

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

# **DISERTAČNÍ PRÁCE**

Plzeň, 2017

Ing. Martin Hirman



**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DISERTAČNÍ PRÁCE**

k získání akademického titulu doktor v oboru

Elektronika

**Ing. Martin Hirman**

## **Materiálové a procesní aspekty připojování součástek na flexibilní substráty**

Školitel: doc. Ing. František Steiner, Ph.D.  
Datum státní doktorské zkoušky: 24. června 2015  
Datum odevzdání práce: 6. června 2017

**Plzeň, 2017**



**FACULTY OF ELECTRICAL  
ENGINEERING**  
UNIVERSITY  
OF WEST BOHEMIA

**DEPARTMENT OF TECHNOLOGIES AND MEASUREMENT**

# **DISSERTATION THESIS**

to earn of an academic degree Ph.D. in field

Electronics

**Ing. Martin Hirman**

**Material and process aspects of  
components connecting to flexible  
substrates**

Supervisor: doc. Ing. Frantisek Steiner, Ph.D.  
Date of the state doctoral exam: 24<sup>th</sup> June 2015  
Date of the thesis submission: 6<sup>th</sup> June 2017

**Pilsen, 2017**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Plzni dne 6.6.2017

.....  
Podpis

## **Poděkování**

Rád bych využil tuto příležitost a poděkoval svému školiteli doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady při jejím zpracování, a za přátelský přístup při mém vedení.

Rovněž bych rád poděkoval kolegům z Katedry technologií a měření, kteří mi pomáhali a poskytovali cenné rady v průběhu mého studia.

## **Anotace**

Tato práce se věnuje problematice propojování součástek s flexibilními substráty s ohledem na odlišné vlastnosti spojů oproti standardním tuhým substrátům. V první části práce je tato problematika popsána v teoretické rovině. Konkrétně je zde popsána technologie pájení a vodivého lepení, dále jsou zde zmíněny typy substrátů se zaměřením na flexibilní substráty a v neposlední řadě je zde popsán současný stav problematiky elektricky vodivých lepidel a flexibilních substrátů. Ve druhé části této práce jsou popsány jednotlivé experimenty týkající se této problematiky, především se jedná o experimenty zaměřené na oblasti týkající se vytvrzování elektricky vodivých lepidel, množství naneseného lepidla, tvaru naneseného lepidla, procenta dotvrzení lepidla, a také čištění a drsnosti substrátů. Zároveň tato práce obsahuje i část týkající se pájených spojů, které lze za určitých podmínek rovněž využít při kontaktování součástek na flexibilní substráty. V neposlední řadě je zde zmíněno množství rad a doporučení pro aplikaci vodivých lepidel a flexibilních substrátů v praxi.

## **Klíčová slova:**

Flexibilní substrát, elektricky vodivé lepidlo, lepené spoje, pájené spoje.

## **Abstract**

This thesis deals with interconnection of components with flexible substrates considering the different properties compared to the standard rigid substrates. This topic is explained theoretically in the first part of the thesis. Especially, the soldering technology, gluing technology, types of flexible substrates and the state of art of electrically conductive adhesives and flexible substrates are described in the first part. The second part deals with the performed experiments focused on fields of curing of electrically conductive adhesives, quantity of applied adhesive, shape of applied adhesive, percentage of adhesive cure and also substrates cleaning and roughening. The field of soldered joints is also mentioned in this thesis. The soldering can be used for connection of components with flexible substrates if specific conditions are respected. Last but not least, the advices and recommendations for the application of electrically conductive adhesives and flexible substrates in practice are mentioned.

## **Key words:**

Flexible substrate, electrically conductive adhesive, glued joint, soldered joint.

141 pages

97 figures

13 tables

2 appendixes

## Použité zkratky

<b>ACA</b>	Anisotropic Conductive Adhesive = Anizotropní vodivá lepidla
<b>AJP</b>	Aerosol Jet printing – technologie tisku tekutých materiálů ve 3D
<b>BPMN</b>	Business Process Model and Notation = Metodika mapování procesů
<b>DMA</b>	Dynamic Thermomechanical Analysis = Dynamicko - mechanická analýza
<b>DOE</b>	Design of Experiments = Metodika pro návrh experimentů
<b>DPS</b>	Deska Plošných Spojů
<b>DSC</b>	Differential Scanning Calorimetry = Diferenční skenovací kalorimetrie
<b>ECA</b>	Electrically Conductive Adhesive = Elektricky vodivá lepidla
<b>ENIG</b>	Electroless Nickel Immersion Gold – Povrchová úprava vodivé vrstvy DPS, která je chemicky poniklována a poté chemicky pozlacena
<b>FDPS Ag</b>	Flexibilní Deska Plošných Spojů MELINEX® ST504 se stříbrnou vodivou vrstvou DuPont 5064H
<b>FDPS Cu</b>	Flexibilní Deska Plošných Spojů DuPont™ Pyralux® AC s měděnou vodivou vrstvou bez povrchové úpravy
<b>FDPS</b>	Flexibilní Deska Plošných Spojů
<b>FEPA</b>	Federation of European Producers of Abrasives = Svaz evropských výrobců brusného materiálu
<b>HAL</b>	Hot Air Levelling - Povrchová úprava vodivé vrstvy DPS, na kterou je ponorem nanesena vrstva pájecí slitiny (cínu)
<b>ICA</b>	Isotropic Conductive Adhesive = Izotropní vodivá lepidla
<b>LED</b>	Light Emitting Diode = světelná dioda
<b>OSP</b>	Organic Solderability Preservative - Povrchová úprava vodivé vrstvy DPS, na kterou je nanesen organický povlak bránící její oxidaci
<b>OSP</b>	Organic Solderability Preservative = Ochranná organická vrstva
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board = Deska plošných spojů



---

<b>PEN</b>	Polyethylennaftalát - jedná se o nosný materiál používaný pro výrobu flexibilních DPS
<b>PET</b>	Polyethylentereftalát – jedná se o nosný materiál používaný pro výrobu flexibilních DPS
<b>% RH</b>	Procento relativní vlhkosti (= Relative Humidity)
<b>RoHS</b>	Restriction of Hazardous Substances = Omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních
<b>SAC</b>	Sn-Ag-Cu pájecí slitina
<b>SMD</b>	Surface Mount Device = Součástky určené pro povrchovou montáž
<b>TDPS Cu</b>	Tuhá Deska Plošných Spojů s povrchovou úpravou čistá měď
<b>TFT</b>	Thin Film Tranzistor = Tenkovrstvý tranzistorový displej
<b>THT</b>	Through-Hole Technology = Technologie součástek s drátovými vývody
<b>TMA</b>	Thermo-Mechanical Analysis = Termická mechanická analýza
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency = Ultra Krátké Vlny
<b>WEEE</b>	Waste Electrical and Electronic Equipment = Odpadní elektrická a elektronická zařízení

## Použité veličiny a jednotky

**$F_{MAX}$  [N]** Maximální síla potřebná k odtržení součástky [Newton]

**$R$  [ $\Omega$ ]** Elektrický odpor [Ohm]

**$R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]** Aritmetická střední výška drsnosti [Mikrometr]

**$R_z$  [ $\mu\text{m}$ ]** Maximální výška drsnosti [Mikrometr]

**$\gamma_{kp}$  [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ]** Mezifázová energie na rozhraní kapalin – plyn [Joule na metr čtvereční]

**$\gamma_{lk}$  [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ]** Mezifázová energie na rozhraní pevná látka – kapalina [Joule na metr čtvereční]

**$\gamma_{lp}$  [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ]** Mezifázová energie na rozhraní pevná látka – plyn [Joule na metr čtvereční]

**$\theta$  [ $^\circ$ ]** Smáčecí úhel [Stupeň]

# Obsah

<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>14</b>
<b>1 PROPOJOVÁNÍ SOUČÁSTEK A SUBSTRÁTŮ</b>	<b>16</b>
1.1 MĚKKÉ PÁJENÍ	16
1.1.1 Olovnaté pájecí slitiny	17
1.1.2 Bezolovnaté pájecí slitiny	18
1.2 VODIVÉ LEPENÍ	19
1.2.1 Anizotropní vodivá lepidla	21
1.2.2 Izotropní vodivá lepidla	22
1.2.3 Nevodivá lepidla	24
1.3 DEGRADAČNÍ MECHANISMY ELEKTRICKY VODIVÝCH LEPIDEL	25
1.3.1 Degradáčn <span>í</span> mechanismy vazebn <span>í</span> složky	27
1.3.2 Degradáčn <span>í</span> mechanismy plniva	28
1.4 SUBSTRÁTY	28
<b>2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b>	<b>31</b>
2.1 POUŽÍVANÉ FLEXIBILNÍ SUBSTRÁTY	31
2.1.1 Tvorba vodivých motivů na flexibilních substrátech	33
2.1.2 Aktuální dostupnost flexibilních substrátů v České republice	33
2.2 ZPŮSOBY PROPOJOVÁNÍ FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ	34
2.3 ROZDĚLENÍ VODIVÝCH LEPIDEL	35
2.3.1 Používaná vodivá lepidla	35
2.3.2 Aktuální dostupnost vodivých lepidel	37
2.4 ZKOUMANÉ VLASTNOSTI VODIVÝCH LEPIDEL	37
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – ELEKTRICKY VODIVÉ LEPENÍ</b>	<b>41</b>
3.1 PRVNÍ EXPERIMENT - POROVNÁNÍ LEPIDEL, SUBSTRÁTŮ A TEPLOTNÍCH PROFILŮ	42
3.1.1 Materiály pro první experiment	42
3.1.2 Popis prvního experimentu	44
3.1.3 Měření mechanické pevnosti lepeného spoje	47
3.1.4 Výsledky prvního experimentu	48
3.2 DRUHÝ EXPERIMENT – VLIV MNOŽSTVÍ LEPIDLA NA MECHANICKOU PEVNOST SPOJE	57
3.2.1 Popis druhého experimentu	57
3.2.2 Výsledky druhého experimentu	59
3.3 TŘETÍ EXPERIMENT – VLASTNOSTI LEPENÉHO SPOJE PŘI MECHANICKÉM NAMÁHÁNÍ OHYBEM	70
3.3.1 Popis třetího experimentu	71
3.3.2 Výsledky třetího experimentu	74
3.4 ČTVRTÝ EXPERIMENT - VLIV TVARU ŠABLONY NA MECHANICKOU PEVNOST A ELEKTRICKÝ ODPOR	76
3.4.1 První část čtvrtého experimentu	76
3.4.2 Druhá část čtvrtého experimentu	81
3.5 PÁTÝ EXPERIMENT – VLIV VYTVRZENÍ VODIVÉHO LEPIDLA NA MECHANICKOU PEVNOST LEPENÉHO SPOJE	86
3.5.1 Popis pátého experimentu	87
3.5.2 Výsledky pátého experimentu	88
3.6 ŠESTÝ EXPERIMENT – VLIV ČIŠTĚNÍ A DRSNOSTI SUBSTRÁTU NA MECHANICKOU PEVNOST LEPENÉHO SPOJE	92
3.6.1 První část šestého experimentu	92
3.6.2 Druhá část šestého experimentu	94
3.6.3 Třetí část šestého experimentu	97
3.6.4 Čtvrtá část šestého experimentu	99
3.6.5 Výsledky čtvrté části šestého experimentu	102

<b>4</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - PÁJENÍ</b>	<b>104</b>
4.1	SEDMÝ EXPERIMENT – VLIV ČIŠTĚNÍ DPS NA MECHANICKOU PEVNOST PÁJENÝCH SPOJŮ	104
4.1.1	<i>Popis sedmého experimentu</i>	104
4.1.2	<i>Výsledky sedmého experimentu</i>	106
4.2	OSMÝ EXPERIMENT – VLIV MNOŽSTVÍ PÁJECÍ PASTY NA VLASTNOSTI PÁJENÉHO SPOJE	108
4.2.1	<i>Popis osmého experimentu</i>	109
4.2.2	<i>Výsledky osmého experimentu</i>	111
4.2.3	<i>Shrnutí osmého experimentu</i>	115
4.3	DEVÁTÝ EXPERIMENT – TESTOVÁNÍ PÁJENÍ NA VLASTNÍCH FLEXIBILNÍCH AG SUBSTRÁTECH	115
4.3.1	<i>Popis devátého experimentu</i>	116
4.3.2	<i>Výsledky devátého experimentu</i>	116
4.4	DESÁTÝ EXPERIMENT - TESTOVÁNÍ VLASTNÍCH FLEXIBILNÍCH SUBSTRÁTŮ PRO PÁJENÍ NÍZKOTEPLTNÍ SLITINOU	118
4.4.1	<i>Popis desátého experimentu</i>	118
4.4.2	<i>Výsledky desátého experimentu</i>	119
	<b>ZÁVĚR</b>	<b>120</b>
	<b>CONCLUSION</b>	<b>123</b>
	<b>ABSCHLUSS</b>	<b>127</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	<b>131</b>
	<b>SEZNAM PUBLIKACÍ STUDENTA</b>	<b>139</b>
	<b>PŘÍLOHY:</b>	<b>142</b>
PŘÍLOHA A.	SEZNAM TESTOVANÝCH VZORKŮ V PRVNÍM EXPERIMENTU	142
PŘÍLOHA B.	SEZNAM HMOTNOSTÍ VZORKŮ TESTOVANÝCH V PRVNÍM EXPERIMENTU	144

## Úvod

Elektricky vodivý lepený spoj se využívá k propojování elektronických součástek při výrobě elektronických zařízení tam, kde není možné využít pájený spoj. Lepený spoj, stejně jako pájený, má za úkol zajistit nejen elektrické propojení, ale i mechanickou fixaci součástky. Pro vytvoření kvalitního spoje se dříve používala především cín-olovnatá pájecí slitina, která je ovšem díky směrnici Evropské unie RoHS (Restriction of Hazardous Substances) a WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) až na výjimky zakázána. Proto je dnes nahrazována zpravidla bezolovnatou pájecí slitinou, avšak u některých aplikací není možné bezolovnatou slitinu použít a je využíváno právě elektricky vodivých lepidel.

Kvalita elektricky vodivého lepeného spoje je ovlivněna velkou řadou faktorů, které na tento spoj působí. Výběr vodivého lepidla, kterých existuje na trhu poměrně velké množství, je jedním z faktorů. Dalšími faktory, které lepený spoj ovlivňují, jsou vytvrzovací profil, množství lepidla, způsob nanášení lepidla, druh lepeného povrchu, drsnost a čistota lepeného povrchu, teplota a délka skladování lepidla a v neposlední řadě také typ použitého substrátu. Ze současného stavu poznání lze usuzovat, že elektricky vodivá lepidla nemohou plně nahradit klasický pájený spoj. Lze však nalézt aplikace, u kterých je použití vodivého lepení výhodnější než využití pájení. Jedním z možných využití elektricky vodivých lepidel se jeví použití těchto lepidel k osazení součástek nebo konektorů na flexibilní substráty.

Tato práce je věnována právě zmíněné problematice a zkoumá vlastnosti lepených a pájených spojů s ohledem na flexibilní substráty s cílem zlepšit jejich vlastnosti a zvýšit jejich spolehlivost. Vzhledem k rozvoji využívání těchto substrátů v mnoha oblastech elektroniky je řešení této problematiky více než aktuální.

## Cíle disertační práce

Technologie elektricky vodivého lepení jako celek je velice náročný proces, který ovlivňuje celá řada faktorů a vnějších vlivů. Aby byla dosažena požadovaná kvalita lepených spojů, je nutné mít tento proces dokonale řízený a brát v potaz při jeho optimalizaci veškeré působící faktory. Na základě rešeršní činnosti problematiky elektricky vodivých lepidel vyplynulo, že tato problematika je aktuální a je vhodné se zabývat otázkami, jaké parametry ovlivňují kvalitu výsledného lepeného spoje a celé elektronické sestavy. Při bližším pohledu na problematiku elektricky vodivých lepidel v souvislosti s jejich uplatněním na flexibilních substrátech, která je popsána v teoretické části této práce je zřejmé, že v současnosti dochází k rozvoji tohoto odvětví. Testování vlastností elektricky vodivých lepených spojů na již zmíněných flexibilních substrátech je důležitým krokem k jejich masivnějšímu využití v praxi. Na základě této rešeršní činnosti byl zvolen postup pro zkoumání elektricky vodivých lepených spojů a byly stanoveny cíle této disertační práce.

Hlavním cílem disertační práce je ověření mechanických i elektrických vlastností lepených spojů využívaných pro aplikace na flexibilních substrátech. Tyto vlastnosti jsou v rámci této disertace zároveň porovnány s vlastnostmi lepených spojů na tuhých substrátech.

Dílčím cílem disertační práce je optimalizace procesních a materiálových vlivů pro dosažení vyšší kvality a spolehlivosti lepených spojů. Optimalizace je provedena především s ohledem na energetickou náročnost a rychlost výroby s ověřením možností využití nových vytvrzovacích technologií (např. „snap cure“ = velmi rychlé vytvrzení při vysoké teplotě, které bývá zpravidla realizováno s pomocí horké desky), a dále s ohledem na snížení nákladů za pomoci redukce množství použitého elektricky vodivého lepidla.

Dalším dílčím cílem je ověření vlastností a životnosti lepených spojů na flexibilních substrátech pomocí aplikace metod zrychleného stárnutí. Flexibilní substráty jsou v průběhu jejich používání namáhány odlišně oproti tuhým substrátům (mohou být ohýbány, nošeny, prány v pračce, apod.). Tyto odlišnosti bylo nutné zohlednit také při výběru metod zrychleného stárnutí spojů na těchto substrátech.

Posledním dílčím cílem práce, který se prolíná všemi realizovanými experimenty, je na základě výsledků zmíněných experimentů definovat doporučení pro využití

jednotlivých nalezených zlepšení v praxi. Tato doporučení slouží, především v předvýrobní a výrobní etapě, pro získání optimálních procesních a materiálových nastavení procesu lepení zajišťujících kvalitní lepené spoje a spolehlivá elektronická zařízení.

# 1 Propojování součástek a substrátů

Tato kapitola se zabývá problematikou propojování elektronických součástek se substráty. Je zde zmíněna problematika měkkého pájení, dále je popsána problematika vodivého lepení, které se věnuje tato práce, a v neposlední řadě i problematika flexibilních substrátů.

Součástka musí být propojena se substrátem elektricky, ale i mechanicky. Musí být tedy zajištěna co nejlepší elektrická vodivost spojení, dále co nejlepší mechanická pevnost spoje a v neposlední řadě co nejlepší tepelná vodivost spoje pro odvod ztrátového tepla. Zvolený způsob propojení musí být taktéž ekonomicky efektivní a dostatečně spolehlivý. V historii se nejprve k propojení součástek využívali mechanické spoje, nejčastěji pak šroubové spojení. Také byly testovány technologie svařovaných spojů, případně ovíjených spojů, které se ale příliš neujaly. Tyto technologie měly mnoho nevýhod, a proto se od nich postupem času ustoupilo a začala se využívat technologie měkkého pájení. [1], [2]

## 1.1 Měkké pájení

Pájení je v podstatě metalurgické spojení dvou materiálů. Při pájení se tyto materiály přímo netaví, ale taví se a následně tuhne pouze přídavný kovový materiál, který je nazýván pájecí slitina. Z tohoto jednoduchého principu vyplývá, že teplota tavení pájecí slitiny je vždy nižší než teploty tavení spojovaných materiálů. Pro pájení v elektronice se používají pájecí slitiny s teplotou tavení maximálně 450°C. Takové pájení se nazývá měkké. [1], [2]

Při měkkém pájení je vždy nutné dodat do spoje pájecí slitinu a zabezpečit čistotu pájených ploch. K tomu se nejčastěji využívá tavidla, které redukuje oxidační vrstvy na pájené ploše a tím zlepšuje smáčivost pájené plochy. Tavidlové zbytky však způsobují problémy při užívání zařízení a snižují jeho životnost. Z tohoto důvodu je potřeba tyto zbytky po pájení očistit. Další možností, kromě použití tavidla je očištění pájených ploch před pájením a zabezpečení inertní atmosféry při pájení. K očištění pájených ploch lze využít plasmové čištění v dusíkové atmosféře nebo čištění ultrazvukem opět v dusíkové atmosféře, aby nedošlo ke druhotné oxidaci pájeného povrchu. Na spolehlivost pájeného spoje mají vliv i další aspekty, kromě jiných jsou velmi důležité intermetalické



sloučeniny, které jsou v určité míře prospěšné, ale ve větší míře snižují spolehlivost pájeného spoje.

Na počátku této technologie existovalo pouze ruční pájení, které však mělo své velké nevýhody. Proto byla v 60. letech 20. století vyvinuta strojní technologie pájení ponorem a především vlnou. Technologie pájení vlnou v sériové výrobě nahradila ruční pájení, které se dodnes používá pro vývojové a kusové výroby a též na opravy. [1], [2]

Základní princip pájení vlnou je poměrně jednoduchý. Zařízení pro pájení vlnou je součástí výrobní linky a je složeno ze zóny pro nanášení tavidla, zóny předehřevu, zóny pájení a zóny chlazení. Samotné pájení probíhá tak, že čerpadlo čerpá roztavenou pájecí slitinu, která tvoří pájecí vlnu, přes kterou prochází na vodícím pásu DPS s THT součástkami, popřípadě s přilepenými SMD součástkami. [1], [2]

Další důležitou technologií strojního pájení je pájení přetavením. Princip této technologie spočívá v nanesení pájecí slitiny na DPS ve formě pájecí pasty. Tato pasta je složena z částic pájecí slitiny a z tavidla. Do pájecí pasty jsou poté osazeny součástky a celá osazená DPS je vložena do přetavovací pece, kde následuje ohřev na teplotu předehřevu a poté přetavení pájecí pasty. Přetavovací pece mohou být dávkové nebo průběžné. Tato technologie se využívá pro DPS osazené SMD součástkami. [1], [2]

Pájecí slitiny pro měkké pájení v elektronice jsou tvořeny kovy s nízkou teplotou tavení. Základní složkou pájecích slitin je dnes cín (Sn). Pájecí slitiny lze rozdělit na olovnaté a bezolovnaté. Jak již bylo naznačeno výše, využívá se pro jednotlivé druhy pájení různých forem pájecích slitin. Pro ruční pájení je využíváno trubičkové pájky, která bývá dutá a plněná tavidlem. Pro pájení vlnou se nejčastěji využívá pájecí slitina ve formě tyče. Pro pájení přetavením je pak využita pájecí slitina ve formě pájecí pasty, která se skládá z částic kovu, z tavidla a dalších příměsí, kterými je regulována viskozita pájecí pasty. [1], [2]

### 1.1.1 Olovnaté pájecí slitiny

V historii byly nejvíce využívány olovnaté pájecí slitiny. Tyto slitiny obsahovaly cín (Sn), olovo (Pb) a někdy i další prvky. Výhodou těchto slitin byla především poměrně nízká teplota tavení, nízká cena olova, dobrá zpracovatelnost, výborné smáčení měděného povrchu a dobré vlastnosti vzniklých spojů. Nejčastějším zástupcem olovnatých pájecích

slitin byla eutektická slitina Sn-Pb (63% Sn, 37% Pb). V případě, že je slitina eutektická, je teplota tuhnutí této slitiny nejnižší možná. V případě změny procentního složení přestává být slitina eutektickou a její teplota tuhnutí narůstá. Tato konkrétní eutektická slitina SnPb má teplotu tavení 183°C, což je relativně málo. [1], [3]

Vzhledem k legislativním požadavkům je však v současnosti používání pájecích slitin s obsahem olova větším než 0,1% povoleno jen pro speciální účely. Z důvodu toxicity olova začaly v 90. letech jednotlivé státy uvažovat o regulaci jeho používání při výrobě elektroniky. V lednu 2003 vydala Evropská unie dvě směrnice, které se týkají ochrany životního prostředí. Tyto směrnice jsou tedy od roku 2004, kdy vstoupila Česká republika do Evropské unie, závazné i pro nás. Směrnice (2002/95/EC *Restriction of Hazardous Substances – RoHS* [4]) se zabývá omezením používání určitých nebezpečných látek v elektrických a elektronických výrobcích. Tato směrnice však byla v lednu 2013 zrušena a nahradila ji směrnice (2011/65/EU *Restriction of Hazardous Substances – RoHS* [5]). Druhá směrnice (2002/96/EC *Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE* [6]) se zabývá bezplatným odběrem použitých elektronických zařízení, jejich zpracováním, využitím a odstraněním. Tato směrnice byla také nahrazena v roce 2012 novou směrnicí (2012/19/EU *Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE* [7]). Těmito směrnicemi se musí řídit také výrobci ze zemí mimo Evropskou unii, pokud chtějí své výrobky do Evropské unie dovážet. [3]

Směrnice 2011/65/EU [5] přinesla řadu změn, především však zpřísnění podmínek používání olova při pájení. Například zakázala použití olova při pájení v lékařských aplikacích. Na území České republiky jsou tyto směrnice přeneseny prostřednictvím zákona 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů [8], do kterého byly zmíněné směrnice implementovány, a který byl mnohokrát novelizován. Vzhledem k této legislativě jsou olovnaté pájecí slitiny až na určité výjimky, které jsou uvedené v [5] nebo [8] zakázané. Do budoucna lze pak předpokládat úplný zákaz používání olovnatých slitin v elektrotechnice.

### 1.1.2 Bezolovnaté pájecí slitiny

Z důvodů popsaných v kapitole 1.1.1 bylo tedy nutné přestat využívat osvědčené olovnaté pájecí slitiny. Jednou z možností jejich náhrady je použití bezolovnatých pájecích slitin. Výhodou těchto slitin je jejich nižší cena a lepší vlastnosti oproti lepeným

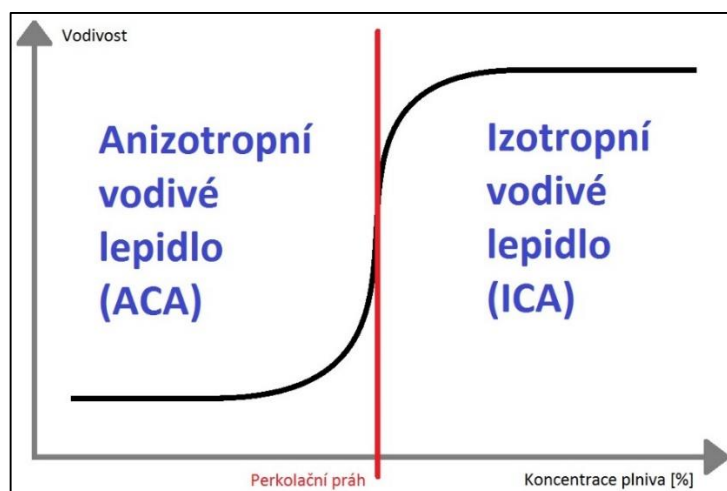
spojům, které se nabízejí jako alternativa k pájeným spojům. Tyto slitiny mají ale i nevýhody, především vyšší teplotu tavení a tedy vyšší teplotní namáhání celého zařízení oproti dříve používaným olovnatým pájecím slitinám. Další nevýhodou bezolovnaté pájecí slitiny oproti olovnaté je horší smáčivost, a také problémy s optickou inspekcí, protože bezolovnaté pájecí slitiny nejsou po správném přetavení lesklé jako olovnaté pájecí slitiny a nelze tedy pohledem poznat kvalitu pájeného spoje. Toto vyšší teplotní namáhání s sebou přináší vyšší požadavky na součástky a rovněž na DPS, což zvyšuje cenu celého procesu. Z těchto důvodů probíhá již delší dobu snaha nalézt takovou bezolovnatou pájecí slitinu, která bude mít podobnou teplotu tavení i podobné vlastnosti jako olovnatá pájecí slitina. V průběhu času bylo využito mnoho různých prvků a jejich kombinace, avšak nejčastěji je využívána kombinace cínu (Sn), stříbra (Ag) a mědi (Cu). Tato pájecí slitina má přijatelné vlastnosti i cenu a v nejčastějším složení pájky (SAC 305) s obsahem (96,5% Sn, 3% Ag, 0,5% Cu) je její teplota tavení 217°C.

## 1.2 Vodivé lepení

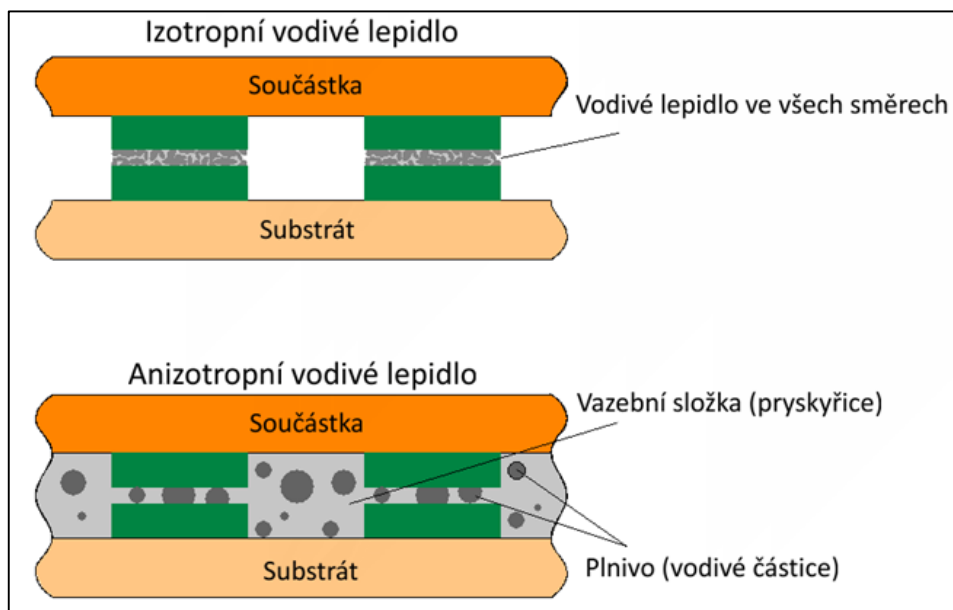
Druhou možností, jak olovnaté pájecí slitiny nahradit jsou elektricky vodivá lepidla (ECA). Tato technologie není nijak nová, a pro běžné aplikace není dnes příliš využívána. Důvody jsou především osvědčená a zvládnutá technologie pájení, a odlišné vlastnosti lepeného spoje od pájeného spoje. Výhodou lepeného spoje je kromě ekologičnosti rovněž možnost připojování vývodů o velmi malé rozteči (až do rozteče 0,1 mm), u technologie pájení je při takto malé rozteči problém s tvorbou můstků mezi vývody. Další výhodou je nižší vytvrzovací teplota oproti teplotě pájení bezolovnatou pájkou. Vytvrzovací teplota vodivých lepidel bývá zpravidla 100°C až 180°C, některá vodivá lepidla se dokonce vytvrzují při pokojové teplotě. Tyto teploty jsou tedy vždy nižší než teplota tavení běžných bezolovnatých pájecích slitin, která je v rozmezí 210°C až 225°C. Lepené spoje jsou také vhodné pro lepení teplotně citlivých součástek. V neposlední řadě je výhodou lepených spojů méně procesních kroků při tvorbě těchto spojů oproti pájeným spojům, což snižuje výrobní náklady těchto spojů. [9] Nevýhodou vodivých lepidel je jejich velká navlhavost, a rovněž nedostatečné dlouhodobé zkušenosti s vodivým lepením, a tedy obtížná predikce dlouhodobé spolehlivosti lepeného spoje. Další významnou nevýhodou je vyšší cena lepeného spoje oproti bezolovnatému

pájenému spoji. Lepené spoje mají o dva až tři řády nižší elektrickou vodivost než pájené spoje. Obvyklá vodivost lepeného spoje bývá cca.  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ . Oproti pájeným spojům mají lepené spoje i horší mechanické vlastnosti a tepelnou vodivost. [2], [9]–[11]

Elektricky vodivá lepidla (ECA) jsou složena ze dvou složek. První složkou je vazební složka (binder). Tato složka je tvořena pryskyřicí, která bývá zpravidla epoxidová. Kromě toho se využívají i pryskyřice silikonové nebo polyimidové. Funkcí této složky je vytvářet izolační matici, zajišťovat mechanické vlastnosti spoje, a také odolnost spoje proti vnějšímu prostředí. Vazební složka může být jednosložková nebo dvousložková. V případě jednosložkové se lepený spoj vytvrzuje při vyšší teplotě (cca.  $100^{\circ}\text{C}$  –  $180^{\circ}\text{C}$ ) a zpravidla kratší čas (cca. 30 min. – 120 min.). V případě dvousložkové je tato složka tvořena pryskyřicí a tvrdidlem. Tyto dvě složky se smíchají před použitím vodivého lepidla. Tento typ lepidel se zpravidla vytvrzuje při nižší teplotě a doba vytvrzování bývá spíše delší (až 140 h). Druhou složkou vodivého lepidla je plnivo (filler). Plnivo je tvořeno vodivými částicemi, zpravidla ve tvaru kuliček nebo šupinek o velikosti v řádu  $\mu\text{m}$ , případně ve tvaru nanotrubic. Materiál těchto kuliček je nejčastěji stříbro (Ag), ale lze použít i nikl (Ni), paladium (Pd), zlato (Au), uhlík (C), případně měděné pocínované nebo postříbřené kuličky nebo plastové pozlacené kuličky. Koncentrace vodivých částic ve vodivém lepidle může být od 10% až do 80%. Podle koncentrace vodivých částic lze rozlišovat lepidla s anizotropní elektrickou vodivostí (ACA) a lepidla s izotropní elektrickou vodivostí (ICA). Hranici mezi těmito typy lepidel tvoří tzv. perkolační práh (viz. Obrázek 1), který vyplývá z perkolační teorie. [2], [9], [11], [12]



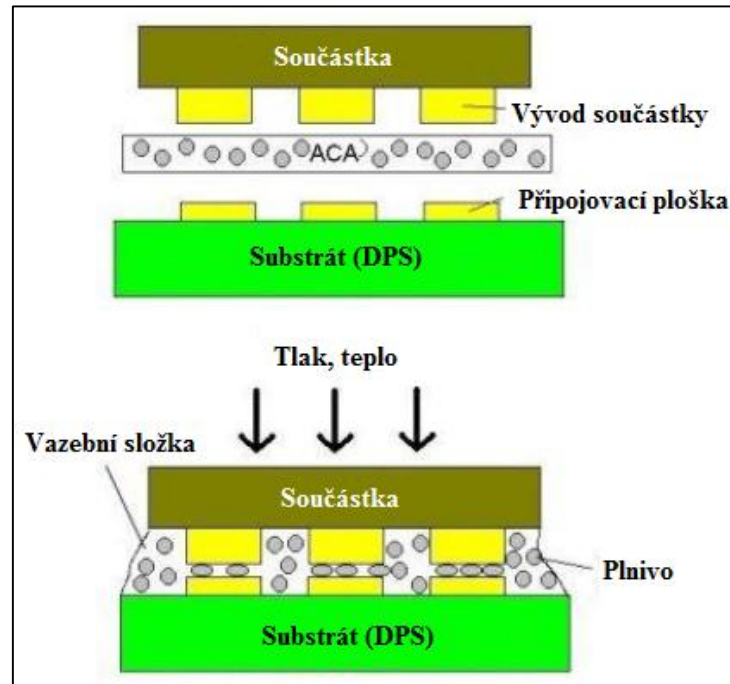
**Obrázek 1:** Typická perkolační křivka elektricky vodivých lepidel. [9]



**Obrázek 2:** Princip anizotropního (ACA) a izotropního (ICA) vodivého lepidla. [13]

### 1.2.1 Anizotropní vodivá lepidla

Tento typ lepidel se vyznačuje elektrickou vodivostí pouze ve směru kolmém na rovinu DPS. Ve směru rovnoběžném s DPS jsou tato lepidla nevodivá. U tohoto typu lepidel je koncentrace vodivých částic (plniva) nižší, zpravidla 5% až 20% objemu, zároveň bývají tyto částice spíše větší (5  $\mu\text{m}$  – 20  $\mu\text{m}$ ). Princip anizotropního vodivého lepidla je dobře patrný z přiložených obrázků (Obrázek 2 a Obrázek 3). Připojovací plošky součástky a substrátu jsou propojeny přitlačením součástky na substrát a vytvrzením lepidla. Vodivé částice, které jsou mezi ploškami, se deformují a vytvoří elektricky vodivé spojení vývodu s připojovací ploškou na DPS. Mezi jednotlivými vývody je však příliš málo vodivých částic, aby došlo ke komplexnímu propojení. Tento druh lepidel se v praxi využívá především u velmi malých vývodů, kde je lepidlo nanášeno na celou plochu DPS pod součástkou a následně je osazena součástka. Další možností je použití tohoto lepidla ve formě fólie, což zjednodušuje nanášení lepidla na DPS. Podmínkou pro tento druh lepení je, aby součástka měla poduškové vývody. V takovém případě se fólie přiloží na DPS a součástka, zpravidla integrovaný obvod, se namontuje za zvýšené teploty a tlaku. [2], [9]–[12], [14]



Obrázek 3: Princip anizotropního vodivého lepidla ve formě fólie. (ACA). [10]

## 1.2.2 Izotropní vodivá lepidla

Tento typ lepidel se vyznačuje elektrickou vodivostí ve všech směrech. Lze ho tedy považovat za přímou obdobu pájecí slitiny a někdy je též nazýván jako „polymerní pájecí slitina“. U tohoto typu lepidel je objemová koncentrace vodivých částic (plniva) vyšší, zpravidla 50% až 80% objemu lepidla, zároveň bývají tyto částice spíše menší (1  $\mu\text{m}$  - 5  $\mu\text{m}$ ). Izotropní vodivá lepidla se nanášejí na DPS zpravidla pomocí šablonového tisku, případně dispensingu, a jsou tedy nanášena pouze na připojovací plošky. Následně je do lepidla osazena součástka a lepidlo se teplem vytvrdí. Princip je patrný z obrázku výše (Obrázek 2). [2], [9], [11], [15]

Izotropní vodivá lepidla se také skládají z vazební složky a plniva. Ideální vazební složka u tohoto typu lepidel by měla mít tyto vlastnosti: dlouhou trvanlivost (ideálně v pokojové teplotě), rychlé vytvrzení, poměrně vysokou teplotu skelného přechodu, nízkou absorpci vlhkosti a dobré adhezní vlastnosti. Jako vazební složku izotropních lepidel lze použít termoplasty nebo termosety. Nejčastěji používaným termoplastem je polyimidová pryskyřice. Výhodou polyimidu je opravitelnost takto vytvořeného spoje. Nevýhodou izotropních lepidel na bázi termoplastů je snížení adheze při vyšších teplotách. Další nevýhodou je, že obsahují rozpouštědla, která se v průběhu

vytvrzení odpařují a mohou způsobovat vznik dutin (voidů) ve spoji. Pro výrobu izotropních vodivých lepidel se však nejčastěji využívají termosety. Nejpoužívanějším zástupcem termosetů pro přípravu těchto lepidel je epoxidová pryskyřice z důvodu vyváženosti všech jejích vlastností. Z pohledu mechanické pevnosti je epoxidová pryskyřice nejlepší volbou, protože má vyšší pevnost než polyamidové nebo silikonové pryskyřice. [9], [16], [17]

Tato lepidla musí být zpravidla skladována a přepravována při nízkých teplotách, obvykle  $-40^{\circ}\text{C}$ , aby se zabránilo jejich předčasnému vytvrzení. Pro uživatele těchto lepidel je jedním z důležitých faktorů také doba skladovatelnosti. Aby se dosáhlo vhodné výdrže lepidla při pokojové teplotě, je nutné vhodně zvolit tvrdidlo epoxidové pryskyřice. U některých izotropních lepidel se používají tzv. „vytvrzovací činidla“, která při pokojové teplotě nereagují s epoxidem, avšak při vyšší (vytvrzovací) teplotě se tato činidla rozpouštějí v epoxidu a vytvrzují ho. Další z možností je například využití imidazolu, který je zapouzdřen v tenké vrstvě polymeru. Při pokojové teplotě zabraňuje tento polymer kontaktu epoxidu s imidazolem, avšak při vyšší (vytvrzovací) teplotě dojde k porušení polymeru a ke kontaktu imidazolu s epoxidem, který působí jako katalyzátor a způsobí rychlé vytvrzení lepidla. Obdobně působí na epoxid také terciární aminy, což jsou organické sloučeniny odvozené od amoniaku.[9]

Vodivý spoj vytvořený izotropním elektricky vodivým lepidlem vystavený zrychlenému stárnutí mění své vlastnosti. V průběhu teplotního cyklování spoje dochází ke snížení vodivosti spoje, především u lepidel s nízkou teplotou skelného přechodu. Jak již bylo řečeno, izotropní vodivá lepidla obsahují plnivo, zpravidla ve formě kovových částic. K vodivosti lepidla dochází dotykem sousedních částic mezi sebou, což způsobí průběžnou vodivou cestu mezi vývodem a ploškou substrátu. V případě namáhání spoje teplotním cyklováním, dochází k vzájemnému pohybu mezi součástkou, lepidlem a ploškou, který je dán odlišnými koeficienty teplotní roztažnosti jednotlivých materiálů. Při tomto pohybu dochází k viskoelastické nebo viskoplastické deformaci vodivého lepidla. V průběhu této deformace mění jednotlivé kovové částice plniva svoji polohu a tím i kontaktní místa mezi sebou, čímž dochází ke změně vodivosti. V případě, že je vazební složka příliš poddajná, dochází k vyplňování oblastí, ze kterých se posunuly vodivé částice. Následně dochází vlivem teplotního cyklování k pohybu částic zpět

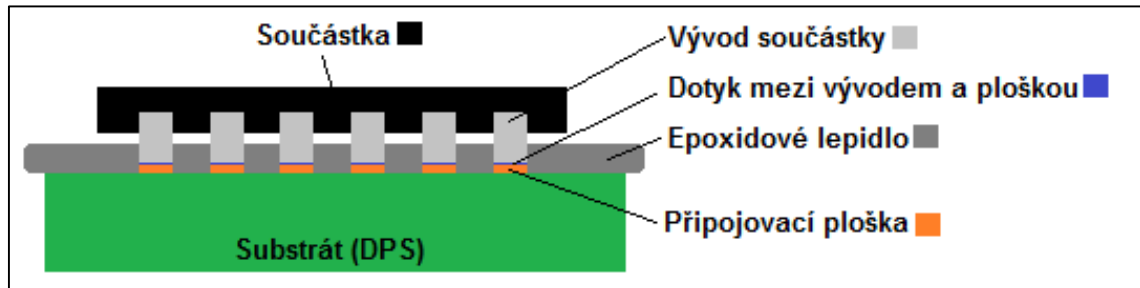
na původní pozice a k jejich částečnému pokrytí nevodivou vazební složkou. S rostoucím počtem teplotních cyklů tak klesá vodivost celého spoje a tím roste elektrický odpor. [9]

Také vlhkost významně ovlivňuje spolehlivost spojů lepených izotropním vodivým lepidlem. Obecně má vlhkost nepříznivý vliv na mechanické i elektrické vlastnosti těchto spojů. Vlhkost způsobuje zvýšení elektrického odporu spoje, především v případech, kdy povrch plošky na substrátu a povrch vývodu součástky není potažen ušlechtilým kovem. Dále vlhkost v lepeném spoji snižuje mechanickou pevnost, snižuje adhezi na rozhraní vývodu, lepidla a plošky a může způsobit odtržení spoje na tomto rozhraní. Vlhkost také podporuje růst dutin (voidů) ve spoji a vede k nárůstu mechanického pnutí ve spoji. V neposlední řadě vlhkost urychluje vznik oxidových vrstev (koroze) na povrchu kovů (plniva, vývodů a plošek), což také zvyšuje elektrický odpor spoje. [9]

### 1.2.3 Nevodivá lepidla

Nevodivá lepidla, zpravidla na bázi epoxidových pryskyřic, využívají jednu z vlastností těchto pryskyřic, kterou je vnitřní pnutí. Pokud k sobě přitiskneme dva kovové povrchy a tento spoj zalijeme lepidlem, které následně vytvrdíme, zůstává takto vytvořený spoj dlouhodobě vodivý. Důvodem vodivosti tohoto spoje je přitlačná síla, kterou vytváří vnitřní pnutí ve vytvrzené pryskyřici. Kontaktní odpor takto vytvořeného spoje je nízký a dlouhodobě stabilní. Nevodivé lepidlo se v tomto případě nanáší prakticky stejně jako anizotropní vodivé lepidlo. Princip nanášení tohoto lepidla lze vidět na obrázku níže (Obrázek 4). Pro vytvoření kvalitního elektricky vodivého spoje je nutné vývody součástky přitlačovat na kontaktní plošky vnější silou a při zvýšené teplotě. Hodnoty přechodových odporů takto vzniklých spojů jsou srovnatelné s hodnotami při použití anizotropního vodivého lepidla. Kvalita takto vytvořeného spoje je také závislá na drsnosti spojovaných ploch. Využití nevodivých lepidel pro tvorbu elektricky vodivého spoje má své výhody. Vzhledem k absenci lepidla mezi ploškou a vývodem neexistuje omezení z pohledu minimální vzdálenosti vývodů. Další výhodou je schopnost přenést větší proudové zatížení, než srovnatelně velký spoj lepený anizotropně vodivým lepidlem. Na druhou stranu má toto řešení horší spolehlivost při vyšších teplotách, vyšší vlhkosti a při teplotním cyklování. [9], [18]–[21]





Obrázek 4: Princip připojení za pomoci nevodivého lepidla. [18]

### 1.3 Degradční mechanismy elektricky vodivých lepidel

Jak již bylo řečeno, elektricky vodivá lepidla se skládají ze dvou základních složek, vazební složky (zpravidla pryskyřice) a plniva (zpravidla kovu). Na vodivé lepidlo působí v průběhu jeho životnosti velké množství degradačních činitelů. Obě složky lepidla však mají odlišné degradační mechanismy a tedy jsou náchylné na různé degradační činitele. V této části je stručně popsána tato problematika. Samotný pojem degradace znamená nežádoucí změnu struktury a molekulové hmotnosti, která vede ke zhoršení mechanických, elektrických, tepelných, a také vzhledových vlastností materiálu. Degradace vodivých lepidel může nastat při jejich výrobě nebo zpracování, avšak z našeho pohledu je nejvíce důležitá degradace v průběhu životnosti zařízení, které je propojeno elektricky vodivým lepidlem. Tato degradace nastává vlivem jednoho či více degradačních činitelů. Jednotlivé degradační činitele (parametry prostředí) a jejich obecný účinek je popsán v následující tabulce (Tabulka 1).

Tabulka 1: Základní účinky jednotlivých parametrů prostředí [22].

