro každý experiment zvlášť. Dále zde bylo nutné upravit trhací přístroj, konkrétně vyměnit horní čelisti za mosazný šestihranný nástavec, který posloužil k odtržení čipu ze substrátu (obrázek 46). Styl zkoušky byl stejný, jen s jiným nástavcem pro odtržení.



Obrázek 46 – Upravený model pro testování adheze vzorků

Testování stárnutí vzorků, ať už v peci nebo šokové komoře, probíhalo za stejných podmínek jako při testování dvou keramických destiček.

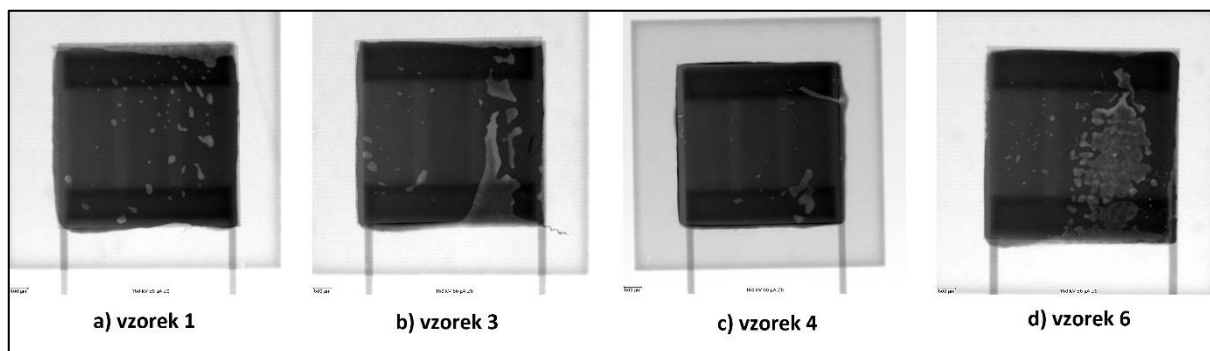
Vzorky bez stárnutí [12 ks]

Z 12 vytvořených vzorků se otestovalo prvních 6, z důvodu rezervy vzorků pro případné selhání některého testu. Z následujících 6 vzorků byly vybrány 4 vzorky s největší adhezí a tyto vzorky byly porovnávány s RTG snímky a fotkami vytvořenými po měření adheze. Největší adhezí měly vzorky 1, 3, 4, 6. RTG snímky vzorků jsou znázorněny na obrázku 47, porovnání vzorku po odtržení a RTG snímku je na obrázku 48 a typický průběh testování adheze je znázorněn v grafu na obrázku 49.

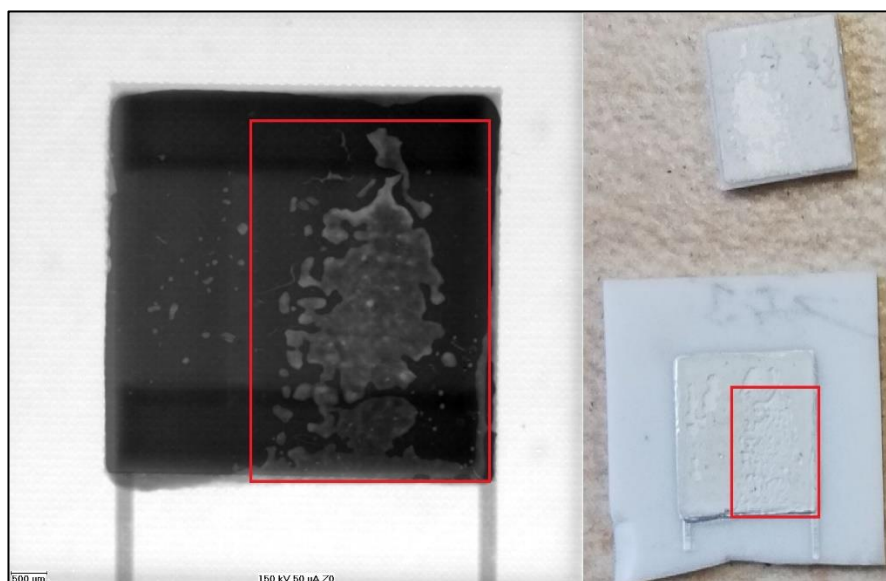
Tabulka 14: Adheze vzorků

Vzorek	Síla F [N/25mm ²]	T _s [N/mm ²]
1	297,91	11,9164
2	187,92	7,5168
3	284,7	11,388
4	294,58	11,7832
5	275,77	11,0308
6	308,32	12,3328

