

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody návrhu a výroby 3D plošných spojů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kamil VECKO**

Osobní číslo: **E16B0172P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Metody návrhu a výroby 3D plošných spojů**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Vypracujte přehled výrobních technologií pro 3D plošné spoje.
2. Zpracujte přehled návrhových programů pro výrobu 3D plošných spojů a jejich metody přístupu k výrobě 3D plošných spojů.
3. Realizujte návrh 3D plošného spoje.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. COOMBS, Clyde F. a Happy T. HOLDEN, ed. Printed circuits handbook. Seventh edition. New York: McGraw-Hill Education, 2016. ISBN 978-0071833950
2. MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3
3. elektronické informační zdroje

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. David Kalaš

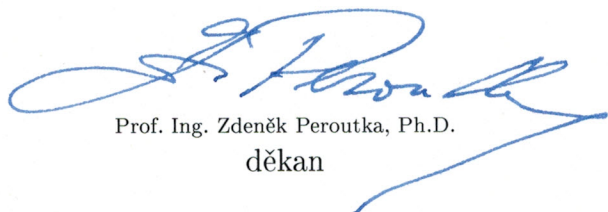
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce:

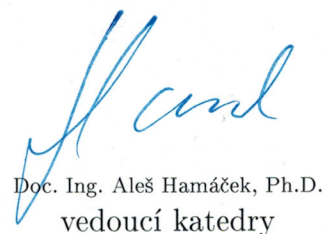
5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce:

13. června 2019


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




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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na způsoby výroby a návrhu 3D plošných spojů. Představuje technologie vhodné pro výrobu 3D plošných spojů, prezentuje jejich výhody a omezení. Práce dále obsahuje výběr návrhových programů využívaných při vývoji 3D plošných spojů. Praktická část návodně popisuje využití konkrétního programu pro návrh flexibilního plošného spoje pro umístění do 3D modelu.

Klíčová slova

3D DPS, deska plošných spojů, flexibilní DPS, MID, návrhové programy DPS, technologie výroby 3D DPS.

Abstract

This bachelor thesis is focused on possible ways of designing and manufacturing 3D printed circuit boards. Available technologies suitable for 3D PCB manufacturing are presented and their advantages and limitations are described. The thesis also contains an overview of PCB design software. A flexible printed circuit board is designed using software presented in the overview.

Key words

3D PCB, 3D PCB manufacturing technologies, flexible PCB, MID, Molded Interconnect Devices, PCB design software, printed circuit board.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 13.6.2019

Kamil Vecko

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
PŘEHLED VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ	11
1.1 TUHÉ 3D PLOŠNÉ SPOJE – TVAROVANÉ (MID).....	11
1.1.1 <i>One-shot molding</i>	12
1.1.2 <i>Two-shot molding</i>	23
1.1.3 <i>Insert Molding (In-Mold)</i>	24
1.2 FLEXIBILNÍ PLOŠNÉ SPOJE.....	26
1.2.1 <i>Typy</i>	26
1.2.2 <i>Materiály</i>	28
2 PŘEHLED NÁVRHOVÝCH PROGRAMŮ	36
2.1 AUTODESK EAGLE (VERZE 9.4.1).....	37
2.2 TARGET 3001!.....	38
2.3 ORCAD PCB DESIGNER LITE 17.2.....	39
2.4 MENTOR PADS PRO LAYOUT VX.2.5.....	42
2.5 ALTIUM DESIGNER (VERZE 19.1.5).....	42
3 REALIZACE PLOŠNÉHO SPOJE	45
3.1 PŘEDSTAVENÍ PLOŠNÉHO SPOJE.....	45
3.2 POSTUP NÁVRHU.....	46
ZÁVĚR	50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
PŘÍLOHY	56

Úvod

Náplní této bakalářské práce jsou 3D plošné spoje. Specifikem 3D plošných spojů je výborné propojení s mechanickými částmi. Dokáží lépe využít prostoru, který nabízí konstrukce zařízení, pro které je spoj navržen. Tuhé 3D plošné spoje mohou dokonce plnit funkci elektrického propojení osazených součástek a zároveň sloužit jako konstrukční část celého zařízení. Jejich využitím lze také dosáhnout snížení váhy, ergonomického tvaru nebo propojení pohyblivých částí v případě flexibilních plošných spojů.

Text je členěn do tří hlavních částí. První částí je přehled výrobních technologií pro tuhé a flexibilní 3D plošné spoje. Jsou rozebrány technologie založené na laseru, tisku, plazmě, vstřiku odlišných typů plastu a 3D tvarování fólií. Druhá část obsahuje popis možných přístupů k návrhu 3D plošných spojů následovaný přehledem vybraných návrhových programů. Ve třetí části je popsán návrh flexibilního plošného spoje určeného pro osazení do 3D modelu. Je zde uveden kompletní postup od získání základního tvaru plošného spoje, jeho převod do návrhového programu, navržení a umístění na konečnou pozici.

Seznam symbolů a zkratek

η	-	Viskozita [mPa·s]
λ	-	Vlnová délka [nm]
2D	-	Dvojměrný
3D	-	Trojměrný
ABS	-	Akrylonitrilbutadienstyren
Al	-	Hliník
Al ₂ O ₃	-	Oxid hlinitý
AlN	-	Nitrid hlinitý
Au	-	Zlato
Bi	-	Bismut
C	-	Uhlík
CIGS	-	Copper indium galium selenide
CIJ	-	Continuous Inkjet (Kontinuální Inkjet)
CO ₂	-	Oxid uhličitý
COP	-	Cyclic olefin polymer
Cu	-	Měď
DNA	-	Deoxyribonukleová kyselina
DoD	-	Drop on demand Pulzní Inkjet
DPS	-	Deska plošných spojů
DRC	-	Design rules check Kontrola návrhových pravidel
ECAD	-	Electronic computer-aided design
ED	-	Electrodeposited copper
ED-HD	-	High-ductility electrodeposited copper
Fe	-	Železo
IR	-	Infračervený
Laser	-	Light amplification by stimulated emission of radiation
LCP	-	Liquid crystal polymers Polymery tekutých krystalů