Parametry prostředí	Základní účinky	Typické způsobené poruchy
Vysoká teplota	Tepelné stárnutí; oxidace, praskání a chemické reakce; měknutí; tavení; sublimace; odpařování; rozpínání	Zhoršení vodivosti; mechanická porucha; zvýšené mechanické namáhání
Nízká teplota	Křehnutí; tvoření námrazy; ztráta mechanické pevnosti; fyzické smrštění	Zhoršení vodivosti; mechanická porucha; praskání
Vysoká relativní vlhkost	Absorpce a adsorpce vlhkosti; bobtnání; ztráta mechanické pevnosti; chemické reakce; koroze a elektrolyza; zvýšená vodivost vazební složky	Mechanická porucha
Nízká relativní vlhkost	Zkřehnutí; ztráta mechanické pevnosti; smrštění	Mechanická porucha; praskání
Vysoký tlak	Stlačení; deformace	Mechanická porucha
Nízký tlak	Rozpínání; zhoršené chlazení	Mechanická porucha; přehřátí
Sluneční záření	Chemické, fyzikální a fotochemické reakce; křehnutí; zahřívání; selektivní zahřívání a mechanická namáhání	Zhoršení vodivosti; mechanická porucha; zvýšené mechanické namáhání
Prach a písek	Otěr a eroze; snížení tepelné vodivosti; elektrostatické účinky	Opotřebením materiálu; elektrická porucha; mechanická porucha; přehřátí
Korozní prostředí	Chemická reakce: koroze a elektrolyza; poškození povrchu	Opotřebením materiálu; elektrická porucha; mechanická porucha
Vítr	Působení síly; únava; usazování materiálů; eroze; vyvolané vibrace	Opotřebením materiálu; elektrická porucha; mechanická porucha; přehřátí
Děšť	Absorpce vody; teplotní ráz; eroze a koroze	Elektrická porucha; praskání; poškození povrchu; mechanická porucha
Kroupy	Eroze; teplotní ráz; mechanická deformace	Elektrická porucha; praskání; poškození povrchu; mechanická porucha
Sníh a led	Mechanické zatížení; absorpce vody; teplotní ráz	Elektrická porucha; praskání; poškození povrchu; mechanická porucha
Rychlá změna teploty	Teplotní ráz; selektivní zahřívání	Mechanická porucha; praskání
Ozón	Rychlá oxidace; křehnutí	Mechanická porucha, elektrická porucha; vznik vlasových trhlinek; praskání
Stálé zrychlení; vibrace; ráz; opakovaný ráz	Mechanické namáhání; únava; rezonance	Mechanická porucha

### 1.3.1 Degradální mechanismy vazební složky

Vazební složkou je u elektricky vodivých lepidel epoxidová, polyimidová nebo silikonová pryskyřice neboli polymery. Při degradaci polymerů se zpravidla především snižuje molekulová hmotnost a procesy, které k tomuto jevu vedou, mohou mít zanedbatelný vliv na změnu chemické struktury polymeru. Prvním typem degradace polymeru je odštěpování monomerních jednotek z konce řetězce tak, že hlavním produktem této degradace je monomer. U druhého typu degradace dochází k přerušování hlavního řetězce na libovolném místě za vzniku dvou zlomků. O který proces převážně jde je možné zjistit podle množství vzniklého monomeru a poklesu molekulové hmotnosti. V případě, že je pokles molekulové hmotnosti významný, ale množství vzniklého monomeru malé, jedná se zpravidla o statické odbourávání. V opačném případě jde o depolymeraci, tedy řetězový zipový degradační mechanismus blízký opačnému průběhu propagační reakce. [23]–[25]

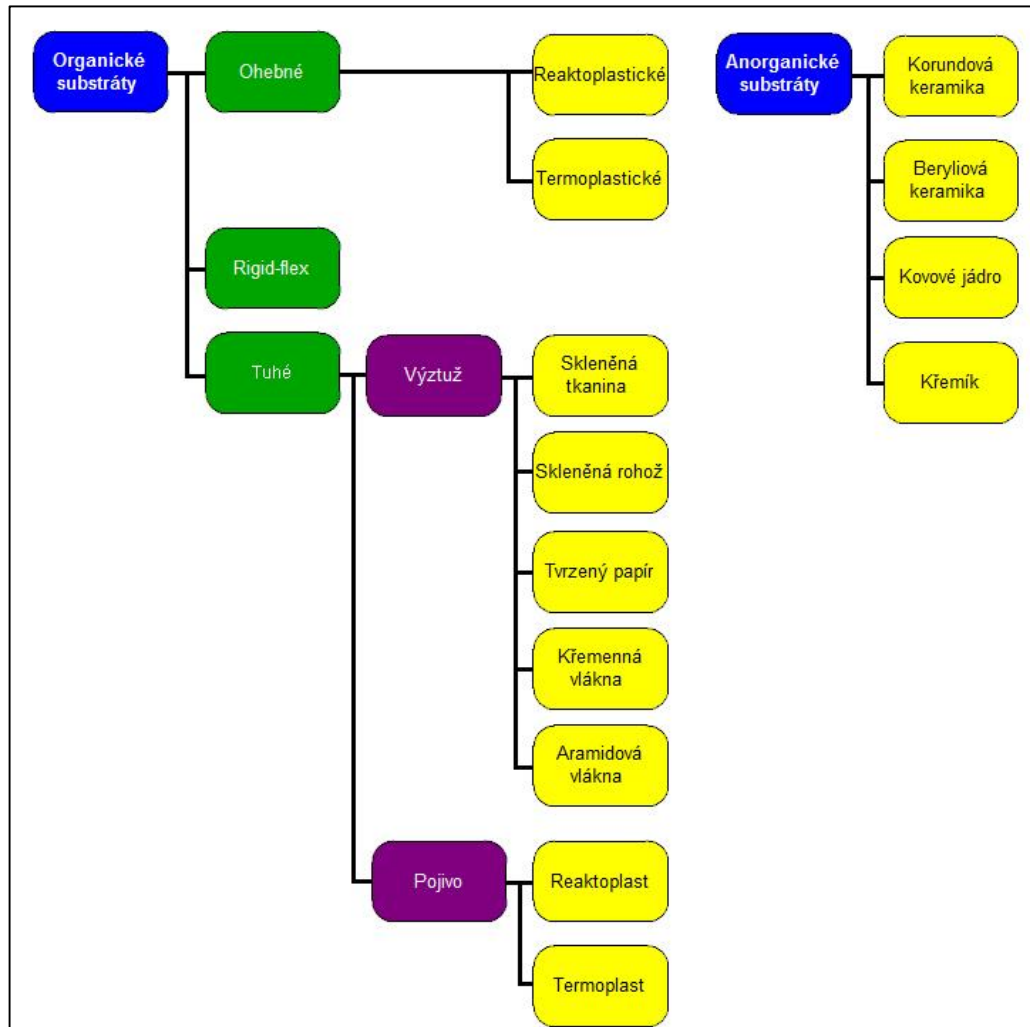
Vliv jednotlivých degradačních činitelů na výslednou degradaci polymeru je závislý na mnoha faktorech, jako je složení daného polymeru, vzájemné působení jednotlivých činitelů, a také význam každého činitele. Ani významné činitele však nemusí za určitých okolností způsobit významnou degradaci, vždy ještě záleží na intenzitě a době působení činitele nebo jejich kombinací, na polymer. Významná degradace nastává při dosažení určité intenzity působení degradačního činitele, nebo při sice nižší intenzitě avšak dlouhé době působení tohoto činitele na polymer. Velikost intenzity těchto vlivů se však v běžných provozních podmínkách trvale mění. Tyto změny způsobují zpravidla rychlejší degradaci materiálu než při konstantním působení činitele. Degradace tedy není zpravidla přímo úměrná intenzitě působícího činitele a průběh degradace je při kolísání intenzity činitele odlišný oproti působení stejného činitele o konstantní intenzitě. U některých činitelů a materiálů má také vliv posloupnost působení činitelů, tedy například vlivem chladu může vzrůst křehkost materiálu a následným působením mechanického namáhání dojde k jeho zničení avšak v případě, že by materiál nebyl vystaven zmíněnému chladu, stejné mechanické namáhání by ho nepoškodilo. Toto vzájemné působení jednotlivých činitelů zesložitňuje celou tuto problematiku. [24]

### 1.3.2 Degradční mechanismy plniva

Plnivo je u elektricky vodivých lepidel tvořeno vodivými částicemi, které jsou nejčastěji ze stříbra, niklu, paladia, zlata, uhlíku, pocínované mědi, postříbřené mědi nebo pozlaceného plastu. U těchto materiálů je hlavním problémem jejich oxidace, která snižuje elektrickou vodivost elektricky vodivého lepidla. Degradace plniva však nemá významný vliv na mechanické vlastnosti lepeného spoje, protože tyto vlastnosti jsou majoritně ovlivňovány pojivem.

## 1.4 Substráty

Vzhledem k tomu, že se substráty v elektronice využívají již dlouhou dobu, bylo navrženo a využíváno velké množství materiálů pro jejich výrobu a vymyšleno mnoho technologických procesů pro jejich zpracování. Jako v každém odvětví se i v elektronice našly substráty, které svými vlastnostmi i cenou nejvíce vyhovují a jsou tedy i nejvíce využívány. Jako základní materiál se nejčastěji využívá dielektrikum jednostranně nebo oboustranně plátované mědi, která tvoří vodivou vrstvu substrátu. Dielektrikum bývá kompozitní materiál složený z jedné nebo více vrstev výztuže spojených nejčastěji pryskyřicí. Nejčastějším materiálem výztuže bývá skleněná tkanina nebo listy buničitého papíru. Nejvíce užívaná pryskyřice je fenolická pro impregnaci papíru a epoxidová pro impregnaci skleněné tkaniny. Použití jednotlivých substrátů je vždy závislé na potřebách jednotlivých odvětví elektroniky. Samotné rozdělení substrátů je nejlépe viditelné na následujícím diagramu. [2], [26]

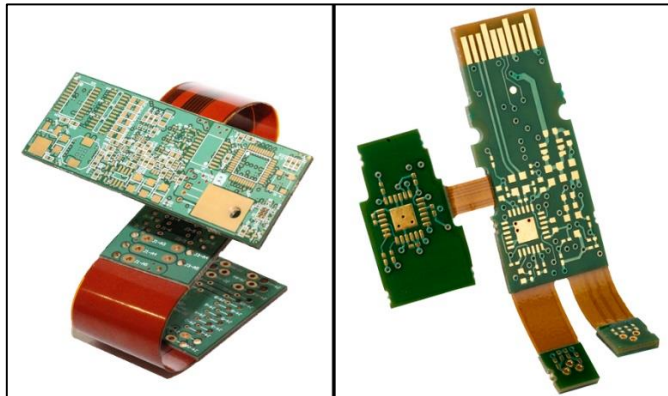


**Obrázek 5:** Rozdělení substrátů pro DPS.

Úkolem substrátů je nést součástky, odvádět ztrátové teplo a zprostředkovávat propojení vývodů součástek. Aby mohl substrát tyto vlastnosti splňovat, musí obsahovat kvalitní izolační materiál, dále musí mít vhodný systém vodivých motivů, a rovněž musí mít dobrou tepelnou vodivost. [2], [26]

Organické substráty lze dále rozdělit na substráty tuhé, ohebné (flexibilní) a tzv. rigid-flex. Jak již vyplývá z jejich pojmenování, tuhé substráty nelze ohýbat. Tyto substráty se v elektronice používají nejčastěji a jejich použití je velmi dobře zmapováno. Druhou skupinou jsou tzv. rigid-flex substráty. Jedná se o tuhé substráty propojené flexibilním substrátem. Princip tohoto uspořádání je nejlépe patrný z obrázku níže (Obrázek 6). [2], [26]

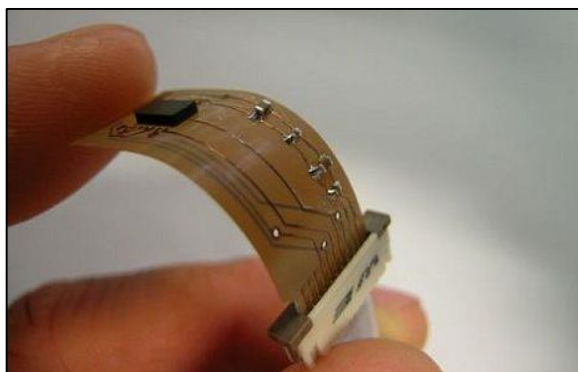
Více o problematice substrátů lze nalézt v [2], [26]–[29].



**Obrázek 6:** Ukázka substrátů typu rigid-flex. [27], [28]

### ***Flexibilní substráty***

Tyto substráty bývají vyráběny podobně jako tuhé, ale liší se tím, že neobsahují výztuž. Měděná fólie se na ohebné základní materiály plátuje jednostranně nebo oboustranně jako u tuhých substrátů. Nejčastěji se pro výrobu ohebných substrátů využívá polyesterová a polyimidová pryskyřice. Polyesterové pryskyřice se využívají pro levnější aplikace. Vůbec nejrozšířenějším materiálem pro výrobu ohebných substrátů je polyimid, přesněji poly-pyromellitic-imid, který nelze zaměňovat s polyimidem, přesněji polyamid-imidem, který je využíván u tuhých substrátů. Vzhledem k tomu, že neobsahují výztuž, jsou tyto substráty rozměrově méně stabilní než tuhé substráty. Také se u nich obtížně pokovují otvory a je na ně obtížnější osazování součástek. Jejich výhody však jsou především ohebnost a nízká cena. Tyto substráty byly navrženy jako náhrada za drátové propojky (např. v tiskárně). Při této aplikaci představují značnou výhodu, protože odpadá připojení konektory, které zvyšují impedanci a snižují spolehlivost. V současnosti se ohebné substráty využívají u mnoha zařízení, kde se využívá jejich ohebnosti (některé lze ohnout i více než milionkrát) a jejich menších rozměrů oproti klasickým substrátům. [2]



**Obrázek 7:** Ukázka flexibilního substrátu. [30]

## 2 Současný stav problematiky

Tato kapitola se soustředí na popsání současného stavu používání flexibilních substrátů, dále jsou zde popsány možnosti propojení flexibilních substrátů se součástkami, a také jsou zde popsány vlastnosti lepených spojů testované v různých vědeckých člancích.

### 2.1 Používané flexibilní substráty

Jak již bylo řečeno, flexibilní substráty nemají výztuž, jsou tenké zpravidla 12  $\mu\text{m}$  až 125  $\mu\text{m}$  a jsou tvořeny různými materiály. Základními používanými materiály jsou polyester (PES), polyimid (PI), polyetylen-naftalen (PEN), polyeterimid (PEI), fluorpolymery (FEP) nebo kopolymery. Nejčastější je však polyimid.

V článku [31] popisuje autor Roeck flexibilní substráty. Konkrétně říká, že nejpoužívanější materiály pro výrobu flexibilních substrátů jsou polyester (PES - PET) a polyimid (PI). Vzhledem k tomu, že se dále zabývá flexibilním substrátem z polyesteru, popisuje jeho hlavní výhody, kterými jsou dle Roecka nižší cena, nižší hmotnost, lepší možnosti recyklace a rychlá a snadná výroba.

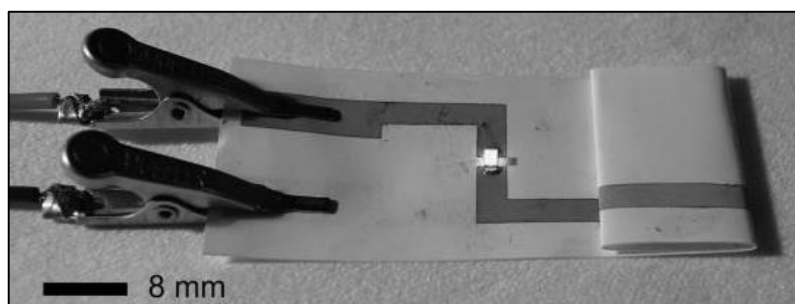
Kinkeldei ve svém článku [32] využívá flexibilní substrát, který se nazývá Kapton®. Konkrétně zde všívá proužky tohoto substrátu do textilní tkaniny a tím vytváří textilní substrát, který dále testuje. Název Kapton® je obchodní značkou společnosti DuPont™ a je v praxi poměrně často využíván. Základním materiálem tohoto substrátu je podle dostupných informací polyimid (PI). [33]

Dalším autorem, který ve svém článku [34] používá flexibilní substrát je Zysset. Tento autor používá typ Pyralux AP8515R. Na proužky substrátu jsou v článku osazeny teplotní senzory, celý substrát je vpleten do textilie a následně jsou jednotlivé proužky substrátu propojeny vodivými vlákny, která jsou ke kontaktním ploškám substrátu připojena s pomocí elektricky vodivého lepidla. Následně je takto vzniklý vzorek testován. Zmíněný flexibilní substrát patří do skupiny substrátů Pyralux®. Tato obchodní značka je opět od společnosti DuPont™. Existují dvě hlavní skupiny materiálů Pyralux®. První skupinou je Pyralux® TK, který využívá jako základní materiál fluorpolymer (FEP). Druhá skupina jsou flexibilní substráty Pyralux® LF, které jako základní materiál

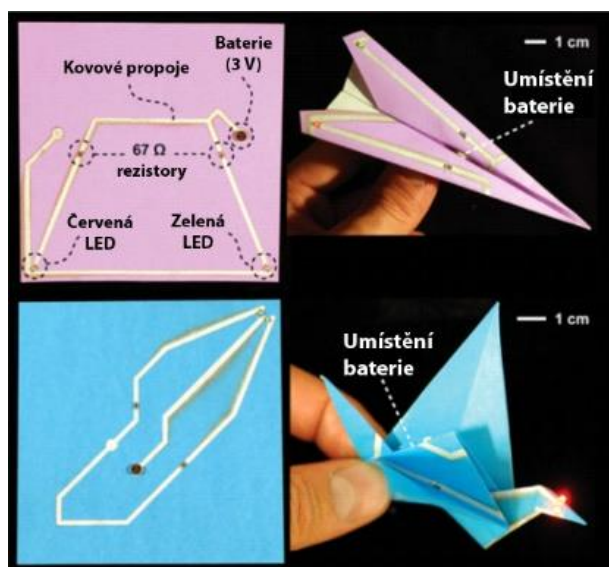
využívají akrylát. Celá řada produktů Pyralux® je vhodná především pro vícevrstvé flexibilní plošné spoje. [33]

Jedním z autorů, kteří využívají flexibilní substrát ve svém výzkumu [35] je Chang. Základní materiál tohoto substrátu je Parylen-C, na který jsou vytvořeny kontaktní plošky a vodivé cesty. Na takto vzniklý substrát je následně za pomoci elektricky vodivého lepidla osazen speciální čip. Celé zařízení je dále testováno a mělo by sloužit jako protéza oční sítnice. Materiál Parylen-C je substituovaný polymer, jehož monomerním základem je p-xylylen. Nejvýznamnější vlastností parylenu je jeho nízká dielektrická konstanta. Parylen je tedy již při malé tloušťce velmi dobrý izolant. [36]

Posledním zde popsaným autorem využívajícím ve svém výzkumu [37] flexibilní substrát je Siegel. Tento autor využívá poměrně netradiční typ substrátu, kterým je papír. Podle mého názoru však lze i papír považovat za flexibilní substrát. Jak je vidět z obrázků níže (Obrázek 8, Obrázek 9) jsou na papír napařeny vodivé vrstvy (Cu a Zn) a na tyto vrstvy jsou vodivým lepidlem osazeny součástky.



**Obrázek 8:** Ukázka papírového flexibilního substrátu. [37]



**Obrázek 9:** Ukázka použití papírového flexibilního substrátu. [37]



### 2.1.1 Tvorba vodivých motivů na flexibilních substrátech

U flexibilních substrátů se pro tvorbu vodivých motivů využívá nejčastěji, stejně jako u tuhých substrátů, měděná fólie, která je na substrát naplátována jednostranně nebo oboustranně. Tato fólie bývá zpravidla vytvořena elektrolytickým navrstvením na nereзовý nebo titanový buben, tedy stejně jako u tuhé DPS, avšak je možné využít válcovanou žíhanou měď, která má výhodu v trvalejší pružnosti z důvodu odlišné struktury zrna. Následně je na flexibilní plošný spoj nanesen fotorezist a po osvětlení a vyvolání fotorezistu jsou odleptáním v leptací lázni vytvořeny vodivé motivy. Jinou možností, kterou lze využít pro nanesení mědi na flexibilní substrát je naprašování. [2] Další možností je nanesení vodivého materiálu v tekuté formě za pomoci sítotisku a následné vytvrzení vodivého motivu za pomoci zvýšené teploty. Jednou z novějších možností je využití přístroje pro tzv. „Aerosol Jet Printing“. Tento přístroj dokáže tisknout mnoho různých materiálů s velmi rozdílnými viskozitami. Podrobnější informace k tomuto přístroji lze nalézt v [38].

### 2.1.2 Aktuální dostupnost flexibilních substrátů v České republice

V této podkapitole jsou popsány hlavní výrobci flexibilních substrátů, které jsou u nás dostupné.

#### ***PragoBoard***

Jako základní materiál využívá tato společnost Kapton®, tedy jak již bylo řečeno polyimid. Tento materiál je jednostranně nebo oboustranně plátován mědí. Společnost nabízí bezlepidlové základní materiály (Pyr lux®, Thinflex®) a lepidlové základní materiály (Epo flex®, Ahesive mat.), u kterých je měděná fólie lepena k nosnému materiálu za pomoci lepidla. Tloušťka nosného materiálu je k dostání od 25 μm do 125 μm (záleží na typu základního materiálu) s tloušťkou měděné fólie 18 μm, 35 μm, u některých typů i 70 μm. U lepidlových materiálů obsahuje DPS ještě lepidlo o tloušťce 15 μm. Na flexibilní spoj je možné přiojednat ještě flexibilní nepájivou masku. U této společnosti je možné objednat jako povrchovou úpravu chemické zlato nebo chemický cín. [39]

#### ***Printed***

K výrobě flexibilních plošných spojů využívá tato společnost materiál Pyr lux® o tloušťce 100 μm. Společnost nabízí jednostranné nebo oboustranné plátování mědi

o tloušťce 18  $\mu\text{m}$  nebo 35  $\mu\text{m}$ . Tento materiál nelze prokovit, lze ho ohnout o 180° a jeho pájení je možné jen s velkou opatrností.

Druhou možností je využití materiálu FR-4, který se běžně používá na tuhé DPS. V případě flexibilního plošného spoje má tento materiál tloušťku 100  $\mu\text{m}$ . Tento materiál lze prokovit, lze ho ohnout o maximálně 90° a lze ho bez problémů pájet. Navíc má tento materiál vyšší mechanickou pevnost než Pyralux® a lze na něj aplikovat nepájitvou masku.

Jako povrchovou úpravu lze u této společnosti objednat OSP, galvanické zlato nebo galvanický cín. [40]

### ***MEV Praha s.r.o.***

Tato společnost nabízí flexibilní substrát na bázi polyimidu, který může být jednovrstvý nebo vícevrstvý. Minimální tloušťka je 100  $\mu\text{m}$ . Společnost MEV nabízí i aplikaci nepájitvé masky. U společnosti lze objednat flexibilní substrát bez povrchové úpravy (čistý Cu), nebo lze jako povrchovou úpravu zvolit OSP, chemický cín, případně chemický Ni/Au. [41]

### ***Gatema***

Společnost využívá opět materiály na bázi polyimidu, zpravidla od společnosti DuPont™. Lze objednat jednostranné i oboustranné flexibilní plošné spoje. [42]

### ***PCB Benešov***

Tato společnost nabízí flexibilní plošné spoje se základním materiálem Pyralux® od společnosti DuPont™. Tloušťku nosného materiálu nabízejí 50  $\mu\text{m}$  (u jednostranných DPS je mezi nosným materiálem a měděnou fólií ještě lepidlo o tloušťce 25  $\mu\text{m}$ ) s tloušťkou měděné vrstvy 18  $\mu\text{m}$  nebo 35  $\mu\text{m}$ . [43]

## **2.2 Způsoby propojování flexibilních substrátů**

V případě flexibilních substrátů je možné k propojení využívat obdobné technologie jako v případě tuhých substrátů avšak s úpravou jejich parametrů. Konkrétně lze pro připojení součástky na flexibilní substrát využít technologii pájení. Z důvodu zákazu olovnatých pájecích slitin, lze v praxi využít pouze bezolovnaté pájecí slitiny. Při použití těchto slitin na flexibilních substrátech vyvstává otázka maximální teploty, kterou dokáže snést flexibilní substrát. U některých substrátů, jako například

Kapton jsou tyto teploty dostatečně vysoké, avšak u jiných substrátů lze použít pouze nízkoteplotní, zpravidla bizmutové, pájecí slitiny. U některých flexibilních substrátů však nelze využívat ani tyto slitiny a je tedy nutné využít jinou technologii propojování. Druhou možností propojování součástek s flexibilním substrátem je použití elektricky vodivých lepidel. Tato možnost je u některých flexibilních substrátů vhodnější především z důvodů potřebné teploty vytvrzení, která bývá zpravidla nižší, než teplota tavení pájecí slitiny, a také z důvodu zpravidla vyšší flexibility lepeného spoje oproti pájenému spoji.

## 2.3 Rozdělení vodivých lepidel

V kapitole 2.3.1 jsou popsány jednotlivé typy vodivých lepidel, které jsou popsány ve vědeckých člancích a jsou komerčně vyráběny a používány. V kapitole 2.3.2 je pak vyjmenováno několik výrobců vodivých lepidel.

### 2.3.1 Používaná vodivá lepidla

Mach ve své práci [44] testuje jednosložková a dvousložková izotropní vodivá lepidla, která jsou na bisfenolové epoxidové bázi a jsou plněna stříbrnými vločkami. Dále tento autor používá ve své práci [45] izotropní vodivá lepidla na epoxidové bázi plněná stříbrnými vločkami nebo kuličkami od společnosti Amepox. Konkrétně se jedná o lepidla Elpox SC 515, Elpox SC 515e, Elpox SC 24D, Elpox AX 12, Elpox AX 15S a Eco Solder AX. V další své práci [46] testoval zmíněný autor opět s epoxidovými lepidly plněnými stříbrnými částicemi od společnosti Amepox, konkrétně Elpox 55MN, Elpox 55MNa, Elpox AX70N, Elpox ER48, Elpox ER48a, Elpox AX20 a Elpox AX20a. Tento autor používá izotropní elektricky vodivá lepidla i ve svém článku [47]. V tomto článku testoval lepidla Amepox, Alpha Metals 171, Alpha Metals 181, a Epoxy Technology E4110.

Dalším autorem, který ve svých člancích popisuje a testuje vodivá lepidla je Duraj. Ten v článku [48] používá jednosložková lepidla Elpox SC 515, Elpox SC 515e, Elpox SC 24D a dvousložková lepidla Elpox AX 65MN, Elpox AX 12 a Elpox AX 15S. V dalším svém článku [49] využívá Duraj jednosložková lepidla Amepox AX 20 a Amepox ER 55, dále dvousložkové lepidlo Amepox AX 656S a vodivý lak Amepox ER

48. Tento autor používá v článku [50] rovněž anizotropní vodivé lepidlo (ACA). Konkrétně se jedná o lepidlo Loctite 3447.

Dalším autorem popisujícím ve svých člancích použití vodivých lepidel je Zysset, který ve svém článku [51], i v článku [34] využívá vodivé lepidlo Epo-Tech H20E.

Bušek popisuje ve svých člancích [52] a [53] použití vodivých lepidel typu AX 20, AX 70 MN, AX 15S a AX 12 MN. Tato lepidla v článku [52] dokonce modifikuje.

I Roeck zmiňuje ve svém článku [31] použití vodivých lepidel. Jedná se zřejmě o vlastní výrobu epoxidových i jiných lepidel s různým množstvím stříbrných částic.

Yang ve své práci [54] vytváří a testuje izotropní vodivé lepidlo na vodní bázi. Výhodou tohoto lepidla je neškodnost k životnímu prostředí, a také možnost čistit všechny části, které přijdou do styku s tímto lepidlem (stroje, šablony, ...), pouze vodou.

V tabulce níže (Tabulka 2) jsou přehledně shrnuta všechna výše uvedená lepidla, která jsou studována ve vědeckých člancích.

**Tabulka 2:** Seznam vodivých lepidel využívaných ve vybraných vědeckých člancích.

Název lepidla	Výrobce	Použito v článku
Eco Solder AX	AMEPOX	[45]
Elpox 55MN	AMEPOX	[46]
Elpox 55MNa	AMEPOX	[46]
Elpox 656S	AMEPOX	[49]
Elpox 65MN	AMEPOX	[48]
Elpox AX 12	AMEPOX	[45], [48]
Elpox AX 12 MN	AMEPOX	[52], [53]
Elpox AX 15S	AMEPOX	[45], [48], [52], [53]
Elpox AX 20	AMEPOX	[49], [52], [53]
Elpox AX 20a	AMEPOX	[46]
Elpox AX 70MN	AMEPOX	[52], [53]
Elpox AX 70N	AMEPOX	[46]
Elpox ER 48	AMEPOX	[46], [49]
Elpox ER 48a	AMEPOX	[46]
Elpox ER 55	AMEPOX	[49]
Elpox SC 24D	AMEPOX	[45], [48]
Elpox SC 515	AMEPOX	[45], [48]
Elpox SC 515e	AMEPOX	[45], [48]
Epo-Tech E4110	Epoxy Technology	[47]
Epo-Tech H20E	Epoxy Technology	[34], [51]
Loctite 3447	Henkel	[50]

### 2.3.2 Aktuální dostupnost vodivých lepidel

Pro zjištění dostupnosti vodivých lepidel a jejich výrobců bylo zapotřebí zpracovat na toto téma rešerši. Výsledkem této rešeršní činnosti je následující tabulka Tabulka 3, ve které jsou vyjmenováni jednotliví nalezení výrobci vodivých lepidel.

*Tabulka 3:* Seznam nalezených výrobců vodivých lepidel.

Výrobce vodivých lepidel	Odkaz
Daiken Chemical Company Ltd.	[55]
Epoxy Technology	[56]
ESL ElectroScience	[57]
Amepox Microelectronics, Ltd	[58]
Panacol-Elosol GmbH	[59]
Permacol® B.V.	[60]
Fujikura Kasei Company Ltd.	[61]
Henkel Adhesives	[62]
ELCHEMCo	[63]
Master Bond Inc.	[64]
MG Chemicals	[65]

### 2.4 Zkoumané vlastnosti vodivých lepidel

V odborné literatuře a ve vědeckých člancích lze nalézt vlastnosti z oblasti vodivých lepidel, které jsou zkoumány. V této kapitole budou některé z těchto vlastností popsány.

#### *Elektrický odpor*

Prvním parametrem, který se velmi často vyskytuje ve vědeckých člancích, je elektrický odpor. Tento parametr měří Barto ve svých člancích [66]–[68], kde pro měření elektrického odporu využívá měřič LCR HP 4284 a tento odpor měří v článku [66] pro různé povrchové úpravy DPS. Kromě toho nechává lepené spoje stárnout suchým teplem po dobu více než 1000 hodin. V článku [67] pak testuje závislost elektrického odporu na teplotě a době vytvrzování vodivého lepidla. V článku [68] testuje Barto závislost elektrického odporu na stárnutí, avšak v tomto článku využívá teplotní stárnutí, stárnutí ve vysoké vlhkosti a kombinované stárnutí. Elektrický odpor měří i Duraj ve svých člancích [48]–[50], kde v článku [48] podrobil lepený spoj mechanickému namáhání i stárnutí. V článku [49] pak lepený spoj namáhal dynamicky, kdy celou desku prohýbal (cca. 2000 cyklů). V článku [50] pak měřil elektrický odpor

anizotropního lepidla v závislosti na různých povrchových úpravách a vytvrzovacích parametrech. K měření využil ve všech případech měřič impedance HP 4284A. Dalším, kdo měřil elektrický odpor, byl Mach, který zmiňuje měření elektrického odporu (resp. vodivosti) ve svých člancích [45], [47], [69]–[72]. Mach ve svém článku [45] zatěžoval lepený spoj statickým i dynamickým zatížením, a také kombinací statického zatížení a kombinovaného stárnutí (teplem i vlhkostí). V průběhu testování měřil elektrický odpor lepeného spoje za pomoci LCR měřiče HP 4284A. Obdobně i v článku [47] měřil Mach vliv stárnutí na hodnotu elektrického odporu. V článku [69] pak použil různé povrchové úpravy DPS a následně lepený spoj dynamicky namáhal za pomoci průhybu DPS. Pro samotné měření elektrického odporu využil přístroj HP Precision RLC Meter 4284A. I v článku [70] měřil Mach elektrický odpor, tentokrát s pomocí přístroje MCP TH 2818 Automatic Component Analyzer. V tomto článku se však zaměřil na testování změny elektrického odporu při změně složení vodivého lepidla. Rovněž v článku [71] měří Mach elektrický odpor (resp. vodivost), ale zabývá se především vlivem míchání vodivého lepidla při přípravě na vodivost tohoto lepidla po vytvrzení. Taktéž v článku [72] testoval Mach vliv různých povrchových úprav na hodnotu elektrického odporu, který měřil čtyřbodovou metodou. I Bušek ve svém článku [53] měří elektrický odpor čtyřbodovou metodou za pomoci přístroje Agilent 4263B LRC meter. V článku testuje modifikovaná jednosložková i dvousložková lepidla podrobená teplotnímu cyklování. Rovněž Roeck ve svém článku [31] testuje elektrický odpor čtyřbodovou metodou, avšak oproti předchozím článkům se Roeck zabývá lepeným spojem na flexibilním substrátu. Následně měří elektrický odpor i po stárnutí. I Chen se ve svém článku [73] zabývá elektrickým odporem. Konkrétně řeší výpočet hodnoty elektrického odporu spoje při započtení vlivu drsnosti plniva vodivého lepidla. Drsnost v tomto matematickém modelu Chen uvažuje jako dutiny ve tvaru mikro válců, které jsou vytvořeny ve vodivých částicích. Zároveň zde uvažuje různou hustotu, výšku a poloměr těchto otvorů, čímž simuluje různou reálnou drsnost povrchu.

### ***Nelinearita voltampérové charakteristiky spoje***

Dalším parametrem, který se ve vědeckých člancích měří v souvislosti s lepeným spojem, je nelinearita VA charakteristiky spoje. Tuto vlastnost měří Duraj ve svých člancích [48], [50]. Ovlivňované parametry jsou pro tyto články popsány výše, konkrétní

měření nelinearity bylo v obou případech realizováno za pomoci speciálního přípravku vyvinutého na Katedře Elektrotechnologie ČVUT a spektrálního analyzátoru HP 8650. Dalším kdo měřil nelinearitu ve svých člancích [67], [68] byl Barto. Ovlivňované parametry jsou pro tyto články opět popsány výše. Měření nelinearity v článku [67] probíhalo za pomoci čtyřbodové metody s použitím speciálního zařízení pro měření nelinearity. Rovněž Mach ve svých člancích [45], [47], [69], [70], [72] měřil nelinearitu. Ovlivňované parametry v těchto člancích jsou opět popsány výše. Nelinearita byla v článku [45] měřena za pomoci intermodulační metody. V jiných člancích Mach využívá speciální zařízení pro měření nelinearity vyvinuté na Katedře Elektrotechnologie ČVUT, nebo postup měření nelinearity vůbec nezmiňuje.

### ***Šum***

Třetím elektrickým parametrem, který bývá často měřen v souvislosti s lepenými spoji, je šum. Tento parametr měří Duraj ve svých člancích [48], [50]. Rovněž Barto ve svém článku [67] měří šum. Šum měří ve svých člancích [45], [69] i Mach. V těchto člancích měří šum s pomocí zesilovače PAR 124 spolu s předzesilovačem PAR 119.

### ***Elektrická impedance***

Dalším měřeným elektrickým parametrem je impedance, kterou měří Mach ve svých člancích [46], [74]. Pro měření impedance při nízkých frekvencích používá v obou člancích čtyřbodovou metodu a LCR metr Agilent 4284A. Vzorek byl složen z rezistoru s nulovým odporem, přilepeným za pomoci vodivého lepidla na podložku. V článku [46] ještě měří hodnoty impedance lepeného spoje na vyšších frekvencích (100ky MHz, GHz). K tomuto měření využívají rezonátor „High-Q triplate stripline“.

### ***Teplota skelného přechodu***

Další vlastností, kterou je možné u lepených spojů měřit je teplota skelného přechodu. Tu měří ve svém článku [44] Mach. K měření využívá analýzu DMA, což je dynamicko - mechanická analýza. Rovněž Bušek měří ve svém článku [52] teplotu skelného přechodu. Konkrétně zjišťuje změny teploty skelného přechodu pro různé množství a druh vodivých částic přidávaných do vodivých lepidel. Kromě toho testuje

Bušek v tomto článku vytvrzovací teplotu. Při testování Bušek využívá analýzy TMA (termická mechanická analýza), DMA a DSC (diferenční skenovací kalorimetrie).

### ***Mechanické vlastnosti / pevnost***

Dalším parametrem, který lze u lepených spojů testovat je pevnost ve smyku. Tuto pevnost měří Bušek ve svém článku [53], Duraj v článku [48], a Roeck ve svém článku [31]. V případě Roecka byl použit flexibilní substrát. Z tohoto důvodu musel být tento substrát při měření opatřen speciální hliníkovou vrstvou, která zajistila dostatečnou mechanickou pevnost.

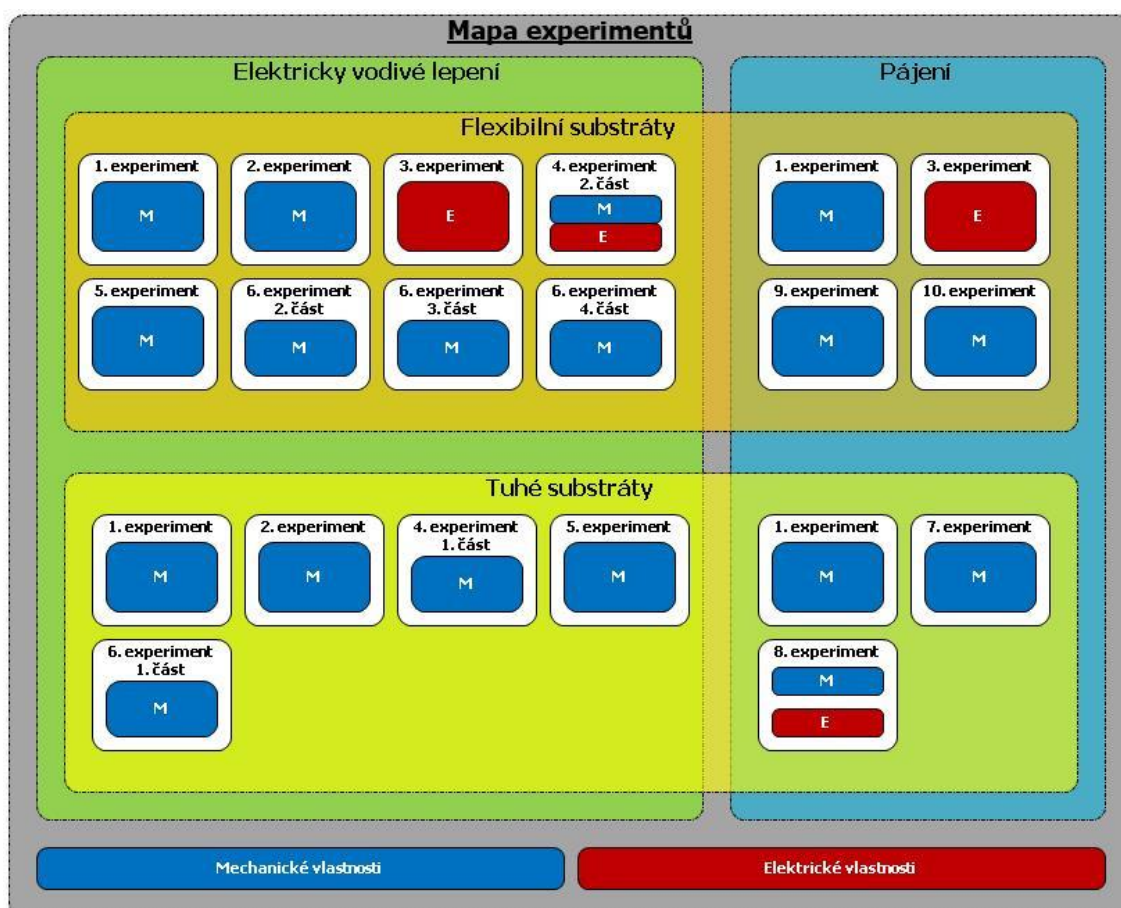
Dalšími parametry, které měřil Duraj v článku [48] jsou pevnost v tahu a odolnost proti statickým a dynamickým mechanickým zatížením. Též Mach ve svém článku [70] měří pevnost v tahu. Roeck pak ve svém článku [31] měří pevnost v ohybu u lepeného spoje na flexibilním substrátu.



### 3 Experimentální část – elektricky vodivé lepení

Vlastnosti a kvalita elektricky vodivých lepených spojů nejsou v současné době zcela prozkoumány a to především z důvodů velkého počtu vyráběných elektricky vodivých lepidel, a také proto, že v současnosti převažuje technologie pájení, a je tedy více zkoumána. Toto tvrzení platí ještě více při použití flexibilních substrátů, protože tyto technologie a jejich uplatnění jsou stále poměrně nové. V rešeršní činnosti, která předcházela této části, bylo zjištěno, jaké parametry jsou ve vědeckých člancích zkoumány a testovány. Dále byla popsána vodivá lepidla, která jsou nejčastěji zkoumána ve vědeckých člancích.

V rámci této disertační práce bylo navrženo a realizováno množství experimentů, které byly pro lepší přehlednost vloženy do přehledové mapy (Obrázek 10).



Obrázek 10: Přehledová mapa experimentů realizovaných v rámci disertační práce.

### 3.1 První experiment - porovnání lepidel, substrátů a teplotních profilů

Na základě rešeršní činnosti byl nejprve navržen experiment, při kterém byly ověřeny základní metody návrhu experimentu a dále metodika výroby a testování vzorků. Nejprve bylo rozhodnuto o využití lepidla EPO-TEK® H20S od společnosti EPOXY Technology, a lepidla 8331S od společnosti MG Chemicals. Tato lepidla byla vybrána z důvodu jejich dostupnosti a přijatelného poměru ceny a předpokládané kvality. Pro následující experimenty byly dále zakoupeny další elektricky vodivá lepidla, čímž došlo k rozšíření experimentů o nová lepidla. Dále bylo rozhodnuto, že pro první experiment budou využity tři druhy standardních čipových SMD součástek. Konkrétně se jedná o rezistory 1206, 0805 a 0603. Všechny součástky měly vývody s galvanicky nanesenou vrstvou cínu. Dalším rozhodnutím bylo zaměřit se nejprve na mechanické vlastnosti lepených spojů, konkrétně na mechanickou pevnost spoje ve smyku. Dalším rozhodnutím u tohoto experimentu bylo otestovat různé vytvrzovací profily udávané výrobcem lepidel. Posledním rozhodnutím bylo otestování tří typů DPS. Tento experiment je realizován pomocí zkušebních vzorků. Na těchto vzorcích byly vytvořeny lepené spoje za daných a opakovatelných podmínek, z důvodu možnosti získané hodnoty porovnávat a vyhodnocovat. Celý první experiment a jeho výsledky jsou prezentovány v následujících podkapitolách.

#### 3.1.1 Materiály pro první experiment

Použité elektricky vodivé lepidlo EPO-TEK® H20S od společnosti EPOXY Technology je dvousložkové a obsahuje stříbrné částice. Obě složky se míchají ve hmotnostním poměru 1:1. Toto lepidlo je určeno především pro lepení čipů. Elektrická vodivost tohoto lepidla udávaná výrobcem je  $\leq 0.0005 \Omega \cdot \text{cm}$ . Vytvrzovací profily doporučené výrobcem jsou znázorněny v tabulce (Tabulka 4). [75]

*Tabulka 4:* Vytvrzovací profily lepidla EPO-TEK® H20S. [75]

EPO-TEK® H20S					
Čas	175 °C	150 °C	120 °C	100 °C	80 °C
Teplota	45 sekund	5 minut	15 minut	45 minut	90 minut

Druhým lepidlem použitým pro tento experiment je lepidlo 8331S od společnosti MG Chemicals. Toto lepidlo je rovněž dvousložkové a obsahuje stříbrné částice. Složky

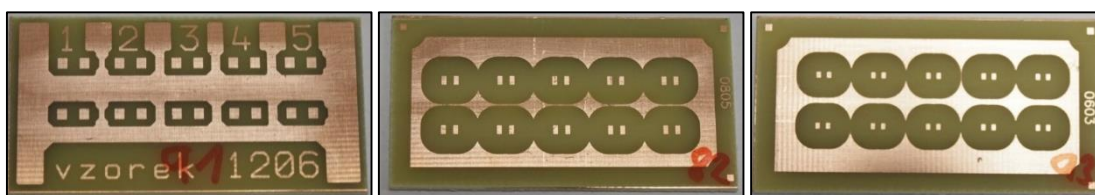
tohoto lepidla (A:B) se míchají ve hmotnostním poměru 1,17:1. Toto lepidlo je určeno pro výrobu, opravu a montáž elektroniky. Elektrická vodivost tohoto lepidla udávaná výrobcem je  $0.006 \Omega \cdot \text{cm}$ . Vytvrzovací profily doporučené výrobcem jsou znázorněny v tabulce (Tabulka 5). [76]

**Tabulka 5:** Vytvrzovací profily lepidla 8331S. [76]

MG 8331S				
Čas	100 °C	80 °C	65 °C	25 °C
Teplota	50 minut	60 minut	120 minut	96 hodin

Při experimentu byly použity čipové rezistory 0R0 s velikostí pouzdra součástky 1206, 0805, 0603. Všechny tyto součástky mají vývody s galvanicky nanesenou vrstvou cínu.

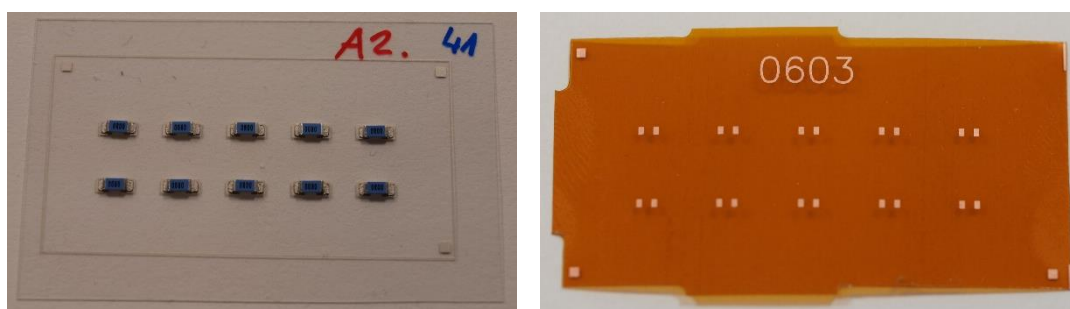
Prvním z použitých substrátů jsou tuhé DPS bez povrchové úpravy, tedy pouze s čistým měděným povrchem (nadále označované jako „TDPS Cu“) Na jedné straně DPS je vytvořen vodivý motiv pro přilepení deseti čipových součástek (viz. Obrázek 11).



**Obrázek 11:** Testovací TDPS Cu pro součástky 1206 (vlevo), 0805 (uprostřed), 0603 (vpravo).

Druhým použitým substrátem jsou flexibilní plošné spoje MELINEX® ST504 se stříbrnou vodivou vrstvou DuPont 5064H (nadále označované jako „FDPS Ag“) (viz. Obrázek 12)

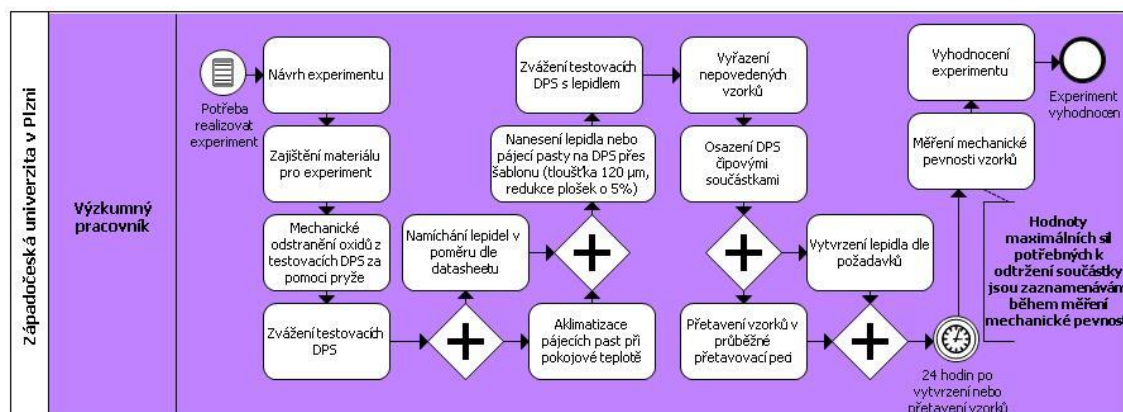
Třetím použitým substrátem jsou flexibilní plošné spoje DuPont™ Pyralux® AC s měděnou vodivou vrstvou bez povrchové úpravy (nadále označované jako „FDPS Cu“) (viz. Obrázek 12)



**Obrázek 12:** Testovací FDPS Ag s osazenými součástkami o velikosti 1206 (vlevo) a FDPS Cu (vpravo).

### 3.1.2 Popis prvního experimentu

Popis experimentu je namodelován jako proces pomocí metodiky BPMN 2.0. Tento proces je zobrazen na obrázku (Obrázek 13).

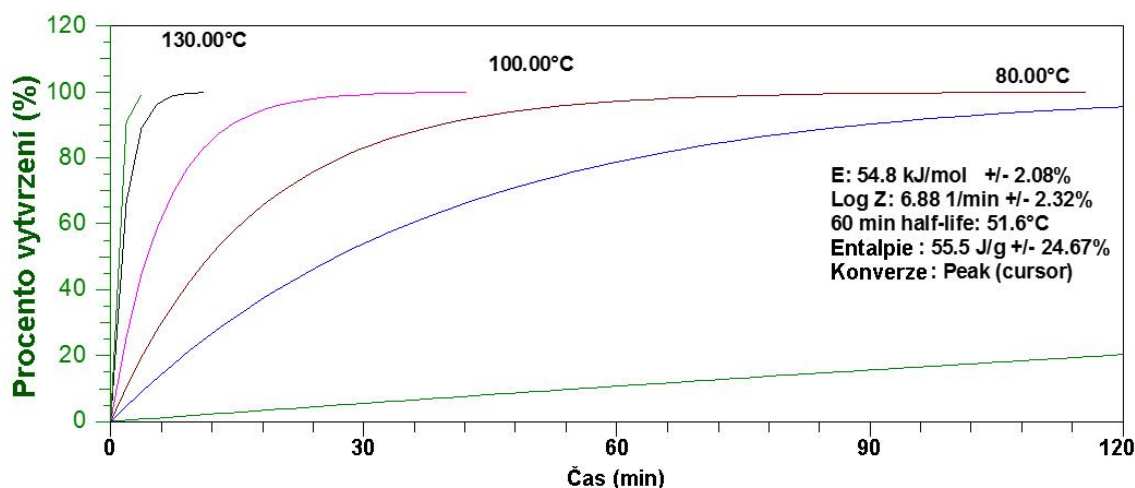


Obrázek 13: Postup realizace experimentu.

Pro doplnění informací k obrázku, který popisuje postup realizace experimentu je potřeba zmínit, že pro vážení testovacích vzorků a množství jednotlivých složek lepidel byla použita analytická laboratorní váha Kern ALJ 120-4. Dále je vhodné zmínit, že plošky na šabloně jsou redukovány o 5% šířky a délky vzhledem k ploškám v motivu na DPS, které jsou standardizované.

Tabulka zobrazující všechny použité kombinace vzorků je pro její rozsáhlost umístěna v příloze (Příloha A - Tabulka 14). Jak vyplývá z tabulek (Tabulka 4, Tabulka 5, Tabulka 14), byly pro experiment na tuhých DPS použity všechny doporučené vytvrzovací profily a navíc byl navržen a otestován u lepidla H20S profil 135 °C / 15 minut a u lepidla 8331S profil 130 °C / 30 minut. Tyto profily byly zvoleny z několika důvodů. Hypotézou (A) bylo, že vyšší teplota by mohla zlepšit mechanické vlastnosti lepidla. Zároveň je však plánováno využití těchto lepidel na flexibilní substráty (PET, PEN), u kterých bývá maximální vytvrzovací teplota pod 150 °C. Z tohoto důvodu byly zvoleny teploty, které by tyto substráty měly bez problémů vydržet. Konkrétní čas vytvrzení byl u profilu 135°C / 15 minut ponechán z doporučeného profilu 120°C / 15 minut a byla pouze zvýšena teplota. U lepidla 8331S byla provedena DSC analýza (Obrázek 14). S přihlédnutím k této analýze a doporučeným časům pro nižší teploty byl stanoven profil 130°C / 30 minut. Kromě těchto profilů, které nejsou doporučené výrobcem, byl test rozšířen o vytvrzení lepidla nejen za pomoci teploty, ale také s pomocí

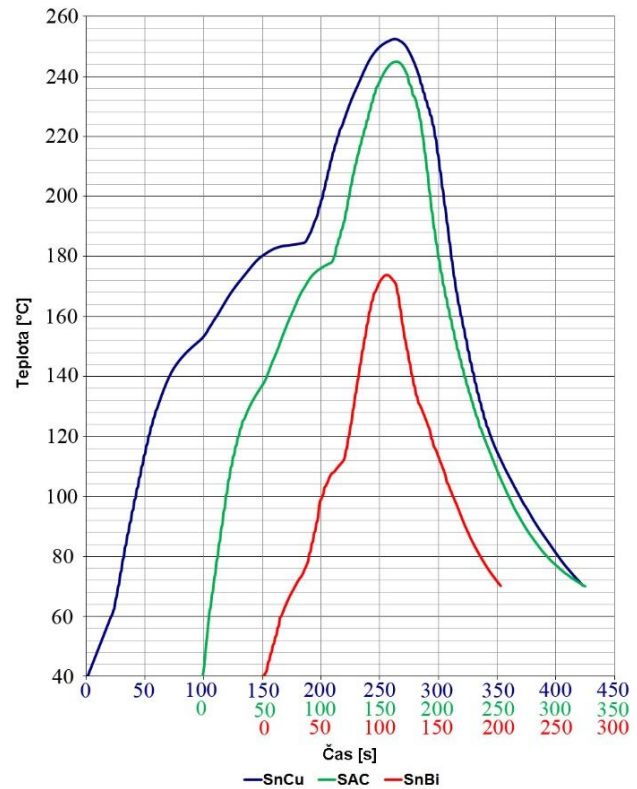
zvýšeného tlaku. Další hypotézou (B) bylo, že pokud bude při běžném vytvrzování zvýšen tlak na lepené spoje, bude jejich mechanická pevnost po vytvrzení vyšší. Byly vybrány dva profily („Zatížení 11“, „Zatížení 61“), kde byly vytvořeny pro velikost 1206 další vzorky, které byly vytvrzeny s použitím závaží. Hmotnost závaží byla 200g, což při přepočtu na tlak vychází na 140,5kPa. Pro vytvrzení všech lepených vzorků byla použita sušička Heraeus 5050.