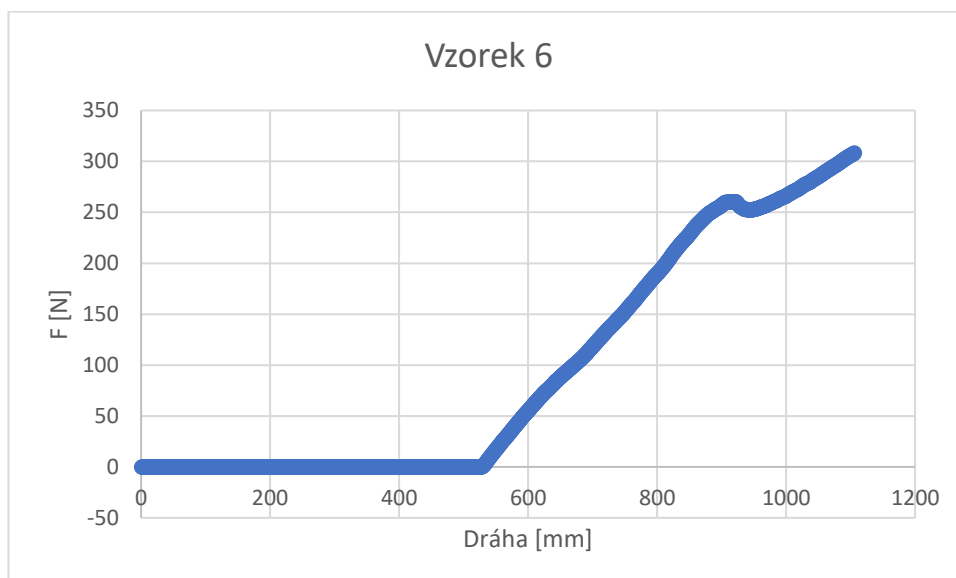
Mezi vybranými čtyřmi vzorky dosahoval nejvyšších hodnot vzorek 6 s hodnotou 308,32 N/mm². Při pohledu na RTG snímek (obrázek 47) je vzorek velmi porézní, a ačkoliv je vzorek porézní, tak zasintrovaná plocha je nejspíš velmi kvalitně spojena. Je zde i možnost, že mohlo dojít k posunutí vzorku v čelistech, než došlo k odtržení a tím se mohla zvýšit celková potřebná síla k odtržení.



Obrázek 47 – RTG snímky vzorků bez stárnutí (čipy)



Obrázek 48 – Porovnání RTG snímku se sintrovaným spojem (6)



Obrázek 49 – Graf měření mechanické pevnosti spoje

Vzorky, stárnutí v peci [12 ks]

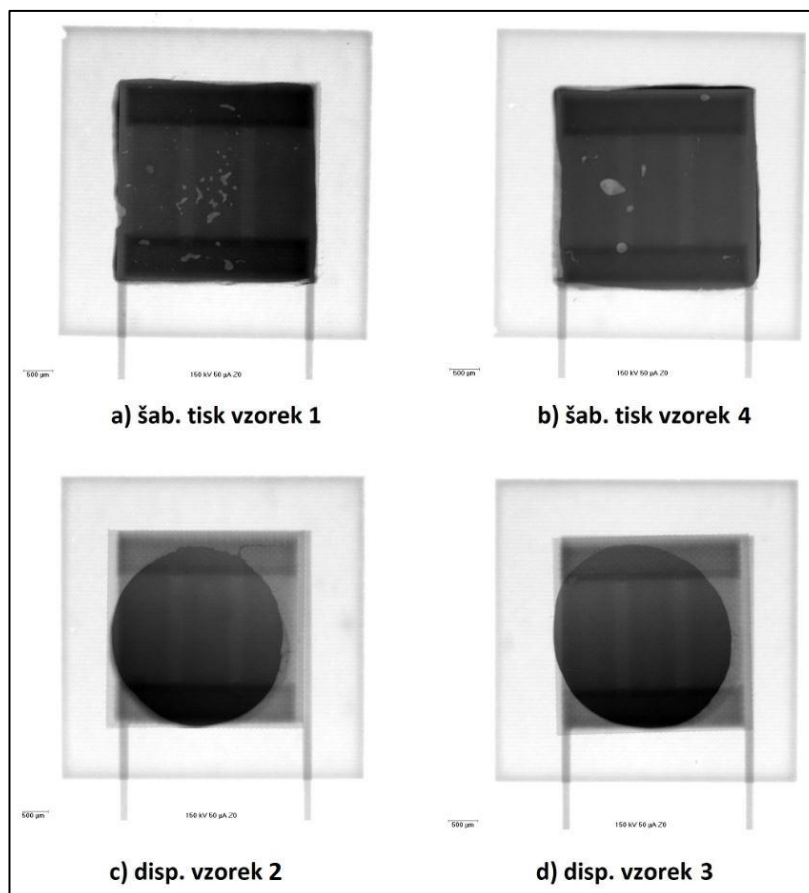
Z 12 vytvořených vzorků byly otestovány 4 vzorky, kde byla sintrovací pasta nanášena pomocí šablonového tisku a 4 vzorky vytvořené s využitím nanesení pasty metodou disperzingu. Následně z těchto 8 vzorků byly vybrány 4 vzorky (2 z každé metody).