LDS	-	Laser direct structuring Vytváření struktur pomocí laseru
LED	-	Light emitting diode
MCAD	-	Mechanical computer-aided design
MID	-	Molded interconnect devices
MIPTEC	-	Microscopic integrated processing technology
MWCNT	-	Multi-walled carbon nanotubes Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky
Nd:YAG	-	Neodmium doped Yttrium Aluminum Garnet
Ni	-	Nikl
PA	-	Polyamid
PA	-	Pneumatický atomizér
PBT	-	Polybutylentereftalát
PC	-	Polykarbonát
PC/ABS	-	Polykarbonát/akrylonitril-butadién-styrén
Pd	-	Palladium
PE	-	Polyethylen
PEDOT:PSS	-	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid)
PEEK	-	Polyetereterketon
PEN	-	Polyethylen-naftalát
PET	-	Polyethylen-tereftalát
PI	-	Polyimid
PIC	-	Photoimageable coverlay
PP	-	Polypropylen
PPA	-	Polyftalamid
PSA	-	Pressure-sensitive adhesive Adheziva citlivá na tlak
PTFE	-	Polytetrafluorethylen
PVP	-	Polyvinylpyrrolidon
RA	-	Rolled annealed copper Válcovaná měď
Ru	-	Ruthenium
SiO ₂	-	Oxid křemičitý

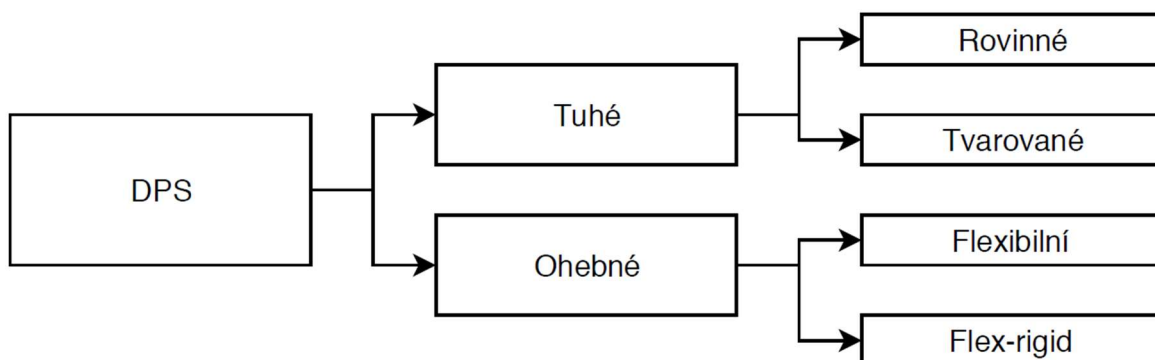
Sn	-	Cín
SMT	-	Surface mount technology Povrchová montáž
SWCNT	-	Single-wall carbon nanotubes Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky
Te	-	Tellur
UA	-	Ultrazvukový atomizér
UV	-	Ultraviolet Ultrafialový
VI	-	Virtual impactor
Zn	-	Zinek

Přehled výrobních technologií

Desky plošných spojů (dále DPS) plní v elektronických zařízeních tři základní funkce [1]:

- slouží jako mechanická podpora pro osazené součástky,
- je na nich realizováno elektrické propojení osazených součástek,
- díky potisku jednoznačně označují každou součástku, její hodnotu, vývody či další informace o DPS.

Pro zařízení složitých tvarů či výrobky, u kterých je požadováno co možná nejmenších rozměrů, je vhodné využít některé z technologií pro výrobu nerovinného plošného spoje. 3D plošné spoje jsou oproti klasickým rovinným DPS schopné se přizpůsobit tvaru a konstrukci celého zařízení. S tím můžeme počítat již při návrhu zařízení a efektivnějším využitím prostoru docílit zmenšení rozměrů, snížení hmotnosti nebo můžeme navrhnout zařízení netradičních tvarů [1].



Obr. 1 Rozdělení DPS (překresleno z [1])

1.1 Tuhé 3D plošné spoje – tvarované (MID)

Molded interconnect devices (dále MID) se poprvé objevily již v 80. letech dvacátého století, nicméně z důvodu vysoké ceny a potřeby velké produkce se na trhu neuchytily. S narůstajícím tlakem na zmenšování rozměrů, snižování hmotnosti a lepší prostorové využití se MID opět vrátily mezi žádané technologie [2]. K vytvoření základního plastového substrátu se využívá některé ze tří technik [3]:

- one-shot molding,
- two-shot molding,
- insert molding.

Technologie založené na tisku (Inkjet, Aerosol-Jet®) a technologie využívající plazmy umožňují nanášení cest i na jiné než plastové substráty (sklo, keramika, ...).

1.1.1 One-shot molding

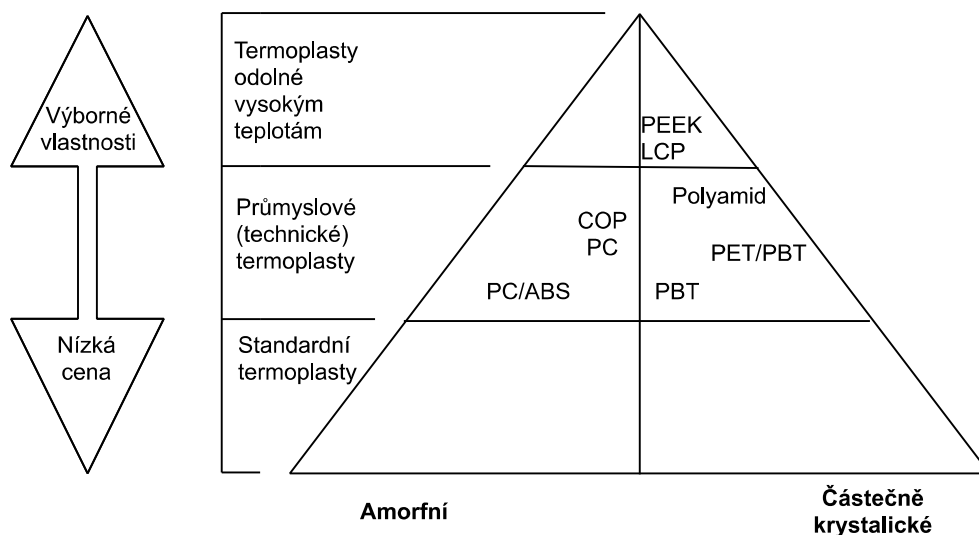
One-shot molding je vhodná technologie pro vytváření struktur ve vysokém objemu produkce při zachování přijatelné ceny za kus. Termoplastický granulát je z násypky podáván šnekovým dopravníkem. Během cesty je postupně zahříván až dojde ke kompletnímu roztavení. Roztavený plast je poté vstříknut do formy, kde získá svůj konečný tvar, postupně chladne a stává se opět pevným. Forma je otevřena a vytvarovaný plast je vyjmut z formy [4]. Výroba může být navýšena použitím více forem, do kterých je materiál vstříknut během jednoho cyklu [3].