**Obrázek 14:** Výsledek DSC analýzy pro lepidlo 8331S.

Pro porovnání výsledků byl experiment na tuhých DPS realizován i pro pájené spoje. Konkrétně se jednalo o pájecí slitinu SnCu od společnosti Cobar o hmotnostním složení Sn 99,3 %, Cu 0,7%, Ni, Ge. Slitina byla použita v podobě pájecí pasty o velikosti zrn 25 – 45  $\mu\text{m}$  a obsahu tavidla 12 % hmotnosti. Tato slitina má teplotu tavení 227 °C [77]. Druhou použitou slitinou byla bezolovnatá slitina SAC od společnosti Shenmao Technology o hmotnostním složení Sn 96,5 %, Ag 3 % a Cu 0,5 %. Slitina byla použita v podobě pájecí pasty o velikosti zrn 20 - 38  $\mu\text{m}$  a obsahu tavidla 11,5 % hmotnosti. Tato slitina má teplotu tavení 217 - 219 °C [78]. Třetí slitinou je taktéž bezolovnatá slitina SnBi od společnosti Shenmao Technology o hmotnostním složení Bi 58 % a Sn 42 %. Slitina byla použita v podobě pájecí pasty o velikosti zrn 20 - 45  $\mu\text{m}$  a obsahu tavidla 10 % hmotnosti. Tato slitina má teplotu tavení 139 °C [79].

Pro každou pájecí slitinu byl zvolen pájecí profil na základě doporučení výrobců past pro jejich přetavení a na základě možností, které dovoluje použitá přetavovací pec. K přetavení došlo pomocí průběžné konvekční přetavovací pece Mistral 260 od společnosti TECHNOPRINT. Pájecí profily pro jednotlivé pájecí slitiny byly naměřeny za pomoci vytvořeného přípravku pro měření teploty, s použitím přístroje METRAHIT od společnosti Gossen Metrawatt, a s použitím programu LabView od společnosti National Instruments. Tyto profily jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek 15).

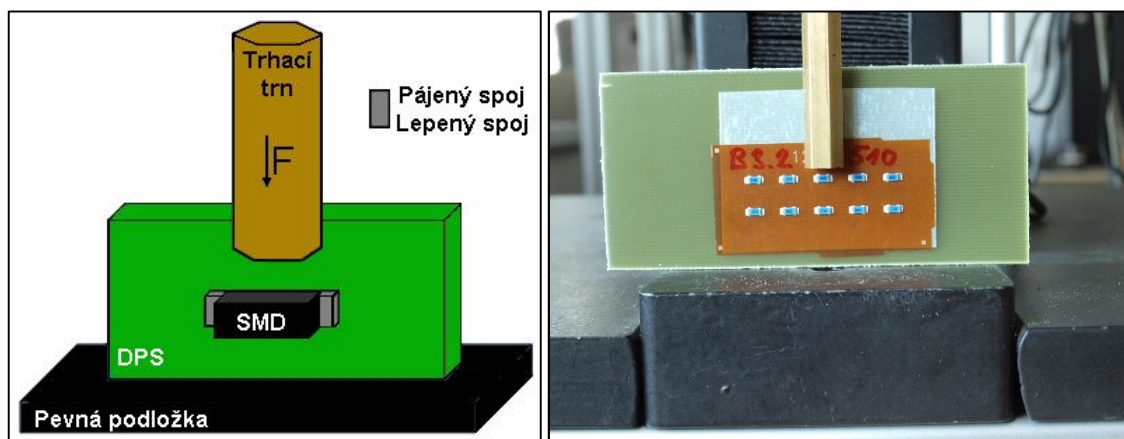


**Obrázek 15:** Naměřené pájecí profily použité pro přetavení jednotlivých pájecích slitin.

Zmíněný experiment byl dále rozšířen o flexibilní substráty. U těchto substrátů byly, na základě výsledků experimentu s tuhými substráty, vybrány pouze některé vytvrzovací profily. Pro substrát FDPS Cu byly použity obě výše zmíněná lepidla s vytvrzovacími profily 120°C/15minut, 135°C/15minut a 150°C/5minut pro lepidlo H20S a profily 100°C/50minut a 130°C/30minut pro lepidlo 8331S. Dále byly použity tři výše zmíněné pájecí slitiny. Všechny vzorky byly realizovány pro součástky o velikosti 1206, 0805 a 0603. U substrátu FDPS Ag nebylo, z důvodu jeho malé teplotní odolnosti, možné realizovat testování pájecích slitin a také nebylo možné uskutečnit test s vytvrzovacím profilem 150°C/5minut. Kromě těchto výjimek byl experiment totožný s experimentem na FDPS Cu. Samotné označení jednotlivých vzorků a použité parametry jsou zobrazeny v příloze (Příloha A - Tabulka 15).

### 3.1.3 Měření mechanické pevnosti lepeného spoje

Jak již bylo řečeno, u všech vzorků bylo provedeno měření mechanické pevnosti. Cílem bylo porovnat obě lepidla, jednotlivé vytvrzovací profily, jednotlivé typy substrátů a také srovnat výsledky s pájenými spoji. Bylo provedeno měření na deseti rezistorech od každého vzorku DPS. Testována byla pevnost ve smyku lepeného spoje. Princip tohoto testu je zobrazen na obrázku (Obrázek 16). Trnem je působeno silou na součástku až do okamžiku porušení spoje a utržení součástky. U flexibilních substrátů byl každý vzorek před testem přilepen k tuhé DPS, aby bylo možné tento test uskutečnit. Nebyla měřena přímá pevnost ve smyku, jelikož by bylo nutné znát plochu, na kterou působila síla. Vyhodnocována je maximální zaznamenaná síla během testu. Mechanická pevnost lepeného spoje byla měřena na trhacím zařízení LabTest 3.030. Nastavení zařízení bylo následující: rychlost posunu trhacího trnu 20 mm/min, návrat čelistí 200 mm/min, kritérium ukončení testu při dosažení 50 % maximální síly ( $F_{max}$ ).

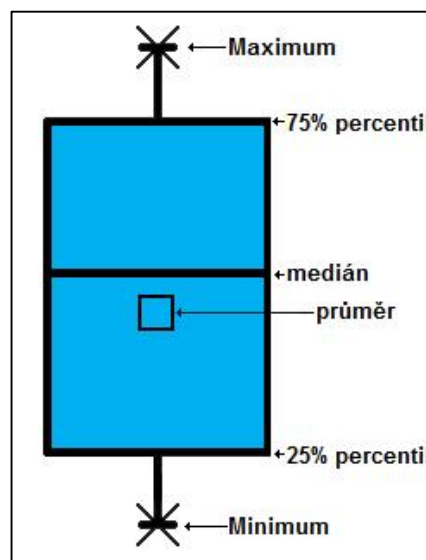


Obrázek 16: Princip měření pevnosti spoje ve smyku.

### 3.1.4 Výsledky prvního experimentu

Jak bylo popsáno v kapitole 3.1.2, byl každý vzorek zvážen před nanesením lepidla a po nanesení lepidla. Tyto hodnoty a vypočtené průměrné hmotnosti lepidla jedné plošky jsou zobrazeny v tabulkách v příloze této práce (Tabulka 16, Tabulka 17).

Vzhledem k tomu, že výsledky experimentu jsou rozsáhlé, jsou tyto výsledky rozděleny do několika částí. Pro každý vzorek bylo naměřeno deset hodnot maximálních sil. Tyto hodnoty byly následně statisticky zpracovány. Pro toto zpracování je na obrázku (Obrázek 17) zobrazena legenda.

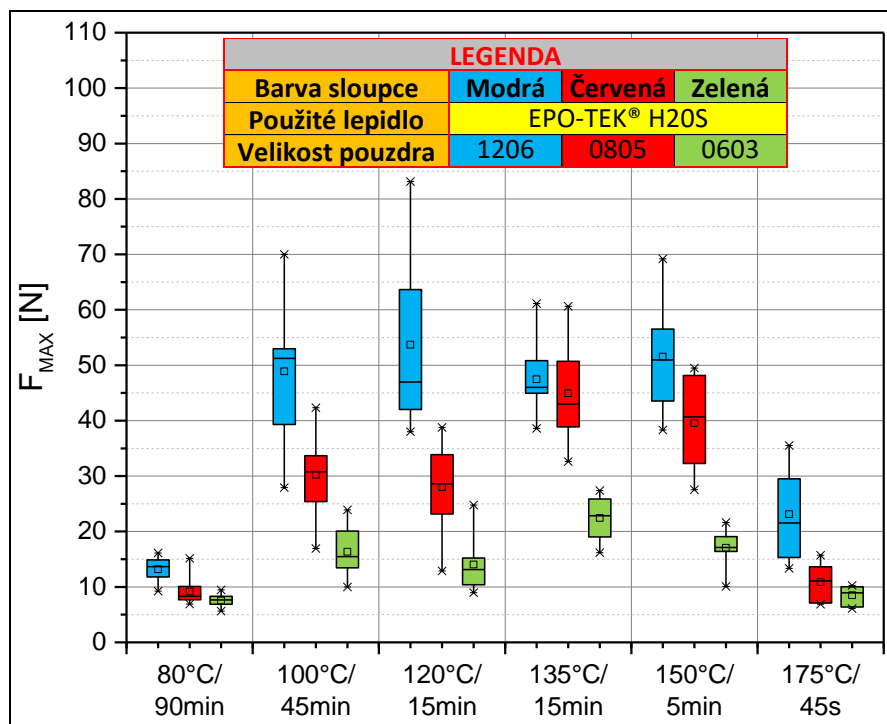


Obrázek 17: Legenda statistického zpracování výsledků.

#### 3.1.4.1 Výsledky lepidla H20S

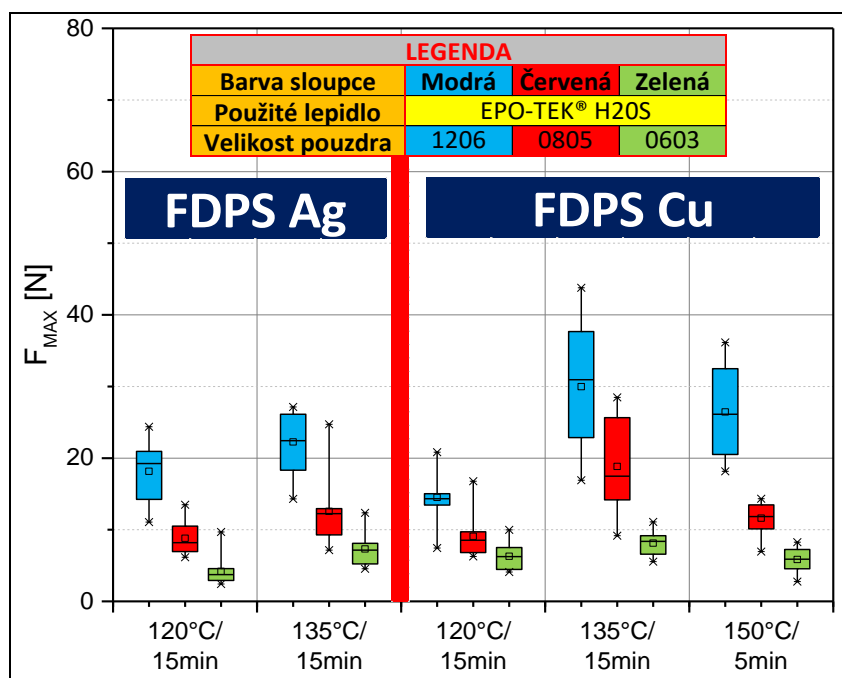
Z výsledků vzorků testovaných na tuhých substrátech pro lepidlo H20S zobrazených na obrázku (Obrázek 18) vyplývá, že vytvrzovací profily 80 °C / 90 minut a 175 °C / 45 sekund nejsou z hlediska požadavku na dobrou mechanickou pevnost příliš vhodné. Co se týče ostatních profilů, je možné pozorovat odlišnosti u různých velikostí součástek. Velmi dobře se jeví profil 135 °C / 15 minut, který je u součástek 0805 a 0603 nejlepší. U součástek 1206 je nepatrně nižší, což může být způsobeno nepatrně nižším množstvím lepidla na tomto vzorku. Avšak tento profil není udáván výrobcem, a proto jsou otázkou elektrické vlastnosti a spolehlivost lepeného spoje vytvrzeného tímto profilem. Také profily 100 °C / 45 minut, 120 °C / 15 minut a 150 °C / 5 minut se jeví poměrně dobře.





Obrázek 18: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS.

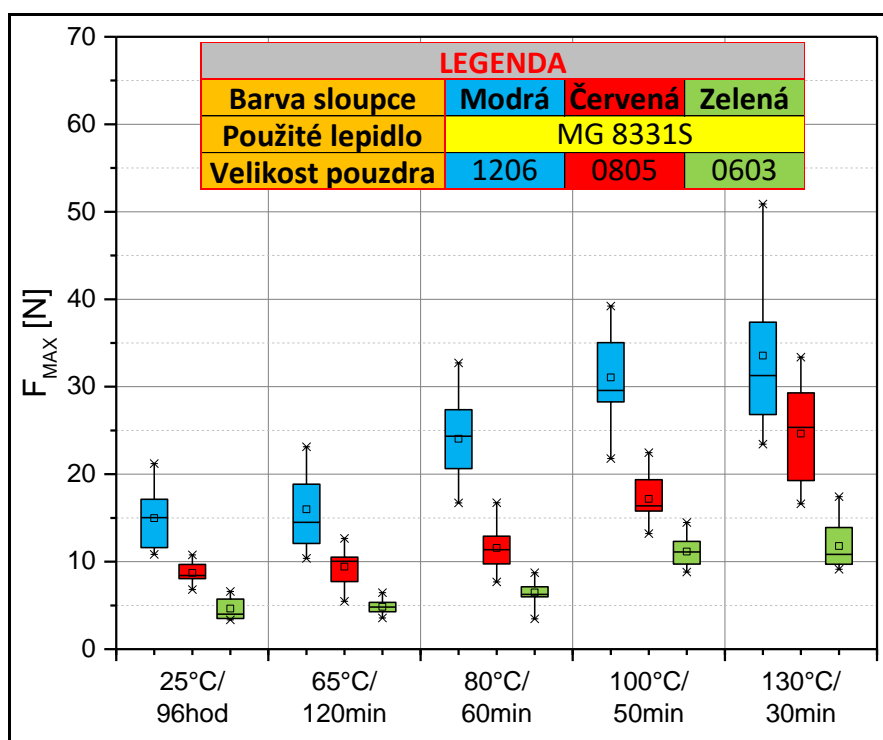
U výsledků mechanické pevnosti vzorků na flexibilních substrátech (Obrázek 19) je patrná vyšší mechanická pevnost u vzorků na FDPS Cu s výjimkou vzorků se součástkami o velikosti 0603, které mají mechanickou pevnost srovnatelnou. Při porovnání mechanické pevnosti vzorků na tuhých a flexibilních substrátech jsou hodnoty na flexibilních substrátech o 50 až 70% nižší než na tuhých substrátech.



Obrázek 19: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS.

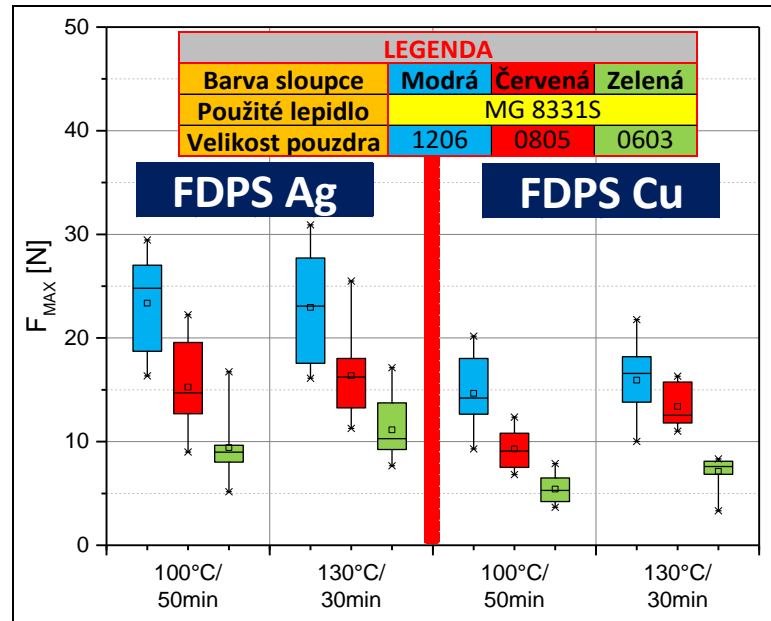
### 3.1.4.2 Výsledky lepidla 8331S

Z výsledků vzorků testovaných na tuhých substrátech pro lepidlo 8331S zobrazených na obrázku (Obrázek 20) vyplývá, že čím vyšší je teplota vytvrzení, tím lepší je i mechanická pevnost lepeného spoje. U tohoto lepidla se potvrdila hypotéza (A), že zvýšení teploty způsobí zlepšení mechanické pevnosti. Z obrázku je však patrné, že u tohoto profilu je větší rozptyl hodnot. I přes tuto skutečnost lze říci, že je tento profil (130 °C / 30 minut) nejlepší. Vzhledem k tomu, že tento profil není doporučen výrobcem v katalogovém listu, zůstává otázkou, jaké budou elektrické vlastnosti, a také spolehlivost lepeného spoje vytvrzeného tímto profilem. Jako dobrý se také jeví vytvrzovací profil 100 °C / 50 minut.



Obrázek 20: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS.

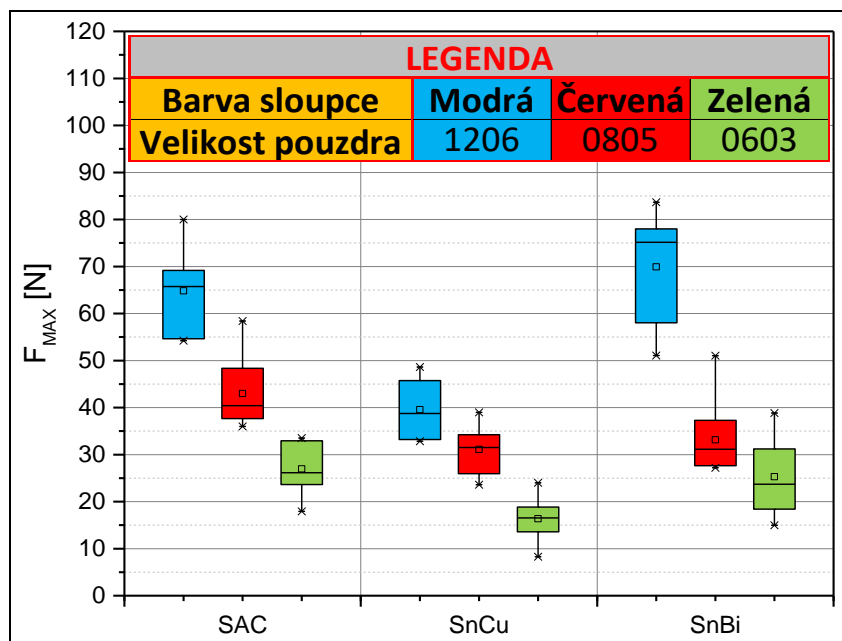
U výsledků mechanické pevnosti vzorků na flexibilních substrátech (Obrázek 21) je patrná vyšší mechanická pevnost u vzorků na FDPS Ag. Při porovnání mechanické pevnosti vzorků na tuhých a flexibilních substrátech jsou hodnoty na flexibilních substrátech o 40 až 60% nižší než na tuhých substrátech.



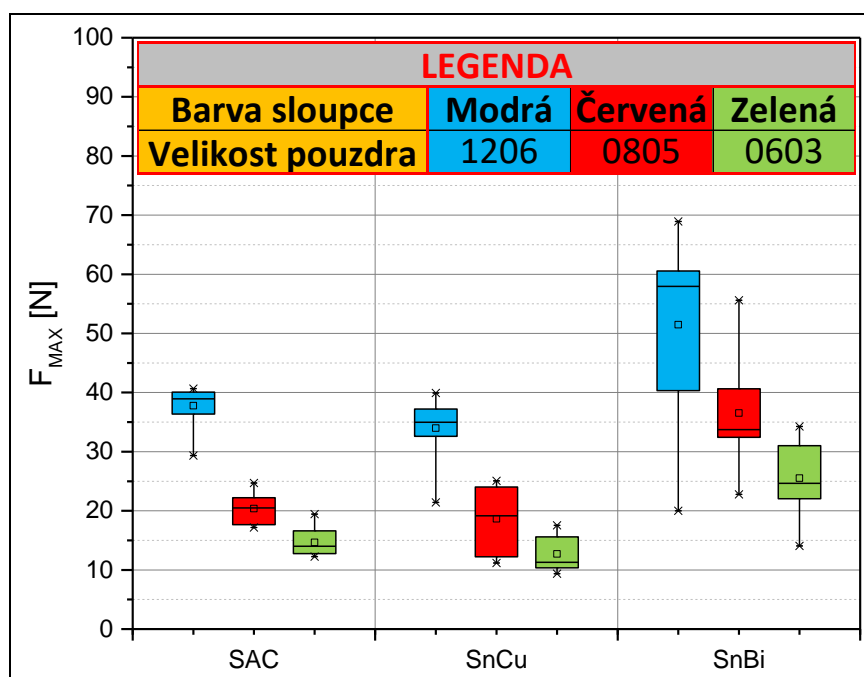
Obrázek 21: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS.

### 3.1.4.3 Výsledky pájených spojů

Pájecí slitiny byly testovány pro účely porovnání výsledků lepených spojů s pájenými spoji. Z tohoto důvodu byly použity pouze tři pájecí slitiny a pro každou tuto slitinu pouze jeden pájecí profil. Vše proběhlo stejným způsobem jako u lepených spojů s výjimkou vytvrzení, které u pájených spojů nahradilo přetavení v průběžné peci. Výsledky pájených spojů na tuhých DPS ukazují, že pájené spoje mají vyšší mechanickou pevnost než lepené v případě použití SnBi nebo SAC pájecích slitin. V případě použití slitiny SnCu, která je v praxi využívána především pro pájení vlnou z důvodu její nižší ceny, je hodnota maximální síly srovnatelná s nejlepšími hodnotami pro lepidlo 8331S a mírně nižší než nejlepší hodnoty pro lepidlo H20S. U flexibilních substrátů je mechanická pevnost pájených spojů vyšší než mechanická pevnost lepených spojů pro všechny použité pájecí slitiny.



Obrázek 22: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pájeného spoje na TDPS.



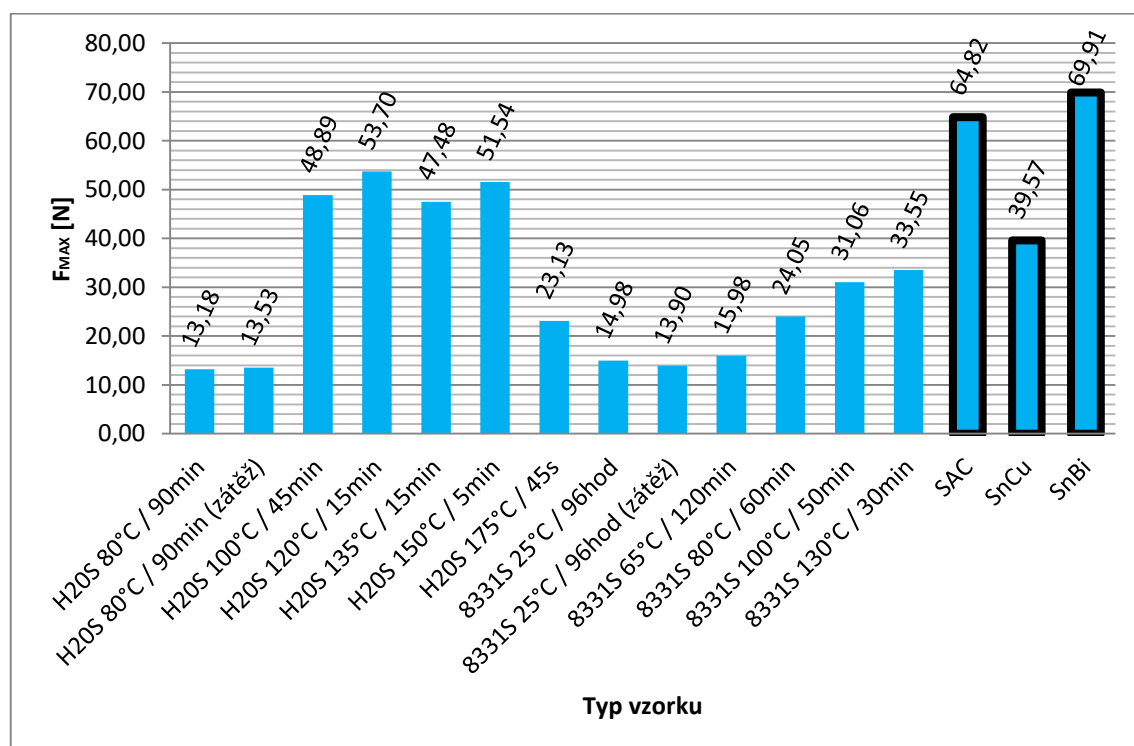
Obrázek 23: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pájeného spoje na FDPS Cu.

### 3.1.4.4 Shrnutí výsledků prvního experimentu

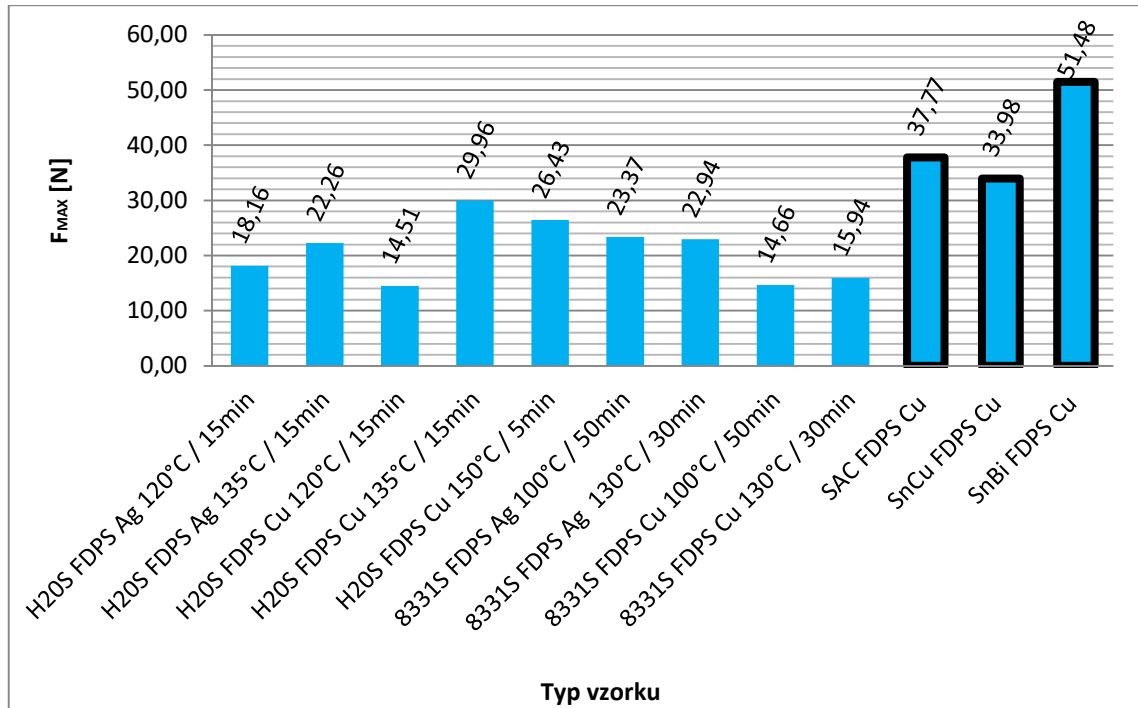
U součástek 1206 byly na tuhých substrátech testovány 2 vzorky, které byly při vytvrzení zatížené závažím o hmotnosti 200g. Toto vytvrzení při zvýšeném tlaku bylo realizováno za pomoci druhé tuhé DPS, která byla opatrně přiložena na osazené součástky a na tuto DPS bylo vloženo závaží o dané hmotnosti. Po vytvrzení bylo závaží i druhá DPS ze vzorku odstraněny. Z výsledků na obrázku (Obrázek 24) je patrné, že zatížení

vzorku závažím nemá prakticky žádný vliv na výslednou mechanickou pevnost, proto bylo rozhodnuto se dále tímto vlivem nezabývat. U lepidla H20S jsou výsledky poměrně překvapivé a lze říci, že při vhodném vytvrzovacím profilu se mechanická pevnost přibližuje pájeným spojům. Lepidlo 8331S má mechanickou pevnost obecně nižší než lepidlo H20S.

U součástek 1206 osazených na flexibilních substrátech jsou výsledky výrazně nižší oproti stejným podmínkám na tuhých substrátech. Tento významný pokles je zčásti způsoben odlišnou vodivou vrstvou na některých substrátech, a také samotnou flexibilitou těchto substrátů. Použitá lepidla a pájky jsou tvrdá a tím i křehká při ohybu. Konkrétně lze pozorovat, že mechanická pevnost u lepidla H20S je mírně nižší pro substrát s měděným vodivým motivem, avšak u lepidla 8331S lze pozorovat přesně opačný trend.



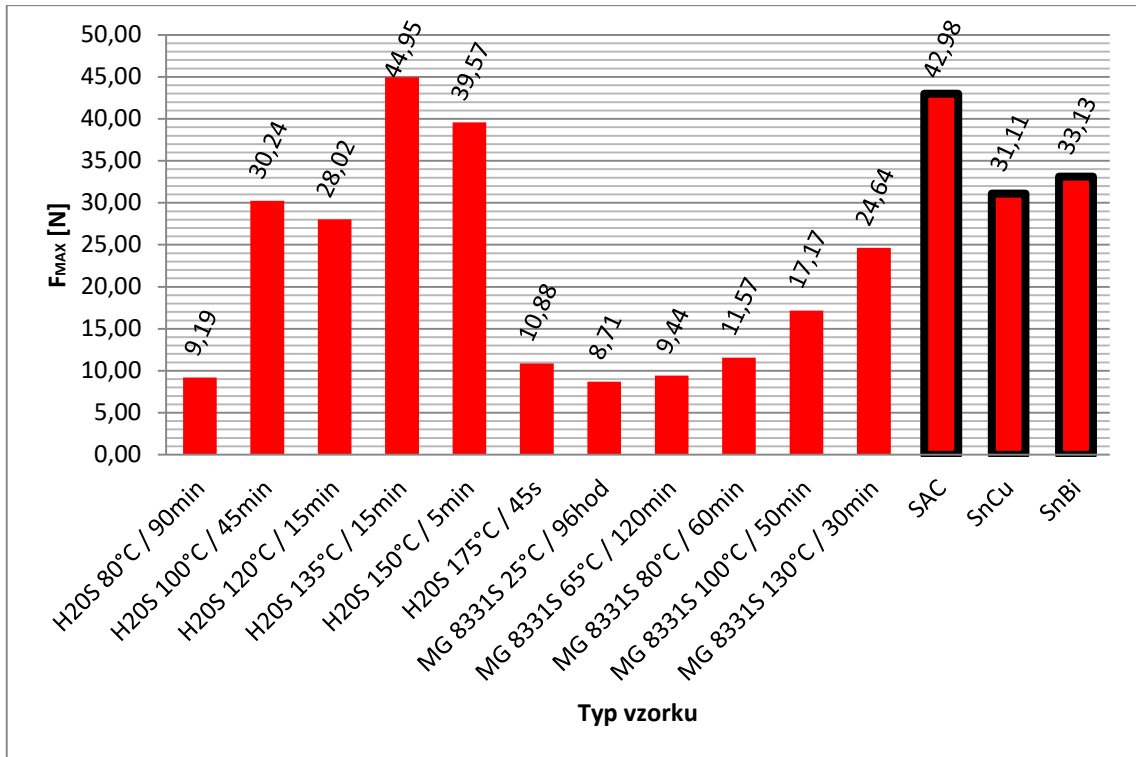
**Obrázek 24:** Souhrn výsledků pro součástky 1206 osazené na tuhých substrátech.



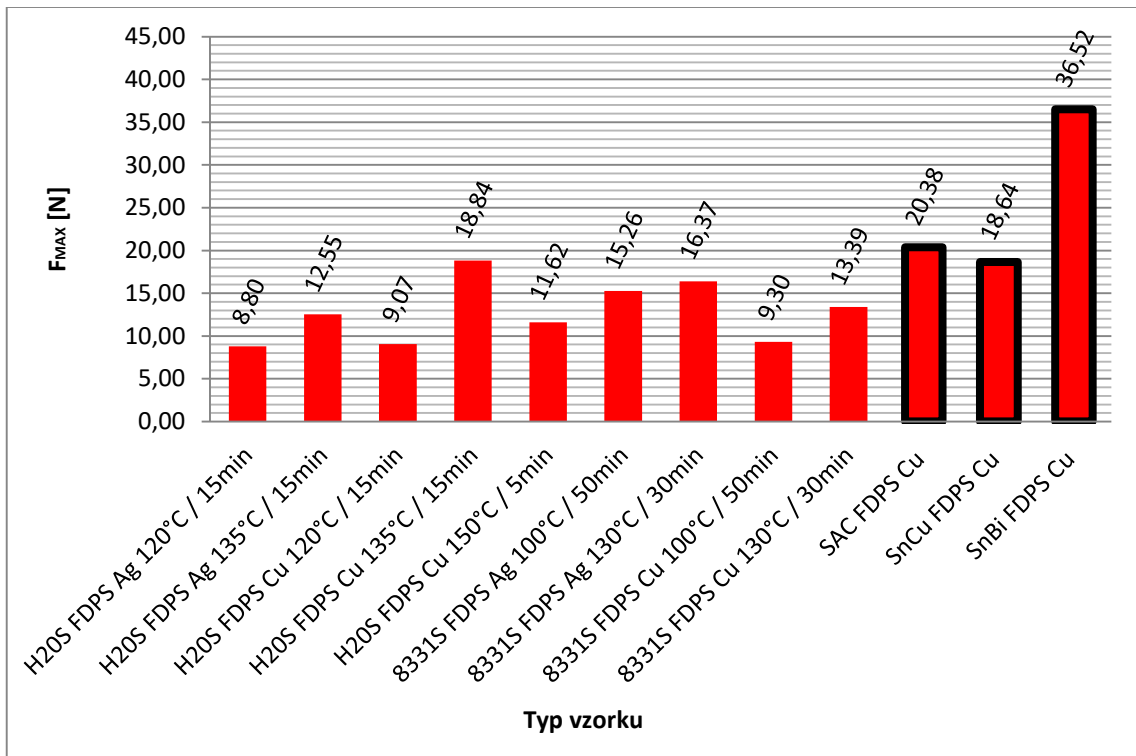
Obrázek 25: Souhrn výsledků pro součástky 1206 osazené na flexibilních substrátech.

V případě součástek 0805 jsou výsledky celkově nižší, což odpovídá předpokladům, vzhledem k menšímu množství naneseného lepidla a menším propojovacím ploškám. U tuhých substrátů vychází lépe lepidlo H20S, u kterého je mechanická pevnost u profilu 135°C / 15 minut dokonce lepší než pájené spoje (SAC, SnBi). Výsledky s lepidlem 8331S jsou opět poněkud nižší avšak například profil 130°C / 30 minut se jeví poměrně příznivě.

V případě flexibilních substrátů a součástek 0805 je mechanická pevnost u lepidla H20S opět mírně nižší pro substrát s měděným vodivým motivem, avšak u lepidla 8331S lze pozorovat přesně opačný trend.



Obrázek 26: Souhrn výsledků pro součástky 0805 osazené na tuhých substrátech.

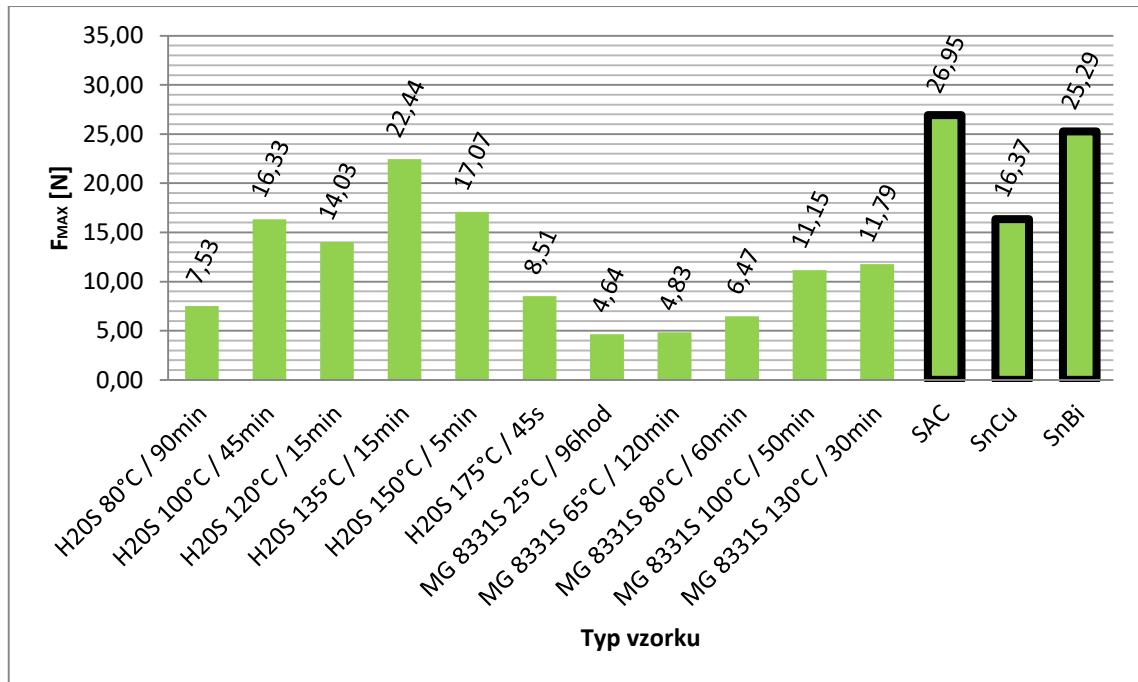


Obrázek 27: Souhrn výsledků pro součástky 0805 osazené na flexibilních substrátech.

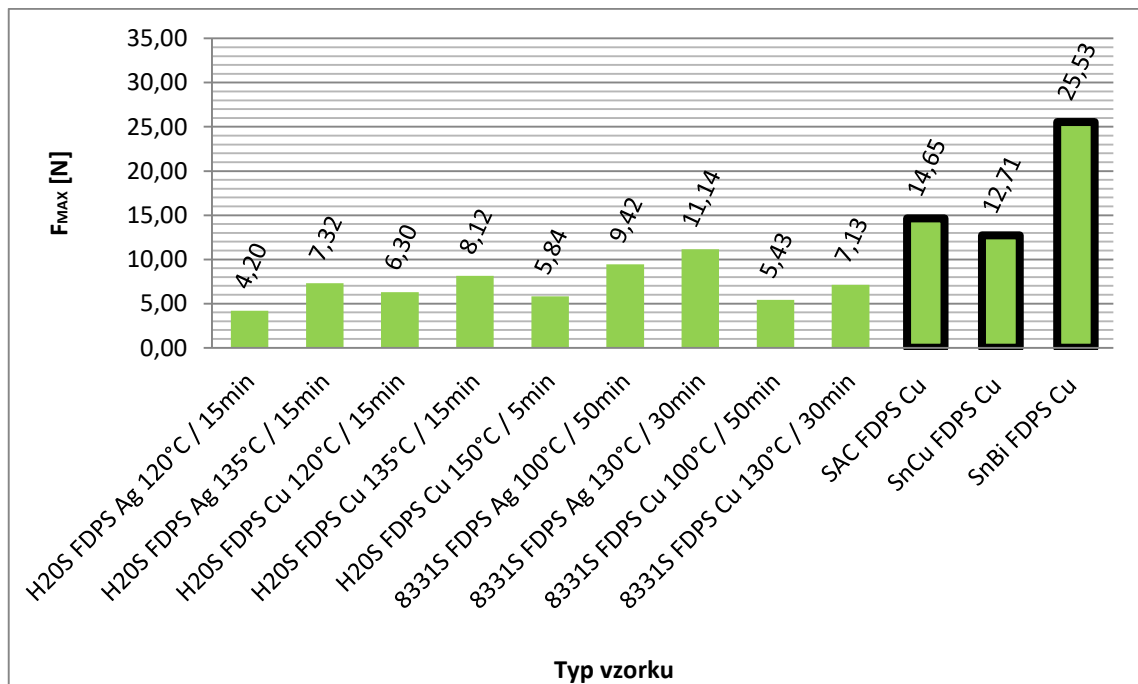
V případě součástek 0603 jsou výsledky opět celkově nižší oproti 0805 i 1206, což odpovídá předpokladům, vzhledem k ještě menšímu množství naneseného lepidla

a ještě menším propojovacím ploškám. I zde vychází na tuhých substrátech lépe lepidlo H20S. Výsledky s lepidlem 8331S jsou opět poněkud nižší.

U flexibilních substrátů jsou výsledky srovnatelné s výsledky naměřenými na součástkách 1206 a 0805.



**Obrázek 28:** Souhrn výsledků pro součástky 0603 osazené na tuhých substrátech.



**Obrázek 29:** Souhrn výsledků pro součástky 0603 osazené na flexibilních substrátech.



U pájených spojů lze obecně pozorovat nižší mechanickou pevnost při použití na flexibilních substrátech oproti tuhým substrátům. Z pohledu slitin jsou výsledky na tuhých substrátech pro slitinu SnCu výrazně nižší než pro ostatní testované slitiny. Na flexibilních substrátech jsou výsledky pro pájku SnBi výrazně vyšší než pro ostatní slitiny a lze tedy přepokládat, že slitina SnBi je o něco flexibilnější.

Hypotézu (A), že vyšší vytvrzovací teplota zlepší mechanické vlastnosti lepidla lze potvrdit u lepidla 8331S. V případě lepidla H20S lze tuto hypotézu obecně zamítnout, avšak v případě srovnání profilů se stejným časem vytvrzení a odlišnými teplotami (120°C x 135°C) lze i zde tuto hypotézu potvrdit.

Hypotézu (B), že pokud bude při běžném vytvrzování zvýšen tlak na lepené spoje, bude jejich mechanická pevnost po vytvrzení vyšší lze u obou lepidel zamítnout.

## **3.2 Druhý experiment – vliv množství lepidla na mechanickou pevnost spoje**

V rámci dalšího výzkumu byl realizován experiment zabývající se vlivem množství naneseného elektricky vodivého lepidla na mechanickou pevnost lepeného spoje. Tento experiment měl potvrdit či vyvrátit hypotézu (C), že snížení množství elektricky vodivého lepidla nebude mít kritický vliv na mechanickou pevnost spoje. Potvrzením této hypotézy by bylo možné doporučit snížení množství lepidla, při zachování dostatečné mechanické pevnosti, čímž by došlo ke snížení výrobních nákladů na lepený spoj. Redukce výrobních nákladů je jedním z klíčových parametrů vyžadovaných v průmyslu a je vždy velkým přínosem.

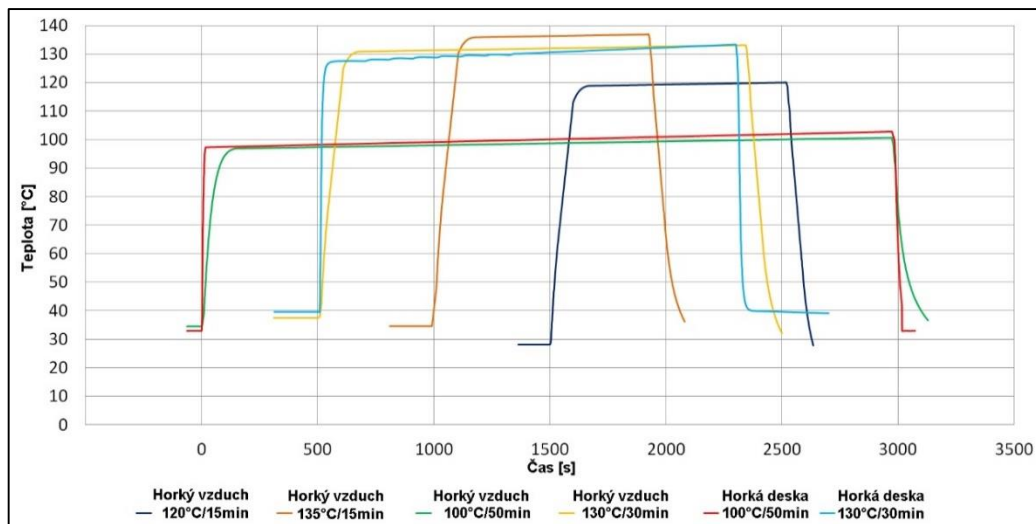
### **3.2.1 Popis druhého experimentu**

Pro tento experiment byly využity některé materiály a postupy popsané v předchozí kapitole, proto je zde pouze stručně připomenuto. Pro experiment byly použity 2 druhy elektricky vodivých lepidel, konkrétně EPO-TEK® H20S a MG 8331S. Pro každé lepidlo byly zvoleny, na základě poznatků z prvního experimentu, dva vytvrzovací profily. Pro lepidlo H20S se jedná o profily 120°C / 15 minut a 135°C / 15 minut. U lepidla 8331S byly zvoleny profily 100°C / 50 minut a 130°C / 30 minut. Vzorky byly vytvrzovány za pomoci sušičky Heraeus 5050.

U části tohoto experimentu bylo navíc testováno vytvrzování za pomoci metody tzv. horké desky. Tato metoda spočívá v použití masivní kovové desky, která byla

vložena do sušičky Heraeus 5050. Následně byla tato deska nahřata na teplotu vytvrzení, poté byly na tuto desku vloženy teflonové kvádry a po jejich nahřátí byly vzorky vloženy na tuto horkou desku a zatíženy zmíněnými teflonovými kvádry. V tomto stavu došlo k vytvrzení vzorků. Výhodou této metody je rychlejší přestup tepla na vzorky a tedy rychlejší ohřátí vzorků na začátku vytvrzení. Hypotézou (D) bylo, že při použití horké desky bude spoj vytvrzen lépe a tedy bude mít i vyšší mechanickou pevnost. Tato metoda byla použita pouze pro substrát FDPS Cu a lepidlo 8331S.

Jednotlivé vytvrzovací profily pro substrát FDPS Cu byly zaznamenány za pomoci teplotního senzoru Pt 1000 a jsou zobrazeny v grafu (Obrázek 30). Graf potvrdil rychlejší nárůst teploty při použití metody „horké desky“, zároveň však přinesl otázku, zda bude tento rychlejší nárůst teploty významný, při použitých vytvrzovacích časech v řádu desítek minut.



**Obrázek 30:** Vytvrzovací profily pro substrát FDPS Cu.

U tohoto experimentu byly použity tři různé substráty, které byly použité již při prvním experimentu. Jedná se o substrát TDPS Cu, FDPS Cu, FDPS Ag. Dále byly použity součástky o velikosti 1206, 0805 a 0603.

Pro zajištění odlišného množství lepidla u jednotlivých spojů bylo použito šablonového tisku se dvěma typy šablon o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  a 80  $\mu\text{m}$ . Otvory pro jednotlivé plošky součástek byly redukovány vzhledem k velikosti těchto plošek o 5%, 10% a 20% šířky i délky. Celkem bylo použito pět odlišných množství lepidla, přičemž nejvyšší množství bylo označeno jako 100% a ostatní množství byla vztažena k tomuto množství. V případě flexibilních substrátů byla z ekonomických důvodů

použita pouze tři množství, která jsou v následující tabulce zvýrazněna zeleně (Tabulka 6).

**Tabulka 6:** Použitá množství lepidel pro druhý experiment.

Množství	100%	90%	71%	60%	47%
Tloušťka šablony	120 $\mu\text{m}$	120 $\mu\text{m}$	120 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$
Redukce otvorů	5%	10%	20%	10%	20%

Před a po nanesení elektricky vodivého lepidla byly vzorky zváženy pomocí analytické laboratorní váhy RADWAG XA 52/2X.