Tabulka 15: Adheze vzorků

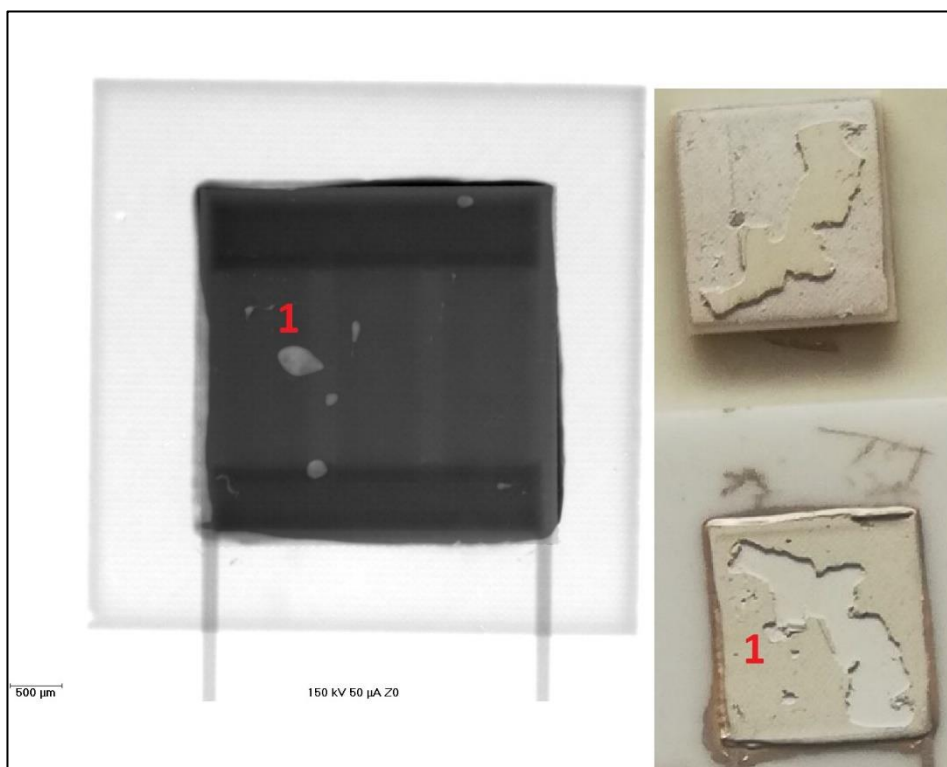
Vzorek	Dispenzing		Šablonový tisk	
	Síla F [N/25mm ²]	T_s [N/mm ²]	Síla F [N/25mm ²]	T_s [N/mm ²]
1	189,6	7,6	314,3	12,6
2	263,3	10,5	186,2	7,4
3	289,0	11,6	275,6	11,0
4	220,9	8,8	339,3	13,6

RTG snímky vzorků jsou znázorněny na obrázku 50, porovnání vzorku po odtržení a RTG snímku je na obrázku 51 a typický průběh testování adheze je znázorněn v grafu na obrázku 52.

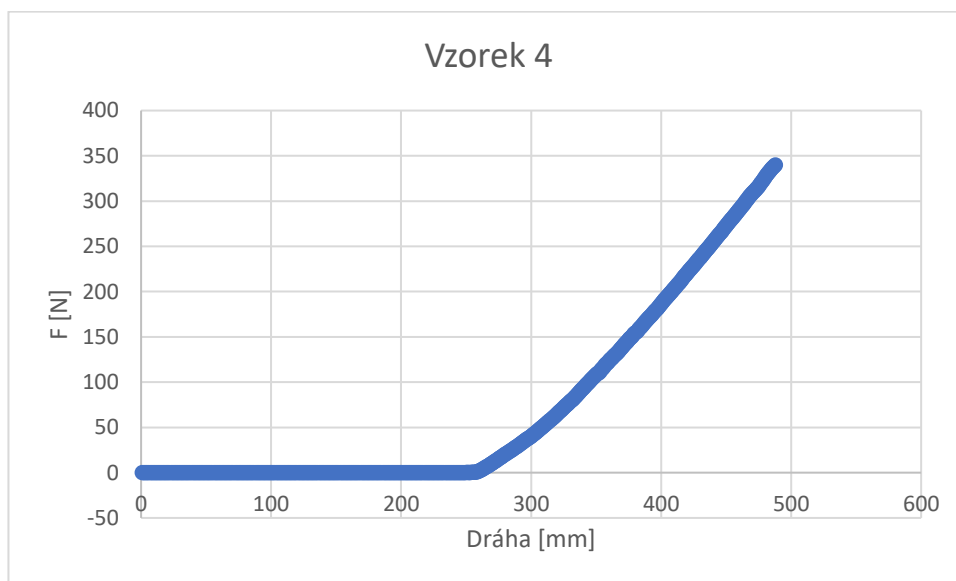
Z výsledků experimentu je patrné, že při nanášení sintrovací pasty šablonovým tiskem dosahuje vzorek lepší mechanické pevnosti než při nanesení pasty pouze pomocí dispenzingu. To je způsobeno plochou pokrytí při nanášení pasty. V porovnání se vzorky z experimentu bez stárnutí se hodnoty příliš neliší a pohybují se kolem 300 N. U vzorků testovaných bez stárnutí byla podle RTG snímků Ag vrstva znatelně horší, a to je nejspíš důvod podobné mechanické pevnosti spoje.