1.1.1.1 Vytváření vodivých struktur pomocí laseru

Jednotlivé techniky vytváření struktur pomocí laseru se liší typem procesu. Mohou být aditivní, semiaditivní či subtraktivní (obr. 4) [3].

- **LPKF-LDS®**

LPKF-LDS® je nejrozšířenější technologií vytváření vodivých vrstev na MID s podílem na trhu větším než 50 % [3]. Jedná se univerzální technologii, která je dobře využitelná jak pro prototypovou, tak sériovou výrobu. Umožňuje vytváření jemných struktur na 3D substráty různorodých tvarů [5]. Vhodnými materiály jsou LCP, PEEK, PA, PBT, PET/PBT, COP, PC a PC/ABS (obr. 2). Vzhledem k častému využití v sektoru telekomunikací a nízké ceně se nejčastěji používá PC a PC/ABS. Laser direct structuring (dále LDS) je aditivní technologií, která je šetrná k životnímu prostředí. Během výrobního procesu není použito leptání a substrát je tvořen ze materiálů, které lze recyklovat.



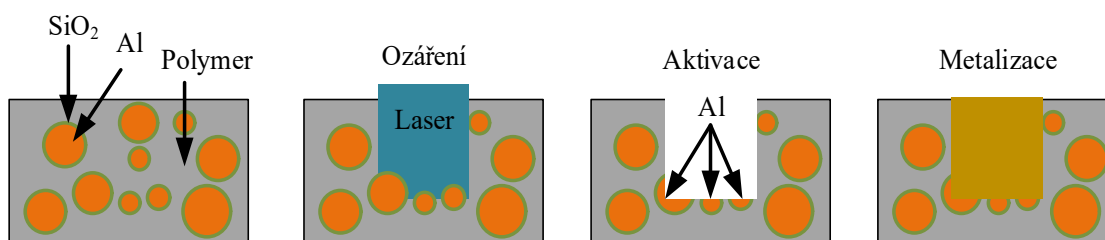
Obr. 2 Rozdělení aktuálně používaných materiálů (překresleno z [3])

Termoplasty používané pro LDS obsahují jako aditivum organokovy [6], které jsou rozprostřeny v celém jeho objemu. Ty mají vysokou teplotní odolnost a díky tomu nedochází k aktivaci aditiva již během lisování základního substrátu, kdy je materiál zahříván na vysokou teplotu. Aditivum tvoří přibližně 4 až 10 % celkové hmotnosti výlisku a jeho vliv na mechanické vlastnosti struktury je zanedbatelný. Po ozáření laserem (obvykle Nd:YAG laser, $\lambda = 1024$ nm) dochází k rozkmitání molekul polymeru a následnému rozrušení jejich řetězcové struktury. Vrstva polymeru o tloušťce 1–2 μm se na ozářeném místě odpaří a tím vytvoří mikroskopicky drsný povrch, který poskytuje dostatek adheze, a zároveň odkryje částičky aditiva. Aditivum je po ozáření laserem aktivováno a chová se jako katalyzátor. Díky tomu se při následném chemickém pokovení pokoví pouze ty části, které byly ozářeny. Standardní šířka je 150 μm u vodivé cesty a 200 μm u izolační mezery, nicméně technologickým limitem pro šířku vodivé cesty je 50 μm [7]. Vodivé cesty jsou laserem vytvářeny rychlostí až 4000 mm/s, s rostoucí složitostí tvaru se rychlost snižuje [3].

Materiály, jež neobsahují aditivum pro LDS je možné ošetřit pomocí spreje LPKF ProtoPaint. Tato možnost je vhodná zejména pro vytváření 3D-MID prototypů. 3D struktura se nejprve důkladně očistí, následně se na ni nastříkají 3 rovnoměrné vrstvy ze vzdálenosti 15–20 cm. Vznikne tak vrstva o tloušťce 20–25 μm (po vysušení). Poté se vysouší po dobu 180 minut při maximální teplotě 70 °C v horkovzdušné cirkulační troubě. Další postup je shodný s materiály, jež aditivum obsahují (vytvoření vodivých struktur pomocí laseru a metalizace) [8].

- **ADDIMID**

Technologie ADDIMID využívá stejně jako technologie LPKF-LDS® plast obohacený o aditivum jako základní materiál. Výrobní proces (obr. 3) je taktéž stejný – vytvoření vodivých cest pomocí Nd:YAG laseru se zářením o vlnové délce 1064 nm a následná metalizace. Lze použít také CO₂ laser se zářením o vlnové délce 10,6 μm. Rozdílem je použití kovového prášku jako aditiva. Zrnka o průměru 0,5–1,2 μm jsou z materiálů jako Cu, Ni nebo Al [3]. Aby se předešlo metalizaci zrněk, které se vyskytují na povrchu, jsou zrnka obalena ve vrstvě izolačního materiálu (např. SiO₂ [9]). Výhodou je nízká cena aditiva oproti LDS. Minimální šířka cest po metalizaci je stejně jako u LPKF-LDS® 50 μm [10]. Tato technologie je stále ve fázi vývoje [3].