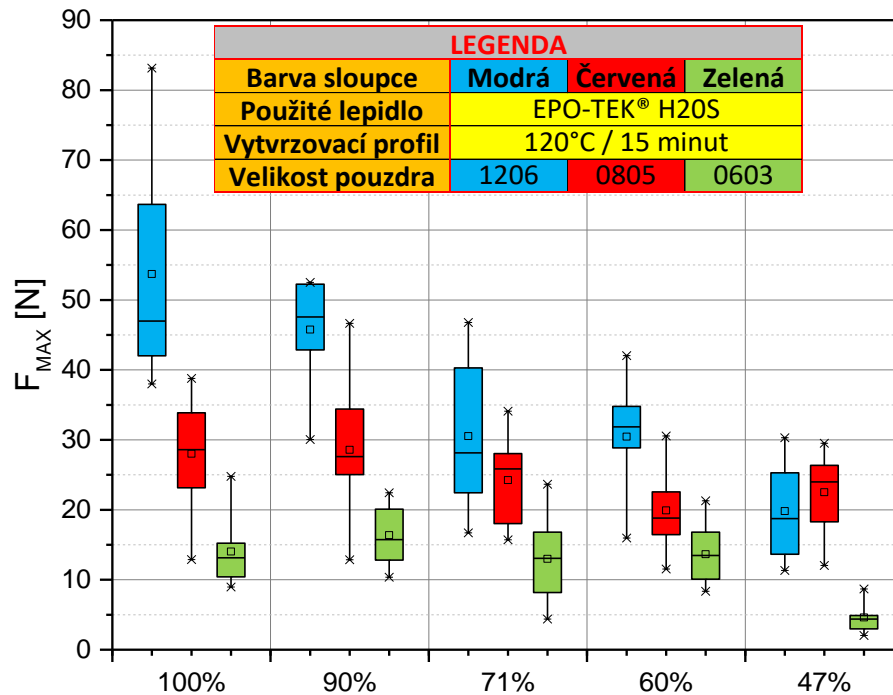
Výsledkem experimentu byly naměřené maximální síly potřebné k odtržení součástky, které byly měřeny shodným způsobem jako v prvním experimentu.

### 3.2.2 Výsledky druhého experimentu

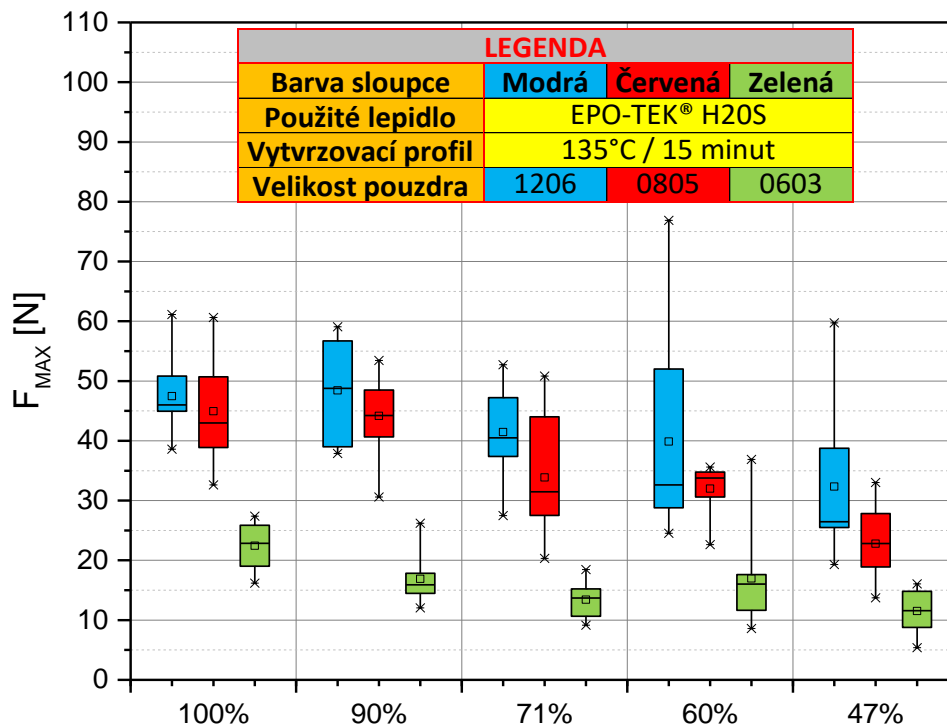
Z důvodu rozsáhlosti výsledků, byly tyto výsledky rozděleny do několika částí. Pro každý testovaný vzorek bylo naměřeno deset hodnot maximálních sil. Tyto hodnoty byly následně statisticky zpracovány. Pro další vyhodnocení výsledků tohoto experimentu byla také použita faktorová analýza, která se zpravidla využívá pro zjištění více či méně významných faktorů. Výsledky této analýzy by měly potvrdit či vyvrátit stanovené hypotézy (C), (D).

#### 3.2.2.1 Výsledky druhého experimentu na tuhém substrátu (TDPS Cu)

U výsledků vzorků testovaných na tuhých substrátech pro lepidlo H20S zobrazených na obrázcích (Obrázek 31, Obrázek 32) je možné pozorovat snižování mechanické pevnosti lepeného spoje při snižování množství naneseného vodivého lepidla. Tento jev je patrný u obou použitých vytvrzovacích teplot a u všech použitých velikostí součástek, avšak u menších součástek je tento jev méně výrazný.



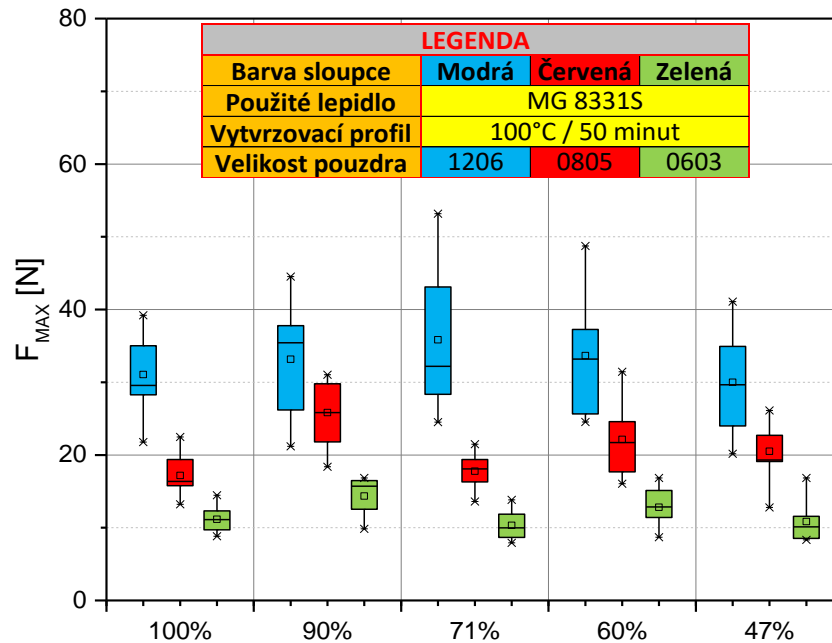
**Obrázek 31:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS, lepidlo H20S a nižší vytvrzovací teplotu.



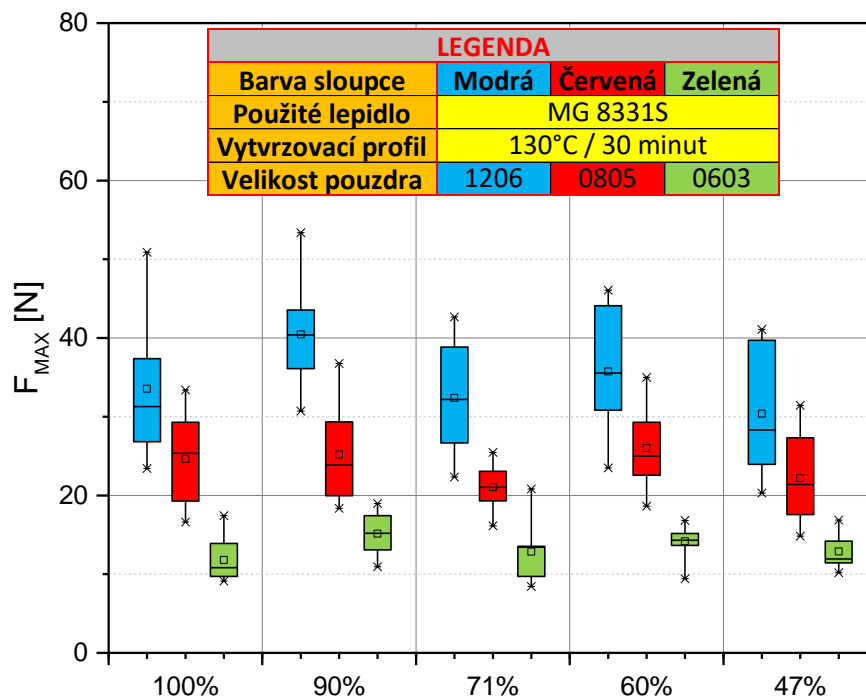
**Obrázek 32:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS, lepidlo H20S a vyšší vytvrzovací teplotu.

U výsledků vzorků testovaných na tuhých substrátech pro lepidlo MG 8331S zobrazených na obrázcích (Obrázek 33, Obrázek 34) lze pozorovat setrvalou

mechanickou pevnost lepeného spoje při snižování množství naneseného vodivého lepidla. Tento stav je patrný u obou použitých vytvrzovacích teplot a u všech použitých velikostí součástek.

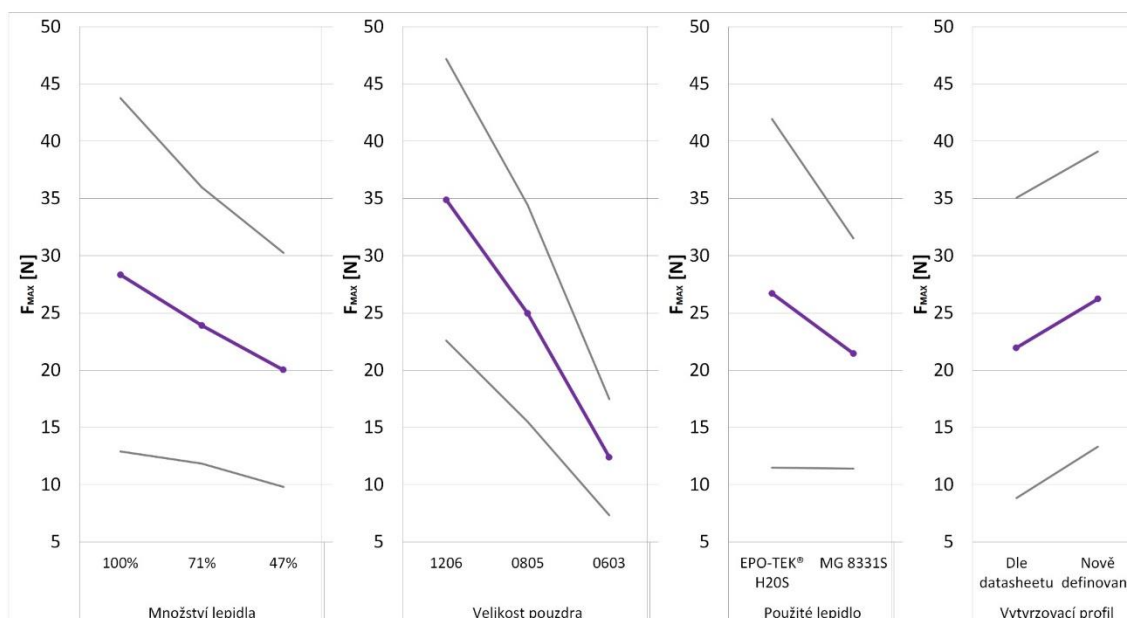


Obrázek 33: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS, lepidlo 8331S a nižší vytvrzovací teplotu.



Obrázek 34: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS, lepidlo 8331S a vyšší vytvrzovací teplotu.

Na základě výsledků mechanické pevnosti spojů na tuhých substrátech byla vytvořena faktorová analýza (Obrázek 35). Nejvíce významným faktorem, který nejvíce ovlivňuje výslednou mechanickou pevnost lepených spojů na tuhých substrátech, je velikost pouzdra. Vzhledem k tomu, že velikost pouzdra přímo ovlivňuje plochu lepeného spoje a také množství naneseného lepidla, byl tento fakt předpokládán. Dalším významným faktorem je množství naneseného lepidla a použitý druh lepidla. Tyto faktory jsou zhruba stejně významné a lze říci, že snižování množství lepidla snižuje mechanickou pevnost a také, že lepidlo H20S má vyšší mechanickou pevnost než lepidlo 8331S při použití na tuhých substrátech. Posledním, avšak také nezanedbatelným faktorem, je vytvrzovací profil. Lze říci, že použití nově definovaného vytvrzovacího profilu zvýší u tuhých substrátů mechanickou pevnost lepeného spoje.

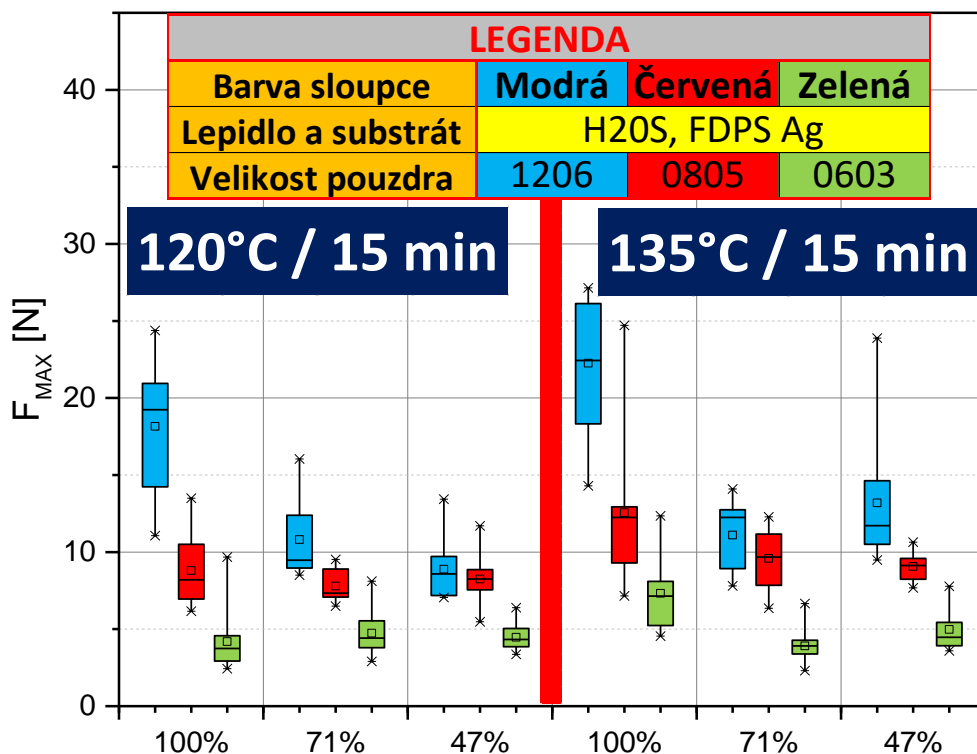


**Obrázek 35:** Vliv použitých faktorů na mechanickou pevnost lepeného spoje na tuhých substrátech podle metodologie DOE.

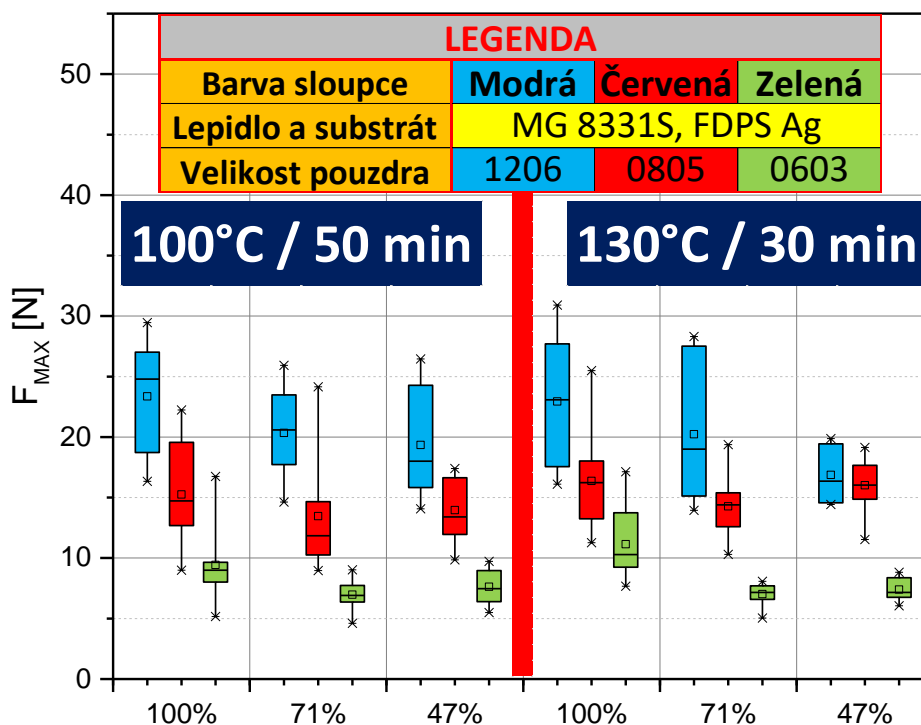
### 3.2.2.2 Výsledky druhého experimentu na flexibilních substrátech (FDPS Ag, FDPS Cu)

U výsledků vzorků testovaných na flexibilním substrátu se stříbrnou vodivou vrstvou (FDPS Ag) zobrazených na obrázcích (Obrázek 36, Obrázek 37) je možné, u lepidla H20S a součástek 1206, pozorovat snižování mechanické pevnosti lepeného spoje při snižování množství naneseného vodivého lepidla ze 100% na 71%. Při dalším snižování množství na 47% již však ke snížení mechanické pevnosti v podstatě nedochází. U menších

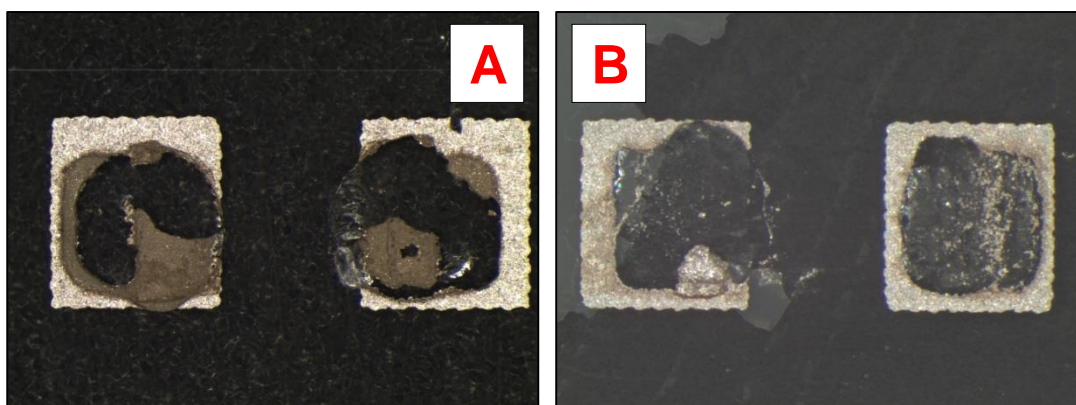
velikostí pouzder součástek k tomuto jevu nedochází a mechanická pevnost je víceméně konstantní. V případě lepidla MG 8331S lze říci, že při redukci množství lepidla dochází pouze k minimálnímu poklesu mechanické pevnosti. Pro bližší pochopení výsledků byly vzorky po odtržení součástek pozorovány pod mikroskopem a ukázky jednotlivých typů vzorků je možné vidět na obrázku (Obrázek 38). Na těchto snímcích je patrné, že u tohoto typu substrátu došlo k odtržení stříbrného vodivého motivu a tedy, že mechanická pevnost vodivého motivu je nižší než mechanická pevnost samotného lepidla. Dále byly u těchto vzorků realizovány metalografické výbrusy, které byly po vybroušení pozorovány laserovým konfokálním skenovacím mikroskopem (LEXT) (Obrázek 39) a pro zvýraznění jednotlivých materiálových struktur byl vzorek z obrázku B poté nasnímán fluorescenčním mikroskopem (Obrázek 40). Na těchto snímcích je možné pozorovat kohezní lom mezi vodivou vrstvou a flexibilním nosným materiálem, který je na posledním snímku označen červenou šipkou. V levé části těchto snímků je patrný adhezní lom ve vrstvě vodivého lepidla, který je označen fialovou šipkou.



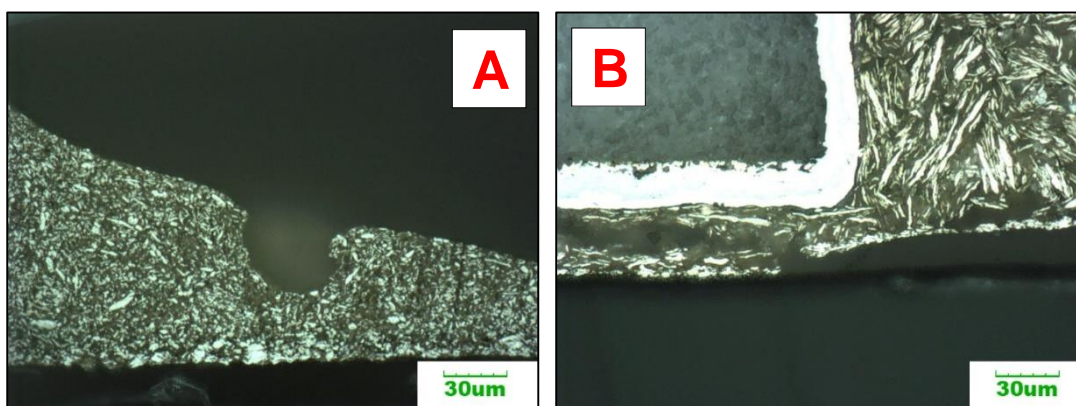
**Obrázek 36:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS s Ag a lepidlo H2O2.



Obrázek 37: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS s Ag a lepidlo 8331S.

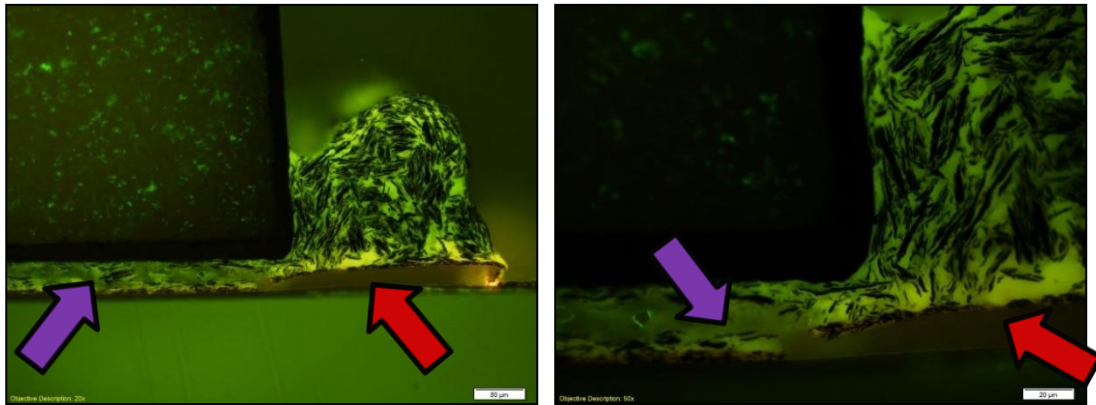


Obrázek 38: Detail odtrženého lepeného spoje na FDPS Ag – (A) H2O<sub>2</sub>, (B) MG 8331S



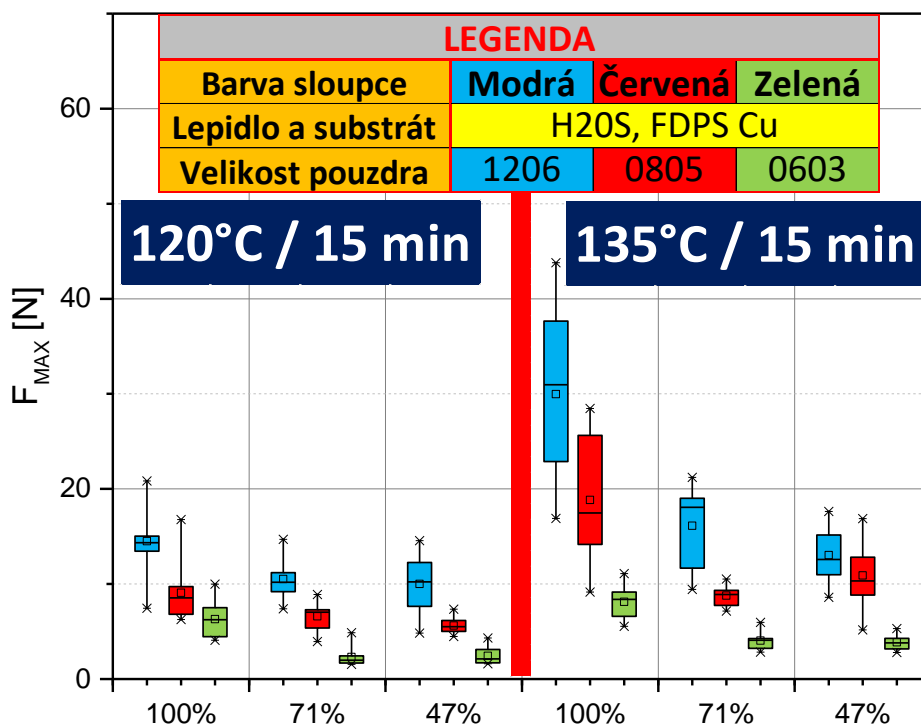
Obrázek 39: Metalografické výbrusy odtrženého lepeného spoje na FDPS Ag snímaného na laserovém konfokálním skenovacím mikroskopu (LEXT) – (A) H2O<sub>2</sub>, (B) MG 8331S



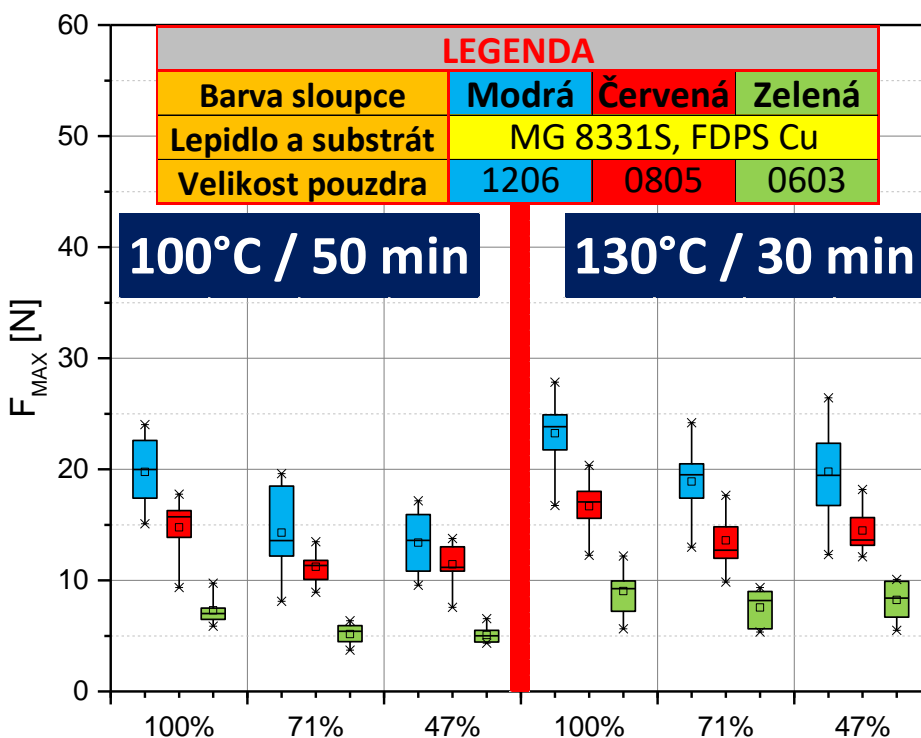


**Obrázek 40:** Metalografické výbrusy odtrženého lepeného spoje na FDPS Ag snímaného na fluorescenčním mikroskopu – použité lepidlo MG 8331S

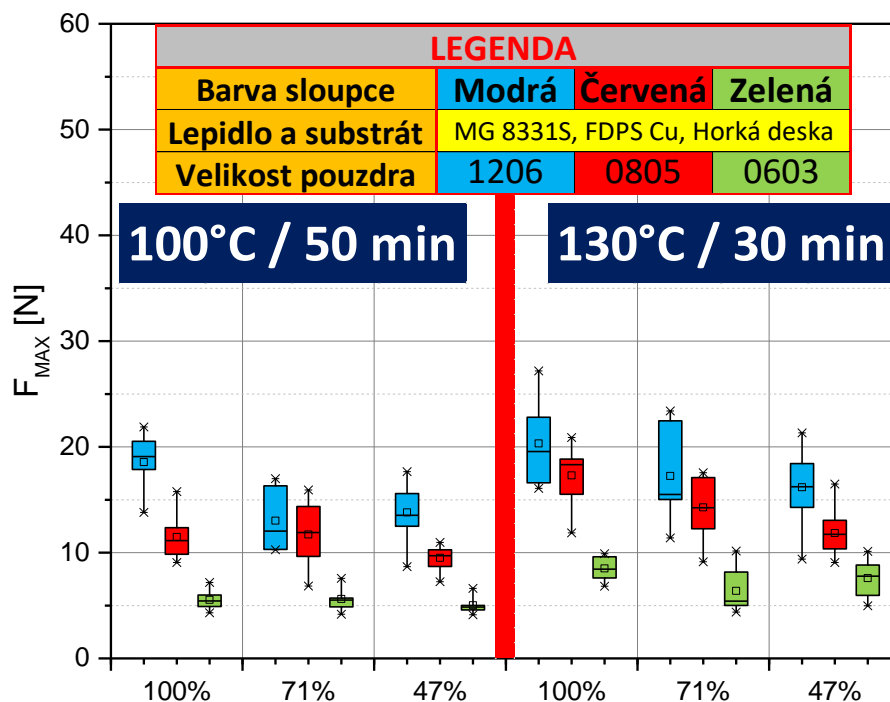
U výsledků vzorků testovaných na flexibilním substrátu s měděnou vodivou vrstvou (FDPS Cu) zobrazených na obrázcích (Obrázek 41, Obrázek 42, Obrázek 43) je možné pozorovat mírný pokles mechanické pevnosti při snižování množství elektricky vodivého lepidla u součástek 1206. U menších součástek je tento pokles mechanické pevnosti také patrný, ale je ještě méně významný a v podstatě zanedbatelný. U tohoto typu substrátu lze pozorovat významný rozdíl v mechanické pevnosti u jednotlivých vytvrzovacích profilů při použití lepidla H20S, kdy při použití profilu 135°C / 15minut je mechanická pevnost výrazně větší, avšak také rozptyl naměřených hodnot je významně vyšší. Lze předpokládat, že vyšší vytvrzovací teplotou dojde k vyššímu vytvrzení zmíněného lepidla, což zvýší jeho mechanickou pevnost, avšak dojde také ke zvýšení jeho křehkosti, což u flexibilního substrátu může způsobit vyšší rozptyl hodnot mechanické pevnosti. Pro bližší pochopení výsledků byly vzorky po odtržení součástek opět pozorovány pod mikroskopem a ukázky jednotlivých typů vzorků je možné vidět na obrázku (Obrázek 44). Na těchto snímcích je patrné, že u tohoto typu substrátu se poškození lepeného spoje u obou lepidel liší, avšak u obou lepidel se jedná o adhezní lom. Zatímco u lepidla H20S došlo k odtržení spoje na rozhraní součástka–lepidlo, u lepidla MG 8331S došlo k odtržení lepidla na rozhraní lepidlo–ploška. Dále byly u těchto vzorků realizovány metalografické výbrusy, které byly po vybroušení pozorovány laserovým konfokálním skenovacím mikroskopem (LEXT) (Obrázek 45). Na těchto snímcích je možné pozorovat výše popsané poškození lepených spojů.



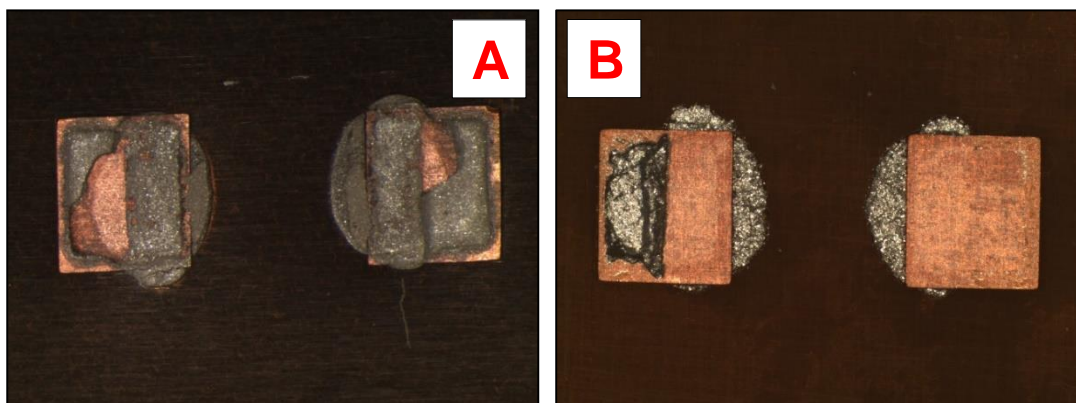
Obrázek 41: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS s Cu a lepidlo H20S.



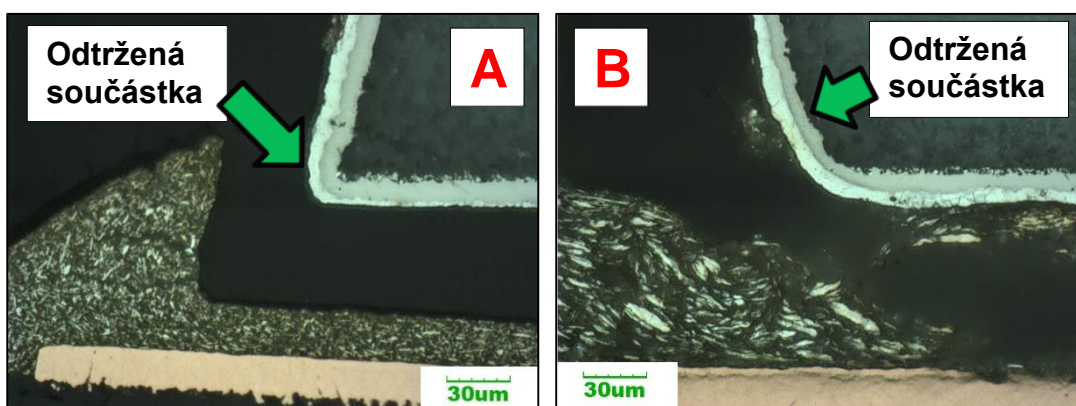
Obrázek 42: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS s Cu a lepidlo 8331S.



Obrázek 43: Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS s Cu a lepidlo 8331S vytvrzené s použitím metody „Horké desky“.

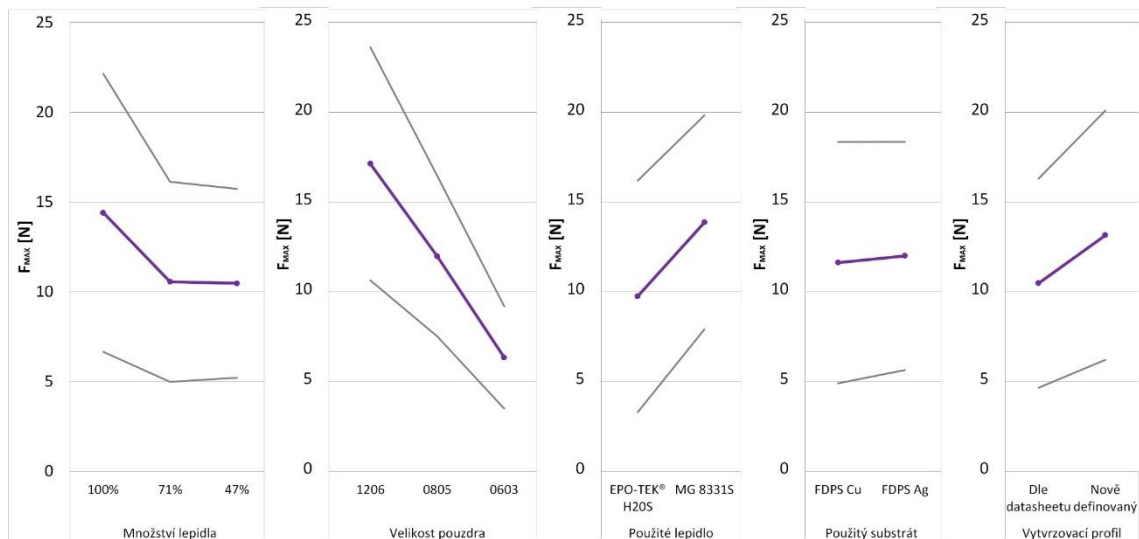


Obrázek 44: Detail odtrženého lepeného spoje na FDPS Cu – (A) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, (B) MG 8331S



Obrázek 45: Metalografické výbrusy odtrženého lepeného spoje na FDPS Cu snímaného na laserovém konfokálním skenovacím mikroskopu (LEXT) – (A) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, (B) MG 8331S

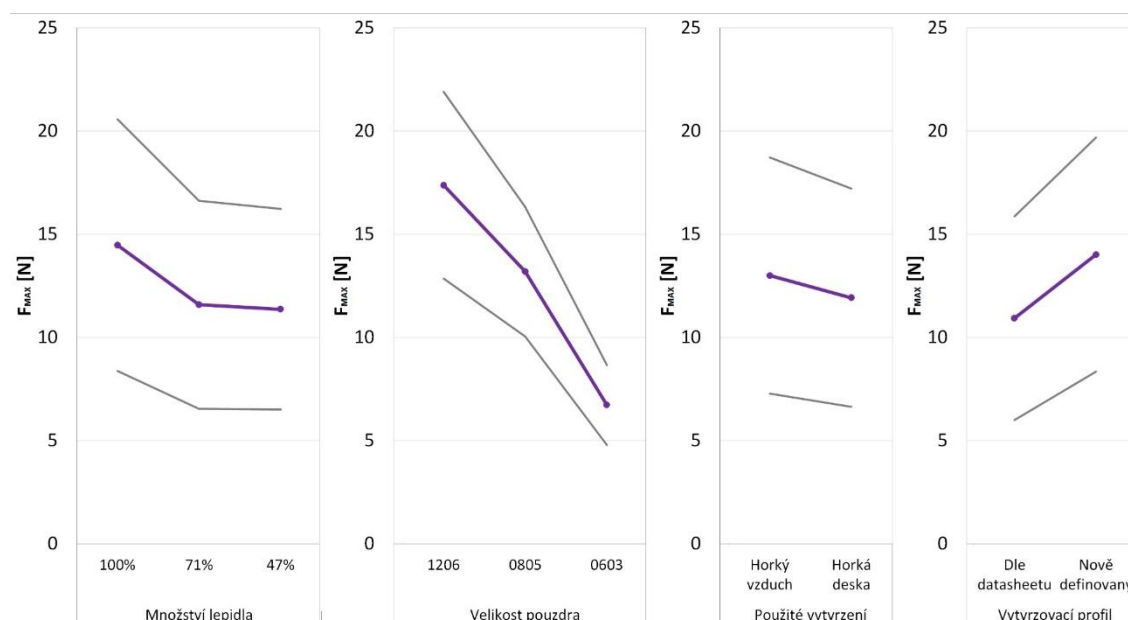
Na základě výsledků mechanické pevnosti spojů na flexibilních substrátech byla vytvořena faktorová analýza pro flexibilní substráty (Obrázek 46). Nejvíce významným faktorem, který nejvíce ovlivňuje výslednou mechanickou pevnost lepených spojů na tuhých substrátech, je opět velikost pouzdra. Jak již bylo řečeno u tuhých substrátů, byl tento fakt předpokládán. Dalším významným faktorem je použitý druh lepidla. V případě flexibilních substrátů má výrazně vyšší mechanickou pevnost lepidlo MG 8331S, což je přesný opak výsledku u tuhých substrátů. Tento výsledek lze vysvětlit odlišnou tvrdostí a křehkostí obou lepidel, přičemž lepidlo H20S je křehčí oproti lepidlu MG 8331S. Dalším významným faktorem je množství naneseného lepidla. Z výsledků faktorové analýzy vyplývá, že snížení množství ze 100% na 71% bude mít nezanedbatelný vliv na mechanickou pevnost, avšak další snížení ze 71% na 47% již nebude mít na mechanickou pevnost významný vliv. Posledním významným faktorem je vytvrzovací profil. Lze opět říci, že použití nově definovaného vytvrzovacího profilu zvýší u flexibilních substrátů mechanickou pevnost lepeného spoje. Zbývající faktor, kterým je typ použitého substrátu, je v případě flexibilních substrátů zanedbatelný. Lze tedy říci, že součástky přilepené na obou použitých typech substrátů mají přibližně stejnou mechanickou pevnost.



**Obrázek 46:** Vliv použitých faktorů na mechanickou pevnost lepeného spoje na flexibilních substrátech podle metodologie DOE.

Aby bylo možné rozhodnout hypotézu (D), zda použití vytvrzení lepidla na flexibilním substrátu za pomoci metody vytvrzení horkou deskou bude mít významný vliv na mechanickou pevnost lepeného spoje, byla vytvořena pomocná faktorová analýza

zabývající se především tímto faktorem. Z výsledků této analýzy vyplývá, že použití metody vytvrzení horkou deskou nemá významný vliv na mechanickou pevnost vzniklého spoje. Výše popsanou hypotézu (D) by bylo možné zamítnout, avšak při zvážení délky vytvrzení testovaných vzorků, která je v řádu desítek minut a prostudování rozdílů v teplotních profilech při použití obou metod vytvrzení (Obrázek 30) bylo rozhodnuto, že bude realizován nový experiment, při kterém budou použita elektricky vodivá lepidla s vytvrzovacím časem v řádu desítek sekund. U těchto lepidel lze předpokládat, že metoda vytvrzení bude mít výraznější vliv na vlastnosti takto vzniklých spojů.



**Obrázek 47:** Vliv použitých faktorů na mechanickou pevnost lepeného spoje na flexibilních substrátech podle metodologie DOE se zaměřením na použité vytvrzení.

### 3.2.2.3 Shrnutí výsledků druhého experimentu

V případě použití standardního tuhého substrátu FR-4 s povrchovou úpravou čistá Cu lze doporučit redukci množství lepidla MG 8331S minimálně na 47% původně použitého množství, při kterém nedojde k výraznému poklesu mechanické pevnosti vzniklého spoje. V případě použití lepidla H20S nemůže být tato redukce automaticky doporučena, protože redukcí dochází k významnému snížení mechanické pevnosti spoje a je tedy nutné zvážit, zda bude nižší mechanická pevnost spoje dostačující.

V případě použití flexibilních substrátů lze obecně říci, že je mechanická pevnost lepeného spoje nižší. V případě lepidla H20S dojde ke snížení mechanické pevnosti na zhruba 20% až 45% své hodnoty u tuhých substrátů. V případě lepidla MG 8331S dochází ke snížení mechanické pevnosti pouze na zhruba 70% své hodnoty. Na flexibilních substrátech má lepidlo MG 8331S dokonce vyšší mechanickou pevnost než lepidlo H20S. Z další analýzy lepených spojů na flexibilních substrátech vyplynulo, že u substrátu FDPS Ag dochází k adheznímu lomu na rozhraní nosného materiálu (PET) a stříbrného vodivého motivu. V případě substrátu FDPS Cu došlo u lepidla H20S také k adheznímu lomu a to na rozhraní plošky součástky a lepidla. U lepidla MG 8331S došlo opět k adheznímu lomu, ale v tomto případě byl lom na rozhraní lepidla a pájecí plošky. Při snížení množství použitého lepidla na flexibilních substrátech ze 100% na 71% zpravidla dochází ke snížení mechanické pevnosti lepeného spoje, které však nebývá příliš výrazné. Při snížení množství ze 71% na 47% již zpravidla ke snížení množství mechanické pevnosti nedochází. Lze tedy doporučit snížení množství použitého elektricky vodivého lepidla na 47% v případě, že nám dostačuje mírně snížená mechanická pevnost vzniklého spoje. Lepidlo H20S lze, vzhledem k jeho velmi nízké mechanické pevnosti na flexibilních substrátech a jeho křehkosti, označit za nevhodné k tomuto použití.

Hypotézu (C), že snížení množství elektricky vodivého lepidla nebude mít kritický vliv na mechanickou pevnost spoje, lze potvrdit v případě lepidla 8331S. V případě lepidla H20S lze tuto hypotézu (C) vyvrátit pro tuhé substráty a potvrdit pro flexibilní substráty, avšak toto lepidlo nelze u flexibilních substrátů doporučit.

Hypotézu (D), že při vytvrzení lepidla za pomoci horké desky bude spoj vytvrzen lépe, a tedy bude mít i vyšší mechanickou pevnost, by bylo možné podle výsledků zamítnout, avšak při zvážení délky vytvrzení testovaných vzorků, která je v řádu desítek minut, a prostudování rozdílů v teplotních profilech při použití obou metod vytvrzení bylo zjištěno, že o této hypotéze (D) nelze rozhodnout.

### **3.3 Třetí experiment – vlastnosti lepeného spoje při mechanickém namáhání ohybem**

V rámci dalšího výzkumu byl realizován experiment zabývající se vlastnostmi lepeného spoje při jeho mechanickém namáhání. Tento experiment měl přinést poznatky o mechanických vlastnostech lepeného spoje z pohledu jeho flexibility. Dále měla být

ověřena hypotéza (E), že při nižším procentním stupni vytvrzení vodivého lepidla, dojde k mírnému snížení mechanické pevnosti, avšak zároveň dojde i ke zvýšení flexibility spoje z důvodu nedotvrzení lepidla, a tím i k jeho delší výdrž při ohýbání.

### 3.3.1 Popis třetího experimentu

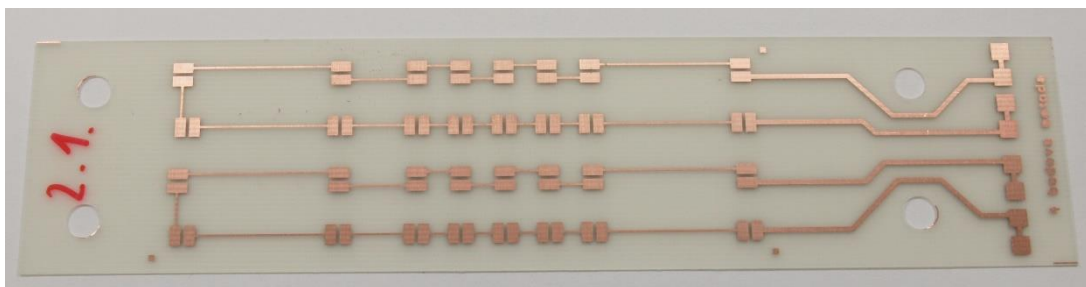
Na základě předchozích experimentů bylo rozhodnuto o pořízení nového elektricky vodivého lepidla, které mělo být flexibilnější a zároveň rychleji vytvrditelné, což by zrychlilo výrobní proces a zároveň snížilo výrobní náklady. Po důkladné rešerši a kontaktování několika výrobců elektricky vodivých lepidel určených pro flexibilní substráty bylo vybráno lepidlo XCA 3556 HF od společnosti Henkel (dříve Emerson & Cumming). Dle katalogového listu se jedná o jednosložkové lepidlo s vysokou flexibilitou, které je rychle vytvrditelné při nízkých teplotách.

**Tabulka 7:** Vytvrzovací profily lepidla XCA 3556 HF [80].

XCA 3556 HF				
Čas	110 °C	100 °C	90 °C	80 °C
Teplota	<30 sekund	45 sekund	60 sekund	90 sekund

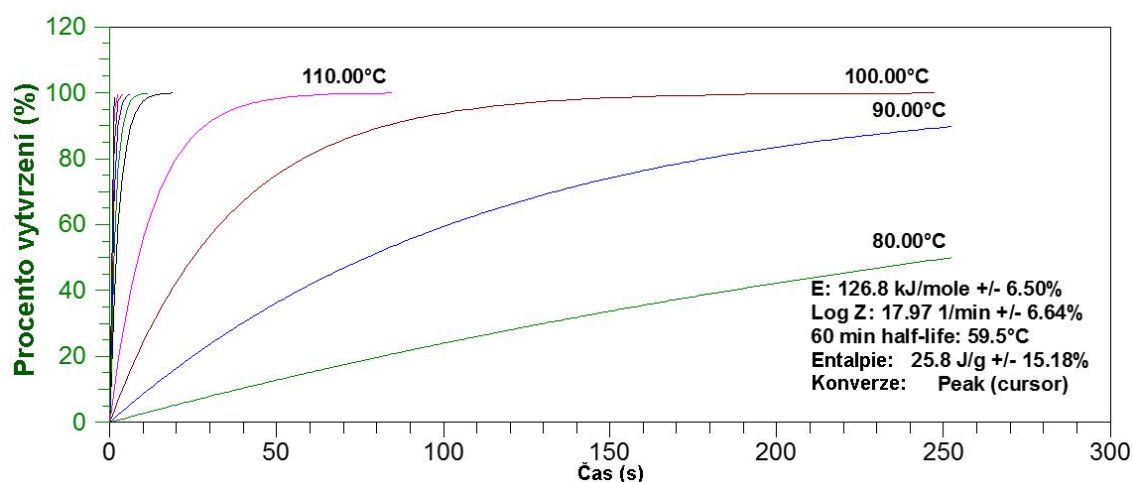
Pro porovnání byly navíc testovány pájené spoje vytvořené za pomoci pájecí slitiny SAC305 od společnosti SHENMAO o složení 96,5% Sn – 3% Ag – 0,5% Cu. Tyto vzorky byly označeny SAC 1, SAC 2 a SAC 3 a jejich výsledky jsou zobrazeny společně s výsledky ostatních vzorků.

Pro tento experiment bylo nutné nalézt vhodný substrát, který by byl dostatečně flexibilní, aby bylo možné ho ohýbat, ale zároveň by byla jeho cena přijatelná, aby bylo možné zajistit ho v dostatečném množství na testování. Z těchto důvodů byl zvolen tenký substrát typu FR-4 o tloušťce 180  $\mu\text{m}$  s vodivou Cu vrstvou o tloušťce 18  $\mu\text{m}$  bez povrchové úpravy. Na každém substrátu byly vytvořeny plošky pro osazení 32 SMD rezistorů 0R0 o velikosti pouzdra 0805. Celý vzorek obsahoval dvě větve po 16 sériově zapojených součástkách. Obě větve byly připraveny pro měření elektrického odporu čtyřbodovou metodou (viz Obrázek 48). Pro nanesení zmíněného elektricky vodivého lepidla byla použita šablona o tloušťce 80  $\mu\text{m}$  s redukcí velikosti plošek o 20% šířky i délky (detailně popsané v kapitole 3.2.1).