Obrázek 50 – RTG snímky vzorků



Obrázek 51 – Porovnání RTG snímku se sintrovaným spojem (šab. tisk 4)



Obrázek 52 – Graf měření mechanické pevnosti spoje

Vzorky, stárnutí v šokové komoře [12 ks]

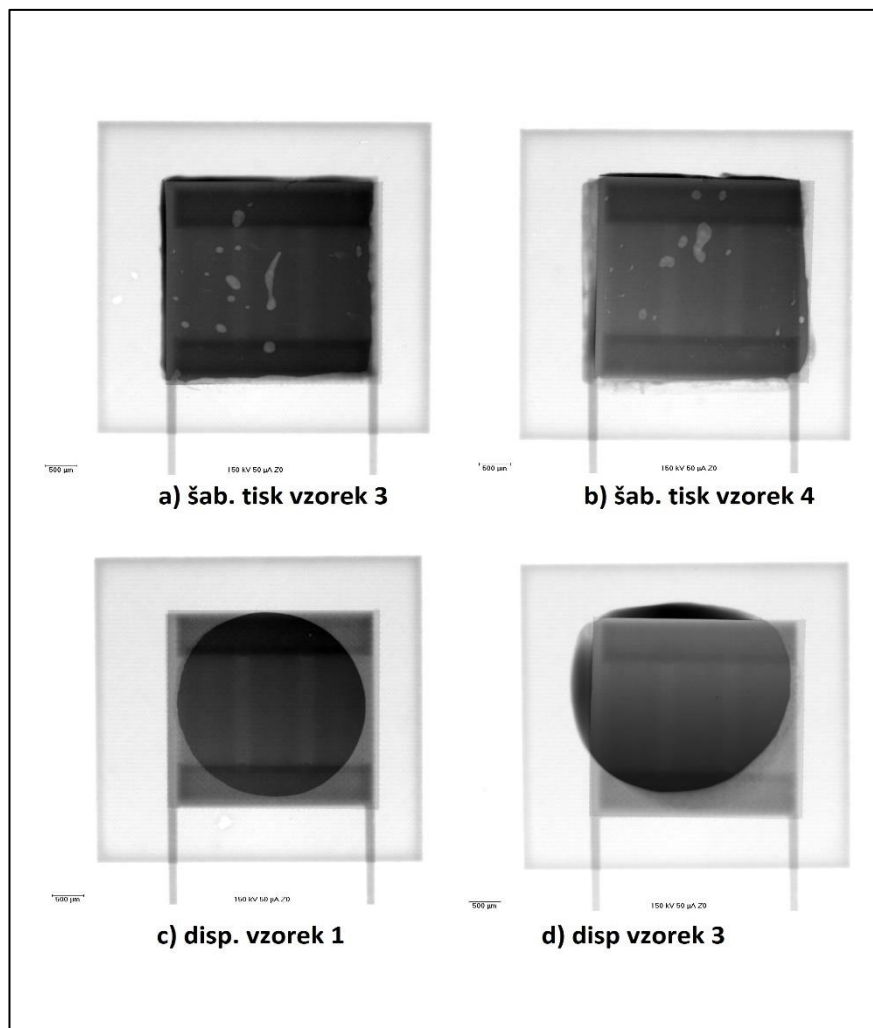
Z 12 vytvořených vzorků se otestovaly 4 vzorky, kde byla sintrovací pasta nanášena pomocí šablonového tisku a 4 vzorky vytvořené s využitím nanesení pasty metodou disperzingu. Následně z těchto 8 vzorků byly vybrány 4 vzorky (2 z každé metody).