Obr. 3. Proces vytvoření vodivé cesty technologií ADDIMID - bez vrstvy SiO₂ platí i pro LPKF-LDS® (překresleno z [9])

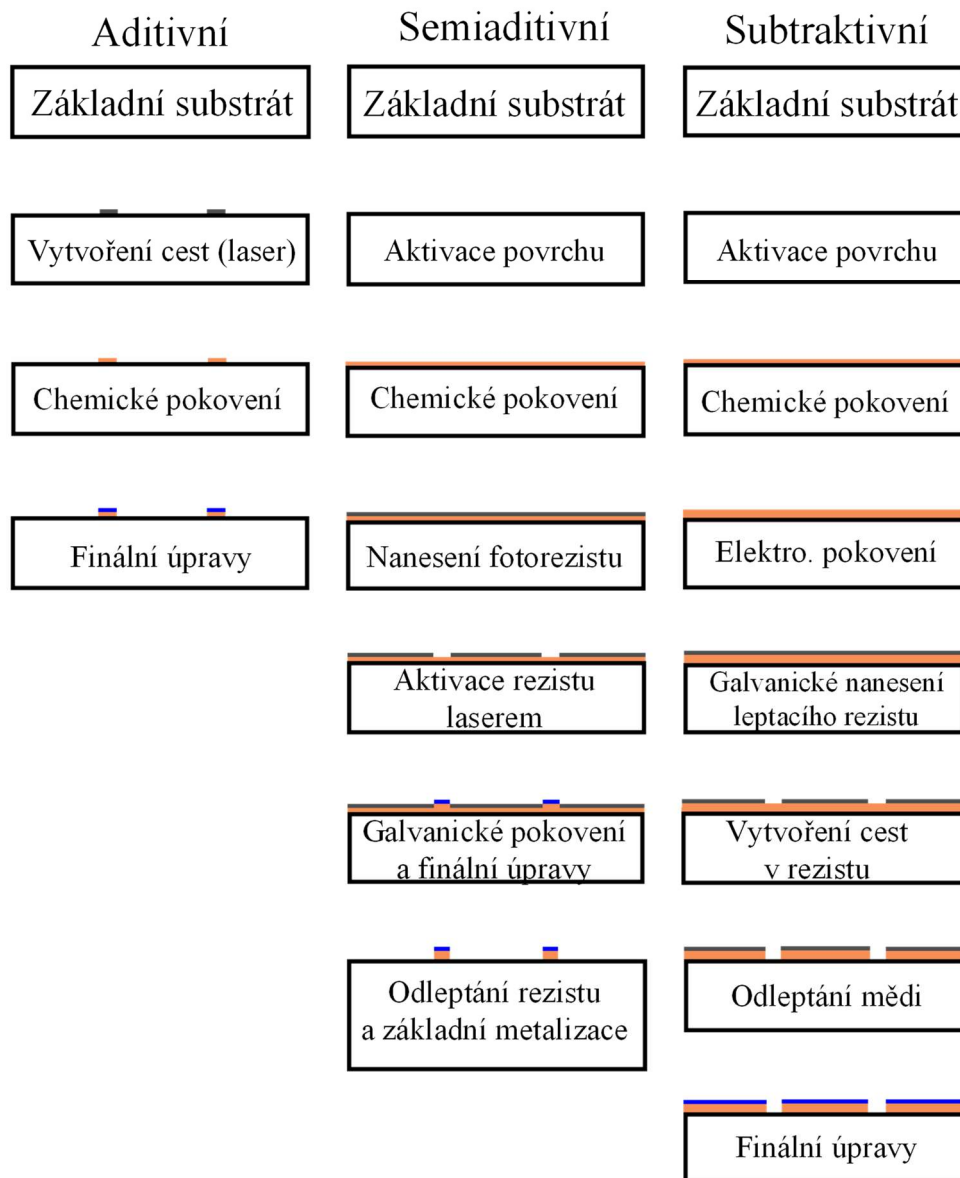
- **MIPTEC**

Vytvarovaný substrát se nejprve chemicky pokoví po celé části povrchu. Důsledkem toho není výsledný vodivý povrch drsný stejně jako je tomu u předchozích technologií a po dokončení je na něj bez dalších povrchových úprav možné kontaktovat čipy metodou bondování. Pomocí UV či IR laseru se oddělí vodivé části, které chceme zachovat. Ty mohou být zesíleny pomocí galvanického pokovení. Chemicky pokovené části, které mají zůstat nevodivé, jsou na závěr odleptány. Díky leptání je možné dosáhnout šířky 50 μm u vodivých cest i izolačních mezer, maximální úhel (strmost) substrátu, na kterém může být struktura vytvořena, činí 90° [3]. Materiály pro základní substrát jsou PPA a keramiky Al₂O₃ a AlN. Výhodou těchto keramik je dobrá tepelná vodivost a rozměrová stabilita, a to zejména pro MID LED aplikace [11]. Z procesu výroby je zřejmé, že se jedná o semiaditivní technologii.

- ***Subtraktivní vytváření struktury pomocí laseru***

Po vytvoření základní struktury se povrch aktivuje a chemicky pokoví mědí či niklem. Následuje galvanické pokovení až na konečnou tloušťku vodivé vrstvy. Dále se na povrch nanese galvanický rezist. Ten se odstraní po ozáření laserem. Při použití klasického fotorezistu, který je po ozáření UV světlem narušen (pozitivní) či vytvrzen (negativní), může vlivem částice prachu dojít k neosvícení některých míst a následnému vzniku zkratu či přerušování vodivé cesty. Tento problém nabývá na důležitosti se zmenšující se šířkou vodivých cest a izolačních mezer. Díky této technologii je problém eliminován použitím galvanického rezistu a laseru. Naopak nevýhodou je nižší rychlost vytváření motivu. Po překročení rychlosti 600 mm/s může docházet k nedokonalému odstranění rezistu. Po nanesení a aktivaci rezistu následuje leptání, odstranění rezistu a povrchová úprava. Nevýhodou této techniky vytváření 3D-MID je více kroků v procesu výroby a leptání, které s sebou přináší problematiku nedoleptání či naopak podleptání [3].