**Obrázek 48:** Vzorek pro testování ohybem.

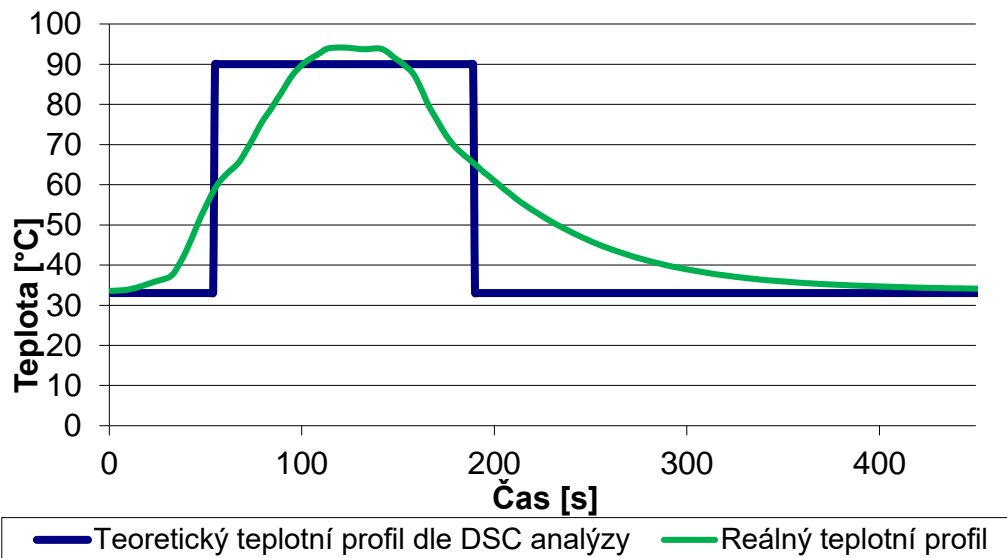
Jako u předchozích experimentů byl každý vzorek zvážen před a po nanesení vodivého lepidla a vzorky s odlehlými hodnotami hmotnosti byly vypuštěny. Pro nalezení nejvhodnějšího profilu vytvrzení tohoto vodivého lepidla bylo toto lepidlo podrobena DSC analýze (Obrázek 49). Pro vytvrzení byla zvolena teplota 90°C. Dále byly vybrány tři vytvrzovací profily, odpovídající 50%, 70% a 90% vytvrzení pro ověření hypotézy (E).



**Obrázek 49:** Výsledek DSC analýzy pro lepidlo XCA 3556 HF.

Pro vytvrzení byla použita průběžná přetavovací pec MISTRAL 260, na které byly dopředu odladěny vhodné teplotní profily. Na obrázku níže je na ukázkou zobrazen reálný teplotní profil porovnaný s teoretickým teplotním profilem dle DSC (Obrázek 50). Použité teplotní profily jsou popsány v tabulce níže (Tabulka 8).





**Obrázek 50:** Teoretický a reálný teplotní profil pro vytvrzení na 70% při teplotě 90°C.

**Tabulka 8:** Teplotní profily použité pro třetí experiment.

Číslo vzorku			Vytvrzení [%]	Teplota [°C]	Čas [s]
1.1	1.2	1.3	50	90	77
2.1	2.2	2.3	70	90	134
3.1	3.2	3.3	90	90	252

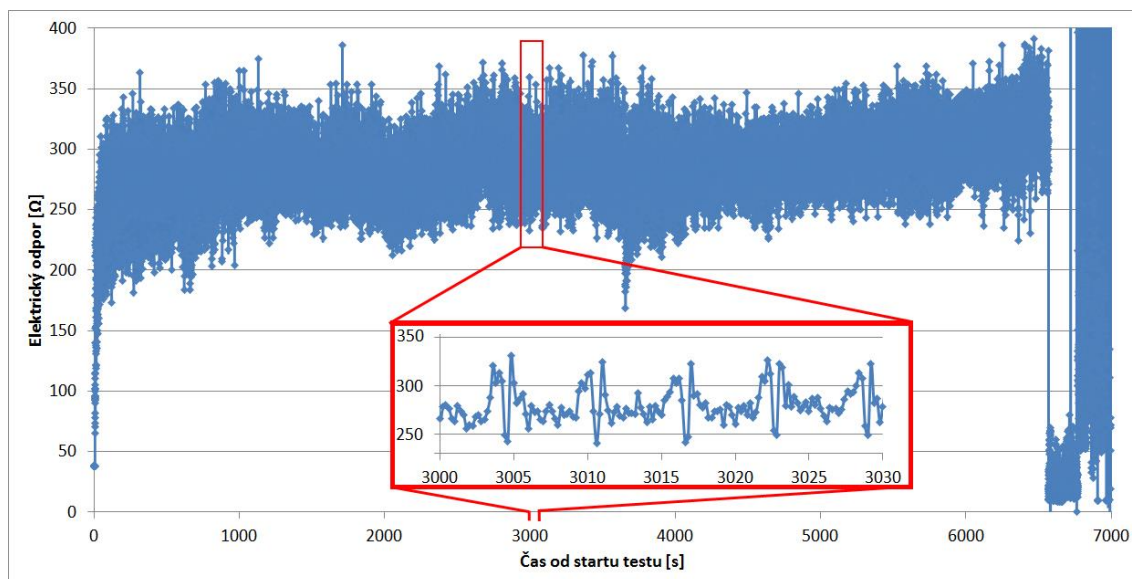
Velikost substrátu a vodivý motiv byly navrženy s ohledem na standard IPC-TM-650 (2.4.3), který se mimo jiné zabývá testováním vodivých motivů na flexibilních DPS ohybem. Pro samotné testování bylo vytvořeno speciální ohýbací zařízení, do kterého byly uchyceny vždy 2 vzorky zároveň (viz Obrázek 51). Toto zařízení bylo osazeno krokovým motorem Haydon, který je ovládán přes rozhraní USB. Tento motor pohybuje posuvnou lavicí, ke které jsou uchyceny konce obou vzorků. Druhé konce obou vzorků jsou ve stejné výšce uchyceny k fixní části zařízení. Aby nedošlo k poškození vzorků jejich přílišným napnutím, jsou zde osazeny koncové spínače, které zabraňují vyjetí krokového motoru z nastavené dráhy. Pozice substrátu byla nastavena taky, aby byly splněny základní parametry testu, které jsou stanoveny výše zmíněnou normou IPC. Rychlost ohýbání vzorku byla stanovena na jeden ohyb každých 6 sekund. Velikost prohnutí substrátu byla  $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  v počáteční poloze a  $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  v koncové poloze.



**Obrázek 51:** Zařízení pro mechanické namáhání flexibilního substrátu ohybem (tzv. bend test)

### 3.3.2 Výsledky třetího experimentu

Hodnota elektrického odporu všech vzorků byla měřena nejprve před testem a poté kontinuálně v průběhu testu (Tabulka 9). Test byl ukončen v případě, že došlo k přerušení vodivé cesty nebo ke skokovému zvýšení elektrického odporu vodivé cesty více než o řád. Zajímavou vlastností bylo kolísání hodnoty elektrického odporu v průběhu každého cyklu. Z tohoto důvodu byla na zařízení nastavena prodleva 0,2 sekundy před startem každého nového cyklu, za kterou došlo k poklesu zvýšené hodnoty odporu na hodnotu, která by již byla víceméně stálá, pokud by nedošlo k dalšímu cyklu. Tento jev lze vidět v detailu průběhu na obrázku níže (Obrázek 52). U vzorků se spoji lepenými vodivým lepidlem byl patrný až stonásobný nárůst elektrického odporu v průběhu testu, který byl způsobený pohybem vodivých částic v objemu lepidla. V případě, že byly vzorky ponechány bez ohybu, došlo k „regeneraci“ spojů a elektrický odpor opět výrazně klesl, nicméně neklesl již na původní hodnoty.



**Obrázek 52:** Graf naměřeného elektrického odporu v průběhu testu ohybem u vzorku 1.2 včetně detailu části průběhu.

**Tabulka 9:** Souhrn výsledků třetího experimentu.

Číslo vzorku	Před testem			Po 500 cyklech			Před poruchou cesty			Počet cyklů do poruchy		
	Odpor cesty A [Ω]	Odpor cesty B [Ω]	Průměrný odpor [Ω]	Odpor cesty A [Ω]	Odpor cesty B [Ω]	Průměrný odpor [Ω]	Odpor cesty A [Ω]	Odpor cesty B [Ω]	Průměrný odpor [Ω]	Cesty A	Cesty B	Průměrný počet cyklů do poruchy
1.1	5,79	7,47	12,71	195	160	309	215	170	320	1539	1103	1180
1.2	3,73	4,9		205	248		210	260		1145	1064	
1.3	23,8	30,6		565	480		510	555		1178	1048	
2.1	11,3	13,7	12,47	51	45	289	59	55	298	949	691	1477
2.2	10,9	10,5		420	370		430	400		1745	1822	
2.3	18,1	10,5		495	355		590	255		2075	1580	
3.1	7,17	7,3	9,79	155	120	228	240	205	284	1322	1516	1457
3.2	8,73	11,8		170	240		215	250		1290	1241	
3.3	14,6	9,13		450	235		467	325		693	2677	
SAC 1	0,45	0,44	0,45	0,48	0,45	0,54	1,45	1,5	0,95	675	694	556
SAC 2	0,45	0,46		0,59	0,65		0,9	0,93		594	661	
SAC 3	0,44	0,44		-	-		0,45	0,46		490	224	

Elektrický odpor lepených spojů je obecně vyšší než u pájených spojů, což je obecným faktem, který se při realizovaném experimentu potvrdil. Dále lze říci, že procento vytvrzení použitého vodivého lepidla má nezanedbatelný vliv na elektrický odpor, který vytvrzováním klesá. Pokud se zaměříme na elektrický odpor v průběhu testování vzorků ohybem, lze pozorovat výrazné zvýšení elektrického odporu u lepených vzorků a pouze mírné zvýšení elektrického odporu u pájených vzorků. Tento jev

je způsoben charakterem vodivosti lepidel, u kterých je vodivost zajištěna pomocí elektricky vodivých částic přidávaných do pojiva. Při neustálém mechanickém namáhání tedy dochází k posunu těchto částic a zvýšení elektrického odporu. Pokud se zaměříme na výdrž vzorků, lze konstatovat, že lepené spoje vydrží výrazně více ohybů než pájené spoje, které jsou příliš tvrdé, a tedy nejsou dostatečně flexibilní. Výdrž lepených spojů nebyla v rámci realizovaného experimentu prokázána, protože ještě před poškozením samotných spojů došlo k přerušení vodivého Cu motivu na testovaném substrátu. I přesto lze však říci, že v případě nutnosti použití flexibilních substrátů, které budou mechanicky namáhány v ohybu, je vhodnější použít elektricky vodivá lepidla.

Hypotézu (E), že při nižším procentním stupni vytvrzení vodivého lepidla, dojde ke zlepšení flexibility spoje, lze obecně zamítnout. Zlepšení flexibility by se v tomto testu projevilo snížením elektrického odporu v porovnání s více vytvrzenými vzorky, což však nebylo pozorováno.

### **3.4 Čtvrtý experiment - vliv tvaru šablony na mechanickou pevnost a elektrický odpor**

V rámci dalšího výzkumu byl realizován experiment zabývající se tvarem použitého otvoru v šabloně a jeho vlivem na vlastnosti výsledného spoje. Tvar otvoru v šabloně ovlivňuje množství použitého elektricky vodivého lepidla a zároveň ovlivní izolační vzdálenost mezi vývody součástky a čištění šablony po tisku. Jak již bylo řečeno výše, redukce množství použitého lepidla bude mít příznivý vliv na výrobní náklady a je tedy žádoucí. Zároveň by se vhodnou změnou tvaru měla zvýšit i izolační vzdálenost mezi vývody, a pokud by v takovém případě příliš neklesla mechanická pevnost, ani se výrazně nezvýšil elektrický odpor, bylo by takové řešení ideální. Pro nalezení optimálního tvaru otvoru v šabloně pro čipové SMD součástky byl tento čtvrtý experiment rozdělen do dvou částí.

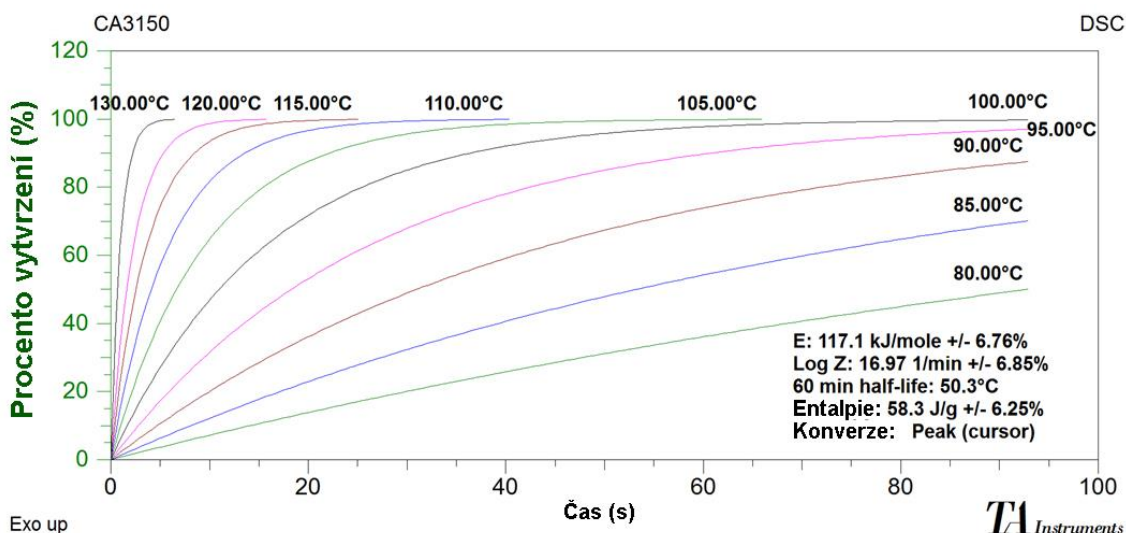
#### **3.4.1 První část čtvrtého experimentu**

V první části byla navržena řada různých tvarů otvorů. Tato část byla z ekonomického důvodu realizována na tuhých substrátech. Vytvořené vzorky byly podrobeny testu mechanické pevnosti ve smyku, a také byly opticky zkoumány izolační vzdálenosti mezi ploškami součástky.

### 3.4.1.1 Popis první části čtvrtého experimentu

Jak již bylo řečeno, byl pro tento experiment vybrán tuhý substrát, konkrétně typu FR-4 s povrchovou úpravou čistá měď. Dále byly použity SMD čipové součástky o velikosti pouzdra 0805.

Pro experiment byla zvolena dvě elektricky vodivá lepidla. Prvním z nich je již výše popsáné (v kapitole 3.1.1) lepidlo MG 8331S. U tohoto lepidla byl použit vytvrzovací profil 130°C / 30 minut, který se již osvědčil v předchozích experimentech. Druhým zvoleným lepidlem je lepidlo od společnosti Henkel s názvem Hysol CA3150. Toto lepidlo je dle výrobce vhodné na flexibilní substráty a lze ho vytvrdit při 130°C do 10 sekund [81]. Pro nalezení více vytvrzovacích profilů tohoto lepidla byla provedena DSC analýza (Obrázek 53), ze které byl stanoven použitý vytvrzovací profil 100°C / 93 sekund. K vytvrzování tohoto lepidla byla použita metoda horké desky, popsána výše v kapitole 3.2.1.



**Obrázek 53:** Výsledek DSC analýzy pro lepidlo Hysol CA 3150.

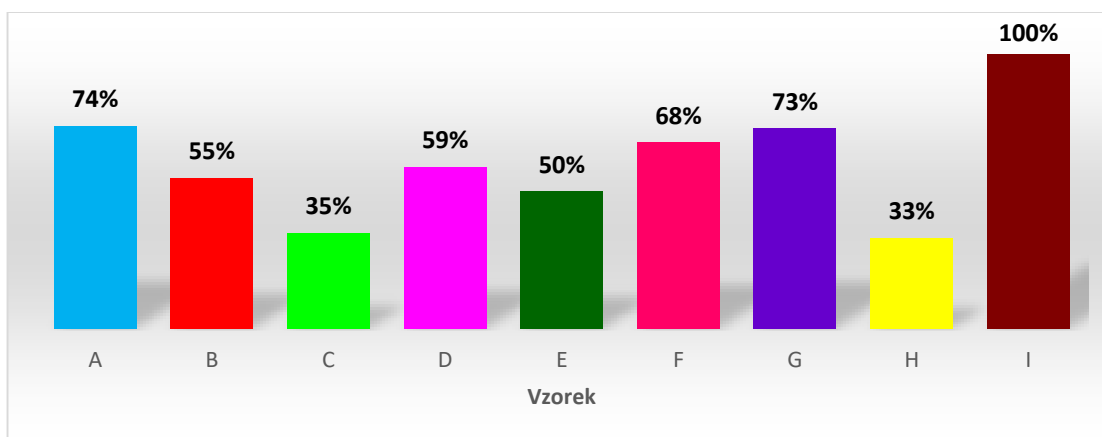
Pro první část experimentu bylo navrženo osm odlišných tvarů otvorů v šabloně (Obrázek 54). Tvary otvorů „A“ a „G“ jsou navrženy dle normy IPC-7525A („Stencil design guidelines“) podle tvaru nazvaného „motýlek“ (bow tie). Tvar otvoru „B“ je upravený tvar s označením „domácí meta“ (home plate) ze zmíněné normy. Tvary „C“ a „H“ byly navrženy, jako pokusné tvary. Tvar „D“ je upravený tvar „A“ s ohledem na další zvýšení izolační vzdálenosti. Tvar „E“ je ještě více upravený tvar s označením „domácí meta“ (home plate) z normy IPC a tvar „F“ je upravený tvar „E“. Pro porovnání

všech výsledků byl ještě testován devátý tvar s označením „I“, kterým byl standardně používaný obdélníkový otvor zmenšený o 5% šířky a délky vzhledem k velikosti plošky. Všechny tvary otvorů byly použity v šabloně o tloušťce 120  $\mu\text{m}$ .



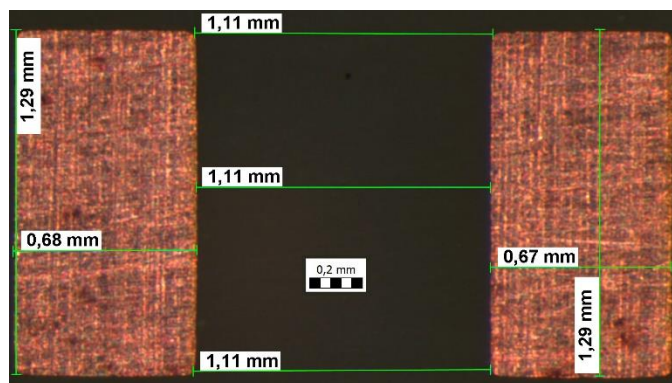
**Obrázek 54:** Navržené tvary otvorů v šabloně pro první část čtvrtého experimentu.

Vzhledem k tomu, že jedním z důvodů realizace tohoto experimentu bylo snížit množství použitého elektricky vodivého lepidla, byl u každého navrženého tvaru vypočten teoretický objem naneseného lepidla a tento objem byl vztažen ke standardnímu tvaru „I“. (Obrázek 55)

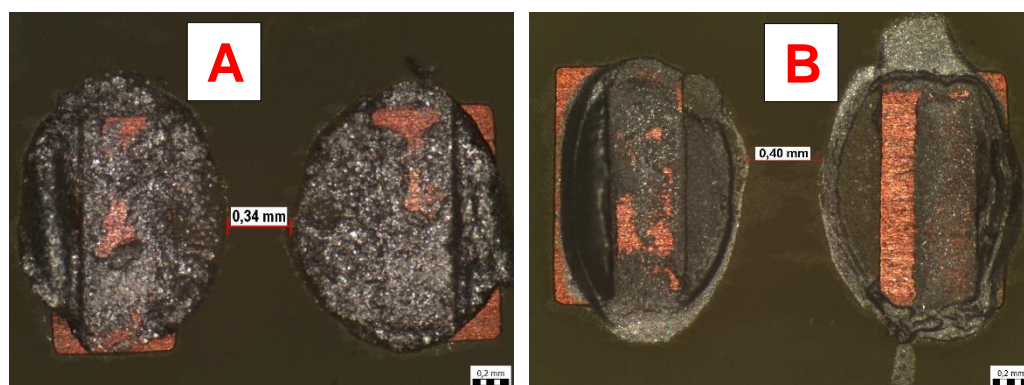


**Obrázek 55:** Teoretické množství lepidla naneseného přes jednotlivé tvary otvorů vztažené ke standardnímu tvaru „I“

Pro testování mechanické pevnosti vzorků ve smyku byl použit princip popsany v předchozí kapitole 3.1.3. Dále byly odtrhané vzorky podrobeny optické inspekci za pomoci stereomikroskopu Olympus SZX10 a na získaných snímcích byla měřena izolační vzdálenost. Měřena byla nejmenší možná vzdálenost mezi elektricky vodivým lepidlem na obou ploškách. Příklad tohoto měření je zobrazen na obrázcích (Obrázek 56, Obrázek 57)



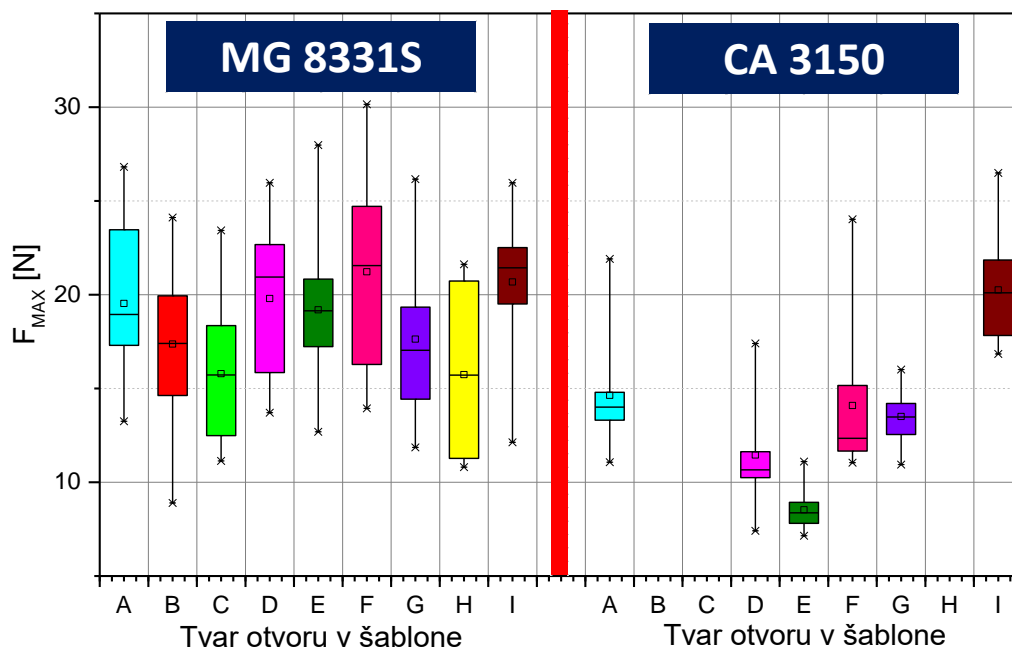
Obrázek 56: Izolační vzdálenost samotných plošek.



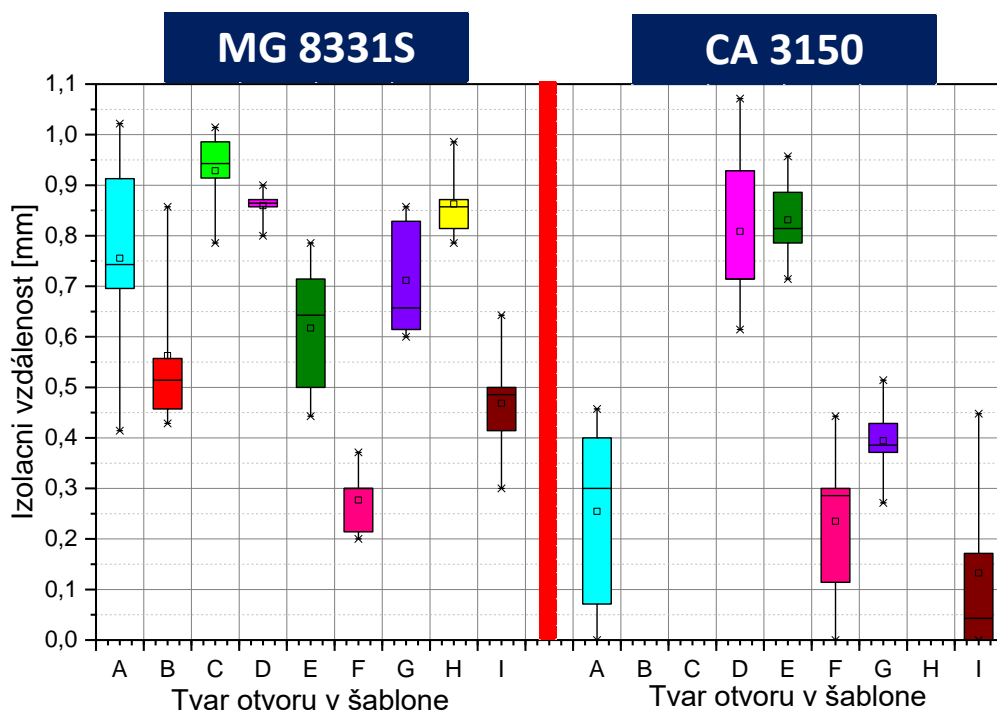
Obrázek 57: Izolační vzdálenost tvaru „F“ s použitím lepidla – (A) 8331S, (B) CA 3150.

### 3.4.1.2 Výsledky první části čtvrtého experimentu

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a tyto zpracované výsledky jsou zobrazeny v boxových grafech níže (Obrázek 58, Obrázek 59). Vzhledem k velmi malé viskozitě lepidla CA3150 nebylo možné některé tvary otestovat, protože toto lepidlo nepřiléhalo do úzkých otvorů, a proto byly z technologického důvodu vynechány tvary „B“, „C“ a „H“. Zároveň lze říci, že tyto tvary nemohou být doporučeny pro lepidla s nízkou viskozitou.



**Obrázek 58:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS a různé tvary otvorů v šabloně



**Obrázek 59:** Statisticky zpracované hodnoty izolační vzdálenosti pro tuhé DPS a různé tvary otvorů v šabloně.

Pokud se u lepidla MG 8331S zaměříme pouze na výsledky mechanické pevnosti, zjistíme, že nejlépe dopadly tvary „I“ a „F“ a pouze o málo hůře skončily tvary „A“, „D“, „E“, „G“. Z pohledu izolační vzdálenosti se jeví u lepidla MG 8331S jako nejlepší tvary „C“, „D“ a „H“ a pouze mírně horší jsou tvary „A“, „E“ a „G“. Z toho vyplývá,



že nejlepším tvarem z pohledu mechanické pevnosti i izolační vzdálenosti jsou pro lepidlo MG 8331S tvary „A“, „D“, „E“ a „G“. V případě, že budeme uvažovat také ekonomické hledisko, vyjde nám jako nejvhodnější tvar „E“, který má 50% redukcí množství použitého lepidla oproti referenčnímu tvaru „I“.

V případě lepidla CA 3150 dopadl z pohledu mechanické pevnosti nejlépe tvar „I“ a pouze o velmi málo hůře tvary „A“, „G“ a „F“. Z pohledu izolační vzdálenosti se jako nejlepší u tohoto lepidla jeví tvary „D“ a „E“. Z toho vyplývá, že u lepidla CA3150 není ideální tvar snadno zjistitelný. Tvary „A“, „F“ a „I“ lze z výběru vyloučit, protože u některých vzorků byla naměřena nulová izolační vzdálenost, tedy došlo ke zkratu mezi ploškami. Lze tedy říci, že u tohoto lepidla s nízkou viskozitou jsou použitelné tvary „D“, „E“ a „G“. Rozhodnutí, který tvar z těchto tří použít záleží na tom, jaká vlastnost je naší prioritou. V případě, že preferujeme co nejlepší mechanickou pevnost, lze doporučit tvar „G“. Pokud preferujeme co největší izolační vzdálenost a vyšší mechanickou pevnost, lze doporučit tvar „D“. Při preferenci co nejnižšího použitého množství lepidla lze doporučit tvar „E“.

V průběhu realizace tohoto experimentu byl nalezen problém při čištění použitých šablon. Bylo zjištěno, že v případě otvorů, které svírají ostrý úhel (menší než 90°) se tyto otvory obtížně čistí. Lze proto doporučit odstranění těchto ostrých úhlů a jejich nahrazení kruhovými tvary.

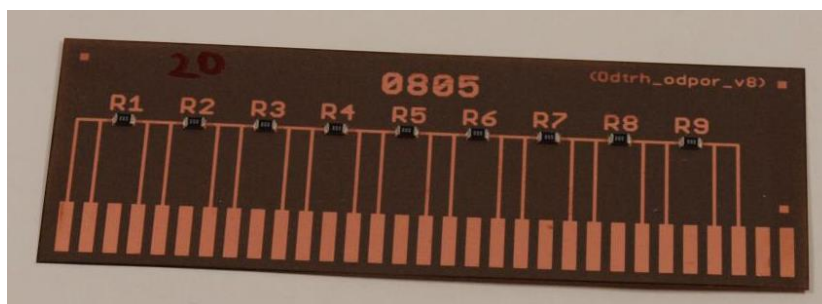
### **3.4.2 Druhá část čtvrtého experimentu**

Pro druhou část byly, na základě první části, vybrány pouze nejvhodnější tvary otvorů. U některých otvorů bylo navíc přistoupeno k drobným geometrickým korekcím. V této části již byl experiment realizován na flexibilních substrátech a kromě mechanické pevnosti a izolační vzdálenosti byl zkoumán také elektrický odpor. Část vzorků byla navíc podrobena zrychlenému stárnutí v klimatické komoře.

#### **3.4.2.1 Popis druhé části čtvrtého experimentu**

Pro tento experiment byl vybrán flexibilní kaptonový substrát od společnosti PragoBoard s.r.o., který je prodáván pod názvem DuPont Pyralux. Jedná se o bezlepidlový substrát s tloušťkou nosné kaptonové fólie 100 µm a vodivou Cu

vrstvou s povrchovou úpravou čistá měď o tloušťce 18  $\mu\text{m}$ . Dále byly použity SMD čípkové rezistory 0R0 o velikosti pouzdra 0805.



**Obrázek 60:** Flexibilní substrát Pyralux použitý pro druhou část čtvrtého experimentu s osazenými součástkami.

Pro experiment byla zvolena stejná lepidla jako v první části, tedy lepidlo MG 8331S a lepidlo CA3150 a u obou lepidel byly také použity stejné vytvrzovací profily.

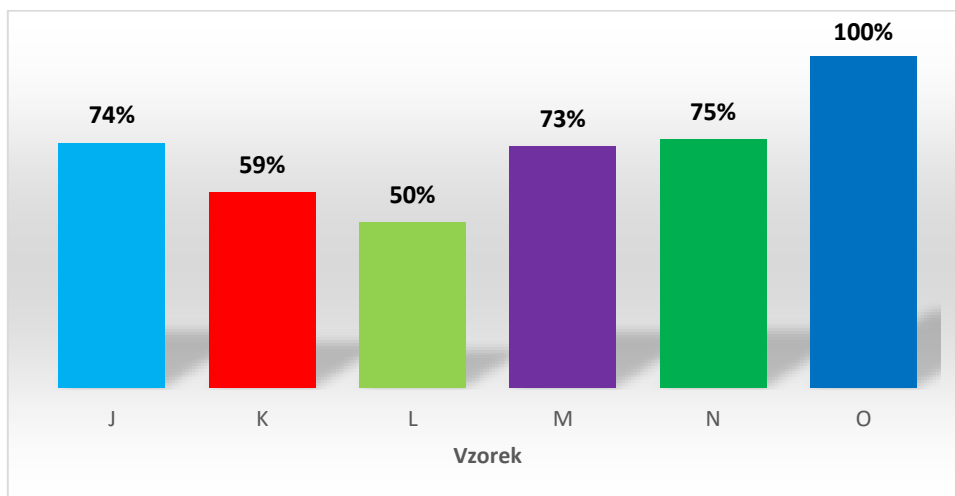
Pro druhou část experimentu bylo použito celkem šest odlišných tvarů otvorů v šabloně (Obrázek 61). Tvary otvorů „J“, „K“, „L“ a „M“ jsou téměř shodné s tvary „A“, „D“, „E“ a „G“ z první části experimentu, pouze došlo k drobným zaoblením ostrých hran, z důvodu lepšího čištění šablony. Tvar „N“ byl vytvořen navíc na základě pozorování vzorků v průběhu první části experimentu. U tohoto tvaru se jedná o pozměněný tvar „L“ (resp. „E“). Pro porovnání všech výsledků byl opět ještě testován šestý tvar s označením „O“, kterým byl standardně používáný obdélníkový otvor zmenšený o 5% šířky a délky vzhledem k velikosti plošky. Všechny tvary otvorů byly použity v šabloně o tloušťce 120  $\mu\text{m}$ .



**Obrázek 61:** Navržené tvary otvorů v šabloně pro druhou část čtvrtého experimentu.

Vzhledem k tomu, že jedním z důvodů realizace tohoto experimentu bylo snížit množství použitého elektricky vodivého lepidla, byl i v této části u každého navrženého

tvaru vypočten teoretický objem naneseného lepidla a tento objem byl vztažen ke standardnímu tvaru „O“. (Obrázek 62)

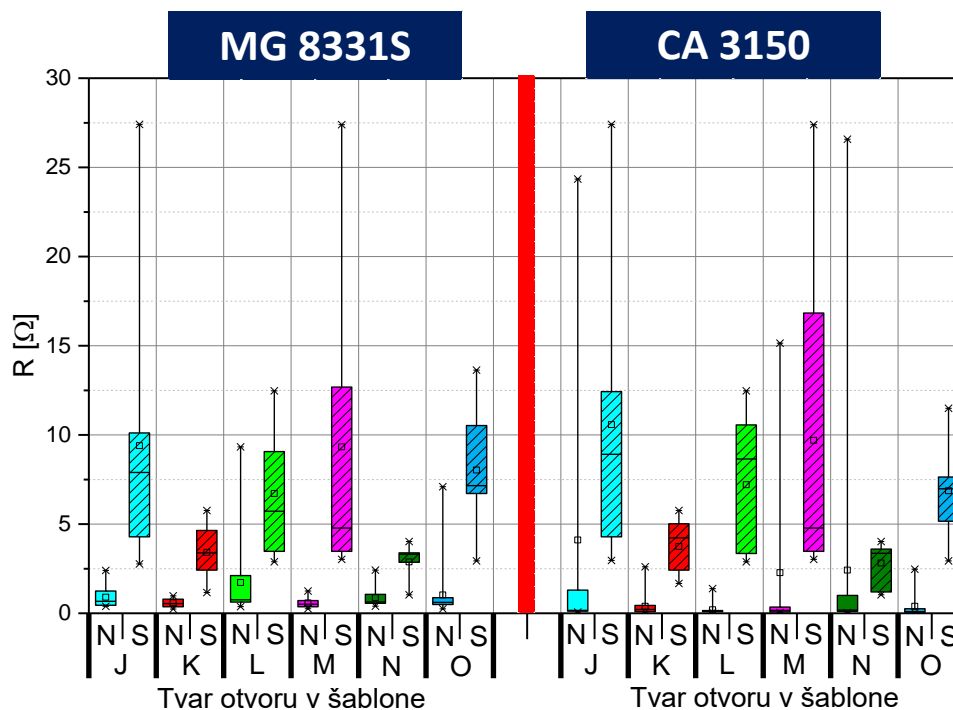


**Obrázek 62:** Teoretické množství lepidla naneseného přes jednotlivé tvary otvorů vztažené ke standardnímu tvaru „O“

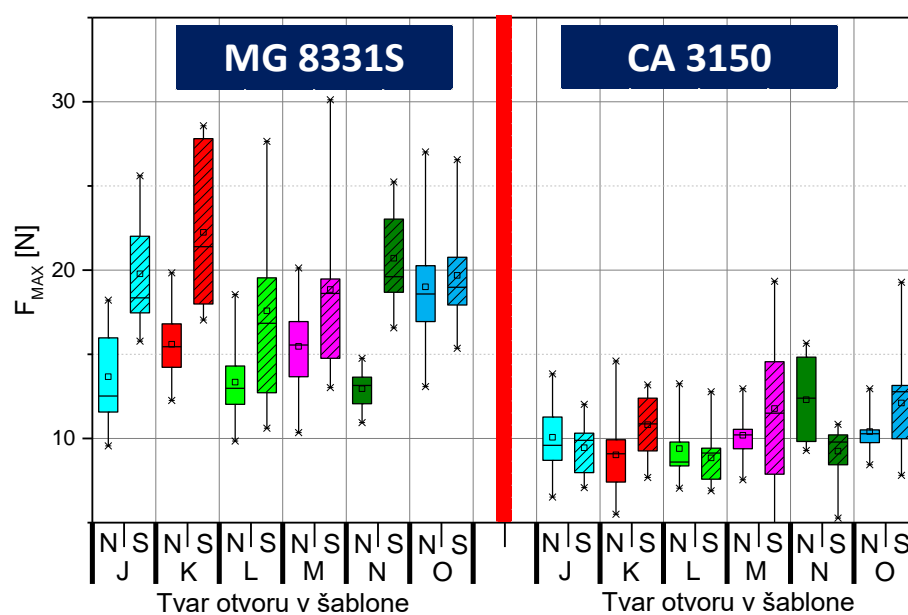
U všech vytvořených vzorků byl nejprve s pomocí přístroje Keithley 2700 změřen elektrický odpor každé osazené součástky čtyřbodovou metodou, která eliminuje elektrické odpory přívodních vodičů. Výsledné naměřené odpory jsou tedy součtem odporu lepeného spoje, součástky a druhého lepeného spoje. V dalším kroku byly vzorky podrobeny testu mechanické pevnosti ve smyku a poté byly opticky pozorovány za účelem zjištění izolační vzdálenosti. Obě tato měření byla shodná s první částí experimentu a byla již detailněji popsána výše. Zároveň byla polovina vzorků po měření elektrického odporu podrobena zrychlenému stárnutí v klimatické komoře. Konkrétně se jednalo o klimatickou komoru Vötsch, ve které byly ponechány po dobu 168 hodin při teplotě 85°C a relativní vlhkosti 85% RH. Následně byla i tato druhá polovina vzorků otestována stejně jako ta první, přičemž elektrický odpor byl změřen znovu i po stárnutí.

### 3.4.2.2 Výsledky druhé části čtvrtého experimentu

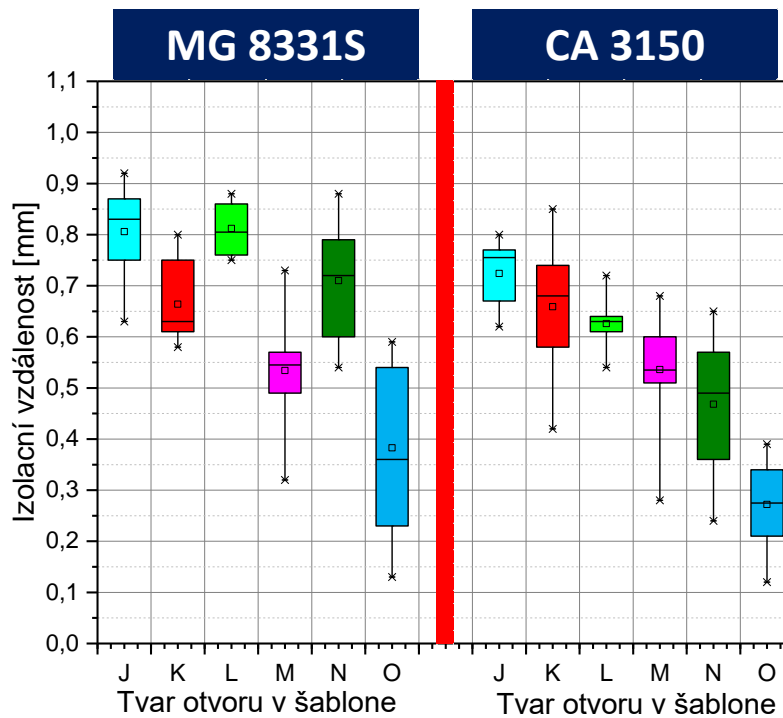
Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a tyto zpracované výsledky jsou zobrazeny v boxových grafech níže (Obrázek 63, Obrázek 64, Obrázek 65).



**Obrázek 63:** Statisticky zpracované hodnoty elektrického odporu pro flexibilní DPS a různé tvary otvorů v šabloně u nestárnutých (N) a stárnutých (S) vzorků.



**Obrázek 64:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS a různé tvary otvorů v šabloně u nestárnutých (N) a stárnutých (S) vzorků.



**Obrázek 65:** Statisticky zpracované hodnoty izolační vzdálenosti pro flexibilní DPS a různé tvary otvorů v šabloně.

Pokud se zaměříme na výsledky elektrického odporu, lze pozorovat obdobné výsledky u všech nestárnutých testovaných vzorků, které se pohybují v řádu jednotek ohmů, což jsou hodnoty postačující pro většinu aplikací. V případě stárnutých vzorků lze pozorovat nárůst elektrického odporu, který je u stárnutých vzorků v řádu desítek ohmů, což je stále ještě většinou dostačující. Při porovnání jednotlivých použitých tvarů otvorů v šabloně nelze nalézt významné rozdíly.

Pokud se u lepidla MG 8331S zaměříme na výsledky mechanické pevnosti, zjistíme, že u nestárnutých vzorků mají nejvyšší mechanickou pevnost tvary „O“ a pouze o málo horší mechanickou pevnost ostatní tvary. U stárnutých vzorků mají nejvyšší mechanickou pevnost tvary „J“, „K“, „N“ a „O“. Zároveň lze říci, že u všech stárnutých vzorků s tímto lepidlem došlo po stárnutí ke zvýšení mechanické pevnosti. Tento jev lze vysvětlit dotvrzením lepidla v průběhu stárnutí, kterým došlo k tomuto zvýšení. V případě lepidla CA3150 jsou výsledky mechanické pevnosti obdobné u všech použitých tvarů. Také po stárnutí jsou výsledky mechanické pevnosti podobné s výsledky mechanické pevnosti před stárnutím.

Z pohledu izolační vzdálenosti jsou nejlepší u lepidla MG 8331S tvary „J“ a „L“ a pouze o málo horší tvary „K“ a „N“. V případě lepidla CA3150 jsou nejlepší tvary „J“,

„K“ a „L“ a jako přijatelné se jeví i tvary „M“ a „N“. Obecně lze říci, že referenční tvar „O“ má poměrně malou izolační vzdálenost. Všechny ostatní tvary mají izolační vzdálenost dostatečnou.

Pokud se podíváme na výsledky druhé části čtvrtého experimentu obecně lze říci, že všechny tvary testované v této části jsou v podstatě srovnatelné a lze je doporučit. Referenční tvar „O“ není příliš vhodný z pohledu izolační vzdálenosti, což se ukázalo již v první části čtvrtého experimentu. Vzhledem k tomu, že jedním z uvažovaných faktorů bylo také ekonomické hledisko, lze doporučit především otvory s tvarem „K“ a „L“, protože tyto tvary používají pouze 59%, resp. 50% množství vodivého lepidla oproti standardnímu tvaru „O“.

Jak již bylo zmíněno výše, byl v průběhu realizace první části experimentu nalezen problém při čištění použitých šablon. Bylo zjištěno, že v případě otvorů, které svírají ostrý úhel (menší než  $90^\circ$ ) se tyto otvory obtížně čistí. Otvory pro druhou část experimentu byly na základě tohoto poznatku optimalizovány a ostré úhly otvorů byly zaobleny. Lze konstatovat, že tyto optimalizované otvory se při realizaci druhé části čtvrtého experimentu čistily mnohem snadněji a lze proto doporučit odstranění ostrých úhlů při tvorbě všech otvorů a jejich nahrazení kruhovými tvary.

### **3.5 Pátý experiment – vliv vytvrzení vodivého lepidla na mechanickou pevnost lepeného spoje**

V pátém experimentu bylo realizováno několik testů zabývajících se vlivem dotvrzení elektricky vodivého lepidla na mechanickou pevnost spoje. Lze předpokládat, že nedotvrzené lepidlo se bude po nějaký čas ještě dotvrzovat a teprve poté začne postupně degradovat, zatímco plně vytvrzené lepidlo bude degradovat ihned. Z této hypotézy (F) vyplývá, že nedotvrzením lepidla by bylo možné prodloužit životnost vzniklého lepeného spoje. Je logické, že nedotvrzené lepidlo, bude mít nižší mechanickou pevnost než lepidlo plně vytvrzené, je však otázkou, zda bude tato nižší mechanická pevnost dostačující.

### 3.5.1 Popis pátého experimentu

Při tomto experimentu byly použity celkem tři elektricky vodivá lepidla. Prvním z nich bylo lepidlo MG 8331S, které je blíže popsáno v kapitole 3.1.1. Druhým lepidlem je XCA 3556 HF, které již bylo popsáno v kapitole 3.3.1. Posledním použitým lepidlem bylo CA3150, které je blíže popsáno v kapitole 3.4.1.1. Pro část experimentu byly, z důvodu jejich nižší ceny, použity tuhé substráty FR-4 s povrchovou úpravou čistá měď a součástky o velikosti 1206. U lepidla CA3150 však bylo rozhodnuto o použití flexibilního substrátu z důvodu velmi krátkých vytvrzovacích časů. V tomto případě se jednalo o substrát DuPont™ Pyralux® AC s měděnou vodivou vrstvou bez povrchové úpravy (označovaný jako „FDPS Cu“). Dále bylo rozhodnuto otestovat u tohoto lepidla součástky o velikosti 1206, 0805 i 0603.

U všech lepidel byl pro jejich nanesení použit šablonový tisk se šablonou o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  a s redukcí plošek o 5%, vše tedy probíhalo stejně jako v některých předchozích experimentech. Po vytvrzení byla u vzorků testována mechanická pevnost ve smyku způsobem popsaným již výše (v kapitole 3.1.3).

Vytvrzovací profily byly u většiny vzorků stanoveny podle DSC analýzy jednotlivých lepidel, které jsou podrobně popsány v kapitolách 3.1.2, 3.3.1 a 3.4.1.1. Výjimku tvoří vytvrzení na „více než 100%“, u kterých bylo snahou vzorky skutečně plně dotvrdit, případně je začít již degradovat. Čas vytvrzení u těchto vzorků byl stanoven odhadem. Další výjimku tvoří vzorky vytvrzené na 100% u lepidla MG 8331S. Čas vytvrzení u těchto vzorků byl získán přímo z katalogového listu výrobce tohoto lepidla [76].

Tabulka 10: Označení jednotlivých profilů vytvrzení použitých v pátém experimentu

Použité lepidlo	Ozn.	Teplota vytvrzení [°C]	Procento vytvrzení	Čas [s]	
XCA 3556 HF	1A	80°C	30%	130	
	1B		50%	252	
	1C		70%	350	
	1D		80%	400	
	1E		90%	450	
	1F		100%	500	
	1G	90°C	50%	77	
	1H		70%	134	
	1I		90%	252	
	1J		95%	325	
	1K		100%	400	
	1L	>100%	720		
	1M	100°C	90%	81	
	1N		100%	248	
	1O	110°C	70%	15	
	1P		80%	20	
	1Q		90%	28	
	1R		95%	37	
	1S		100%	82	
	1T	120°C	>100%	600	
1U	>100%		1200		
1V	150°C	100%	5		
1W		>100%	30		
1X		>100%	60		
1Y		>100%	600		
			>100%	600	

Použité lepidlo	Ozn.	Teplota vytvrzení [°C]	Procento vytvrzení	Čas [min]
MG 8331S	2A	80°C	70%	19,5
	2B		80%	27,1
	2C		90%	38,4
	2D		100%	60
	2E	100°C	70%	7,2
	2F		80%	9,9
	2G		90%	13,9
	2H		100%	50
	2I	130°C	70%	2,4
	2J		80%	2,9
	2K		90%	3,6
	2L		100%	30

Použité lepidlo	Ozn.	Teplota vytvrzení [°C]	Procento vytvrzení	Čas [min]
CA3150	3A	100°C	70%	19
	3B		80%	26
	3C		90%	36
	3D		95%	46
	3E		100%	93
	3F	130°C	100%	10

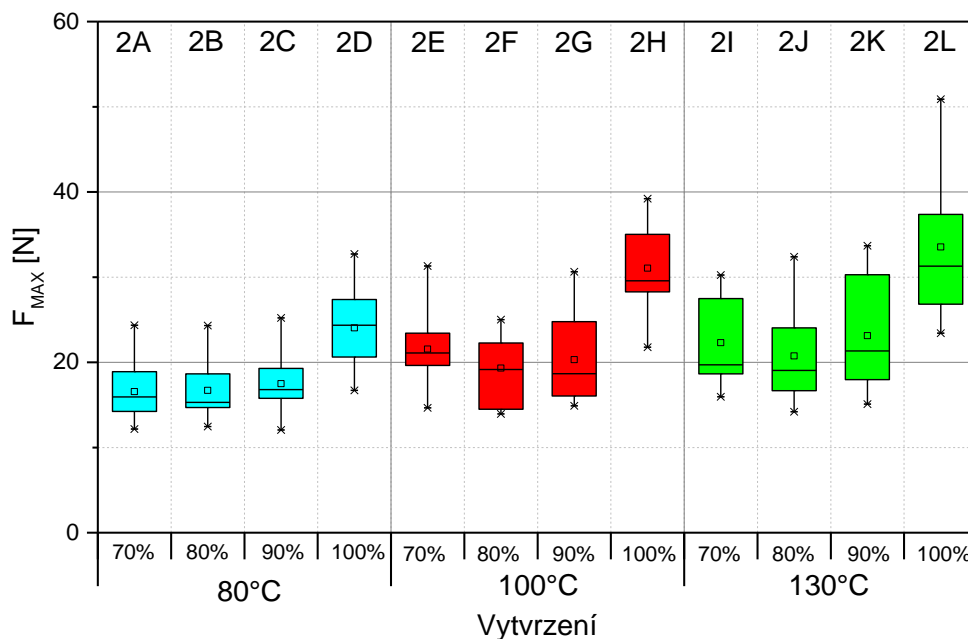
### 3.5.2 Výsledky pátého experimentu

Vzhledem k tomu, že každé lepidlo má odlišné charakteristiky a odlišné vytvrzovací profily, budou výsledky prezentovány pro každé lepidlo zvlášť.