Tabulka 16: Adheze vzorků

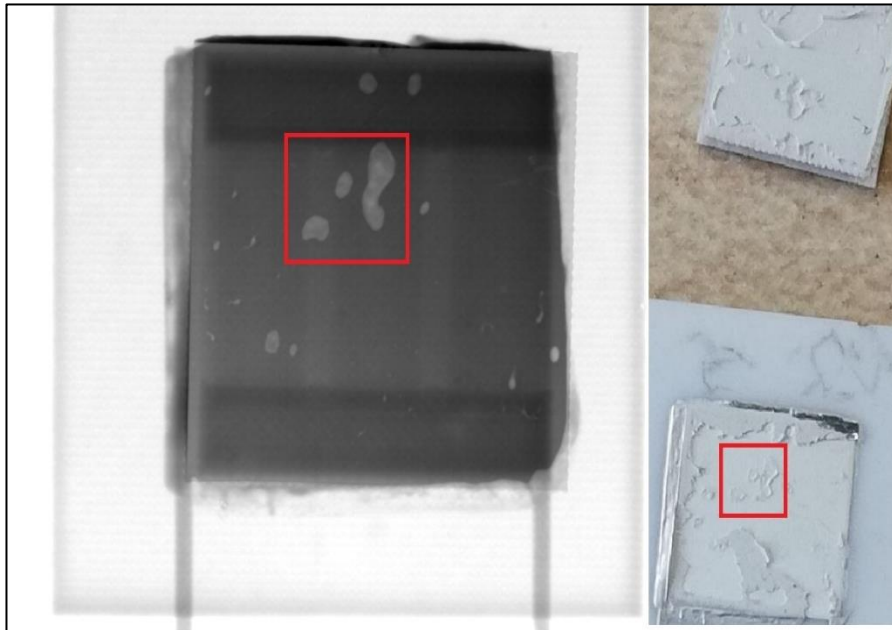
Vzorek	Dispenzing		Šablonový tisk	
	Síla F [N/25mm ²]	T _s [N/mm ²]	Síla F [N/25mm ²]	T _s [N/mm ²]
1	211,7	8,5	261,1	10,4
2	184,3	7,4	264,4	10,6
3	295,2	11,8	300,1	12,0
4	197,3	7,9	367,6	14,7

RTG snímky vzorků jsou znázorněny na obrázku 53, porovnání vzorku po odtržení a RTG snímku je na obrázku 54 a typický průběh testování adheze je znázorněn v grafu na obrázku 55.

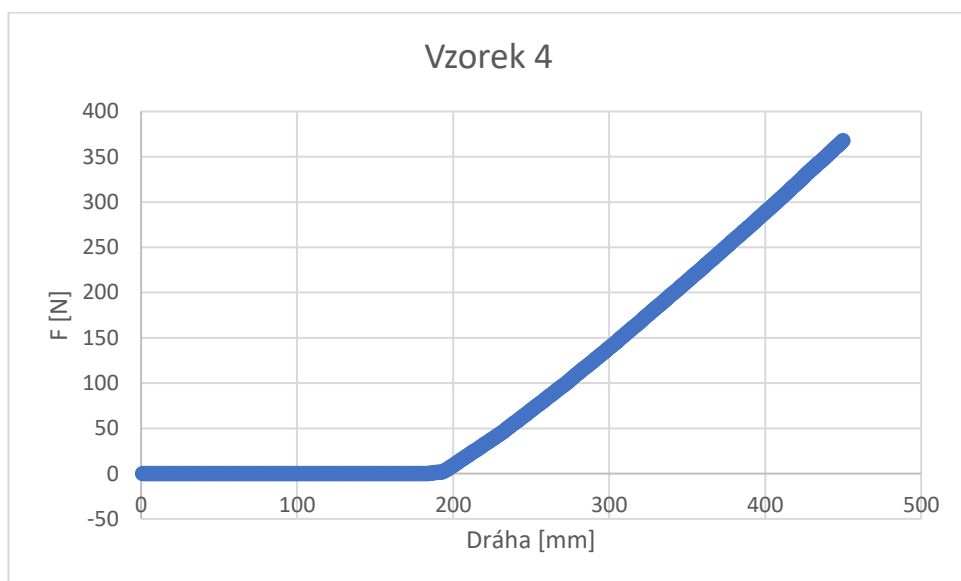
Zde se potvrdila teorie, že vzorky, u kterých byla pasta nanášena metodou šablonového tisku, mají větší mechanickou pevnost než vzorky, u kterých byla pasta nanášena dispenzínem. Hodnoty jsou si s předchozím experimentem velmi podobné.