Další subtraktivní metodou je metoda, která se téměř neliší od metody využívané u planárních DPS. Po aktivaci povrchu základního substrátu následuje chemické pokovení a nanesení pozitivního fotorezistu. V dalším kroku je nutné použití speciální 3D masky. Po expozici a vyvolání následuje galvanické pokovení na konečnou tloušťku vodivé cesty. Dále se nanese maska na vodivé cesty, která je chrání při leptání, odstraní se fotorezist a odleptá chemicky nanesená měď. V posledním kroku dochází k povrchové úpravě [3].



Obr. 4 Proces výroby laserem u aditivní, semiaditivní a subtraktivní technologie (překresleno z [3])

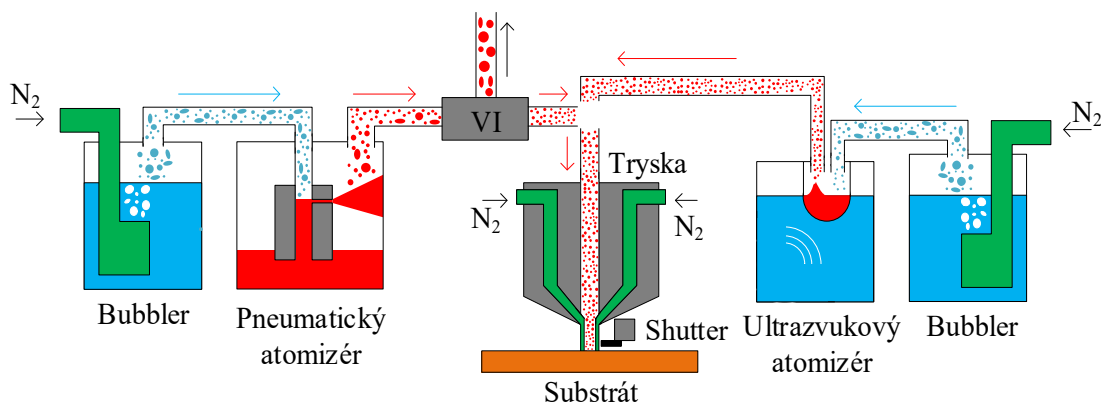
1.1.1.2 Vytváření struktur pomocí tisku

Proces vytváření 3D spojů pomocí tisku sestává z natisknutí materiálu na 3D substrát a následného sintrování. Jedná se o takzvaný funkční tisk, na který jsou kladeny jiné požadavky než na běžný grafický tisk. Ten je tvořen izolovanými oblastmi inkoustu a není proto vhodný pro využití v elektrotechnice. Funkční tisk musí být tvořen homogenní vrstvou, povrch musí být hladký s rozdíly v jednotkách nm a jeho tvar musí být přesně podle návrhu [12].

- **Aerosol-Jet®**

Nanášený materiál nevstupuje do procesu ve formě roztoku, nýbrž koloidní disperze. Koloidní disperze je mikroheterogenní látka obsahující částice velké od 1 nm do 500 nm (pro Aerosol-Jet® obvykle 50 nm). Obsah pevných částic je přibližně 60 – 70 % [3]. Tyto částice mohou sedimentovat. Klasický roztok je homogenní soustavou obsahující disperzní částice (molekuly nebo ionty) menší než 1 nm [13]. První částí, do které inkoust vstupuje, je bubbler. Ten obsahuje rozpouštědlo (voda, isopropylalkohol, aceton,...) a napomáhá tvorbě aerosolu v atomizéru. Atomizér je zařízení, které z inkoustu vytvoří aerosol, tedy směs částic v plynu. Jako inertní plyn je používán dusík. Existují dva typy atomizérů – pneumatický (PA) a ultrazvukový (UA) atomizér (obr. 5). PA vyrábí aerosol rozbíjením inkoustu o stěnu nádoby, zatímco UA vyrábí aerosol rozbíjením inkoustu ultrazvukovými vlnami. PA je vhodný pro inkousty o větší viskozitě ($\eta = 1-1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) s částicemi o velikosti až 500 nm, UA je vhodný pro inkousty menších viskozit ($\eta = 1-5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) s částicemi menšími než 100 nm [14]. Pro funkci PA je potřeba nejméně 30 ml inkoustu, zatímco pro správné fungování UA stačí pouze 1 ml inkoustu [15]. Aerosol cestou k trysce prochází skrz virtual impactor, který odsává přebytečný dusík stejně tak jako příliš velké částice inkoustu. To zaručí, že je aerosol v další části homogenní. Dále aerosol prochází skrz trysku s keramickými či ocelovými hroty. V této části je aerosol fokusován dusíkem, který jej obklopuje, do úzkého paprsku. To zároveň přináší další výhodu, a to že aerosol nepřichází do kontaktu s hroty trysky a nehrozí tak její ucpání. Aerosol vychází skrz trysku kontinuálně, to znamená, že pro přerušení paprsku je potřeba další části. Tou je mechanická uzávěrka (Shutter), která se při požadavku na zastavení paprsku rychle přesune pod trysku a zastaví depozici aerosolu na substrát.

Natisknutý inkoust je následně vytvrzován. Při tom dochází k oddělení tekutých částí inkoustu od pevných částic, které se roztaví a vytvoří koherentní vrstvu. Vytvrzování (sintrování) může probíhat v kontinuálním režimu s tiskovou hlavou pomocí laseru či UV světla (modrá LED zaostřena pomocí skleněných čoček). Výhodou laseru je, že je inkoust vytvrzován selektivně, a tedy nedochází k zahřívání celého substrátu. K tomu dochází při sintrování v peci. Substráty s nízkou teplotní odolností je nutné sintrovat při nižší teplotě, ovšem s nižší teplotou se doba sintrování prodlužuje. Například při sintrování inkoustu s částicemi stříbra se doba vytvrzování v peci pohybuje od 15 minut do 2 hodin [3].