#### 3.5.2.1 Výsledky lepidla MG 8331S

Pokud se podíváme na výsledky mechanické pevnosti pro lepidlo MG 8331S (Obrázek 66), můžeme pozorovat přibližně shodné hodnoty u vzorků vytvrzených na 70%, 80% i 90%. U vzorků vytvrzených na 100% lze pozorovat mechanickou pevnost vyšší o zhruba 20 až 30%. Z výsledků je tedy patrné, že nedotvrzením lepidla MG 8331S dojde ke snížení mechanické pevnosti, což bylo předpokládáno, ale tato snížená mechanická pevnost lepených spojů je stále ještě vyhovující a takovéto spoje mají delší životnost.

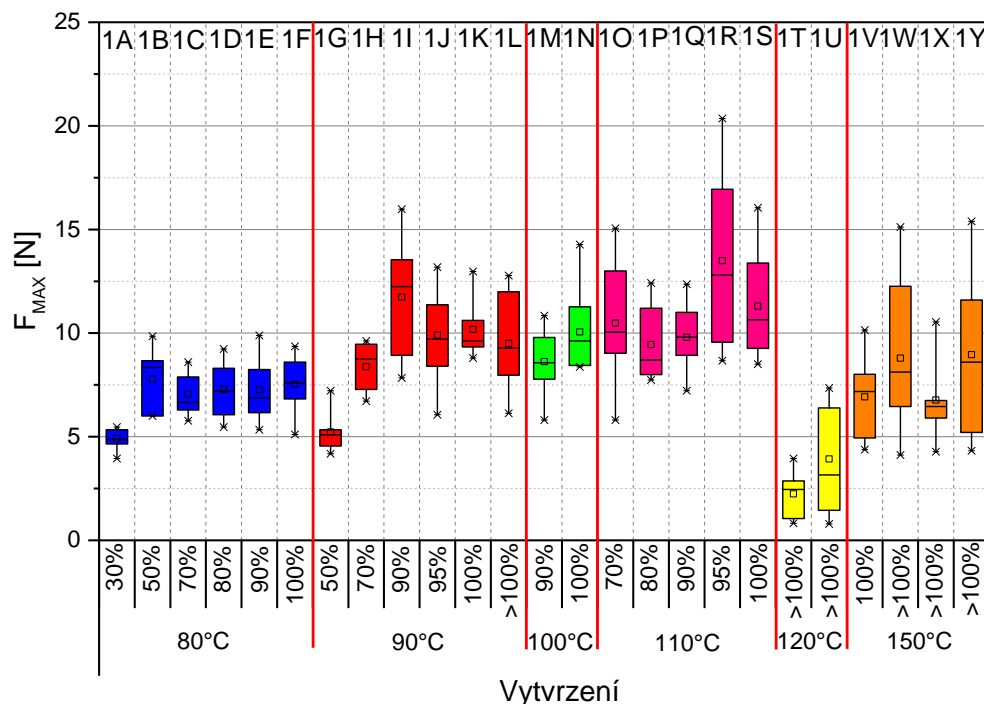




**Obrázek 66:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS s lepidlem MG 8331S a různé procento vytvrzení u součástek o velikosti 1206.

### 3.5.2.2 Výsledky lepidla XCA 3556 HF

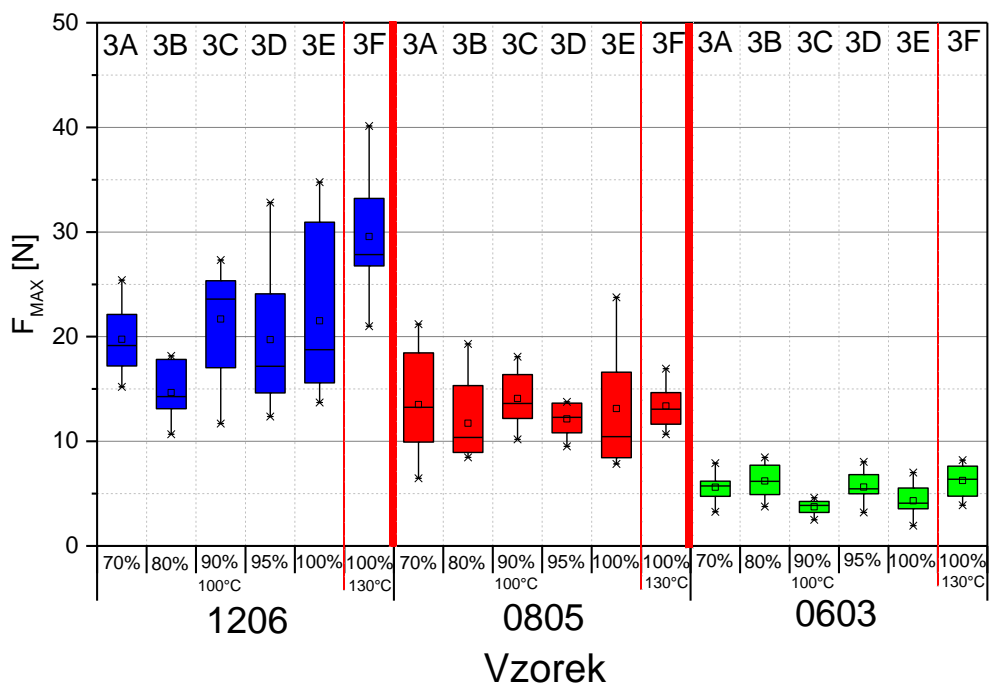
V případě lepidla XCA 3556 HF bylo použito nejvíce vytvrzovacích profilů. Pokud se podíváme na výsledky mechanické pevnosti pro toto lepidlo (Obrázek 67), můžeme pozorovat u všech vytvrzovacích profilů výrazně nižší mechanickou pevnost než u ostatních lepidel. Jako nejvhodnější se jeví teplota vytvrzení okolo 110°C, při které je mechanická pevnost nejvyšší. Pokud se zaměříme na procento vytvrzení, můžeme pozorovat přibližně shodné výsledky mechanické pevnosti u teploty 80°C. Při teplotě 90°C lze pozorovat přibližně stejné hodnoty od vytvrzení 90% výše. V případě vytvrzení na 110°C jsou hodnoty mechanické pevnosti mírně vyšší u vytvrzení na 95% a 100%, avšak celkově lze opět říci, že všechna vytvrzení jsou srovnatelná. V případě teploty 150°C byly provedeny vytvrzení pouze na 100% a dále byly některé vzorky „přetvrzeny“. I v tomto případě jsou jednotlivé vzorky z pohledu mechanické pevnosti v podstatě srovnatelné. Z výsledků je tedy patrné, že nedotvrzením lepidla XCA 3556 HF téměř nedojde ke snížení mechanické pevnosti a lze tedy doporučit vytvrzování tohoto lepidla na méně než 100%, čímž dojde k prodloužení životnosti vzniklého spoje.



**Obrázek 67:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS s lepidlem XCA3556HF a různé procento vytvrzení u součástek o velikosti 1206.

### 3.5.2.3 Výsledky lepidla CA 3150

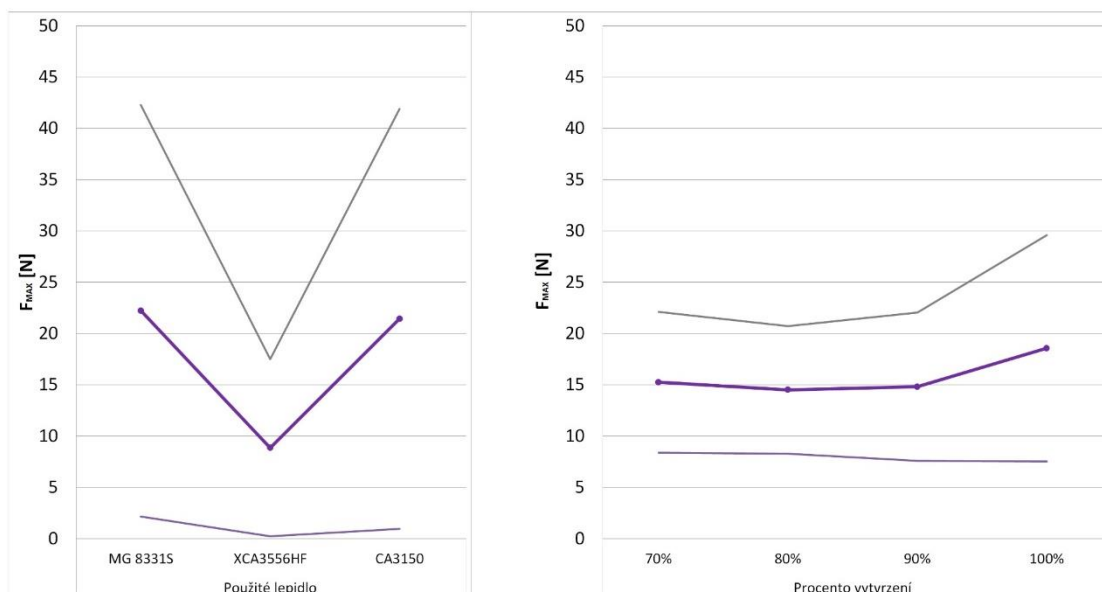
V případě lepidla CA 3150 byl použit flexibilní substrát a také tři velikosti součástek. Pokud se podíváme na výsledky mechanické pevnosti pro toto lepidlo (Obrázek 68), můžeme pozorovat přibližně shodné hodnoty mechanické pevnosti u jednotlivých procent vytvrzení. V případě součástek 1206 a teploty vytvrzení 130°C lze pozorovat výrazně vyšší mechanickou pevnost oproti vytvrzení při 100°C. Obecně lze říci, že dotvrzení tohoto lepidla mírně zvýší rozptyl hodnot mechanické pevnosti, avšak na samotnou pevnost má minimální vliv. U tohoto lepidla lze tedy opět doporučit využití nedotvrzeného lepidla, což v obecné rovině prodlouží životnost lepeného spoje.



**Obrázek 68:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro FDPS Cu s lepidlem CA3150 a různé procento vytvrzení.

### 3.5.2.4 Shrnutí výsledků všech testovaných lepidel

Pro úplné vyhodnocení tohoto experimentu byla vytvořena faktorová analýza (Obrázek 69), ve které byly zpracovány výsledky všech testovaných lepidel pro procento vytvrzení 70, 80, 90 a 100% bez ohledu na použitou teplotu vytvrzení. Z této analýzy vyplývá, že mechanická pevnost vzorků při použití lepidla XCA3556HF je výrazně nižší, a tedy že použití tohoto lepidla nebo jiného lepidla má významný vliv na mechanickou pevnost spoje. Dále z této analýzy vyplývá, že použité procento vytvrzení na 70%, 80% nebo 90% nemá u testovaných lepidel téměř žádný vliv na mechanickou pevnost lepeného spoje, a že vytvrzení lepidla na 100% nebo na nižší procento má pouze minimální vliv na mechanickou pevnost a je to tedy zanedbatelný faktor.



**Obrázek 69:** Vliv použitých faktorů na mechanickou pevnost lepeného spoje podle metodologie DOE.

Obecně lze říci, že nedotvrzení elektricky vodivého lepidla významně nesnižuje mechanickou pevnost výsledného spoje i při poměrně nízkém procentu vytvrzení a je možné stanovenou hypotézu (F) potvrdit. Lze tedy doporučit se tímto nedotvrzením dále zabývat, a po zjištění chování a spolehlivosti nedotvrzeného lepeného spoje v konkrétní aplikaci, toto nedotvrzení využívat v praxi.

### 3.6 Šestý experiment – vliv čištění a drsnosti substrátu na mechanickou pevnost lepeného spoje

Z předchozích experimentů vyplynulo, že při testování mechanické pevnosti lepeného spoje dochází v některých případech k adheznímu lomu mezi vodivou ploškou substrátu a elektricky vodivým lepidlem. Z tohoto zjištění byla stanovena hypotéza (G), že změnou čištění plošek před nanesením lepidla nebo změnou drsnosti těchto plošek bude zvýšena mechanická pevnost celého spoje. Samotný šestý experiment byl rozdělen na více částí, ve kterých byly postupně otestovány různé substráty a různé metody zdrsňení.

#### 3.6.1 První část šestého experimentu

V první části byla testována hypotéza (G1), že použití odlišných povrchových úprav tuhých DPS, které jsou určeny pro pájení, by mohlo zvýšit mechanickou pevnost lepených spojů vzhledem k odlišným vlastnostem a drsnosti jednotlivých povrchových úprav.

### 3.6.1.1 Popis první části šestého experimentu

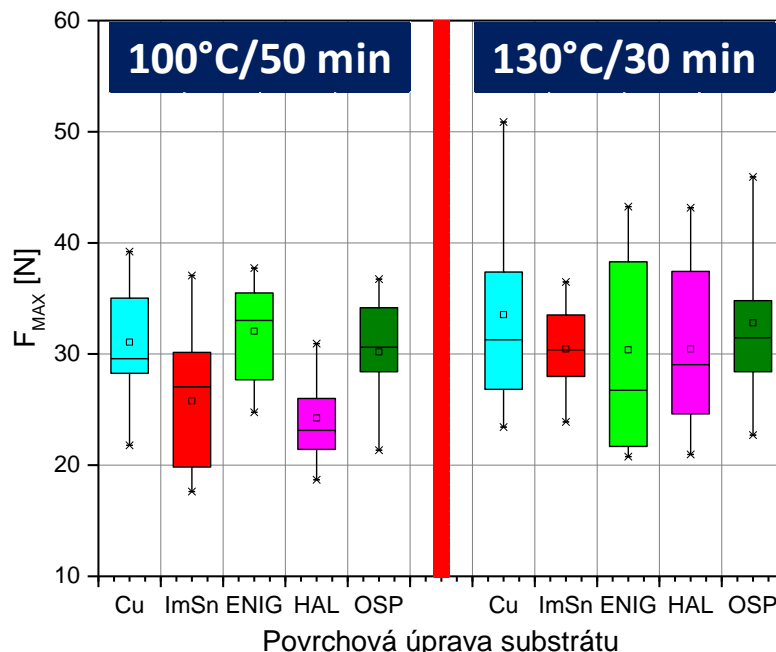
Pro tuto část experimentu byly použity tuhé substráty FR-4 s povrchovými úpravami imerzní cín (ImSn), ENIG, HAL, OSP a pro srovnání také substráty bez povrchové úpravy. Dále byly v této části experimentu použity SMD čipové rezistory o velikosti pouzdra 1206.

Pro experiment bylo zvoleno elektricky vodivé lepidlo MG 8331S, které je detailně popsáno již výše (v kapitole 3.1.1). U lepidla byly použity vytvrzovací profily 100°C/50 minut a 130°C/30 minut, které se již osvědčily v předchozích experimentech.

Pro nanesení lepidla byl použit šablonový tisk se šablonou o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  a s redukcí plošek o 5%, vše tedy probíhalo stejně jako v některých předchozích experimentech. Po vytvrzení byla u vzorků testována mechanická pevnost ve smyku způsobem popsáným již výše (v kapitole 3.1.3).

### 3.6.1.2 Výsledky první části šestého experimentu

Hodnoty mechanické pevnosti spojů zaznamenané trhacím zařízením byly následně statisticky zpracovány a jsou zobrazeny v boxovém grafu (Obrázek 70).



**Obrázek 70:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro tuhé DPS s různými povrchovými úpravami a lepidlo MG 8331S.

Z výsledků je patrné, že u použitého lepidla došlo při použití substrátů s povrchovou úpravou ImSn a HAL při vytvrzení při 100°C po dobu 50 minut k poklesu mechanické pevnosti oproti substrátu bez povrchové úpravy. V případě ostatních povrchových úprav

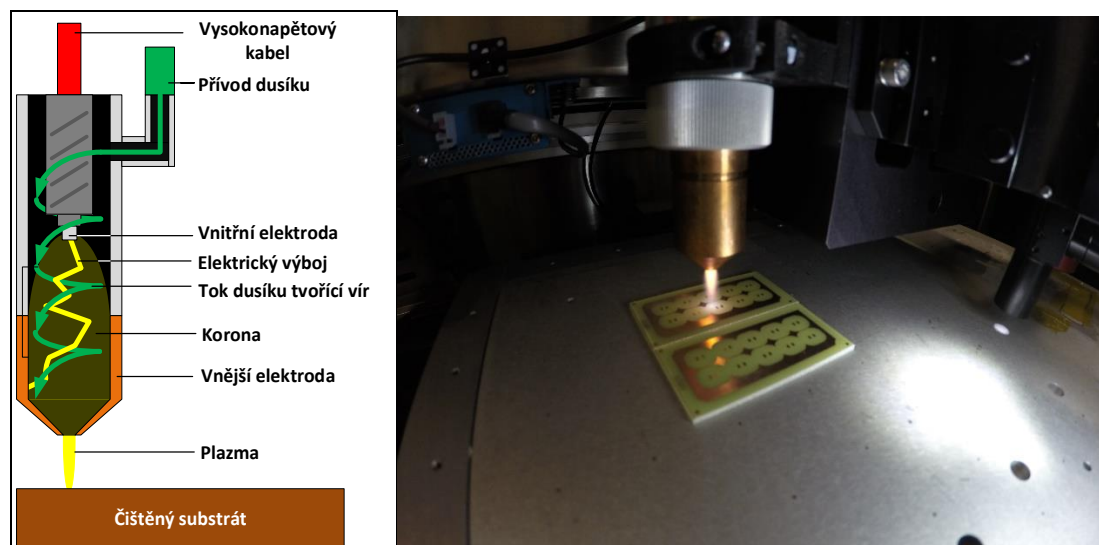
a všech povrchových úprav při vytvrzení při 130°C po dobu 30 minut jsou výsledky srovnatelné s mechanickou pevností na substrátu bez povrchové úpravy. Použití povrchových úprav určených pro pájení tedy nelze v případě elektricky vodivého lepení doporučit, protože nepřinášejí zlepšení mechanických vlastností spoje a zároveň zvyšují cenu substrátu. Z těchto důvodů lze tedy hypotézu (G1) zamítnout. V případě některých povrchových úprav, především ENIG, by bylo možné uvažovat o jejich přínosu v oblasti elektrických vlastností spoje, avšak tento jev nebyl testován a nelze tedy tento předpoklad potvrdit či vyvrátit.

### **3.6.2 Druhá část šestého experimentu**

Druhá část byla zaměřena na zjištění přínosu plasmového čištění plošek. Hypotézou (G2) této části bylo, že plasmové očištění odstraní nečistoty z kontaktních plošek a po nanesení a vytvrzení lepidla na těchto ploškách bude výsledná mechanická pevnost vyšší.

#### **3.6.2.1 Popis druhé části šestého experimentu**

V této části experimentu byl použit flexibilní substrát DuPont™ Pyralux® AC s měděnou vodivou vrstvou bez povrchové úpravy (označovaný jako „FDPS Cu“). Dále bylo v této části experimentu použito plasmové čištění. Konkrétně byly flexibilní substráty očištěny měkkou pryží a poté podrobeny plasmovému čištění. Pro toto čištění byla využita pulzní atmosférická oblouková technologie (PAA®) s vířivou tryskou. Konkrétně se jednalo o systém Relyon plasma PB3 + PS 2000. Tento systém byl nastaven na frekvenci výboje 54 kHz, rychlost průtoku dusíku 30 l/min, byla použita nízkoteplotní tryska a rychlost posuvu substrátu pod tryskou byla 150 mm/s. Vzdálenost mezi tryskou a substrátem pak byla 8 mm. Princip tohoto čištění a fotografie jsou zobrazeny na obrázku níže (Obrázek 71).



**Obrázek 71:** Princip zařízení pro čištění plasmou (vlevo), příklad čištění substrátu plasmou (vpravo).

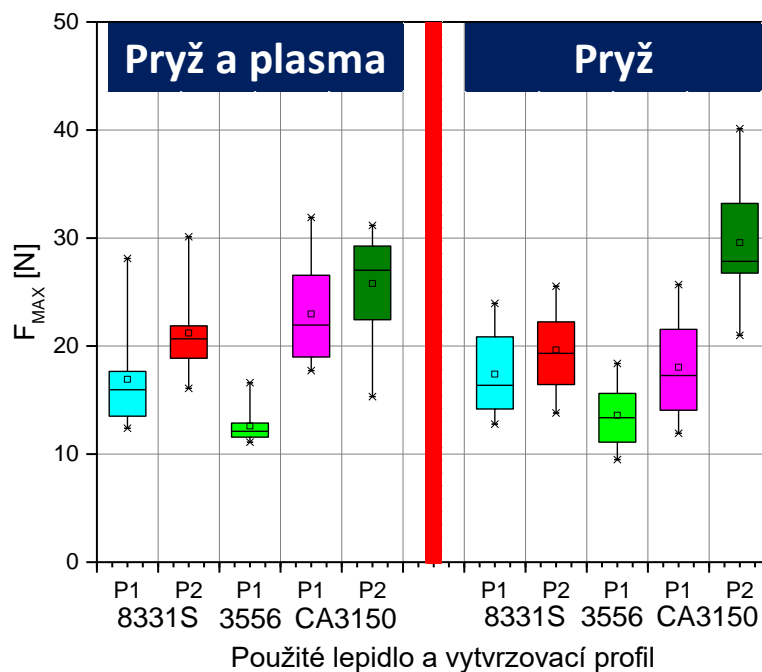
Dále byly v této části experimentu použity SMD čipové rezistory o velikosti pouzdra 1206 a 0805.

Pro tuto část experimentu byly zvoleny tři elektricky vodivá lepidla. Konkrétně se jednalo o lepidlo MG 8331S, XCA 3556 HF a CA3150. Všechna zmíněná lepidla jsou již detailně popsána výše (v kapitolách 3.1.1, 3.3.1 a 3.4.1.1). U lepidla MG 8331S byly použity vytvrzovací profily 100°C/50 minut (P1) a 130°C/30 minut (P2). U lepidla XCA 3556 HF je použit pouze jeden vytvrzovací profil 100°C/248 sekund (P1). Tento profil byl zvolen na základě DSC analýzy prezentované v kapitole 3.3.1. U posledního použitého lepidla CA3150 byly použity vytvrzovací profily 100°C / 93 sekund (P1) a 130°C / 10 sekund (P2).

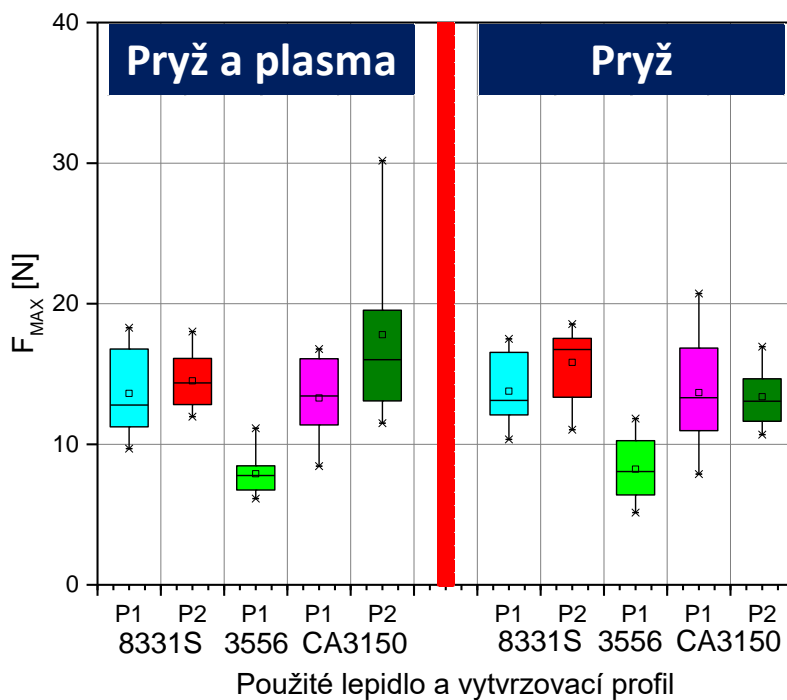
Pro nanesení lepidla byl opět použit šablonový tisk se šablonou o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  a s redukcí plošek o 5%, vše tedy probíhalo stejně jako v některých předchozích experimentech. Po vytvrzení byla u vzorků testována mechanická pevnost ve smyku způsobem popsaným již výše (v kapitole 3.1.3).

### 3.6.2.2 Výsledky druhé části šestého experimentu

Statisticky zpracované hodnoty naměřených maximálních sil potřebných k odtržení lepených spojů jsou zobrazeny na obrázcích níže (Obrázek 72, Obrázek 73, Obrázek 74).



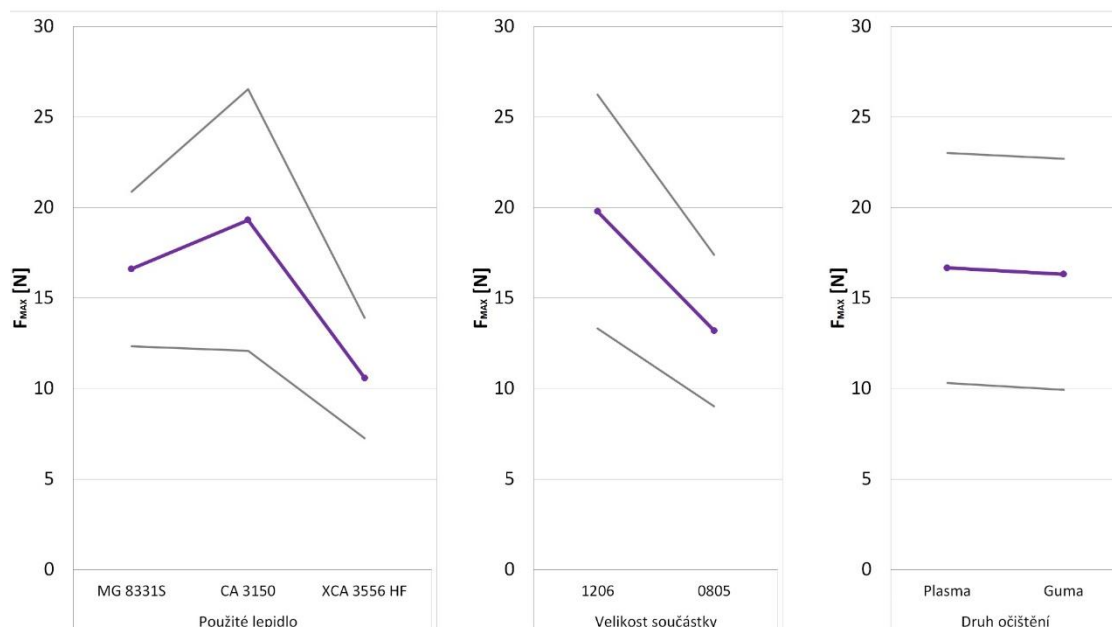
**Obrázek 72:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS pro různé typy čištění pro součástky o velikosti 1206.



**Obrázek 73:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro flexibilní DPS pro různé typy čištění pro součástky o velikosti 0805.



Z výsledků vyplývá, že mechanická pevnost lepených spojů na flexibilních substrátech je srovnatelná při očištění měkkou pryží s pevností při očištění pryží a plasmou. Při porovnání jednotlivých lepidel lze říci, že lepidlo XCA 3556 HF má výrazně nižší mechanickou pevnost než ostatní použitá lepidla, což platí u obou typů čištění a tento fakt již byl prokázán i v předchozích experimentech.



**Obrázek 74:** Vliv použitých faktorů na mechanickou pevnost lepeného spoje na flexibilních substrátech podle metodologie DOE.

Pokud se podíváme na vliv jednotlivých faktorů (Obrázek 74), můžeme vidět, že největší vliv má použitý typ lepidla a samozřejmě také velikost součástky, což potvrzuje očekávání. V případě faktoru očištění je zde pouze minimální vliv, což potvrzuje předchozí boxové grafy. Navrženou hypotézu (G2), že očištění plasmou zvýší mechanickou pevnost lepeného spoje, je tedy možné zamítnout. Tato hypotéza by ovšem mohla platit v případě pájených spojů, kde by plasmové čištění, které snižuje povrchové napětí, mohlo zlepšit smáčení pájecí plošky. Potvrzení nebo vyvrácení této hypotézy je věnována kapitola níže.

### 3.6.3 Třetí část šestého experimentu

Třetí část byla zaměřena na výrobu vlastního substrátu. V této části byly vytvořeny substráty se třemi drsnostmi a následně bylo zjišťováno, zda jsou tyto substráty prakticky využitelné pro osazení součástek vodivým lepidlem a zda se jejich vlastnosti liší

v závislosti na jejich drsnosti. Hypotézou (G3) této části bylo, že zvýšením drsnosti nosné fólie se zvýší také drsnost vodivého stříbrného motivu, čímž se zvýší kontaktní plocha s elektricky vodivým lepidlem, což by mělo zvýšit mechanickou pevnost vzniklého spoje.

### 3.6.3.1 Popis třetí části šestého experimentu

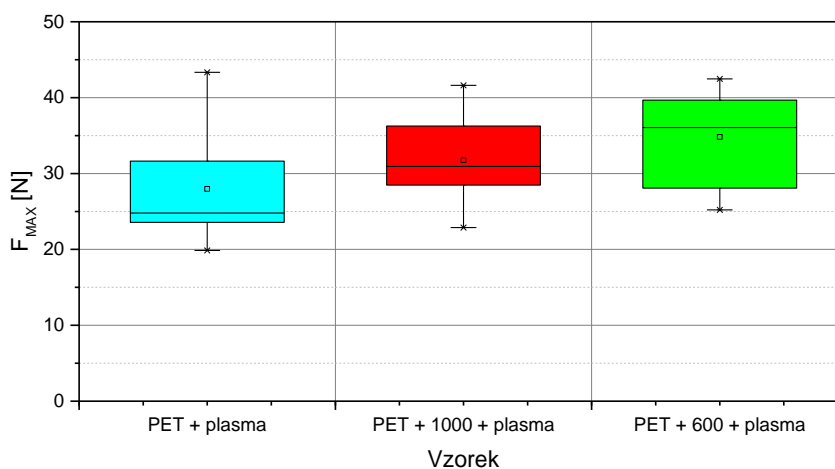
V této části experimentu byla použita PET fólie (Melinex), která sloužila jako nosná část substrátu. Tato fólie byla u prvního typu pouze očištěna plasmovým čištěním, princip tohoto čištění byl popsán výše v kapitole 3.6.2.1. U druhého typu byla tato fólie zdrsňena za pomoci brusného papíru o drsnosti 1000 a poté očištěna plasmovým čištěním. U třetího typu byla zmíněná PET fólie zdrsňena pomocí brusného papíru s drsností 600 a poté očištěna plasmovým čištěním. Takto připravené tři typy nosných materiálů byly připevněny do zařízení AJP (Aerosol Jet Printing) a byly na ně stříbrným inkoustem (Paru PG-007 AJ) natisknuty vodivé motivy, čímž byly vytvořeny tři typy flexibilních substrátů o různé drsnosti stříbrného motivu.

U tohoto experimentu bylo použito elektricky vodivé lepidlo MG 8331S, které bylo nanášeno standardní šablonou o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  s otvory redukovánými o 5% šířky a délky vzhledem k velikosti plošky. Pro vytvrzení byl použit vytvrzovací profil 100°C / 50 minut.

Po vytvrzení byla u všech vzorků testována mechanická pevnost ve smyku za pomoci zařízení LabTech 3.030, detaily tohoto testu jsou popsány výše v kapitole 3.1.3.

### 3.6.3.2 Výsledky třetí části šestého experimentu

Statisticky zpracované hodnoty naměřených maximálních sil potřebných k odtržení lepených spojů jsou zobrazeny na obrázku níže (Obrázek 75).



**Obrázek 75:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro různé drsnosti flexibilních DPS.

Z naměřených dat je patrné, že zdrsňení PET fólie před nanesením stříbrné vodivé vrstvy má vliv na výslednou mechanickou pevnost lepených spojů. Stanovená hypotéza (G3) byla tedy potvrzena, avšak pouze na třech vzorcích. Dále lze říci, že větší zdrsňení, které je vytvořeno hrubším brusným papírem (600) má vyšší mechanickou pevnost. Tímto experimentem však vyvstalo několik otázek. První otázkou bylo, zda by použití ještě drsnějších brusných papírů ještě zlepšilo mechanickou pevnost výsledného spoje. Další otázkou bylo, jaká je skutečná drsnost vodivého motivu naneseného na zdrsňený substrát. Třetí otázkou bylo, zda větší počet natištěných vrstev vodivého motivu změní mechanickou pevnost. Čtvrtou otázkou pak bylo, zda má očištění folie plasmou v tomto případě vliv na mechanickou pevnost. Pro zodpovězení těchto otázek a také potvrzení dříve stanovené hypotézy (G3) na více vzorcích byl navržen experiment popsáný ve čtvrté části šestého experimentu (v kapitole 3.6.4).

### **3.6.4 Čtvrtá část šestého experimentu**

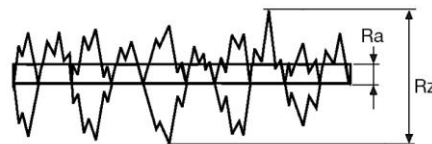
Jak již bylo řečeno výše, byla tato část v podstatě rozšířením třetí části. Pro experiment bylo použito šest různých drsností fólie, dvě různá množství stříbrného vodivého motivu a polovina vzorků byla navíc plasmována. U všech drsností fólie byla navíc tato drsnost změřena a následně byla porovnána s měřenou drsností vodivého motivu po nanesení stříbrného inkoustu. Také byl v tomto experimentu použit více opakovatelný postup zdrsňení substrátu.

#### **3.6.4.1 Popis čtvrté části šestého experimentu**

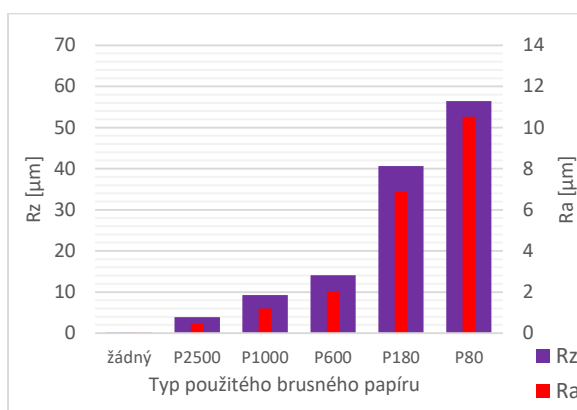
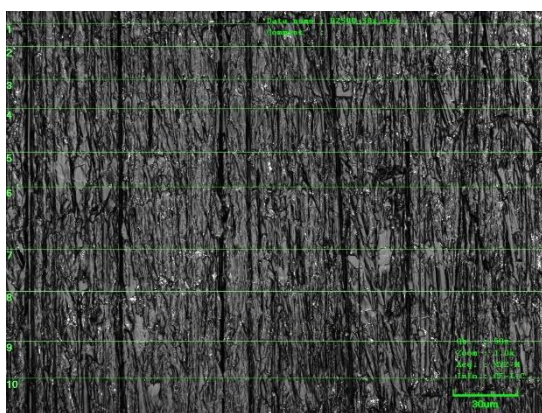
V této části experimentu byla opět použita PET fólie (Melinex<sup>®</sup> 506) o tloušťce 175  $\mu\text{m}$ , která měla z obou stran „adhezní“ vrstvu, která by měla zvýšit přilnavost nanášeného materiálu. Jakým způsobem je tato vrstva vytvořena výrobce neudává. Tato fólie sloužila jako nosná část substrátu.

Pro zdrsňení substrátu byla použita bruska „Phoenix beta“ od společnosti Buehler. Na tomto zařízení bylo postupně použito pět různých brusných papírů s různou velikostí abrazivních částic, které vychází ze standardu FEPA, konkrétně se jednalo o papíry P2500, P1000, P600, P180 a P80. Bruska byla nastavena na rychlost otáčení 200 otáček za minutu, bylo zapnuto omývání vodou a za použití přitlačné síly 30N byla každá fólie zdrsňena ve dvou na sebe kolmých směrech, přičemž každý směr zdrsňení trval 5 sekund. Po zdrsňení byly tyto fólie pozorovány a nasnímány za pomoci laserového konfokálního

skenovacího mikroskopu (LEXT) se zvětšením 1200x. Na snímcích byla poté změřena drsnost jednotlivých fólií, viz Obrázek 77. V případě měření drsnosti lze měřit více vzdáleností, v našem případě byla měřena maximální výška drsnosti Rz, která udává rozdíl mezi nejvyšším naměřeným bodem a nejnižším naměřeným bodem. Jako druhý parametr byla měřena aritmetická střední výška drsnosti Ra, viz Obrázek 76.

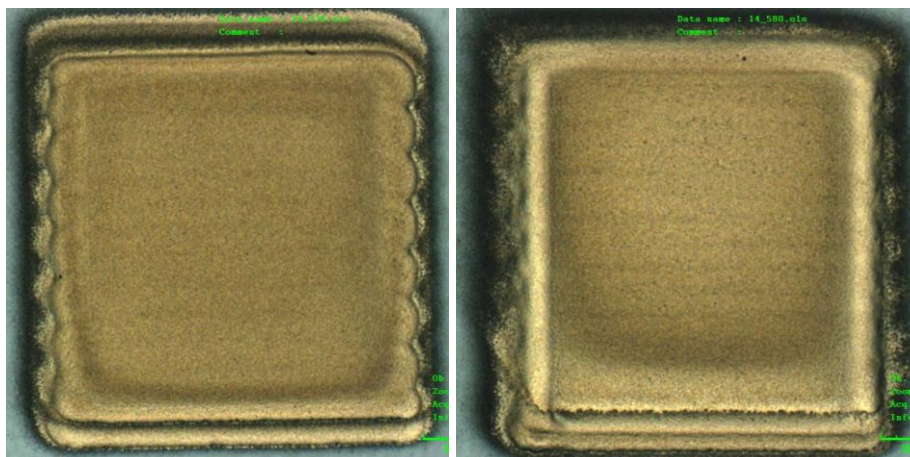


Obrázek 76: Měřené parametry drsnosti

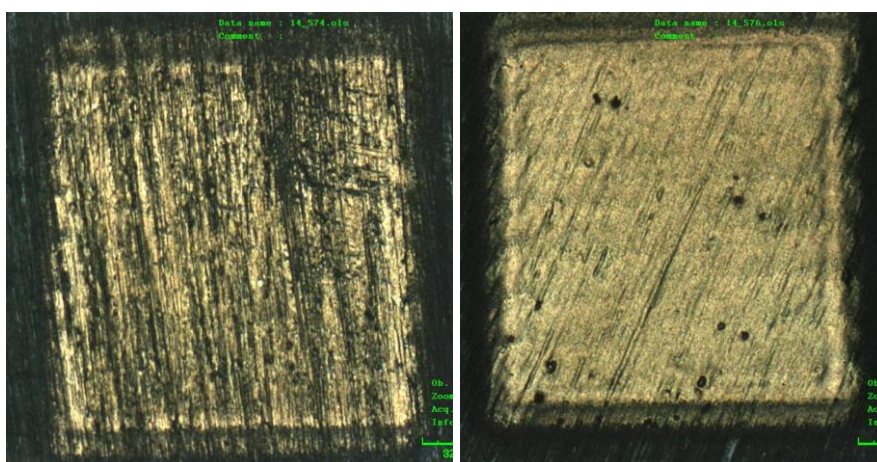


Obrázek 77: Příklad měření drsnosti vzorku (P2500) před tiskem inkoustu (vlevo); graf naměřených drsností vzorků před tiskem inkoustu (vpravo).

Po nasnímání vzorků byla polovina z nich ošetřena plasmovým čištěním za pomoci zařízení Relyon PB3 + PS 2000. Následně byl na všechny vzorky nanesen stříbrný vodivý inkoustu Paru PG-007 AJ za pomoci zařízení AJP (Aerosol Jet Printing), které vytvoří z inkoustu aerosol, který je následně za pomoci trysky nanášen na požadované plochy. Na polovinu vzorků byla nanесena jedna vrstva inkoustu, zatímco na druhou polovinu vzorků byly nanесeny tři vrstvy inkoustu. Po nanесení byl inkoust vytvrzen při teplotě 140°C po dobu 10 minut.

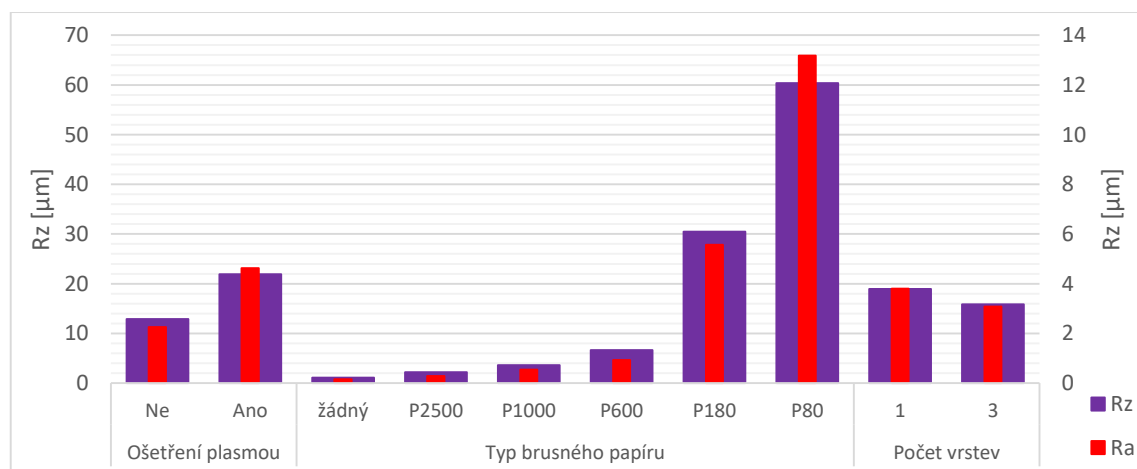


**Obrázek 78:** Natištěná vodivá ploška na nezdrsněnou fólii v tloušťce - 1 vrstvy (vlevo); 3 vrstev (vpravo)



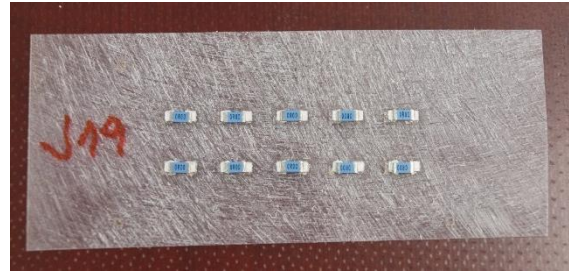
**Obrázek 79:** Natištěná vodivá ploška na zdrsněnou (P1000) fólii v tloušťce - 1 vrstvy (vlevo); 3 vrstev (vpravo)

Po nanesení a vytvrzení vodivého inkoustu byla způsobem popsaným výše u každého vzorku měřena drsnost plochy vodivého inkoustu. Naměřené hodnoty byly následně statisticky zpracovány a byla vytvořena obdoba faktorové analýzy, viz Obrázek 80.



**Obrázek 80:** Vliv jednotlivých použitých faktorů na naměřenou drsnost vzorků po tisku inkoustu.

Po vytvoření substrátů bylo použito elektricky vodivé lepidlo MG 8331S, které bylo nanášeno standardní šablonou o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  s otvory redukovanými o 5% šířky a délky vzhledem k velikosti plošky. Po nanášení lepidla byly na všechny substráty osazeny součástky o velikosti pouzdra 1206 v počtu 10 ks, viz Obrázek 81. Pro vytvrzení byl použit vytvrzovací profil 100°C / 50 minut.

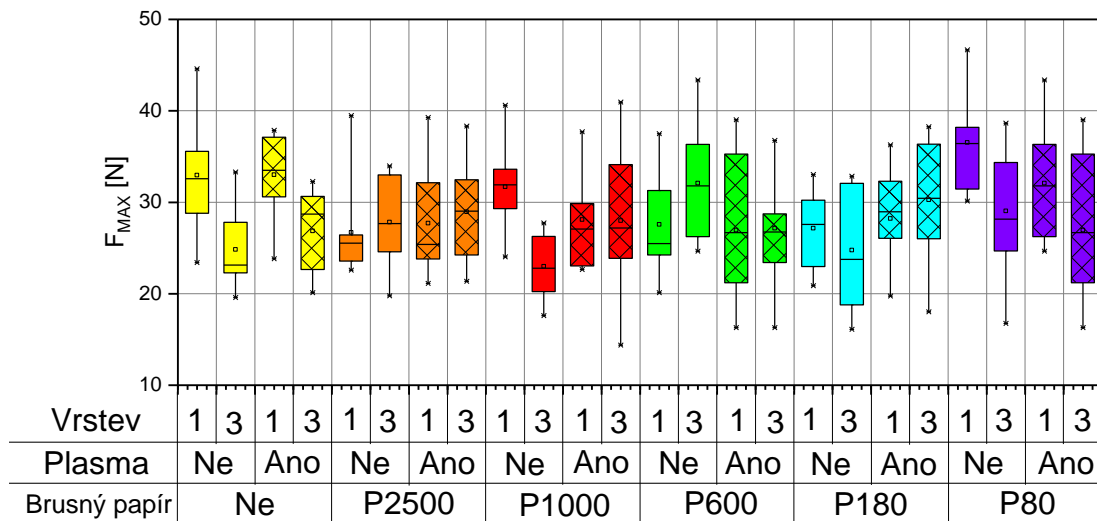


**Obrázek 81:** Substrát zdrsňený brusným papírem P80 s vytvořeným vodivým motivem a osazenými rezistory.

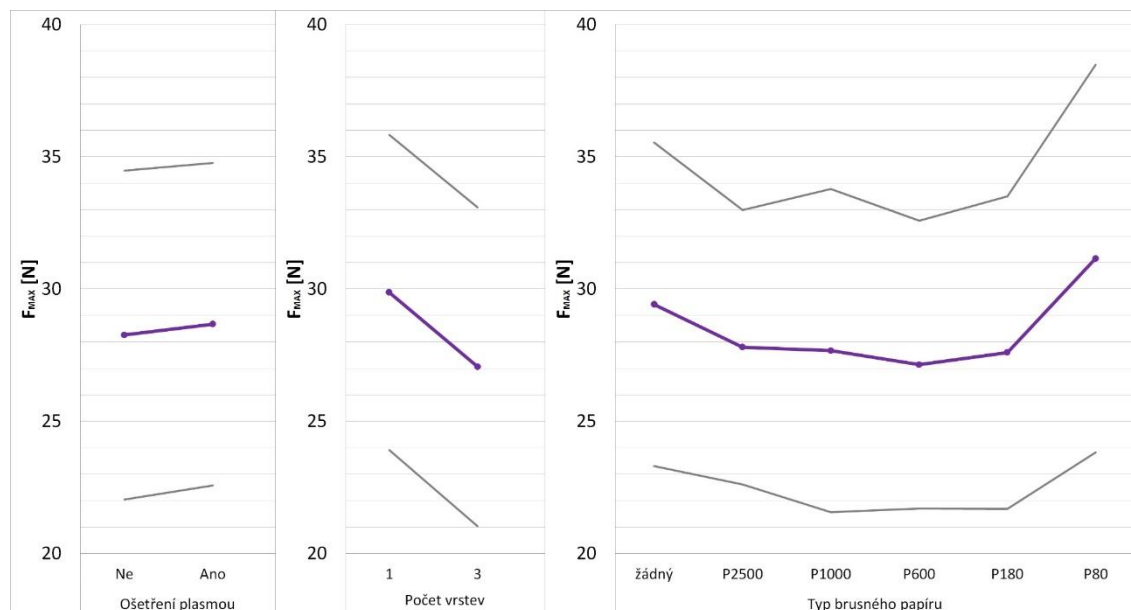
Po vytvrzení byla u všech vzorků testována mechanická pevnost ve smyku za pomoci zařízení LabTech 3.030, detaily tohoto testu jsou popsány výše v kapitole 3.1.3.

### 3.6.5 Výsledky čtvrté části šestého experimentu

Statisticky zpracované hodnoty naměřených maximálních sil potřebných k odtržení lepených spojů jsou zobrazeny na obrázku níže (Obrázek 82). Pro zjištění vlivu jednotlivých faktorů byla dále vytvořena faktorová analýza všech výsledků, viz Obrázek 83.



**Obrázek 82:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly.



**Obrázek 83:** Vliv použitých faktorů na mechanickou pevnost lepeného spoje podle metodologie DOE.

Z výsledků naměřených drsností vytvořených substrátů (Obrázek 77 a Obrázek 80) vyplývá, že drsnost samotné PET fólie roste v podstatě lineárně s nárůstem velikosti částic brusného papíru. Při pohledu na drsnost naneseného vodivého motivu lze říci, že tato drsnost narůstá spíše exponenciálně. Tento efekt je zřejmě způsoben nízkou viskozitou inkoustu, který při nižším zdrsnění zateče do jednotlivých otvorů a zdrsněnou fólii částečně vyhladí. Oproti tomu u fólií s vyšší drsností již k tomuto jevu nedojde v takové míře, protože otvory jsou větší a hlubší a v dané oblasti není dostatek inkoustu pro jejich zaplnění. Vodivý inkoust tedy v těchto případech více kopíruje zdrsnění samotné fólie. Na drsnost výsledného vodivého motivu má vliv také množství naneseného vodivého inkoustu, které je přímo úměrné počtu nanesených vrstev, přičemž při vyšším množství inkoustu dochází opět ke snížení drsnosti.