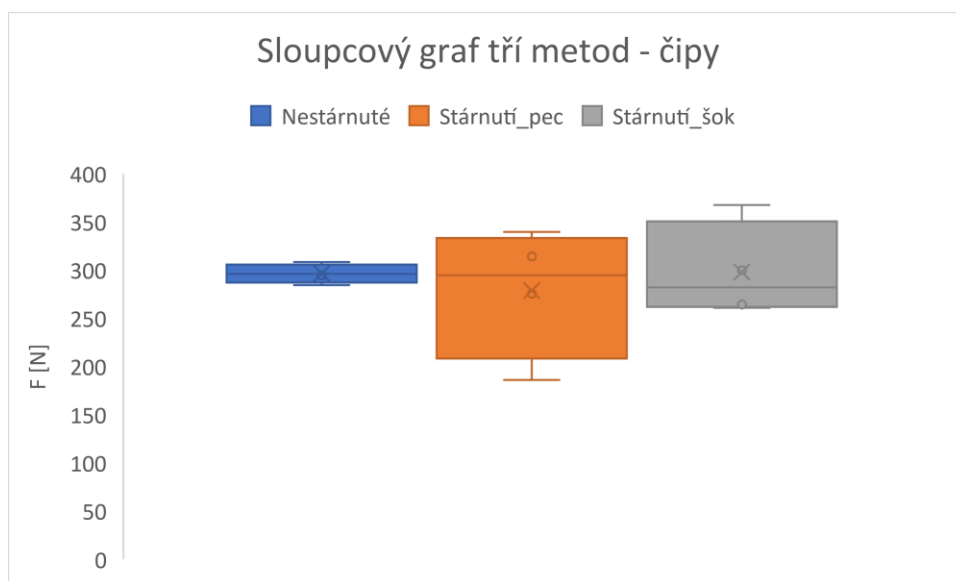
Obrázek 53 – RTG snímky vzorků



Obrázek 54 – Porovnání RTG snímku se sintrovaným spojem (šab. tisk 4)



Obrázek 55 – Graf měření mechanické pevnosti spoje



Obrázek 56 – Sloupcový graf tří metod testování vzorků

Souhrn: Z těchto tří experimentů na mechanickou pevnost si byly vzorky velmi podobné. V experimentu bez stárnutí byla maximální hodnota 308,32 N, v experimentu stárnutí v peci byla maximální hodnota u šablonového tisku, konkrétně 339,33 N a v experimentu stárnutí v šokové komoře byla maximální hodnota také u šablonového tisku, a to 367,6 N. Rozdíl tedy oproti vzorkům bez stárnutí je, ale ne tak razantní jako u experimentu beztlakého sintrování dvou destiček.

4.4 Zhodnocení

V této kapitole bylo navrženo a otestováno několik druhů vzorků s různými metodami nanášení sintrovací pasty, různými metodami zasušení sintrovací pasty a následně provedenými testy se zhodnocením výsledků. Bylo potřeba řešit několik problémů co se týče testování vzorků, ale i samotného návrhu vzorků a nanášení pasty.

Závěr

Předkládaná práce se zabývá kontaktováním výkonových součástek pomocí metody sintrování. Úvodní část je věnována přehledu jednotlivých metod kontaktování, z hlediska vlastností a výhod/nevýhod daných metod.

Velká část teoretické práce je zaměřena na samotné sintrování, metody nanášení pasty a sintrovací materiály. Zde je rozebrán princip sintrování a rozdíl mezi sintrovacími pastami využívanými pro vytváření buď motivů na substrát, a nebo sintrovací pasty využívané pro vytvoření spoje. Následně jsou v práci vysvětleny metody nanášení a jejich výhody/nevýhody při jejím použití. Práce popisuje výběr sintrovací pasty vhodné pro experimentální část a zhodnocení vlastností této pasty pro porovnání s ostatními pastami. Probíhala tedy komunikace s výrobcí sintrovacích past ohledně ceny a dostupnosti pasty. Byla vybrána sintrovací pasta NanoTach od firmy NBE Tech jako optimální varianta. Nevyžaduje sintrování pod tlakem, umožňuje sintrování součástek až do ploch 100 mm² a není ji nutné skladovat při nízkých teplotách. Poslední bod této kapitoly porovnává vlastnosti metod kontaktování.

Pro další část práce bylo potřeba vyhledat používané motivy pro testování sintrovaných spojů a na základě těchto motivů navrhnout vlastní testovací motiv. Vytvořený spoj bylo nutné nějakým způsobem zhodnotit, a proto bylo potřeba nalézt nejvhodnější hodnotící metodu pro vyhodnocení kvality sintrovaného spoje. Byly zvoleny testovací postupy na klimatické testy suchým teplem a na šokovou změnu teploty, dále na testování metodou shear testu. Všechny tyto údaje byly využity do poslední závěrečné kapitoly samotného testování vzorků.