Obr. 5 Technologie Aerosol-Jet® s pneumatickým a ultrazvukovým atomizérem (překresleno z [15])

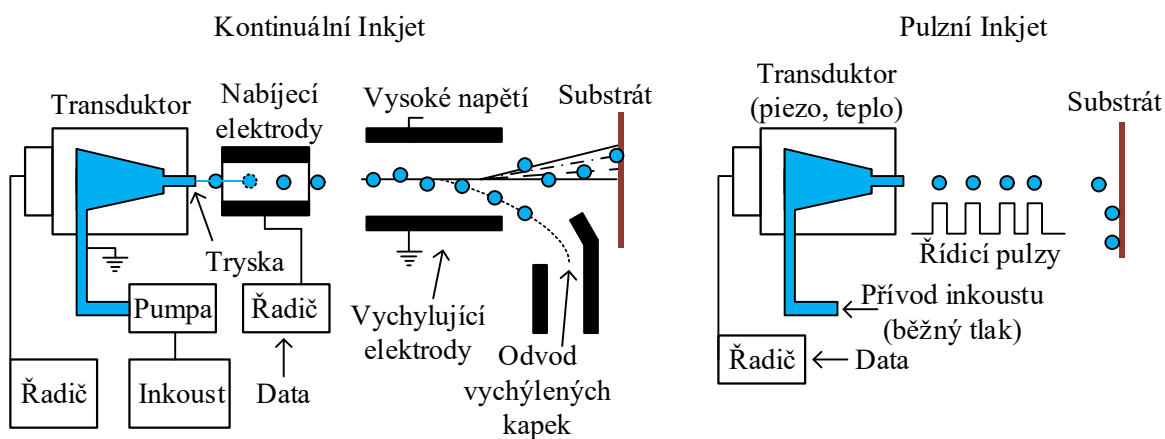
Šířka tištěných čar je od 8 [15] do 250 μm a jsou nanášeny rychlostí až 200 mm/s [3]. Při použití širší tiskové hlavy je možné dosáhnout šířky čar 1,3–1,5 mm (v závislosti na materiálu) při jednom průchodu [16]. Tloušťka tištěných čar je od 100 nm do 10 μm podle volby materiálu a rychlosti nanášení čar. Díky fokusování paprsku je možné tisknout se vzdáleností tiskové hlavy až 5 mm od substrátu [17]. To umožňuje tisk na malé nerovnosti na substrátu i bez změny polohy tiskové hlavy v ose Z. Maximální úhel mezi substrátem a osou tiskové hlavy činí 45 ° [18]. Pro tisk na členitý substrát, kde by úhel přesáhnul 45 °, se využívá šestiosých polohovacích systémů, kde je buďto pevně umístěna tisková hlava a je pohybováno se substrátem a nebo se tisková hlava pohybuje vůči pevně umístěnému substrátu [3], [18].

Tisknuté inkousty mohou plnit úlohu vodiče, polovodiče (organické polovodiče, uhlíkové nanotrubičky) nebo izolantu a adheziva (polyimid, PVP, ...), vodivé inkousty mohou být metalické (Cu, Ag, Au, Pt, Ni, Al) nebo nemetalické (SWCNT, MWCNT, PEDOT:PSS), odporové inkousty obsahují C nebo Ru, technologie také umožňuje tisk biologických materiálů (protein, DNA, enzymy) bez ztráty biologické aktivity [19] [18]. Je možné natisknout různé materiály přes sebe a vytvořit tak více vrstev či natisknout kombinované materiály. Například vodivé cesty mohou být překryty dielektrickou vrstvou polymeru a bránit tak korozi [17]. Substrátem mohou být plasty, kovy, polovodiče, keramika, sklo, papír či textilie. Je důležité, aby tisknutý materiál byl kompatibilní se substrátem (adheze, teplota vytvrzení). Zvolená kombinace materiálů je pro zaručení správné vodivosti, adheze a spolehlivosti důležitá zejména při tisknutí velmi tenkých struktur [3].

- **Inkjet**

Inkjet je další přímou selektivní aditivní technologií tisku struktur. Jde o starší technologii než je Aerosol-Jet®, a proto je možné vybrat z mnoha dodavatelů samotné technologie i inkoustů. Ty mohou opět plnit mnoho úloh od vodiče, přes polovodiče až k izolantům [3]. Částice obsažené v inkoustu mají obvykle velikost přibližně 50 nm. Aby nedocházelo k tzv. aglomeraci (shlukování nanočástic do větších celků), jsou nanočástice obaleny tenkou organickou vrstvou, která je odděluje. Po zahřátí inkoustu se tato vrstva rozpadne a částice odhalí. Dalším benefitem je snížení hustoty metalických nanočástic (v kombinaci nanočástice + organická vrstva). Díky tomu se těžké metalické nanočástice neusazují na dně nádoby s inkoustem. Nevýhodou organické vrstvy je omezená životnost inkoustu (maximálně 6 měsíců) [12]. Vhodné inkousty pro Inkjet by neměly přesáhnout hodnotu viskozity η 20 mPas pro správnou disperzi. Inkoust ve formě drobných kapek je na základní substrát vstřikován z tiskových trysek kadencí více jak 60 000 kapek za sekundu [20].

Dávkování kapek z tiskové hlavy může být nepřetržité (CIJ) nebo pulzní, tzv. na vyžádání (DoD) (obr. 6). CIJ dávkování je využíváno pro rychlý tisk vodivých cest o šířce 50-150 μm a tloušťce 2 μm . Zesílení může být dosaženo natisknutím dalších vrstev. Na místech, které nejsou určeny k potištění, se kapky inkoustu odklání pomocí elektrického pole. DoD dávkování umožňuje individuální dávkování kapek s větší přesností než CIJ, ovšem s menší rychlostí tisku [21].