Z výsledků mechanické pevnosti (Obrázek 82 a Obrázek 83) je patrné, že ošetření fólie plasmou před nanesením vodivého motivu nemá významný vliv na výslednou mechanickou pevnost a nejedná se tedy o významný faktor. Počet vrstev vodivého inkoustu lze oproti tomu považovat za významný faktor. V případě vyššího počtu vrstev dochází ke snížení mechanické pevnosti. Tento jev je způsoben snížením drsnosti vodivého motivu, které je popsáno v předchozím odstavci. Posledním zkoumaným faktorem je vliv použitého brusného papíru, tedy vliv drsnosti, na mechanickou pevnost. Tento faktor lze podle výsledků považovat za významný. V případě použití nezdrsněné fólie je mechanická pevnost vyšší oproti fóliím s jemnějším zdrsněním. Tento jev

je zřejmě způsobem vlivem adhezní vrstvy, která je vytvořena na fólii výrobcem. Tato vrstva zvyšuje adhezi vodivého inkoustu a tím i mechanickou pevnost celého spoje. V případě zdrsnění substrátu je tato vrstva odstraněna, což vede ke snížení mechanické pevnosti u substrátů s nižším zdrsněním. U substrátu s nejvyšším použitým zdrsněním však již dochází k uplatnění vlivu vyšší drsnosti a tím i ke zvýšení mechanické pevnosti, která je v průměru vyšší než v případě nezdrsněných substrátů, což potvrzuje hypotézu (G3).

Závěrem lze říci, že zdrsnění substrátu může být přínosné, avšak je vždy nutné zohlednit konkrétní aplikaci, a také ostatní, především elektrické, vlastnosti daného substrátu, které nebyly v realizovaném experimentu zkoumány.

## **4 Experimentální část - pájení**

V průběhu návrhů a realizace experimentů popsaných v kapitole 3 vyvstaly některé hypotézy týkající se použití obdobných testů u pájených spojů. Tyto experimenty na pájených spojích jsou popsány v následujících podkapitolách a jsou uvedeny v této disertační práci pro doplnění výše popsaných experimentů.

### **4.1 Sedmý experiment – vliv čištění DPS na mechanickou pevnost pájených spojů**

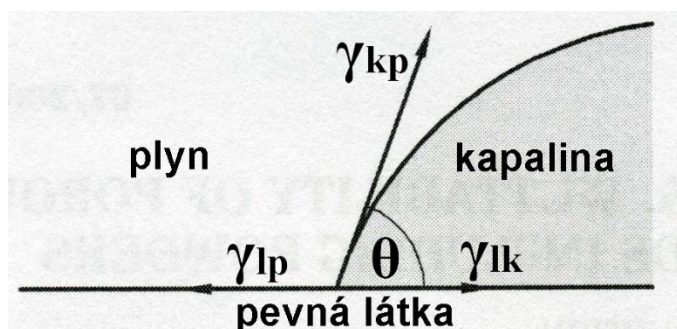
Tento experiment byl navržen na základě experimentu popsaného v kapitole 3.6.2 a zabývá se vlivem čištění vodivého motivu substrátu před pájením na mechanickou pevnost výsledného spoje.

#### **4.1.1 Popis sedmého experimentu**

V tomto experimentu byly použity dva druhy čištění. První část vzorků byla očištěna mechanicky za pomoci měkké pryže, druhá část vzorků byla očištěna plasmovým čištěním, které bylo realizováno stejně jako v kapitole 3.6.2.1, pouze rychlost posuvu byla změněna na 140 mm/s a celý proces byl u každého vzorku proveden třikrát. Třetí část vzorků byla pro porovnání ponechána neočištěná. První hypotézou (H) tohoto experimentu bylo, že plasmové očištění odstraní nečistoty z vodivých plošek a zároveň sníží povrchové napětí na vodivých ploškách. Zde se uplatní Youngova rovnice (1), ze které vyplývá, že smáčecí úhel je úměrný povrchovému napětí, a tedy že snížením povrchového napětí by mělo dojít ke snížení smáčecího úhlu a tím ke zlepšení pájitelnosti daného povrchu. [82]



$$\gamma_{kp} \cdot \cos \theta = \gamma_{lp} - \gamma_{lk} \quad (1)$$



**Obrázek 84:** Rovnováha sil na rozhraní tří fází [83].

V případě, že dojde ke zlepšení pájitelnosti, měla by se zvýšit také mechanická pevnost spoje, což by se projevilo na naměřených výsledcích. Druhou hypotézou (I) experimentu bylo, že mechanickým očištěním vodivého motivu měkkou pryží dojde k odstranění oxidů a zároveň k mikroskopickému zdrsňení povrchu, což zvýší dotykovou plochu, čímž opět dojde ke zvýšení mechanické pevnosti spoje.

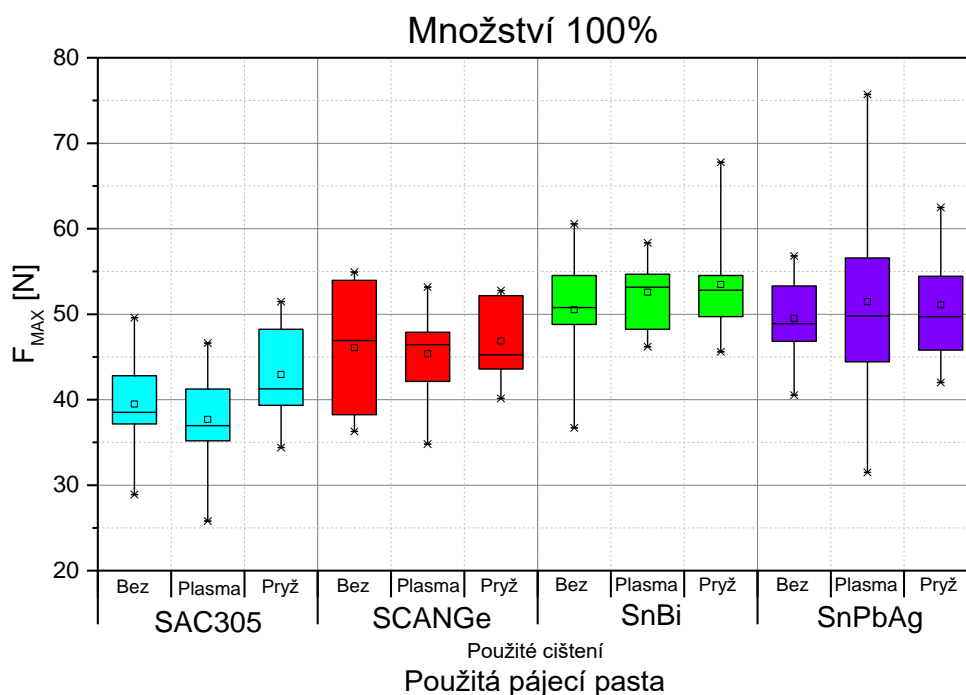
Tento experiment byl realizován na tuhých substrátech FR-4 s povrchovou úpravou čistá měď, která by neměla ovlivnit výsledné hodnoty. Pro experiment byly použity součástky o velikosti pouzdra 0805. Při experimentu byly použity čtyři druhy pájecích past. Jako první byla zvolena standardní bezolovnatá pájecí pasta SAC305 od společnosti Cobar o hmotnostním složení 96,5% Sn - 3% Ag - 0,5% Cu. Druhá použitá pasta SCANGe byla také od společnosti Cobar s hmotnostním složením 98,3% Sn - 0,7% Cu - 1,0% Ag - 0,05% Ni - 0,005% Ge. Tato pasta byla vybrána jako zástupce slitin s nižším obsahem stříbra používaných především při pájení vlnou. Třetí použitou pastou byla nízkoteplotní bezolovnatá pájecí pasta SnBi od společnosti Shenmao s hmotnostním složením 58% Bi - 42% Sn. Tato pasta byla vybrána jako zástupce nízkoteplotních past s ohledem na možnost použití této pasty na některých flexibilních substrátech. Poslední použitou pastou byla SnPbAg opět od společnosti Cobar o hmotnostním složení 62,5% Sn - 32,5% Pb - 1% Ag. Tato pasta byla vybrána jako zástupce dříve používaných olovnatých pájecích past pro porovnání výsledků s bezolovnatými pastami. Všechny použité pasty byly nanášeny za pomoci šablonového tisku ve dvou množstvích. První množství bylo označeno jako 100% a bylo nanášeno šablonou o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  s redukcí otvorů v šabloně o 5% šířky a délky vzhledem k velikosti standardizovaných pájecích plošek. Druhé množství bylo nanášeno šablonou o tloušťce 80  $\mu\text{m}$  s redukcí

otvorů v šabloně o 20% šířky a délky vzhledem k velikosti plošek a bylo označeno jako 47%.

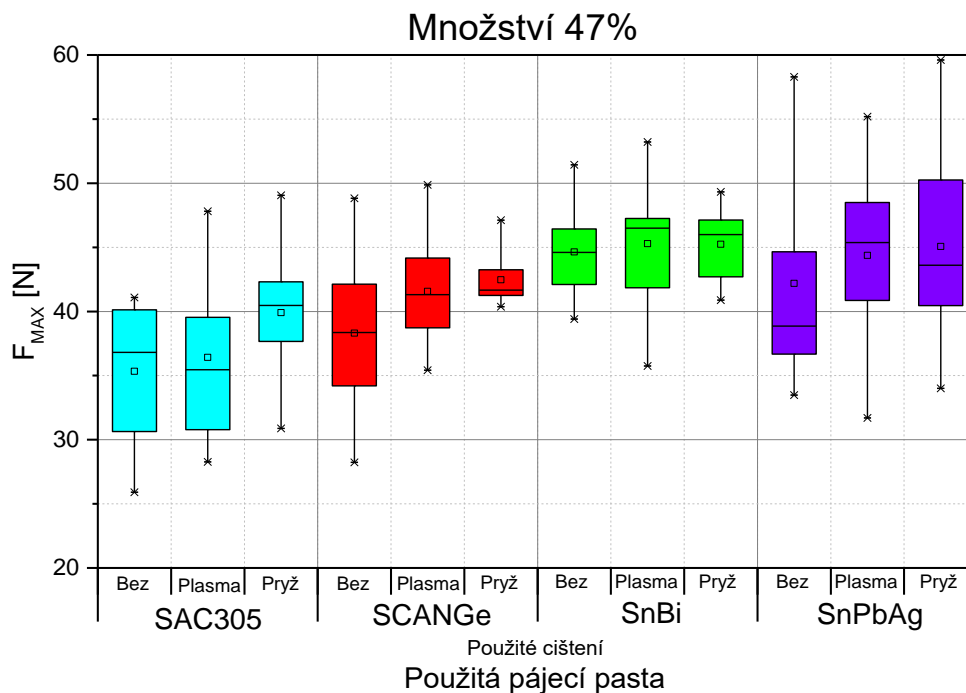
Po nanesení pájecí pasty byly vzorky opět zváženy a bylo postupováno obdobným způsobem jako v případě osazování do elektricky vodivého lepidla popsáno v kapitole 3.1.2. Oproti této kapitole byly vzorky v tomto případě přetaveny v průběžné přetavovací peci Mistral 260, u které byl pro každou pájecí slitinu nejprve odladěn vhodný teplotní profil odpovídající požadavkům výrobce pro danou pájecí slitinu, které jsou uvedeny v katalogových listech. Po přetavení byly vzorky podrobeny testování mechanické pevnosti spoje ve smyku, které probíhalo stejným způsobem jako v kapitole 3.1.3.

#### 4.1.2 Výsledky sedmého experimentu

Naměřené hodnoty maximálních sil potřebných k odtržení pájených součástek byly následně statisticky zpracovány a lze je vidět na obrázcích níže (Obrázek 85, Obrázek 86, Obrázek 87).

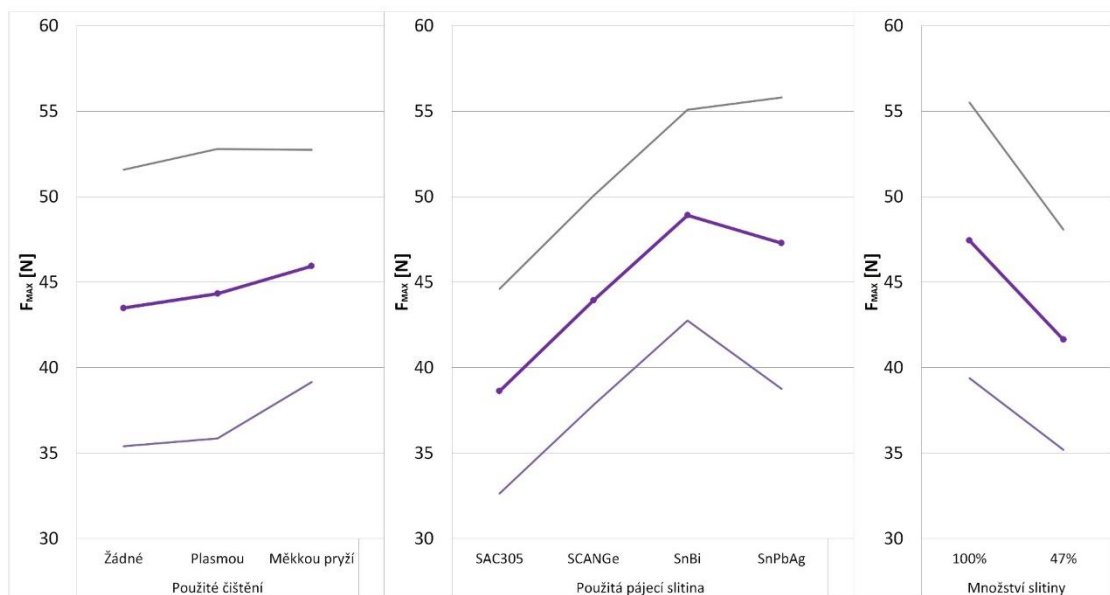


**Obrázek 85:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro různé typy čištění, různé pájecí slitiny a množství slitiny 100%.



**Obrázek 86:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly pro různé typy čištění, různé pájecí slitiny a množství slitiny 47%.

Z výsledků sedmého experimentu při použitém množství slitiny 100% je patrné, že mechanická pevnost pájeného spoje je nejvyšší při použití čištění substrátu měkkou pryží. V případě použití plasmového čištění jsou výsledky mírně lepší než v případě nečištěných substrátů s výjimkou slitiny SAC. U výsledků s použitým množstvím pájecí pasty 47% jsou výsledky mechanické pevnosti spoje průměrně o 5N nižší oproti 100% množství slitiny. Tento pokles je o zhruba 10% mechanické pevnosti, čímž se uspoří polovina množství pájecí slitiny. Z pohledu množství lze tedy doporučit použití menšího množství pájecí slitiny při pouze nepatrném zhoršení mechanických vlastností spoje. Pokud se podíváme na výsledky z pohledu čištění, dojdeme k obdobným závěrům jako v případě 100% množství, pouze lze říci, že rozdíly mezi jednotlivými druhy čištění jsou zde mírně větší.



**Obrázek 87:** Vliv použitých faktorů na mechanickou pevnost pájeného spoje podle metodologie DOE.

Aby bylo možné rozhodnout hypotézy (H, I), zda plasmovým čištěním nebo mechanickým čištěním měkkou pryží dojde ke zlepšení mechanické pevnosti, byla vytvořena pomocná faktorová analýza. Z výsledků této analýzy vyplývá, že snížení množství slitiny ze 100% na 47% má vliv na mechanickou pevnost spoje. Zároveň lze říci, že čištění substrátu před pájením má také vliv na mechanickou pevnost spoje, avšak tento vliv není tak významný. Výše popsanou první hypotézu (H), že očištěním vodivého motivu DPS plasmou lze zlepšit mechanickou pevnost spoje lze obecně potvrdit, avšak je nutné dodat, že toto zlepšení je poměrně malé. Druhou hypotézu (I), že očištěním motivu měkkou pryží lze zlepšit mechanickou pevnost spoje lze také potvrdit, ovšem i v tomto případě je zlepšení pouze v řádech jednotek procent. Závěrem je nutné konstatovat, že nečištěné vzorky nebyly žádným způsobem záměrně znečištěny ani stárnuty. Lze tedy předpokládat, že v případě více znečištěných nebo oxidovaných vzorků by rozdíly měly být vyšší.

## 4.2 Osmý experiment – Vliv množství pájecí pasty na vlastnosti pájeného spoje

Tento experiment byl navržen na základě experimentu popsaného v kapitole 3.2 a na základě výsledků sedmého experimentu a zabývá se vlivem množství použité pájecí pasty na výsledné vlastnosti pájeného spoje. Ze sedmého experimentu vplynula hypotéza (J), že snížením množství pájecí pasty o více než polovinu nedojde k příliš

významnému poklesu mechanické pevnosti a bylo by tedy možné používat méně pájecí pasty. Bylo však nutné tuto hypotézu (J) potvrdit v rozsáhlejší experimentu a také ověřit, zda snížením množství pájecí pasty nedojde ke zhoršení jiných důležitých vlastností pájeného spoje.

#### 4.2.1 Popis osmého experimentu

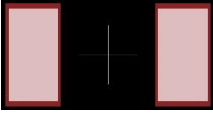


V tomto experimentu byl použit tuhý substrát FR-4 s povrchovou úpravou čistá měď. Pro experiment bylo zvoleno sedm pájecích past (viz Tabulka 11).

*Tabulka 11:* Seznam pájecích past použitých v sedmém experimentu.

Označení	Výrobce	Označení	Hmotnostní složení	Klasifikace tavidla
<b>A</b>	Cobar	BSA04-XSP	Sn42Bi57.6Ag0.4	RELO
<b>B</b>	NeVo/Shenmao	PF602-P30	Sn42Bi58	ROLO
<b>C</b>	Cobar	SAC3-OT2	SnAg3.0Cu0.5	ROLO
<b>D</b>	Henkel - Loctite	SAC 305 (GC10)	SnAg3.0Cu0.5	ROLO
<b>E</b>	Cobar	S6M-XM3S	Sn62.5Pb36.5Ag1.0	REL1
<b>F (F1,F2)</b>	EcoSolder	M716-INJ7-32-11S	SnAg3.5Bi0.5In8.0	-
<b>G</b>	Cobar	SCANGe071-OT2	SnCu0.7Ag1.0NiGe	ROLO

Na základě zkušeností z předchozích experimentů byly zvoleny tři množství pájecí slitiny (Tabulka 12). První označené jako 100% bylo zajištěno šablonou o tloušťce 120  $\mu\text{m}$  s obdélníkovými otvory redukovanými o 5% šířky a délky vzhledem k velikosti pájecí plošky. Pro obě zbývající množství byly použity otvory ve tvaru nazvaném „motýlek“ (bow tie), který je definován standardem IPC-7525A („Stencil design guidelines“). Tento tvar by měl snižovat pravděpodobnost vzniku tzv. solder beads, tedy kuliček pájky vedle těla součástky po procesu přetavení a zároveň snižuje množství nanesené pájecí pasty. Tato dvě zbývající množství se liší pouze tloušťkou použité šablony, která byla 120  $\mu\text{m}$  resp. 80  $\mu\text{m}$ .

*Tabulka 12:* Použité šablony a otvory s různým množstvím nanesené pájecí pasty.

Tloušťka šablony	120 $\mu\text{m}$	120 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$
Redukce šířky a délky otvoru	5%	-	-
Poměrné množství	100%	74%	49%
Tvar otvoru v šabloně	Obdélníkový	Motýlek (0,2L) (IPC-7525A)	Motýlek (0,2L) (IPC-7525A)
Ukázka pájecí plošky (červeně) s otvorem v šabloně (bíle)			

Po nanesení byly do pájecí pasty osazeny čipové rezistory 0R0 o velikosti pouzdra 0805. Následně byly vzorky přetaveny v průběžné přetavovací peci Mistral 260, u které byly

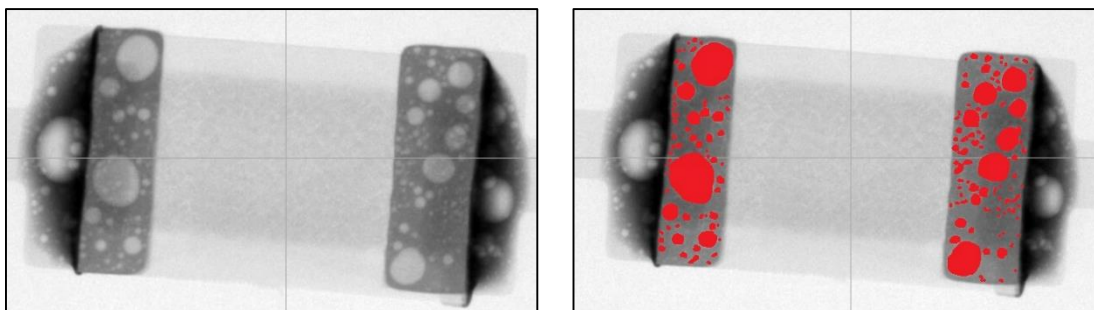
nejprve odladěny vhodné teplotní profily podle katalogových listů výrobců past. Minimální, maximální a použité nejvyšší teploty jsou zobrazeny v tabulce níže (Tabulka 13).

*Tabulka 13:* Jednotlivé špičkové teploty pro použité pájecí slitiny.

Označení	A	B	C	D	E	F1	F2	G
Teplota (min, použitá, max) [°C]	170 175 180	165 175 185	230 245 260	230 245 260	205 215 225	224 228 254	224 252 254	230 245 260

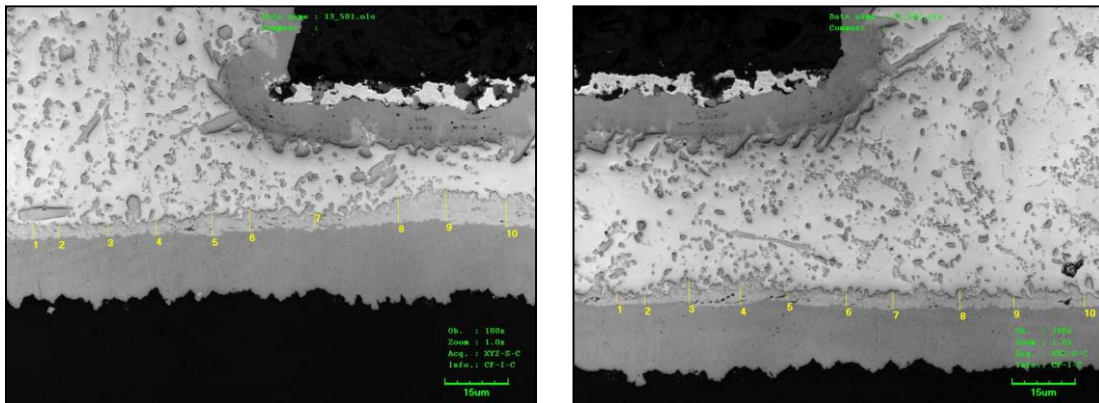
Po přetavení byly změřeny elektrické odpory každé součástky každého vzorku. Měření elektrického odporu probíhalo čtyřbodovou metodou, která eliminuje elektrický odpor přívodních měřících vodičů. K měření byl použit přístroj DMM Keithley 2701. Změřená hodnota elektrického odporu byla výslednou hodnotou dvou pájených spojů a jednoho rezistoru 0R0. Vzhledem k tomu, že v případě pájených spojů je hodnota elektrického odporu velmi malá, bylo nutné změřit a odečíst hodnotu elektrického odporu čipového rezistoru, která je teoreticky nulová, avšak prakticky se pohybuje v řádu mΩ. Z tohoto důvodu byl změřen odpor u třiceti těchto rezistorů za pomoci zařízení Precision LCR Meter Keysight E4980A, zařízení Agilent 16197A a Agilent 16085B. Z naměřených výsledků byl vypočten aritmetický průměr, který je 4,8 mΩ. Tato hodnota elektrického odporu samotné součástky byla následně od všech výsledků odečtena.

Následně byly vzorky zkoumány pod rentgenovým zářením pro zjištění plochy voidů, což je běžně používaný anglický výraz pro dutiny v pájeném spoji. Pro toto snímání bylo použito rentgenové zařízení v|tomex|240. Po nasnímání byly výsledné snímky podrobeny grafickému zpracování, při kterém byly všechny voidy pod ploškami součástky označeny červeně (Obrázek 88). Následně byl za pomoci softwaru vyhodnocen podíl plochy voidů na celkové ploše pod ploškami součástky.



**Obrázek 88:** Nasnímaná součástka ze vzorku G s množstvím 100% před a po grafickém zpracování.

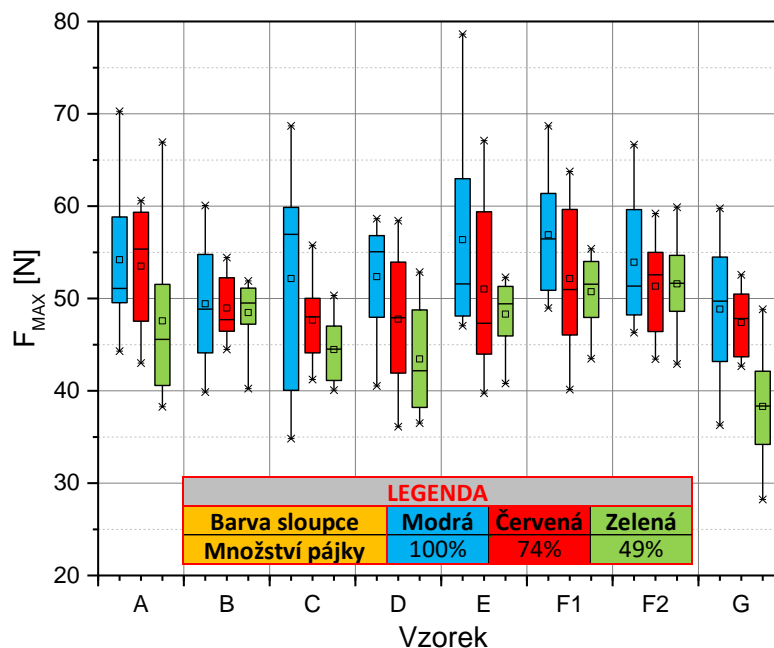
Následně bylo osm součástek z každého vzorku podrobena testu mechanické pevnosti spoje ve smyku, který proběhl obdobným způsobem popsáním výše v kapitole 3.1.3. Devátá součástka každého vzorku byla použita pro vytvoření materiálografického výbrusu, který byl po zaleštění pozorován konfokálním laserovým skenovacím mikroskopem (LEXT) a byly zkoumány tloušťky intermetalických vrstev (Obrázek 89).



**Obrázek 89:** Nasnímaný metalografický výbrus součástky ze vzorku F1 s množstvím 100% s naměřenou tloušťkou intermetalických vrstev

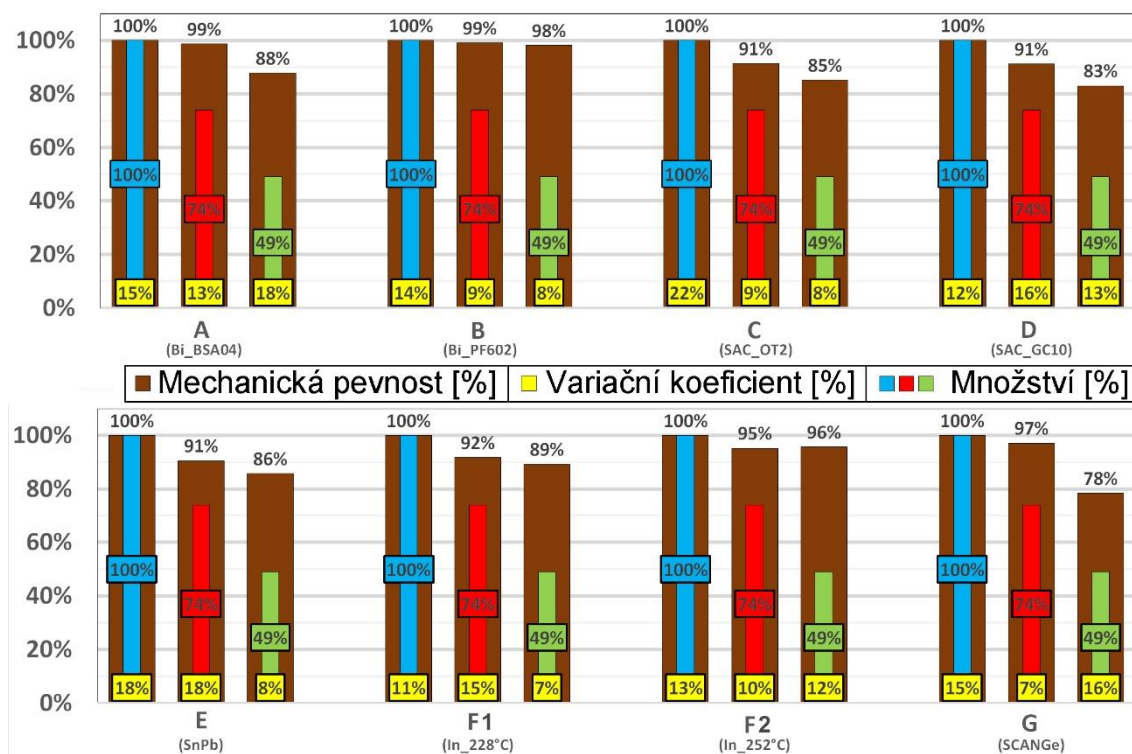
#### 4.2.2 Výsledky osmého experimentu

Naměřené hodnoty maximálních sil potřebných k odtržení pájených součástek byly následně statisticky zpracovány a lze je vidět na obrázku níže (Obrázek 90) ve formě boxového grafu.



**Obrázek 90:** Statisticky zpracované hodnoty maximální síly naměřené v osmém experimentu.

Pro zvýšení přehlednosti a snadnější získání porovnání závislosti mechanické pevnosti na množství byl vytvořen sloupcový graf (Obrázek 91), který zobrazuje procentní podíl mechanické pevnosti pro dané množství vztažený k mechanické pevnosti stejné pasty pro 100% množství. Dále je v tomto grafu zobrazen variační koeficient pro každý vzorek, který je roven podílu směrodatné odchylky k aritmetickému průměru a je vyjádřen v procentech. Tento koeficient by měl být nižší než 20 procent, což bylo, až na jednu výjimku, splněno pro všechny vzorky a odchylky jednotlivých hodnot lze tedy považovat za přijatelné.

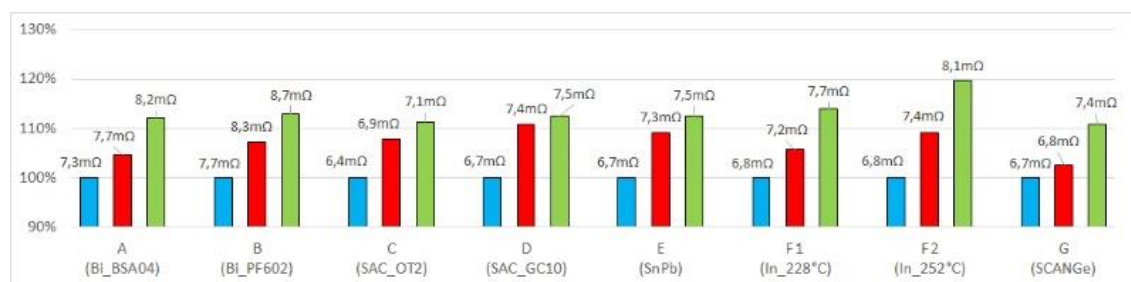


**Obrázek 91:** Vliv množství nanášené pájecí pasty na mechanickou pevnost spoje.

Z výsledků testování mechanické pevnosti vyplývá, že při snížení množství použité pájecí pasty na méně než polovinu klesla u většiny použitých pájecích past hodnota mechanické pevnosti maximálně o 15% až 20%, což je ve většině případů přijatelný pokles. Pokud se podíváme na absolutní hodnoty, pak lze pozorovat při stejném množství u vzorků B, C, D a G nižší mechanickou pevnost zhruba o 5 N oproti ostatním vzorkům. Celková průměrná mechanická pevnost se pohybuje u všech vzorků v rozmezí zhruba od 40N do 60N, což jsou hodnoty vyšší než v případě většiny dříve testovaných lepených spojů při použití součástek o velikosti 0805.



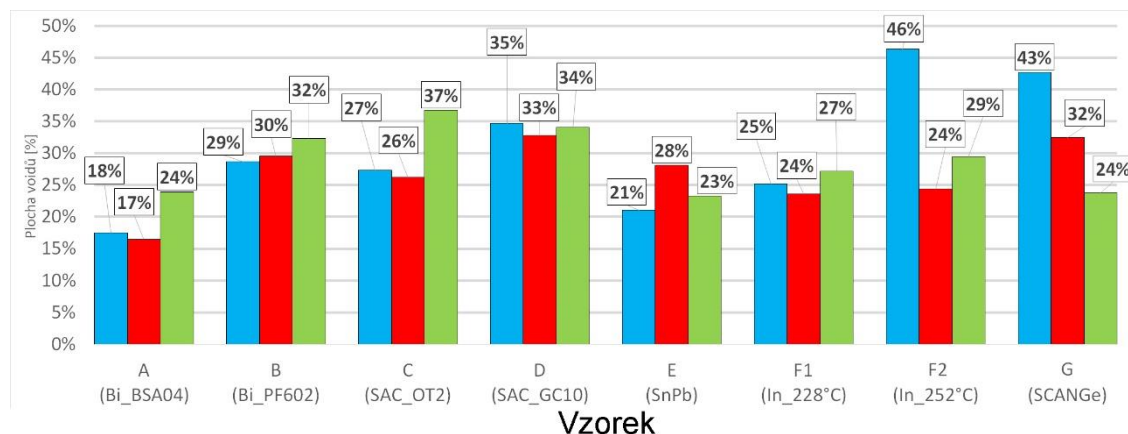
Další testovanou veličinou byl elektrický odpor. Jak již bylo řečeno, od každé hodnoty byla odečtena průměrná hodnota elektrického odporu použité součástky, která činí  $4,8 \text{ m}\Omega$ . Po odečtení byl z nových hodnot vytvořen graf zobrazený níže (Obrázek 92). Tento graf zobrazuje podíl průměrné hodnoty elektrického odporu pro jednotlivá množství pasty vztažený k podílu hodnoty elektrického odporu pro 100% množství pasty. Zároveň je nad každým sloupcem zobrazena také průměrná hodnota odporu pro daný sloupec.



**Obrázek 92:** Sloupcový graf elektrického odporu a jeho poměrné změny v závislosti na množství pasty.

Z výsledných hodnot elektrického odporu pájených spojů vyplývá, že všechny použité slitiny mají srovnatelné výsledky elektrického odporu. Dále lze z výsledků konstatovat, že při snížení množství pájecí pasty o více než 50% dojde ke zvýšení elektrického odporu dvou pájených spojů o 10% až 20%. Tyto hodnoty jsou však stále velmi nízké a lze konstatovat, že z pohledu elektrického odporu lze snížit množství pájecí slitiny až o 50% bez významného zvýšení elektrického odporu. Při srovnání elektrického odporu pájených spojů s lepenými se potvrzuje teoretický předpoklad, že lepené spoje mají řádově vyšší elektrický odpor, který se v případě lepidla XCA 3556HF (kapitola 3.3) pohyboval zhruba v řádu stovek  $\text{m}\Omega$ , v případě lepidla MG 8331S (kapitola 3.4.2) okolo 1 až  $2 \Omega$  a v případě lepidla CA 3150 (kapitola 3.4.2) také v řádu stovek  $\text{m}\Omega$ .

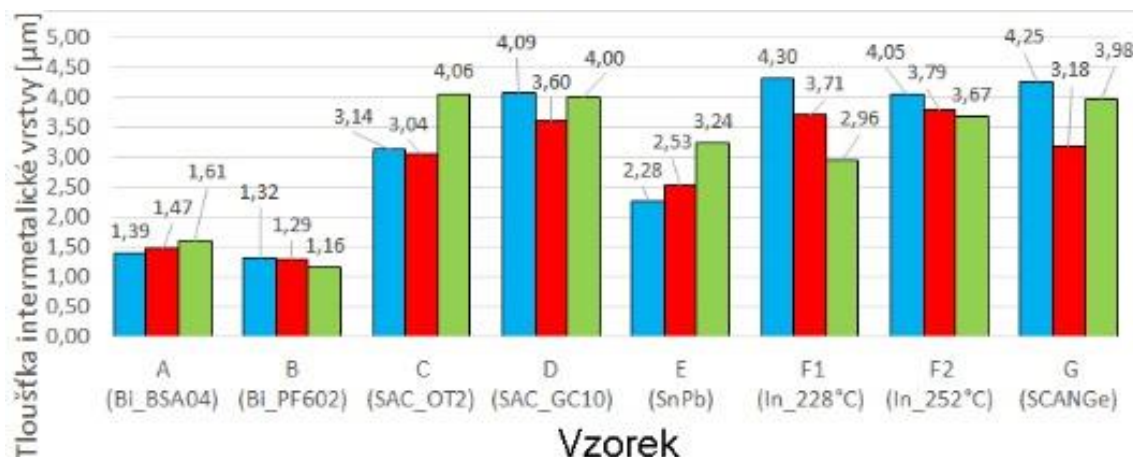
V tomto experimentu byla dále zkoumána plocha voidů v pájecí slitině pod součástkou. Výsledné hodnoty této plochy jsou zobrazeny v grafu níže (Obrázek 93).



**Obrázek 93:** Sloupcový graf podílu plochy voidů po vývodu součástky.

Z výsledných hodnot plochy voidů lze pozorovat průměrnou plochu okolo 25% plochy spoje pod vývodem součástky, což nelze považovat za zanedbatelnou hodnotu. Z publikovaných článků jiných autorů lze vyčíst, že jednou z možností snížení plochy voidů je snížení množství použité pájecí pasty. Z experimentu vyplývá, že snížením množství pájecí pasty došlo k výraznému snížení plochy voidů v případě vzorků F2 a G. V případě vzorků B, D, E a F1 je plocha voidů prakticky nezávislá na naneseném množství pájecí pasty. V případě vzorků A a C lze dokonce pozorovat opačný efekt. Z provedeného experimentu tedy nelze jednoznačně potvrdit či vyvrátit zmíněné tvrzení. Pro jeho potvrzení lze doporučit realizaci obdobného experimentu s použitím výrazně vyššího množství vzorků, které by významně zvýšilo statistickou přesnost celého experimentu.

Dalším zkoumaným parametrem byla tloušťka intermetalické vrstvy mezi vodivou měděnou ploškou a pájecí slitinou. Naměřené hodnoty jsou zpracovány do sloupcového grafu zobrazeného níže (Obrázek 94). Složení i tloušťka této vrstvy se u jednotlivých pájecích slitin liší, lze však porovnávat vliv množství pasty na tloušťku vzniklé intermetalické vrstvy a také tloušťky pro pasty obsahující stejnou slitinu.



**Obrázek 94:** Sloupcový graf tloušťky intermetalické vrstvy u jednotlivých vzorků.

Z výsledků je patrné, že tloušťky intermetalické vrstvy jsou výrazně nižší u pájecích slitin obsahujících bismut a částečně nižší i u olovnaté pájecí slitiny. Dále lze konstatovat, že z naměřených výsledků není patrná jednoznačná závislost tloušťky intermetalické vrstvy na množství použité pasty. Lze tedy říci, že z pohledu tloušťky intermetalické vrstvy není problém použít o 50% menší množství slitiny.

#### 4.2.3 Shrnutí osmého experimentu

Stanovenou hypotézu (J), že snížením množství pájecí pasty o více než polovinu nedojde k příliš významnému poklesu mechanické pevnosti, ani ke zhoršení dalších vlastností a bylo by tedy možné používat méně pájecí pasty lze přijmout. Z tohoto experimentu vyplynulo, že snížením množství pájecí pasty o více než polovinu dojde ke snížení mechanické pevnosti o 15% až 20%, zvýšení elektrického odporu o 10% až 20% a nedojde k významnému zhoršení plochy voidů ani k významnému zvýšení tloušťky intermetalické vrstvy. Vzhledem k tomu, že vlastnosti spoje jsou, i přes zhoršení elektrického odporu a mechanické pevnosti, pro většinu aplikací dostatečné, lze toto významné snížení množství pájecí pasty doporučit.

#### 4.3 Devátý experiment – Testování pájení na vlastních flexibilních Ag substrátech

Cílem tohoto experimentu bylo ověřit možnosti použití technologie pájení na experimentálně vytvořené flexibilní substráty s nanosenou stříbrnou vodivou vrstvou za pomoci sítotisku. Vzhledem k tomu, že nebyly známy vlastnosti jednotlivých substrátů, byl celý test realizován operativně a na základě jednotlivých zjištění byl další plán testování upravován.

### 4.3.1 Popis devátého experimentu

Pro experiment bylo vytvořeno osm typů substrátů, konkrétně byly použity čtyři nosné fólie (Melinex 504, Polykarbonát Kotacka, Teonex Q83, Kapton - 75 $\mu$ m) a dále byly použity dva druhy stříbra pro tvorbu vodivých motivů (Paron-350, AgNanoW).

Před samotným hlavním experimentem byly nejprve otestovány možnosti jednotlivých nosných fólií z pohledu teplotní výdrže. Experimentálním způsobem bylo zjištěno, že všechny materiály jsou schopné krátkodobě snést teplotu pájení potřebnou pro pájení nízkoteplotní slitinou (SnBi). Pro tuto slitinu byly navíc zvoleny dva teplotní profily, první byl poměrně standardní s teplotou pájecí špičky 165°C, pro druhý byla teplota co nejvíce snížena na 145°C, přičemž tento druhý profil byl na samé hranici možností přetavení pájky (SnBi). Nejhorší teplotní odolnost projevil materiál Polykarbonát Kotacka, který se již při teplotě 145°C prohýbal a při teplotě 165°C docházelo k tak velkému poškození, že nebylo možné ho po tomto pájení použít. V případě materiálu Melinex nedošlo při teplotě 145°C k viditelné změně a při teplotě 165°C došlo k mírnému prohnutí materiálu. V případě materiálů Teonex a Kapton nedošlo ani při jedné z teplot k viditelné změně. V případě posledních dvou materiálů byla dále testována možnost použití bezolovnaté pájecí slitiny SAC 305, což znamenalo nutnost snést teplotu pájecí špičky 250°C. Při této teplotě došlo k roztavení materiálu Teonex, avšak materiál Kapton se, i přes svou malou tloušťku, pouze mírně prohnul a tuto teplotu vydržel.

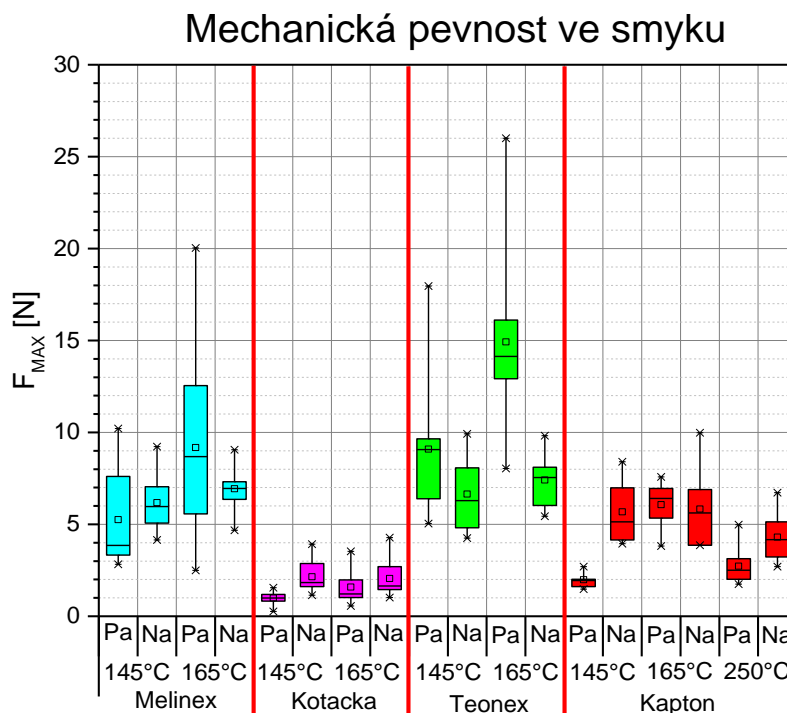
Následně byl realizován experiment, při kterém byla na substráty nanесena pájecí slitina (52%Bi - 48%Sn od společnosti Shenmao), osazeny čipové součástky o velikosti 1206, jednotlivé vzorky byly přetaveny v průběžné přetavovací peci Mistral 260 a následně byla testována mechanická pevnost spojů ve smyku. Kromě toho bylo na některé vodivé plošky substrátu Kapton nanесeno tavidlo a následně vložena kulička pájecí slitiny SAC 305 o průměru 500 $\mu$ m sloužící k provedení měření smáčecího úhlu a také byla na tyto substráty nanесena pájecí pasta (96,5%Sn – 3%Ag – 0,5%Cu od společnosti Cobar) a po osazení a přetavení byla i u této pájecí slitiny testována mechanická pevnost.

### 4.3.2 Výsledky devátého experimentu

Boxový graf s výsledky neměřené mechanické pevnosti ve smyku u jednotlivých vzorků je umístěn níže (Obrázek 95). Vzhledem k tomu, že tisk vodivých motivů

na jednotlivé nosné materiály i samotné testování vzorků probíhalo bez předchozích zkušeností, jsou i výsledky při srovnání se standardními substráty poměrně špatné. Při pohledu na výsledky lze říci, že u všech vzorků je mechanická pevnost při použití profilu s teplotou 165°C stejná či vyšší než při teplotě 145°C, což bylo očekáváno, vzhledem k tomu, že teplota 145°C je na samé hranici možnosti přetavení bizmutové pájecí pasty. V případě substrátu s materiálem Melinex lze pozorovat lepší výsledky při použití teploty 165°C, avšak při této teplotě již dochází k mírné deformaci substrátu a nelze pro tento substrát pájení doporučit. V případě substrátu Polykarbonát Kotacka dochází k deformacím dokonce již při teplotě 145°C a s tím souvisí i mechanická pevnost, která je v podstatě minimální. Tento substrát tedy také nelze doporučit pro pájení. Substrát Teonex má lepší výsledky při použití vodivé vrstvy z materiálu Paron a také má lepší výsledky při použití vyšší teploty (165°C). Z pohledu viditelné deformace je tento substrát při zmíněné teplotě stabilní a k deformaci nedochází. Substrát Teonex, obzvláště se stříbrem Paron, lze doporučit pro další výzkum v souvislosti s pájením na tento substrát. V případě substrátu Kapton s tloušťkou 75  $\mu\text{m}$  jsou výsledky mechanické pevnosti spíše podprůměrné, především v případě bezolovnaté pájecí slitiny. Při kontrole tohoto substrátu po pájení bylo zjištěno, že nedošlo k mechanickým deformacím substrátu v případě nízkoteplotní pájecí slitiny a pouze k mírné deformaci substrátu v případě bezolovnaté slitiny. V případě tohoto substrátu se lze domnívat, že nízká mechanická pevnost je částečně způsobena nižší tloušťkou tohoto substrátu. Obecně lze také konstatovat, že všechny výsledky jsou částečně ovlivněny přilnavostí vodivého motivu k podkladovému materiálu.

V případě substrátu Kapton byl ještě změřen, za pomoci laserového konfokálního skenovacího mikroskopu, smáčecí úhel. Tento úhel v průměru vyšel 33,2°. Z literatury vyplývá, že povrch, s naměřeným smáčecím úhlem mezi 20° až 40° lze považovat za dobře smáčivý. I tento substrát by tedy bylo vhodné dále testovat, ale je nutné vyřešit nízkou přilnavost stříbrné vodivé vrstvy k podkladu.



Obrázek 95: Mechanická pevnost ve smyku pro jednotlivé vzorky desátého experimentu.

#### 4.4 Desátý experiment - Testování vlastních flexibilních substrátů pro pájení nízkoteplotní slitinou

Tento test byl navržen na základě výsledků kapitoly 4.3, a dostupných možností výroby vlastního flexibilního substrátu v rámci Katedry technologií a měření.

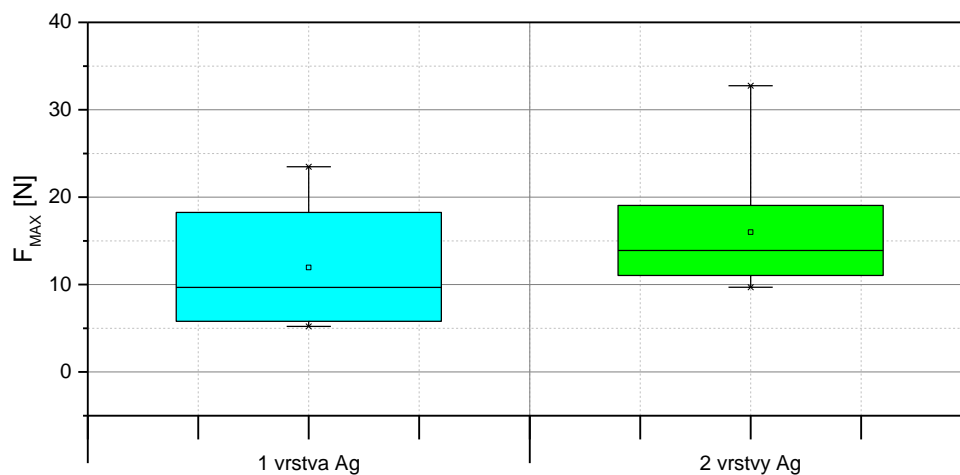
##### 4.4.1 Popis desátého experimentu

V tomto experimentu byla jako základní materiál použita Kaptonová fólie, na kterou byl pomocí zařízení AJP (Aerosol Jet Printing) nanesen stříbrný inkoust (Paru – 60wt.%) a poté byl tento inkoust vytvrzen za pomoci zvýšené teploty v sušičce Heraeus. Vzorky byly vytvořeny ve dvou variantách, přičemž na první byla nanášena 1 vrstva stříbrného inkoustu, zatímco v případě druhého byly aplikovány vrstvy 2.

Na vytvořené substráty byla následně nanášena nízkoteplotní pájecí pasta (SnBi od společnosti Shenmao). Po osazení součástek o velikosti 1206 byly vzorky přetaveny v průběžné přetavovací peci Mistral 260 s použitím teplotního profilu se špičkovou teplotou 165°C (stejný profil jako v případě kapitoly 4.3.1.). Po přetavení byly součástky podrobeny testu mechanické pevnosti ve smyku a následně vizuálně pozorovány.