V poslední kapitole bylo nejdůležitější navrhnout testované vzorky a motiv, který bude natištěn na tyto vzorky. Pro tyto účely byly využity informace z předchozích kapitol. Po finálním zhotovení vzorků kdy, již byly připraveny na testování, bylo nutné zvolit vhodnou nanášecí metodu sintrovací pasty. Pro tyto účely byla zvolena metoda šablonového tisku. Dále byly vytvořeny vzorky s dvěma druhy motivů. První s Ag vrstvou, které byly využity pro finální testování vzorků a Cu vzorky, které byly použity jako zkušební. Na těchto vzorcích se testovaly různé způsoby nanášení pasty, různý čas zasušení pasty, nebo teplotní profily při sintrování. Hlavní podstatou zkušebních vzorků bylo vytvořit kvalitní sintrovaný spoj bez voidů nebo odplyňovacích kanálek. Pro tento úkol je nejdůležitější zasušení pasty, při kterém dochází k odpařování rozpouštědla z pasty. Proto bylo velmi důležité najít nejvhodnější dobu zasušení

pasty. Ta byla nakonec zvolena na 24 h při laboratorních podmínkách. K vyřešení tohoto problému mělo pomoci i přenastavení teplotního profilu tak, aby byla delší doba zasušení pasty. Další komplikací bylo velké roztékání pasty při nanesení velkého množství sintrovacího materiálu. Proto bylo hledáno optimální řešení nanesení pasty. Pasta se nakonec nanášela pouze na jeden testovací motiv ze dvou spojovaných. Takto připravené vzorky se nechaly sintrovat pod tlakem (větší hustota výsledné Ag vrstvy) nebo bez tlaku.

Když se podařilo na testovaných vzorcích vytvořit vyhovující spoj, bylo možné se přesunout k testování finálních vzorků s Ag motivem. Z těchto vzorků bylo vytvořeno 45 přípravků tvořených ze dvou keramických destiček a 36 přípravků keramických destiček s čipy. Tyto vzorky byly rozděleny vždy do třech skupin (15+15+15; 12+12+12) na různé testování. První skupina (15; 12) byla testována ihned po zasintrování metodou shear testu. Druhá skupina vzorků byla vložena do pece na stárnutí suchým teplem a poslední skupina byla vložena do šokové komory. Následně byly podrobeny také shear testu.

Z těchto testů vykazovaly největší pevnost sintrovaného spoje vzorky tvořené spojením dvou keramických substrátů, které byly vloženy do pece na stárnutí suchým teplem. Síly nutné k odtržení dosahovaly hodnot až 599 N. Naopak nejnižší pevnost měly vzorky tvořené ze dvou destiček vložené do šokové komory. Ze všech měřených vzorků měly nejnižší hodnotu kolem 44 N.

Sintrování má velmi slibnou budoucnost, oproti pájeným spojům neobsahuje nežádoucí olovo, má až desetinásobně delší životnost, lepší tepelnou vodivost (pájený spoj 50 W/m K; sintrovaný spoj 150-200 W/m K) a možnost vyšších pracovních teplot. Pájka má bod tání okolo 200 °C (záleží na složení pájky) a sintrovaný spoj má bod tání při 961 °C. Proto je metoda sintrování vhodná pro vytvoření spojů, které se využívají v součástkách výkonové elektroniky. Naopak mechanická pevnost je v porovnání s pájeným spojem velmi podobná. Jistou nevýhodou jsou vysoké náklady na sintrovací materiály, neboť obsahují stříbro.