Obr. 6 Kontinuální Inkjet a pulzní Inkjet (překresleno z [20])

DoD tiskové hlavy mohou obsahovat stovky či tisíce mikrotrysek, které mohou pracovat individuálně. U každé trysky se nachází malá komora se zásobou inkoustu. Princip generování kapek spočívá v řízeném zvýšení tlaku v této komoře. Regulací tlaku můžeme řídit objem i rychlost vypuzovaných kapek. Nejčastěji využívanými metodami pro vypuzování kapek jsou piezoelektrické a termální metody. Méně využívanými možnostmi jsou elektrostatické a akustické metody [20].

Piezoelektrický Inkjet tvoří piezoelektrický krystal, který působí na membránu komory (transduktor) s inkoustem (smrštění, stlačení, ohyb, stříh). Po přivedení napětí se piezo prvek mechanicky deformuje (smršťuje nebo roztahuje v závislosti na polaritě napětí) a mění objem komory. Tím dojde ke zvýšení tlaku v komoře a vypuzení kapky inkoustu z trysky. Termální Inkjet obsahuje integrovaný topný článek do stěny komory. Po přivedení pulzu dojde k rychlému zahřátí části inkoustu a jeho následnému vypaření. Vytvořená bublina prudce zvýší tlak v komoře (>100 bar) a umožní vypuzení kapky o dostatečném objemu a s dostatečnou rychlostí [3]. V tomto okamžiku je komora pouze částečně naplněna. K znovunaplnění komory dojde díky povrchovému napětí inkoustu, které musí být dostatečně velké. Zvětšující se viskozita inkoustu dobu naplnění zpomaluje, a proto je žádoucí, aby byla co nejmenší. Doba znovunaplnění se pohybuje v řádu desítek μs , vyšší doby mohou negativně ovlivňovat propustnost trysky (frekvenci vypuzování kapek) [20].

Kontinuální Inkjet využívá komory natlakované inkoustem. Odtud inkoust postupuje skrz trysku a tvoří proud inkoustu. Působením vibrací piezoelektrického aktuátoru je proud rozdělen na jednotlivé kapky periodickými signály, díky kterým jsou kapky synchronizovány a tvoří se stejně daleko od tiskové hlavy, mají stejný objem a stejnou rychlost (10 – 20 m/s). Z každé trysky může být každou sekundu vypuzeno až několik stovek tisíc kapek. Dále kapky letí kolem elektrod, kde se nabíjí. Následují elektrody, mezi kterými je vysoké napětí. Ty umožňují odklonění nabitých kapek na místech, kde nemá být materiál natisknut [20], [22].

Nevýhodou při tisku na 3D struktury je nutnost zachování 2 mm mezery mezi substrátem a tiskovou hlavou pro dosažení kvalitní vodivé cesty. Pro inkousty je důležitá nízká viskozita (do 20 mPas) a povrchové napětí (28 – 350 mN/m), které způsobuje kulovitý tvar kapek dopadajících na substrát. Vodivé, polovodivé i izolační inkousty jsou komerčně dostupné. Inkousty musí obsahovat nanočástice dostatečně malé na to, aby se předešlo

zanášení trysek. Kvalitu natisknutého motivu ovlivňuje volba inkoustu, jeho viskozita, velikost tisknutých kapek, substrát, kvalita tiskové hlavy a zachování správné mezery mezi tiskovou hlavou a substrátem. Natisknutý inkoust je vytvrzován stejnými způsoby používanými u technologie Aerosol-Jet® [3].

- ***Hot Embossing***

Základem je raznice, která je obvykle vyrobena z oceli a vanadu. Mosazné raznice mohou být použity pro výrobu o méně cyklech. Zvýšení životnosti raznice může být dosaženo nanesením další odolné vrstvy (například karbon). Elektromechanicky či hydraulicky poháněná raznice lisuje měděnou fólii na termoplastický substrát silou 70 - 90 N/mm². Raznice je zahřívána na teplotu až 300 °C a proces lisování trvá po dobu až 3 sekund. Na vzoru raznice je substrát roztaven a fólie tlakem vystřižena. Zbylá část fólie je odstraněna. Fólie se skládá ze tří vrstev. Svrchní metalizovaná vrstva (Sn, Ni, Au) brání oxidaci, zlepšuje pájitelnost a kontaktování. Prostřední je měděná vrstva o tloušťce typicky 18, 25 nebo 35 μm. Spodní vrstva zaručuje adhezi k substrátu. Tvoří ji lepivá vrstva (1–4 μm), která se vysokou teplotou při lisování aktivuje, a nebo velmi drsná vrstva oxidu, která se zapustí do rozpuštěného termoplastu a po vychladnutí poskytuje dostatečnou adhezi [3].

Technologie se vyznačuje malým počtem kroků, a tedy rychlostí vytváření vzoru. Po nalisování není potřeba dalších kroků (leptání, vytvrzování). Je vhodná pro velké série. Při změně návrhu je nutná změna raznice. Bez využití dalších procesů není možné realizovat vodivé cesty na vodorovných plochách či dokonce v dutinách. Lisování na nakloněné plochy je možné. Tloušťka lisované fólie přímo úměrně ovlivňuje minimální šířku vodivých cest a izolačních mezer. Pro Cu fólii o tloušťce 18 μm je minimální šířka cest a mezer 500 μm [3].