#### 4.4.2 Výsledky desátého experimentu

Z výsledků tohoto experimentu (Obrázek 96, Obrázek 97) vyplývá, že v případě použití dvou vrstev stříbra je mechanická pevnost vyšší. Při detailním optickém průzkumu vzorků bylo zjištěno, že v případě jednovrstvého stříbrného vodivého motivu došlo ke stažení části tohoto motivu do pájecí slitiny. V případě dvouvrstvého motivu byl tento jev velmi omezen. Závěrem lze říci, že tento test byl spíše iniciační a testování v tomto směru bude v budoucnu pokračovat. Předpokladem je, že další zvyšování počtu vrstev vodivého motivu a také případné zdrsnění povrchu Kaptonové fólie před nanesením vodivého motivu by mohlo ještě zvýšit mechanickou pevnost pájeného spoje. Na druhou stranu je zde riziko, že zvýšením počtu vrstev, a tedy zvýšením tloušťky vodivého motivu, může dojít k problémům s ohýbáním substrátu a k praskání stříbrného motivu při ohybu tohoto substrátu. Tyto teorie budou v budoucnu prověřeny a budou realizovány další experimenty.



**Obrázek 96:** Mechanická pevnost součástek v pájených pájkou SnBi na Kaptonový substrát s jednovrstvým a dvouvrstvým stříbrným vodivým motivem.



**Obrázek 97:** Vzorky po přetavení a odtržení součástek; 1 vrstva (vlevo), 2 vrstvy (vpravo).

## Závěr

Tato práce je zaměřena na problematiku elektricky vodivých lepidel, především pro použití na flexibilních substrátech. Byl zde shrnut současný stav vývoje v této oblasti, která byla dříve více v ústraní, ale s rostoucím používáním flexibilních substrátů v aplikovaném výzkumu a v praxi je opět aktuální.

Práce uvádí teoretické informace z oblasti měkkého pájení, vodivého lepení, flexibilních substrátů, a také degradačních mechanismů vodivých lepidel. Dále zde byl zmapován současný stav problematiky flexibilních substrátů a elektricky vodivých lepidel. Z rešeršní činnosti realizované v této práci vyplynulo, že problematika propojování flexibilních substrátů za pomoci elektricky vodivých lepidel není zcela probádaná, a byla zde tedy příležitost pro další výzkum v této oblasti. V další části práce byly zmapovány vlastnosti, které jsou v oblasti elektricky vodivých lepidel zkoumány. Z výsledku tohoto mapování vyplynulo, že oblast mechanických vlastností vodivých lepidel, používaných na flexibilních substrátech, byla méně probádaná než oblast elektrických vlastností těchto lepidel a proto klade tato práce větší důraz na mechanické vlastnosti vodivých lepidel.

Po dokončení rešeršní činnosti popsané v první části práce byly na základě stanovených cílů disertační práce navrženy oblasti, kterými je vhodné se zabývat. Postupným řešením těchto oblastí byly navrženy a realizovány experimenty s použitím elektricky vodivých lepidel, které se konkrétně zaměřují na oblasti vytvrzování lepidel, množství naneseného lepidla, tvar naneseného lepidla, procento dotvrzení lepidla, čištění a drsnost substrátů, a další. Tyto vlivy jsou testovány s ohledem na mechanickou pevnost lepených spojů a v některých případech i na elektrický odpor vzniklých spojů. Závěrem většiny experimentů je také doporučení pro využití daného nastavení v praxi.

### ***Splnění cílů disertační práce:***

- Hlavním cílem disertační práce bylo ověření mechanických i elektrických vlastností lepených spojů využívaných pro aplikace na flexibilních substrátech a jejich porovnání s vlastnostmi spojů na tuhých substrátech. Pro splnění tohoto cíle byly realizovány experimenty, které ukázaly, že mechanické vlastnosti lepených spojů na flexibilních substrátech jsou zpravidla výrazně horší než



v případě použití tuhých substrátů. Obecně lze říci, že v případě potřeby použití flexibilního substrátu je vhodné využít k připojení součástek elektricky vodivá lepidla, která nejsou příliš křehká, ale zároveň mají dostatečnou mechanickou pevnost. Z testovaných lepidel je tento požadavek nejlépe splněn lepidlem MG 8331S nebo CA3150.

- Dílčím cílem disertační práce byla optimalizace procesních a materiálových vlivů pro dosažení vyšší kvality a spolehlivosti lepených spojů. Z pohledu procesních vlivů je u každého elektricky vodivého lepidla nutné stanovit nejvhodnější teplotu a dobu vytvrzení. V rámci této disertační práce byly tyto parametry stanoveny zpravidla na základě katalogového listu a následně upřesněny za pomoci DSC analýzy daného lepidla. V případě lepidel s rychlým vytvrzením je zároveň nutné využít při vytvrzení metodu „snap cure“, která byla v našem případě realizována „horkou deskou“. V případě déle tvrdnoucích lepidel však tato metoda není nutná a nepřináší žádnou přidanou hodnotu. Pro námi použitá lepidla lze obecně doporučit tyto procesní parametry: H20S – 135°C / 15 minut, MG 8331S – 100°C / 50 minut nebo 130°C / 30 minut, XCA3556HF – 110°C / 82 sekund, CA3150 – 100°C / 93 sekund nebo 130°C / 10 sekund. Z pohledu optimalizace materiálových vlivů je nutné rozdělit tuto problematiku na vliv použitého lepidla a vliv použitého substrátu. V případě vlivu lepidla lze na flexibilních substrátech doporučit lepidlo MG 8331S nebo CA3150. V případě vlivu použitého substrátu lze na základě experimentů doporučit použití kaptonového substrátu s měděnou povrchovou úpravou. Pokud je však požadavek na vytvoření vlastního substrátu, je vždy nutné ověřit přilnavost vodivého motivu k nosné fólii a přilnavost lepidla k vlastnímu vodivému motivu, protože toto jsou kritické body celé soustavy. S ohledem na snížení nákladů pak lze na základě realizovaných experimentů doporučit snížení množství použitého elektricky vodivého lepidla. Toto snížení je nutné realizovat s ohledem na plánovanou aplikaci vzniklého zařízení a tedy potřebné vlastnosti spojů. Obecně však lze říci, že vhodná redukce množství s použitím vhodného tvaru otvoru v šabloně zajistí lepší izolační vzdálenost mezi vývody součástky, uspoření téměř poloviny množství vodivého lepidla a zároveň nedojde k příliš významnému snížení mechanické pevnosti spoje.

- Dalším dílčím cílem bylo ověření vlastností a životnosti lepených spojů na flexibilních substrátech pomocí aplikace metod zrychleného stárnutí. Vlastnosti lepených spojů v průběhu jejich používání byly testovány za pomoci metod zrychleného stárnutí. V rámci jednoho z experimentů byly testovány vlastnosti spoje při jeho mechanickém ohýbání. Na základě tohoto experimentu bylo zjištěno, že pájecí slitiny jsou náchylnější na ohyb, zatímco lepené spoje jsou pružnější a lépe odolávají ohybu. V rámci jiného experimentu byly vzorky podrobeny kombinovanému klimatickému testu při teplotě 85°C a relativní vlhkosti 85%RH. Na základě tohoto experimentu bylo zjištěno, že elektrický odpor vzorků podrobených zrychlenému stárnutí vzrostl několikanásobně k hodnotám v řádu desítek ohmů. Mechanická pevnost se v tomto případě lehce zvýšila, což je způsobeno dotvrzením lepidel v průběhu stárnutí. Na základě provedených experimentů lze tedy říci, že lepené spoje jsou více náchylné na stárnutí klimatické, nežli na mechanické ohýbání. U ohybu se naopak projevila vyšší výdrž lepených spojů oproti pájeným spojům.
- Posledním dílčím cílem práce bylo definovat doporučení pro využití jednotlivých získaných poznatků v praxi. V rámci jednotlivých experimentů byla tato doporučení detailně popsána. Konkrétně je vhodné před použitím elektricky vodivých lepidel stanovit vhodný vytvrzovací profil na základě DSC analýzy. V řadě případů byly prostřednictvím DSC analýzy identifikovány vhodnější profily než ty, které byly doporučeny výrobcem lepidel. Dále je možné optimalizovat množství lepidla a také nanášený tvar lepidla s ohledem na izolační vzdálenost mezi vývody, mechanickou pevnost spoje, elektrické vlastnosti spoje a jeho cenu. Toto optimální množství se může lišit podle požadavků na vlastnosti spoje u konkrétní aplikace. Velkou pozornost je nutné věnovat výběru elektricky vodivého lepidla, kterým jsou zásadně ovlivněny vlastnosti výsledného lepeného spoje. Jedním ze způsobů jak ovlivnit životnost lepeného spoje je nedotvrzení elektricky vodivého lepidla. Tímto krokem nedojde k významnému zhoršení mechanických vlastností a životnost spoje je prodloužena o dobu kdy dochází k dotvrzení lepidla, avšak je nutné zohlednit konkrétní aplikaci a dle této aplikace zvolit vhodné procento vytvrzení.

## **Conclusion**

This thesis is focused on the electrically conductive adhesives, especially for using them together with flexible substrates. The current state of art in the field of flexible substrates is described in the thesis. This field was in seclusion, but today it is actual in practice again.

The thesis describes the theoretical information about areas of soldering, electrically conductive gluing, flexible substrates and degradation mechanisms of conductive adhesives. The thesis also describes the current state of art from field of flexible substrates and electrically conductive adhesives. The background research activities showed that the problematics of flexible substrates connection by electrically conductive adhesives is not currently completely explored. Based on that there was an opportunity for the research in this field. The next part of the thesis is focused on the properties researched in the electrically conductive adhesives field. The result of this part is that the mechanical properties of glued joints on flexible substrates are less explored than the electrical properties. This is the reason of thesis emphasis on the mechanical properties.

The areas of the interest to the experimental part were designed when the theoretical part of the thesis was done. These areas were designed according to the dissertation objectives. The experiments were designed and performed in these areas, especially on the fields of curing of electrically conductive adhesives, quantity of applied adhesive, shape of applied adhesive, percentage of adhesive cure and also substrates cleaning and roughening and more. These influences are tested with considering of mechanical strength of glued joints and in some cases also electrical resistance of joints. Recommendations of specific settings for the practice are in conclusion of experiments.

***Accomplishment of the dissertation thesis objectives:***

- The verification of mechanical and electrical properties of glued joints used for applications on flexible substrates and their comparison with properties of joints on rigid substrates was the main objective of the thesis. The experiments were designed and performed for the main objectives accomplishment. These experiments provided proof that the mechanical properties of glued joints on flexible substrates are usually significantly worse than in case of the rigid substrates. In general, the using of solid but not fragile electrically conductive adhesives to connecting of components with substrate is recommended if use of the flexible substrate is necessary. From the tested samples, these requirements were fulfilled by the adhesive MG 8331S or CA3150.
- The process and material influences optimization to achieve a higher quality and reliability of glued joints was the partial objective of the thesis. In case of the process influences, the temperature and time of curing is necessary to set up. These parameters were set up according to the datasheet of the producers and then specified by the DSC analysis of the adhesive. The method called “snap cure” is necessary to use in case of the fast curing adhesives. In our case, the “snap cure” was realized by using of hot plate. In case of the standard adhesives, this method is not important and has not added value. For the tested adhesives the following parameters could be recommend: H20S – 135°C / 15 minutes, MG 8331S – 100°C / 50 minutes or 130°C / 30 minutes, XCA3556HF – 110°C / 82 seconds, CA3150 – 100°C / 93 seconds or 130°C / 10 seconds. In case of the material optimization influences, the problematics have to be divided into influence of the used adhesive and influence of the used substrate. In case of adhesive influence, the adhesives MG 8331S or CA3150 are recommended for use with flexible substrates. In case of substrate influence, the Kapton substrate with copper conductive pattern is recommended. If the own substrate has to be made, the adhesion of conductive pattern to the carrier foil and also the adhesion of conductive adhesive to the conductive pattern have to be verified because these parts

are the critical areas. The reduction of the conductive adhesive is recommended according to the reduction of the production costs. This reduction should be applied according to the planned application of the device. In general, the appropriate reduction of adhesive quantity with using of suitable shape of the aperture in stencil improve the insulation distance between the component pads, save almost 50% of adhesive quantity and the mechanical strength is not significantly reduced.

- The verification of properties and service life of glued joints on flexible substrates by using the accelerated ageing methods was the another partial objective of the thesis. The properties of glued joints were tested during the bend test in one of the experiments. The solder alloys are more susceptible to bending but the glued joints are more flexible and more resistant against to the bending. The another samples were tested in the climatic chamber (85°C / 85% RH) in another experiment. The electrical resistance of the samples after climatic ageing was several times higher than of the samples without ageing. The values after the testing were approximately dozens of ohms. Mechanical strength of joints after ageing was a little higher because the adhesives were fully cured during the ageing. In general, the glued joints are sensitive on climatic testing and not so much sensitive on the mechanical bending. For bending the adhesives are better option.
- The design of the recommendations for application of the gained knowledge to the practice was the another partial objective of the thesis. The details of these recommendations were described in each chapter of the thesis. Specifically, the determination of the curing profile based on DSC analysis before the adhesive is used. The better profiles than the profiles recommended by adhesive producers were founded in many cases by these DSC analyses. Also the quantity of the adhesive and the shape of apertures in the stencil according to the insulation distance, mechanical strength, electrical properties and price can be optimized. The optimal quantity of adhesive can be different according to required properties to the specific application. The selection of adhesive is very important because the joint properties are influenced

by the adhesive. One of the possible options to improve the service life of the joint is partial curing the adhesive. When the joint is partially cured, the mechanical properties are not significantly reduced and the service life is extended. This extension is equal to the time when the adhesive is naturally fully cured during its using. The suitable percentage of curing should be set according to the specific application of the device.

## Abschluss

Diese Arbeit ist auf elektrisch leitfähige Klebstoffe fokussiert, insbesondere für die Verwendung auf flexiblen Substraten. Es wurde den aktuellen Stand der Entwicklung in diesem Bereich zusammengefasst, die in der Abgeschlossenheit zuvor mehr war, aber mit der zunehmenden Verwendung von flexiblen Substraten in der angewandten Forschung und in der Praxis ist wieder aktuell.

Das Papier stellt theoretische Informationen auf dem Gebiet des Lötens, Leitkleber, flexible Substrate und leitende Mechanismen Abbau Klebstoffe. Darüber hinaus gab es den aktuellen Stand der Technik flexible Substrat abgebildet und elektrisch leitfähige Klebstoffe. Für Suchaktivitäten in dieser Arbeit durchgeführt wurde, zeigte, dass die Frage der Verknüpfung von flexiblen Substraten mit Hilfe von elektrisch leitenden Kleber ist nicht vollständig erforscht, und es war daher eine Chance für die weitere Forschung auf diesem Gebiet. Im nächsten Teil, die abgebildeten Objekte sind, die in elektrisch leitfähigen Klebstoffen untersucht. Das Ergebnis dieser Abbildung gezeigt, dass die Fläche der mechanischen Eigenschaften von leitfähigen Klebstoffen auf flexiblen Substraten verwendet wurde, wurde weniger bekannt als die Fläche der elektrischen Eigenschaften dieser Klebstoffe und setzt daher diese Arbeit mehr Gewicht auf den mechanischen Eigenschaften von leitenden Klebstoffen.

Nach Beendigung der Suchoperation die im ersten Teil beschrieben wurde auf den erklärten Zielen der Dissertation gestaltete Bereiche basieren, die angegangen werden sollen. Allmähliche Lösung für diese Regionen wurden entworfen und Experimente durchgeführt unter Verwendung von elektrisch leitfähigen Klebstoffen, die auf Bereiche gezielt werden härtende Klebstoffe, die Menge aufgebracht wird, die Form des aufgetragenen Klebstoffs, der prozentuale Anteil von Klebstoffen Härten, Reinigen und Rauheit der Substrate und anderen. Diese Einflüsse sind in Bezug auf die mechanische Festigkeit der Klebeverbindungen und in manchen Fällen auch auf den elektrischen Widerstand getestet resultierenden Gelenke. Schließlich ist für die meisten Experimente auch eine Empfehlung, die Verwendung der Einstellung in der Praxis.

**Ziel der Dissertation:**

- Das Hauptziel der Arbeit war, die mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Klebverbindungen für Anwendungen auf flexiblen Substraten und deren Vergleich mit den Eigenschaften der Gelenke auf harten Substraten verwendet um zu prüfen. Um dieses Ziel zu erreichen wurden Experimente realisiert, die zeigten, dass die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen auf flexiblen Substraten sind in der Regel deutlich schlechter als bei der Verwendung von harten Substraten. Im Allgemeinen kann man sagen, wenn man notwendig, ein geeignetes flexibles Substrat unter Verwendung zum Verbinden von Komponenten elektrisch leitfähige Klebstoffe eingesetzt, wird die nicht zu zerbrechlich sind, sondern auch eine ausreichende mechanische Festigkeit aufweisen. Unter den getesteten Klebstoffen, die Anforderung wird am besten mit Leim MG 8331S oder CA3150 erfüllt.
- Ein Teilziel der Arbeit war Prozess- und Material Wirkungen von höherer Qualität und Zuverlässigkeit von Klebverbindungen zu optimieren. Aus der Sicht der Prozessdrücke für jede elektrisch leitende Klebstoff Notwendigkeit bestimmt werden und die am besten geeignete Temperatur für die Härtung. In dieser Arbeit wurden diese Parameter basieren im Allgemeinen auf dem Datenblatt ermittelt und verfeinert anschließend der DSC-Analyse des Klebstoffs verwendet wird. Im Fall von schnell härtenden Klebstoffen ist es auch erforderlich, bei Härtungsverfahren zu verwenden „snap cure“, die in unserem Fall wurde „hot plate“ durchgeführt. Im Fall von längeren härtende Klebstoffen, jedoch ist dieses Verfahren nicht erforderlich und bringt keinen Mehrwert. Für uns sind die verwendeten Klebstoffe im Allgemeinen empfohlen die folgenden Verfahrensparameter: H20S - 135 ° C / 15 Minuten, MG 8331S - 100 ° C / 50 Minuten oder 130 ° C / 30 Minuten XCA3556HF - 110 ° C / 82 Sekunden CA3150 - 100 ° C / 93 Sekunden oder 130 ° C / 10 Sekunden. Aus Sicht dem Optimierung Material Einflüsse zu optimieren ist es zu diesem Thema Einfluss des Klebers und der Einfluss des Substrats geteilt werden. Im Fall des Einflusses von Leim auf flexiblen Substraten empfehlenswert Klebstoff MG 8331S oder CA3150. Wenn der Einfluss des Substrats können auf Experimenten basieren Kapton die Verwendung eines Substrats mit Kupfer Finish empfehlen. Wenn jedoch die



Anforderung das Substrat selbst zu schaffen, ist es immer notwendig, die Haftung des leitenden Motivträgers und die Haftung des Klebstoffs auf das tatsächliche leitende Motiv zu überprüfen, da diese kritischen Punkte des Systems sind. Hinsichtlich kann zu Kostenreduktion dann auf der Grundlage von Experimenten durchgeführt werden, um zu empfehlen, die Menge an elektrisch leitfähigen Kleber zu reduzieren. Diese Reduktion ist in Bezug auf die vorgesehene Anwendung der resultierenden Vorrichtung und damit die erforderlichen Eigenschaften der Verbindung umgesetzt werden. Im Allgemeinen wird jedoch eine geeignete Menge an Reduktion eines geeigneten geformten Loches in der Vorlage unter Verwendung einen besseren Isolationsabstand zwischen den Anschlüssen der Komponenten zu gewährleisten, eine Einsparung von fast der Hälfte der Menge des leitenden Klebstoffs und ist nicht sehr deutliche Verringerung der mechanischen Festigkeit der Verbindung.

- Noch eine weitere Aufgabe war es, die Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Klebverbindungen auf flexiblen Substraten zu verifizieren, Methoden der beschleunigten Alterung verwenden. Eigenschaften von Klebverbindungen im Laufe ihrer Verwendung wurden mit den Methoden der beschleunigten Alterung getestet. In einem der Experimente wurden Eigenschaften der Verbindung getestet, bei der mechanischen Biegung. Basierend auf diesem Experiment wurde gefunden, dass die Lotlegierungen sind anfälliger zu biegen, während die Leimfugen sind flexibler und biegesteifer. In einem anderen Experiment wurden die Proben bei 85 ° C zu dem kombinierten Klimatest unterzogen, und bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85% RH. Basierend auf dieses Experiment wurde festgestellt, daß der elektrische Widerstand der Proben zu einer beschleunigten Alterung unterzogen, um Wert mehr zehn Ohm erhöht. Die mechanische Festigkeit ist in diesem Fall leicht während der Alterung aufgrund von post-härtende Klebstoffe erhöht. Basierend auf den Experimenten können wir sagen, dass die Leimfugen sind anfälliger für Alterung Klima als mechanische Biegung. An der Biegung, hingegen zeigte höhere Lebensdauer im Vergleich zu Klebeverbindungen Lötverbindungen.
- Das letzte Teilziel war es, Empfehlungen für den individuellen Gebrauch erworbenen Kenntnisse in der Praxis zu definieren. Innerhalb jeden Experiment

wurden diese Empfehlungen im Detail beschrieben. Genauer gesagt, ist es angebracht, bevor die elektrisch leitfähigen Klebstoffe stellen geeignete Härtingsprofil basierend auf DSC-Analyse angewendet wird. In einer Reihe von Fällen durch die Analyse des DSC identifiziert wurden Profile besser als die von den Herstellern von Klebstoffen empfohlen. Darüber hinaus ist es möglich, die Menge von Klebstoff und Klebstoffmuster zu optimieren, in Bezug auf die Isolierung angewandt Abstand zwischen den Anschlüssen, die mechanische Festigkeit der Verbindung, die elektrischen Eigenschaften der Verbindung und ihren Preis. Diese optimale Menge kann sich ändern abhängig von den Anforderungen Eigenschaften von Verbindungen für eine bestimmte Anwendung. Große Aufmerksamkeit ist auf die Auswahl einen elektrisch leitenden Klebstoff zu bezahlen, die durch die Eigenschaften der resultierenden Klebeverbindung stark beeinflusst werden. Eine Möglichkeit, die Laufzeit der Anleihe zu beeinflussen ist, um sicherzustellen, nur eine teilweise Heilung elektrisch leitende Kleber. Mit diesem Schritt gibt es keine signifikante Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften und die Haltbarkeit des Gelenks für einen bestimmten Zeitraum verlängert wird, wenn ein Aushärten des Klebers ist, aber es ist notwendig, zu berücksichtigen, die spezifische Anwendung und nach dieser Anwendung wählen Sie den entsprechenden Prozentsatz der Heilung.

## Použitá literatura

- [1] K. R. J. Wassink, *Soldering in Electronics*, 2nd Edition. Electrochemical Publications Limited, 1989.
- [2] P. Mach, V. Skočil, a J. Urbánek, *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVÚT, 2001.
- [3] K. Suganuma, *Lead-free soldering in electronics*. Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [4] European Parliament, „Directive 2002/95/EC of the European Parliament and on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)“, 2003. [Online]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-CS/TXT/?qid=1470213017190&uri=CELEX:32002L0095&from=EN>.
- [5] European Parliament, „Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)“, 2011. [Online]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-CS/TXT/?qid=1470213209334&uri=CELEX:32011L0065&from=EN>.
- [6] European Parliament, „Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE)“, 2003. [Online]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-CS/TXT/?qid=1470213105533&uri=CELEX:32002L0096&from=EN>.
- [7] European Parliament, „Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE)“, 2012. [Online]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-CS/TXT/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>.
- [8] Parlament, „Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů“, 2001. [Online]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/%2524file/Z\\_185\\_2001.pdf](http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/%2524file/Z_185_2001.pdf).
- [9] Y. Li, D. Lu, a C. P. Wong, *Electrical Conductive Adhesives with Nanotechnologies*. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [10] P. Mach, „Modifikovaná elektricky vodivá lepidla“, *Electroscope*, roč. II, s. 4, 2009.

- [11] P. Mach a A. Duraj, „Náhrada olova v pájkách: Výhody a nevýhody alternativních řešení". [Online]. Dostupné z: [http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Nahrada\\_olova\\_v\\_pajkach.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~mach/vyuka/X13MTV/Nahrada_olova_v_pajkach.pdf).
- [12] P. Žák, „Spolehlivostní rizika bezolovnatých druhů montáže", in *Disertační práce*, Praha, 2012, s. 219.
- [13] „Chapter B: Flip-Chip Technology: B1. Level 1. Introduction to Flip-Chip techniques. The Nordic Electronics Packaging Guideline", 2000. [Online]. Dostupné z: <http://extra.ivf.se/ngl/b-flip-chip/ChapterB1.htm>. [Viděno: 03-srp-2016].
- [14] C. N. Oguibe, S. H. Mannan, D. C. Whalley, a D. J. Williams, „Conduction mechanisms in anisotropic conducting adhesive assembly", *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. Part A*, roč. 21, č. 2, s. 235–242, čer. 1998.
- [15] I. Szendiuch, „Propojování v elektronice – elektrické spoje". [Online]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a\\_propojovani\\_v\\_elektronice.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/08a_propojovani_v_elektronice.pdf).
- [16] J. C. Jagt, „Reliability of electrically conductive adhesive joints for surface mount applications: a summary of the state of the art", *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. Part A*, roč. 21, č. 2, s. 215–225, čer. 1998.
- [17] J. I. J. Gonzales a M. G. Mena, „Moisture and thermal degradation of cyanate-ester-based die attach material", in *Proceedings 47th Electronic Components and Technology Conference*, 1997, s. 525–535.
- [18] J. Urbánek a E. Klabáčka, *Technologie elektronických zařízení*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997.
- [19] F. Steiner, A. Hamáček, V. Skočil, a J. Štrunc, *Nové uplatnění lepidel v elektronice: Materiály pro elektroniku a elektrotechniku*. Ostrava: Tanger, 1999.
- [20] H. Yu, S. G. Mhaisalkar, a E. H. Wong, „Cure shrinkage measurement of nonconductive adhesives by means of a thermomechanical analyzer", *J. Electron. Mater.*, roč. 34, č. 8, s. 1177–1182, srp. 2005.
- [21] H. Yu, S. G. Mhaisalkar, a E. H. Wong, „Effect of temperature on the cure shrinkage measurement of non-conductive adhesives for flip chip interconnects", *J. Mater. Res.*, roč. 20, č. 5, s. 1324–1329, kvě. 2005.

- [22] ÚNMZ, „ČSN EN 60068-1 ed.2 - Zkoušení vlivů prostředí - Část 1: Obecně a návod". 2014.
- [23] Z. Zámorský, *Nauka o polymerech*, 3. Brno : Ediční středisko Vysokého učení technického, 1982.
- [24] V. Strnad, „Interakce prostředí a elektrotechnických materiálů", Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2005.
- [25] J. Mleziva a J. Šňupárek, *Polymery*, 2 vyd. Brno: Sobotáles, 2000.
- [26] I. Szendiuch, „Pouzdrění v elektronice: substráty, tepelný management a moderní typy pouzder", 2013. [Online]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%25C3%25AD pouzdra a substr%25C3%25A1ty\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-07A-Modern%25C3%25AD%20pouzdra%20a%20substr%25C3%25A1ty(Bc).pdf).
- [27] American Circuit Technology, „Rigid Flex PCB", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://actpcb.com/products-services/rigid-flex-printed-circuit-boards/>. [Viděno: 04-srp-2016].
- [28] J. Tiete, „beyond.io", *Tomorrowland bracelet teardown*, 2015. [Online]. Dostupné z: <http://www.beyond.io/latest/tomorrowland-bracelet-teardown/>. [Viděno: 04-srp-2016].
- [29] T. Rapala-Virtanen a T. Jokela, „New materials and build-up constructions for advanced rigid-flex PCB applications", *Circuit World*, roč. 31, č. 4, s. 21–24, pro. 2005.
- [30] D. Atienza a D. Briand, „Multi-Parametric Sensing Platform on Flexible Substrate", 2013. [Online]. Dostupné z: <http://esl.epfl.ch/page-74321-en.html>. [Viděno: 04-srp-2016].
- [31] M. Roeck a I. Hunt, „Isotropically conductive adhesives for electronic manufacture of flexible printed circuit boards", in *Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000) (Cat. No.00EX456)*, 2000, s. 327–334.
- [32] T. Kinkeldei, C. Zysset, K. Cherenack, a G. Troester, „Development and evaluation of temperature sensors for textile integration", *Proc. IEEE Sensors*, s. 1580–1583, 2009.
- [33] DuPont<sup>TM</sup>, „Pyralux<sup>®</sup> flexible circuit materials", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/flexible-rigidflex-circuit-materials/brands/pyralux-flexible-circuit.html>.

- [Viděno: 04-srp-2016].
- [34] C. Zysset, T. W. Kinkeldei, N. Munzenrieder, K. Cherenack, a G. Tröster, „Integration method for electronics in woven textiles", *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, roč. 2, č. 7, s. 1107–1117, 2012.
- [35] J. H.-C. Chang, D. Kang, a Y.-C. Tai, „High yield packaging for high-density multi-channel chip integration on flexible parylene substrate", in *2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2012, s. 353–356.
- [36] P. Menčík, „Příprava poly-para-xylylenových vrstev a charakterizace jejich vlastností", VÚT v Brně, Fakulta chemická, 2012.
- [37] A. C. Siegel, S. T. Phillips, M. D. Dickey, N. Lu, Z. Suo, a G. M. Whitesides, „Foldable printed circuit boards on paper substrates", *Adv. Funct. Mater.*, roč. 20, s. 28–35, 2010.
- [38] Optomec, „3D Printed Electronics: Aerosol Jet Technology", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [39] PragoBoard s.r.o., „Příjem zakázek a zpracování dat pro pružné plošné spoje a FLEX-RIGID", 2016. [Online]. Dostupné z: [http://www.pragoboard.cz/prijem\\_zakazek\\_flexi](http://www.pragoboard.cz/prijem_zakazek_flexi). [Viděno: 05-srp-2016].
- [40] Printed s.r.o., „PRODUKTY > PRUŽNÉ A OHEBNÉ SPOJE", 2010. [Online]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/pruzne-a-ohebne-spoje>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [41] Mev Praha s.r.o., „Výroba jednovrstvých, dvouvrstevných a vícevrstevných desek s plošnými spoji", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.mev.cz/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [42] Gatema s.r.o., „Rigid-flex a flexi DPS", 2015. [Online]. Dostupné z: <http://pcb.gatema.cz/rigid-flex-a-flexi-dps/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [43] PCB Benešov s.r.o., „Produkty", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.pcb-benesov.cz/produkty>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [44] P. Mach a D. Busek, „Study of thermomechanical properties of one- and two-component conductive adhesives", in *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2014, s. 105–108.

- [45] P. Mach, „Properties of adhesive bonds exposed to the static and dynamic mechanical load“, *26th Int. Spring Semin. Electron. Technol. Integr. Manag. Electron. Mater. Prod. 2003.*, s. 412–416, 2003.
- [46] P. Mach, V. Papež, a A. Duraj, „Frequency dependence of impedance of adhesive joints“, in *ESTC 2006 - 1st Electronics Systemintegration Technology Conference*, 2007, roč. 2, s. 812–817.
- [47] P. Mach, M. Skvor, a P. Szaraz, „Diagnostics and aging of electrically conductive adhesives“, *2000 22nd Int. Conf. Microelectron. Proc. (Cat. No.00TH8400)*, roč. 2, č. 1, s. 1–4, 2000.
- [48] A. Duraj, P. Mach, D. Samal, M. Friese, a D. Busek, „Correlation among Mechanical and Electrical Properties of Conductive Adhesive Joints“, *2006 29th Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, s. 287–290, 2006.
- [49] A. Duraj a P. Mach, „Stability of electrical resistance of isotropic conductive adhesives within mechanical stress“, *Int. Conf. Appl. Electron. 2006, AE*, s. 35–38, 2006.
- [50] a Duraj a P. Mach, „Diagnostic Tools for Evaluation of the Quality of the Anisotropic Conductive Adhesive Joints“, *Proc. 29th Int. Spring Semin. Electron. Technol. ISSE '06*, s. 132–136, 2006.
- [51] C. Zysset, N. Münzenrieder, T. Kinkeldei, K. Cherenack, a G. Tröster, „Woven active-matrix display“, *IEEE Trans. Electron Devices*, roč. 59, č. 3, s. 721–728, 2012.
- [52] D. Bušek, I. Pilarčíkova, a P. Mach, „Thermomechanical analysis of a bulk of electrically conductive adhesive“, *Electron. Technol. (ISSE), 2010 33rd Int. Spring Semin.*, s. 3–6, 2010.
- [53] D. Busek, J. Selepova, a P. Mach, „Correlations between mechanical and electrical parameters of modified electrically conductive adhesives“, *Proc. 2011 34th Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, s. 118–121, 2011.
- [54] C. Yang, W. Lin, Z. Li, R. Zhang, H. Wen, B. Gao, G. Chen, P. Gao, M. M. F. Yuen, a C. P. Wong, „Water-based isotropically conductive adhesives: Towards green and low-cost flexible electronics“, *Adv. Funct. Mater.*, roč. 21, s. 4582–4588, 2011.
- [55] Daiken chemical Co. Ltd., „Thermo-setting paste / Thermo-plastic paste“, 2009.

- [Online]. Dostupné z: [http://www.daiken-chem.co.jp/english/products/n\\_typep.html](http://www.daiken-chem.co.jp/english/products/n_typep.html). [Viděno: 05-srp-2016].
- [56] Epoxy Technology Inc., „EPOTEK - Product List", 2015. [Online]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/component/products/products.html?cat=1&title=Electrical Products&search=0&sign=0&value=>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [57] ESL ElectroScience, „POLYMER SILVER PASTES (AG)", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/polymer.html>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [58] Amepox Microelectronics Ltd., „Standart products", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.amepox-mc.com/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [59] Panacol-Elosol GmbH, „Elecolit®: Conductive Adhesives", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.panacol.com/products/adhesive/elecolit/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [60] Permacol B.V., „Producten", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://en.permacol.nl/producten/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [61] FUJIKURA KASEI CO. LTD, „ドータイト 接着剤タイプ (DOTITE adhesive type)", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.fkkasei.co.jp/product/electric/dotite/01.html>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [62] Henkel ČR, „Lepidla, tmely a funkční nátěry", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.henkel-adhesives.cz/henkel-adhesives.htm>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [63] ELCHEMCo spol s.r.o., „Úvod", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [64] MasterBond, „Electrically conductive adhesives", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.masterbond.com/properties/electrically-conductive-adhesive-systems>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [65] MG Chemicals, „Electrically conductive adhesives", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.mgchemicals.com/products/adhesives/electrically-conductive/>. [Viděno: 05-srp-2016].
- [66] S. Barto, J. Cinert, a P. Mach, „Influence of thermal aging on the reliability of electrically conductive adhesives", *2011 IEEE 17th Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag.*, s. 305–308, 2011.
- [67] S. Barto a P. Mach, „Tolerance design of curing process of electrically conductive adhesives", *33rd Int. Spring Semin. Electron. Technol. ISSE 2010*, s. 103–106,



- 2010.
- [68] S. Barto a P. Mach, „Resistance and non-linearity of electrically conductive adhesives aged by thermal, humidity and combined aging", in *2011 IEEE 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2011, s. 59–62.
- [69] P. Mach, D. Bušek, a a. Duraj, „Influence of interconnection surface finishes on quality of adhesive Joints", *28th Int. Spring Semin. Electron. Technol. Meet. Challenges Electron. Technol. Progress, 2005*, roč. 2005, s. 331–335, 2005.
- [70] P. Mach, L. Richter, a A. Pietriková, „Modification of Electrically Conductive Adhesives for Better Mechanical and Electrical Properties", s. 228–233, 2008.
- [71] P. Mach, L. Richter, a A. Pietriková, „Testing of techniques for improvement of conductivity of electrically conductive adhesives", *Proc. - 2008 2nd Electron. Syst. Technol. Conf. ESTC*, s. 305–308, 2008.
- [72] P. Mach a J. Cinert, „Influence of surface finish on resistance of contacts between ECA and pad", *Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, s. 131–134, 2011.
- [73] X. Chen, B. Tao, a Z. Yin, „Simulation for the contact resistance of a single anisotropic conductive adhesive particle with rough surface", *ICEPT-HDP 2011 Proc. - 2011 Int. Conf. Electron. Packag. Technol. High Density Packag.*, s. 596–600, 2011.
- [74] P. Mach a J. Kolář, „Impedance of adhesive joints", *SIITME 2009 - 15th Int. Symp. Des. Technol. Electron. Packag.*, s. 149–152, 2009.
- [75] Epoxy Technology Inc., „EPO-TEK H20S - Technical Data Sheet", 2011. [Online]. Dostupné z: [http://www.epotek.com/site/administrator/components/com\\_products/assets/files/Style\\_Uploads/H20S.pdf](http://www.epotek.com/site/administrator/components/com_products/assets/files/Style_Uploads/H20S.pdf).
- [76] MG Chemicals, „MG 8331S - Data Sheet", 2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.mgchemicals.com/downloads/tds/tds-8331s-2parts.pdf>.
- [77] Cobar Balver Zinn, „OT2-SN100C-T3/T4". [Online]. Dostupné z: [http://www.balverzinn.com/solder-paste-cobar-ot2.html?file=tl\\_files/balverzinn/downloads/datenblaetter\\_en/Application\\_Note\\_COBAR-OT2-SN100C-T3%28T4%29.pdf](http://www.balverzinn.com/solder-paste-cobar-ot2.html?file=tl_files/balverzinn/downloads/datenblaetter_en/Application_Note_COBAR-OT2-SN100C-T3%28T4%29.pdf).
- [78] Shenmao, „昇貿科技股份有限公司 - PF606-P30 - Data Sheet", 2012. [Online].

- Dostupné z: <http://www.ben-technologies.com/support/wp-content/uploads/2013/07/PF606-P30TDS-E03-00.pdf>.
- [79] Shenmao, „PF602-P - Product Data Sheet". [Online]. Dostupné z: <http://avipre.com/products/printers/Shenmao Solder, Solder Paste, Solder Sphere, Solder Wire and Bar//Product Data Sheets/Lead-Free Solder Paste P Series/PF602-P%2528TDS%2529.pdf>.
- [80] Emerson & Cumming, „XCA 3556 HF - Datasheet", 2007. [Online]. Dostupné z: [http://www.hitek-ltd.co.uk/media/downloads/5356/XCA\\_3556\\_HF\\_\(Electrically\\_Conductive\\_Adhesive\)\\_2007.pdf](http://www.hitek-ltd.co.uk/media/downloads/5356/XCA_3556_HF_(Electrically_Conductive_Adhesive)_2007.pdf). [Viděno: 17-led-2017].
- [81] Loctite, „ABLESTIK CA3150", 2010. [Online]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/7B68DDF4E071A62E85257563005AA6D5/\\$File/ABLESTIK\\_CA\\_3150-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/7B68DDF4E071A62E85257563005AA6D5/$File/ABLESTIK_CA_3150-EN.pdf).
- [82] Katedra makromolekulární fyziky, „Měření smáčivosti". [Online]. Dostupné z: <http://kmf.troja.mff.cuni.cz/okno/vyzkum.php?idv=26>.
- [83] Z. Škubalová, „METODY FARMACEUTICKÉ TECHNOLOGIEČL 2009, D 2010", 2010.

## Seznam publikací studenta

### Doktorandské konference

- [I] HIRMAN, Martin, Mechanická pevnost vodivých lepidel ve srovnání s pájecími slitinami. Elektrotechnika a informatika 2014: Část 1., Elektrotechnika. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 29–32. ISBN 978-80-261-0367-7.
- [II] HIRMAN, Martin, Závislost množství elektricky vodivých lepidel na mechanické pevnosti lepeného spoje. Elektrotechnika a informatika 2015: Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 43–46. ISBN 978-80-261-0514-5

### Mezinárodní konference

- [III] HIRMAN, Martin, Karel RENDL, Frantisek STEINER a Vaclav WIRTH. Influence of reflow soldering profiles on creation of IMC at the interface of SnBi/Cu. In: 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology. IEEE, 2014, s. 147-151. ISBN 978-1-4799-4455-2. DOI: 10.1109/ISSE.2014.6887582.
- [IV] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. A comparison of the shear strength of conductive adhesives and soldering alloys. In: 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2015, s. 167-172. DOI: 10.1109/ISSE.2015.7247983. ISBN 978-1-4799-8860-0.
- [V] HLINA, Jiri, Karel HROMADKA, Jan REBOUN, Martin HIRMAN a Ales HAMACEK. Adhesion improvement of Thick Printed Copper film on alumina substrates by controlling of oxygen level in furnace. In: 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2016, s. 22-26. DOI: 10.1109/ISSE.2016.7563154. ISBN 978-1-5090-1389-0.
- [VI] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Influence of electrically conductive adhesive quantity on insulation distance and shear strength of glued joints. In: 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2016, s. 134-139. DOI: 10.1109/ISSE.2016.7563175. ISBN 978-1-5090-1389-0.
- [VII] BENESOVA, Andrea, Jan SIMOTA, Martin HIRMAN, Jiri NAVRATIL, Jiri TUPA a Frantisek STEINER. Connection technologies quality improving. In:

- 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2016, s. 342-347. DOI: 10.1109/ISSE.2016.7563217. ISBN 978-1-5090-1389-0.
- [VIII] HIRMAN Martin, Jiri NAVRATIL, Radek SOUKUP, Ales HAMACEK a Frantisek STEINER. Influence of Flexible Substrate Roughness with Aerosol Jet Printed Pads on the Mechanical Shear Strength of Glued Joints. In: 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2017, s. 100-101. ISBN 978-619-7066-15-9
- [IX] HLÍNA Jiri, Jan REBOUN, Martin HIRMAN a Ales Hamacek. Comparison of Copper and Silver Thick Film on Alumina Substrates Properties. In: 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2017, s. 34-35. ISBN 978-619-7066-15-9
- [X] FRIDRICHOVSKY Martin, Frantisek STEINER a Martin HIRMAN. Comparison of the Characteristics of PCB Protective Coatings. In: 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2017, s. 136-137. ISBN 978-619-7066-15-9
- [XI] NAVRATIL Jiri, Jan REBOUN, Tomas RERICHA, Radek SOUKUP, Martin HIRMAN a Ales HAMACEK. Nanoparticle based ink printed chip interconnections. In: 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE, 2017, s. 102-103. ISBN 978-619-7066-15-9
- [XII] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Influence of electrically conductive adhesive amount on shear strength of glued joints. In: 2015 International Conference on Applied Electronics (AE). IEEE, 2015, s. 53-56. ISBN: 978-8-0261-0385-1.
- [XIII] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Influence of electrically conductive adhesive amount on shear strength of glued joints on flexible substrates. In: 2015 International flash conference IMAPS: Czech and Slovak chapter. IEEE, 2015, s. 30-31.
- [XIV] STEINER Frantisek, Jakub STUNA a Martin HIRMAN. Temperature stable solder pastes - properties and reliability. In: 2016 IMAPS Flash Conference: 2nd International Microelectronics Assembly and Packaging Society Flash Conference (IMAPS 2016). IEEE, 2016, s. 44-45. ISBN 978-80-214-5416-3.

- [XV] STUNA, Jakub, Frantisek STEINER a Martin HIRMAN. Properties of temperature stable solder pastes. In: 2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). IEEE, 2016, s. 1-6. DOI: 10.1109/ESTC.2016.7764724. ISBN 978-1-5090-1402-6.
- [XVI] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Solder pastes quantity vs. mechanical strength. 40th International Microelectronics and Packaging IMAPS Poland 2016 Conference. ISBN 978-83-932464-2-7.

#### **Neimpaktované časopisy**

- [XVII] STEINER Frantisek, Jakub STUNA a Martin HIRMAN. Temperature stable solder pastes - properties and reliability. In: 2016 Electroscope . 2016, s. 1-8. ISSN 1802-4564.
- [XVIII] BENESOVA, Andrea, Jan SIMOTA, Martin HIRMAN, Jiri NAVRATIL, Jiri TUPA a Frantisek STEINER. Methodologies to Improve Experimental Research Processes in Soldering Technology. Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, Vol. 60, No. 4, pp. 237-244, 2016. DOI: 10.3311/PPee.9684

#### **Impaktované časopisy**

- [XIX] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Shear Strength of Conductive Adhesive Joints on Rigid and Flexible Substrates Depending on Adhesive Quantity. Journal of Electrical Engineering. DOI: 10.1515/jee-2016-0025. ISSN 1339-309x.
- [XX] HIRMAN, Martin a Frantisek STEINER. Optimization of solder paste quantity considering the properties of solder joints. Soldering & Surface Mount Technology. 2017, s. 15-22. DOI: 10.1108/SSMT-10-2016-0025. ISSN 0954-0911.

## PŘÍLOHY:

## Příloha A. Seznam testovaných vzorků v prvním experimentu

Tabulka 14: Seznam testovaných vzorků a použitých parametrů lepidel pro tuhé DPS.

Lepidlo	Typ součástky	Profil vytvrzení	Označení	Lepidlo	Typ součástky	Profil vytvrzení	Označení
H20S	1206	80°C / 90 min	Zatížení 11	8331S	1206	25°C / 96 hod	Zatížení 61
	1206		11		1206	61	
	0805		12		0805	25°C / 96 hod	62
	0603		13		0603	63	
	1206	100°C / 45 min	21		1206	65°C / 120 min	71
	0805		22		0805		72
	0603		23		0603		73
	1206	120°C / 15 min	31		1206	80°C / 60 min	81
	0805		32		0805		82
	0603		33		0603		83
	1206	135°C / 15 min	TT1		1206	100°C / 50 min	91
	0805		TT2		0805		92
	0603		TT3		0603		93
	1206	150°C / 5 min	41		1206	130°C / 30 min	T1
	0805		42		0805		T2
	0603		43		0603		T3
	1206	175°C / 45 s	51				
	0805		52				
	0603		53				

**Tabulka 15:** Seznam testovaných vzorků a použitých parametrů lepidel pro flexibilní DPS.

Lepidlo	Typ součástky	Profil vytvrzení	Označení FDPS Ag	Označení FDPS Cu
H20S	1206	120°C / 15 min	A2.11	A3.11
	0805		A2.12	A3.12
	0603		A2.13	A3.13
	1206	135°C / 15 min	A2.21	A3.21
	0805		A2.22	A3.22
	0603		A2.23	A3.23
	1206	150°C / 5 min	-	A3.31
	0805		-	A3.32
	0603		-	A3.33
8331S	1206	100°C / 50 min	A2.31	A3.41
	0805		A2.32	A3.42
	0603		A2.33	A3.43
	1206	130°C / 30 min	A2.41	A3.51
	0805		A2.42	A3.52
	0603		A2.43	A3.53

## Příloha B. Seznam hmotností vzorků testovaných v prvním experimentu

Z důvodu většího množství dat týkajících se hmotností vzorků, byly tyto tabulky vyjmuty z jádra práce a vloženy do příloh.

*Tabulka 16:* Seznam testovaných vzorků a hmotností jednotlivých vzorků pro tuhé DPS.

Označení	Hmotnost před [g]	Hmotnost po [g]	Hmotnost lepidla 1 plošky [mg]	Označení	Hmotnost před [g]	Hmotnost po [g]	Hmotnost lepidla 1 plošky [mg]
Zatížení 11	3,8189	3,8317	0,64	Zatížení 61	4,1111	4,1226	0,575
11	3,7134	3,7245	0,555	61	4,0903	4,1028	0,625
12	4,1677	4,1714	0,185	62	4,1211	4,1263	0,26
13	4,1181	4,1204	0,115	63	4,1154	4,1188	0,17
21	3,6216	3,6328	0,56	71	4,2112	4,2264	0,76
22	3,9411	3,9448	0,185	72	4,085	4,0905	0,275
23	4,0754	4,0778	0,12	73	4,1432	4,1455	0,115
31	3,8267	3,8387	0,6	81	4,323	4,3355	0,625
32	4,1076	4,1113	0,185	82	4,1175	4,1211	0,18
33	4,1794	4,1817	0,115	83	4,0652	4,0686	0,17
TT1	3,6955	3,7059	0,52	91	4,1667	4,1779	0,56
TT2	4,1303	4,1347	0,22	92	4,0932	4,0977	0,225
TT3	4,0811	4,0836	0,125	93	4,1554	4,1577	0,115
41	3,7107	3,7221	0,57	T1	4,1113	4,1258	0,725
42	4,0929	4,0968	0,195	T2	3,9935	3,9982	0,235
43	4,0301	4,0324	0,115	T3	4,059	4,0621	0,155
51	3,772	3,7837	0,585				
52	3,9523	3,956	0,185				
53	4,1233	4,1256	0,115				



Tabulka 17: Seznam testovaných vzorků a hmotností jednotlivých vzorků pro flexibilní DPS.

Označení FDPS Ag	Hmotnost před [mg]	Hmotnost po [mg]	Hmotnost lepidla 1 plošky [mg]	Označení FDPS Cu	Hmotnost před [mg]	Hmotnost po [mg]	Hmotnost lepidla 1 plošky [mg]
A2.11	520,47	528,97	0,425	A3.11	154,7	164,3	0,48
A2.12	539,07	541,33	0,113	A3.12	149,1	152	0,145
A2.13	470,88	472,25	0,0685	A3.13	151	152,3	0,065
A2.21	540,25	550	0,4875	A3.21	154,4	164	0,48
A2.22	537,77	540,07	0,115	A3.22	148,2	151	0,14
A2.23	499,69	501,01	0,066	A3.23	150,7	152,1	0,07
-	-	-	-	A3.31	156,4	166,3	0,495
-	-	-	-	A3.32	148,2	150,8	0,13
-	-	-	-	A3.33	151,5	152,9	0,07
A2.31	546,78	556,18	0,47	A3.41	156,4	166	0,48
A2.32	554,76	557,44	0,134	A3.42	148,4	151,5	0,155
A2.33	527,99	529,77	0,089	A3.43	149,9	151,3	0,07
A2.41	547,75	557,68	0,4965	A3.51	156,3	166	0,485
A2.42	527,44	530,07	0,1315	A3.52	149,6	152,3	0,135
A2.43	487,07	488,8	0,0865	A3.53	152,9	154,8	0,095