Seznam literatury

- [1] GIRAŠEK, Tomáš. Substráty pre výkonovú elektroniku [online]. 2015, **8**(8), 1–16. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=18118&output=pdf>
- [2] J. HLÍNA, J. ŘEBOUN, A. Hamáček. Adheze a pájitelnost TPC substrátů v závislosti na koncentraci kyslíku ve vypalovacím procesu. 2016.
- [3] P.MACH, V. SKOČIL, J. Urbánek. *Montáž v elektronice, pozdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [4] MRAZ, Stephen. What's the Difference Between Soldering, Brazing, and Welding? *Machine Design* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/fasteners/whats-difference-between-soldering-brazing-and-welding>
- [5] J. URBÁNEK, E. Klabačka. *Technologie elektronických zařízení*. B.m.: Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01551-3.
- [6] HIRMAN, Martin. Disertační práce. 2017.
- [7] J. STARÝ, P. Kahle. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. 2011. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2635621-Ing-jiri-stary-ph-d-ing-petr-kahle-plosne-spoje-a-povrchova-montaz.html>
- [8] *Chip-on-Board (COB)* [online]. 2005. Dostupné z: <http://eesemi.com/cob.htm>
- [9] *Chip-On-Board (COB)* [online]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/11233/chip-on-board-cob>
- [10] JAIN, Preeti. *COB ICs* [online]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/articles/cob-ics>
- [11] LEE, Ning-Cheng. Processes and Troubleshooting : SMT , BGA , CSP and. *Flux*. nedatováno.
- [12] ABEL, M. *Technologie povrchové montáže: Technologie povrchové montáže*. 2000. ISBN ISBN 80-902-7331-9.
- [13] KLÍMA, F. Tištěné součástky pro elektroniku. 2016.
- [14] ELECTRONICSMAKER. *Revival of SMT glue, core issues and latest jet dispensing technology* [online]. 2017. Dostupné z: <https://electronicsmaker.com/revival-of-smt-glue-core-issues-and-latest-jet-dispensing-technology>
- [15] SIOW, Kim S. Mechanical properties of nano-silver joints as die attach materials. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2012, **514**, 6–19. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2011.10.092
- [16] YAN, Fang Chun, Yuan TENG, Ji Kang YAN, Jing Hong DU, Jian Hong YI, Jian YANG a Guo You GAN. Effects of Paste Composition and Sintering Process on Performance of Silver Paste for Silicon Solar Cells. *Materials Science Forum* [online]. 2016, **849**(51262017), 852–859. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/msf.849.852
- [17] *NanoTach® (nanosilver paste): X Series* [online]. Dostupné z: <http://www.nbetech.com/products.shtml>
- [18] *LOCTITE ABLESTIK SSP 2020* [online]. Dostupné z: https://www.henkel-adhesives.com/uk/en/product/adhesives/loctite_ablestikssp2020.html
- [19] TWPROBERTMCKEOWN. *Loctite Ablestik SSP 2020* [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.robertmckeown.com/blog/loctite-ablestik-ssp-2020/>

- [20] *mAgic® Sinter Pastes for high performance applications* [online]. Dostupné z: https://www.heraeus.com/en/het/products_and_solutions_het/sinter_materials/sinter_materials___page.aspx
- [21] PERCENTAGE, Flux a Flux CORE. Lead Free Solder SAC305 Lead Free Solder Sn96 (SAC 305) Features / Benefits Lead free Exceeds the impurity requirements of J-Std-006 Lead Free Solder SAC305. 2010, **96**(Sac 305), 3–4.
- [22] BRAUNWARTH, Louisa, Sebastian AMRHEIN, Timo SCHRECK a MICHAEL KALOUDIS. Ecological comparison of soldering and sintering as die-attach technologies in power electronics. *Cleaner Production 102* [online]. 2015. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.100
- [23] LI-NGEE, Ho a Nishikawa HIROSHI. Properties of Cu Filled Electrically Conductive Adhesive (ECA) Affected by Viscosity of the ECA Paste. *Transactions of JWRI*. 2013, **42**(2), 25–28.
- [24] HLÍNA, J, Jan ŘEBOUN a Aleš HAMÁČEK. Vlastnosti měděných a stříbrných tlustých vrstev na keramických substrátech Properties of Copper and Silver Thick Films on Ceramic Substrates [online]. 2017, **7403**, 4. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/26467>
- [25] LEI, T.G. a J.N. CALATA. Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Attaching Large-Area $100\sim\{\text{mm}\}^2$ Chips. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* [online]. 2010, **33**(1), 98–104. ISSN 1521-3331. Dostupné z: doi:10.1109/TCAPT.2009.2021256
- [26] SCHMITT, Wolfgang. New silver contact pastes from high pressure sintering to low pressure sintering. *Electronics System Integration Technology Conference, ESTC 2010 - Proceedings* [online]. 2010, **49**(0), 1–6. Dostupné z: doi:10.1109/ESTC.2010.5642933
- [27] CHEW, Ly May, Wolfgang SCHMITT, Christian SCHWARZER a Jens NACHREINER. Micro-Silver Sinter Paste Developed for Pressure Sintering on Bare Cu Surfaces under Air or Inert Atmosphere. *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference* [online]. 2018, **2018-May**, 323–330. ISSN 05695503. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2018.00056
- [28] HLÍNA, J, Jan ŘEBOUN a Aleš HAMÁČEK. Vlastnosti měděných a stříbrných tlustých vrstev na keramických substrátech Properties of Copper and Silver Thick Films on Ceramic Substrates. 2017, **7403**, 4.
- [29] JAROSLAV, VÝBORNÝ & ANTON, Trník. Lab Guide Department of Materials Engineering and Chemistry. *Chapter 16 . Determination of Thermal Conductivity*. 2012, 87–90.