1.1.1.3 Vytváření struktur pomocí plazmy

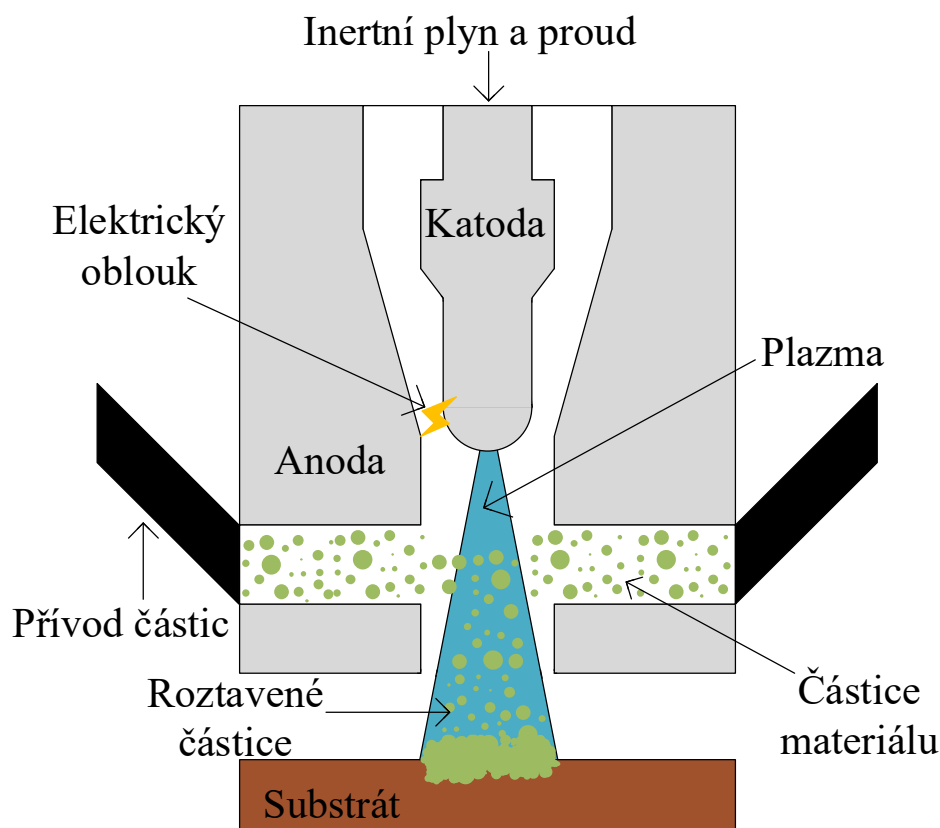
Metallický prášek obsahující nanočástice je při průchodu proudem plazmy roztaven a nanosen na substrát. Je tedy v jednom kroku vytvořena struktura, která je již vodivá, a u které není potřeba dalších úprav či metalizace.

- **Flamecon®**

Substrát musí být nejdříve očištěn a zdrsňen některou s dostupných metod, jako je laser nebo pískování. Řízený objem metalických nanočástic je vstřikován do komory, kde je plazmou roztaven a nosným plynem skrz trysku dopraven na povrch substrátu. Tloušťka nanosené vodivé čáry je 20–100 μm . Opakovaným vrstvením lze dosáhnout tloušťky až 1000 μm . Výhodou je rychlost nanášení vodivých vrstev a jejich vysoká proudová zatížitelnost. Nanášené cesty jsou pórovité a proto se jejich vodivost pohybuje kolem 50 % hodnoty, kterou by měl materiál jako celistvý [3]. Adhezi ovlivňuje volba materiálu metalických částic, jejich velikost a energie a rychlost při dopadu na substrát. Nanášeným kovem je Sn, Zn, Al, Cu [23]. Substrátem mohou být plasty, keramiky, dřeva či kovy. Technologie je stále vyvíjena [3].

- **Plasmadust®**

Plasmadust® je technologie charakteristická využitím studené plazmy, která má teplotu do 150 °C. Díky tomu je na povrchu substrátu relativně nízká teplota a je možné volit nové materiály. Nanášený materiál ve formě prášku s částicemi o velikosti 100 nm až 20 μm je umístěn v zásobnících či násypce, odkud je hadičkou s nosným plynem unášen k trysce plazmy. Pomocí vibračního oscilátoru je zaručeno neshlukování se jednotlivých částic a konstantní transport k trysce. Tisková hlava obsahuje dutou katodu, skrze kterou prochází inertní plyn (nejčastěji dusík), a anodu, která katodu obklopuje (obr. 7). Elektrický proud o vysoké frekvenci vytváří mezi katodou a anodou pulzující elektrický oblouk, který ionizuje procházející plyn a vytváří plazmu. Proud plazmy vytváří na substrátu zdrsňený povrch, na kterém roztavené částice snadno přilnou. Zároveň tyto malé částice před dopadem na substrát zchladnou na teplotu, která nedegraduje substrát [3].



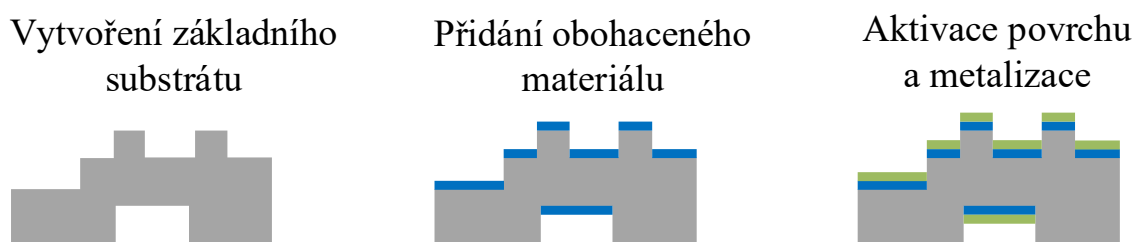
Obr. 7 Princip technologie Plasmadust® (překresleno z [24])

Dle počtu průchodů jedním bodem lze nanášet vrstvy o tloušťce 1–100 μm . Při nanášení vodivých čar není hrana čáry ostrá, ale dochází k nechtěnému rozprašování částic i mimo její okraj. Z tohoto důvodu je minimální šířka čáry 2–5 mm. Nanesením krycí masky lze dosáhnout šířky 200 μm , nicméně to prodlužuje jinak velmi krátký proces. Maximální rychlost vytváření struktury je 50 m/min. Nanášený materiál musí být dostupný ve formě prášku a schopný roztavení se ve studené plazmě. Mezi tyto materiály patří kovy (Cu, Al, Au, Sn, Te, Bi), polymery (PTFE, PE, ABS, PP), sklo, keramiky, polovodiče (CIGS) nebo minerály (sůl). Substrátem může být kov, plast, sklo, keramika, papír či textilie [3].

1.1.2 Two-shot molding

Two-shot molding byla první dostupnou metodou využívanou pro sériovou výrobu propojovacích zařízení. Jak název napovídá, je potřeba dvou různých materiálů. Prvním je obohacený (Pd, Fe, ...) plast, který je později možno selektivně pokovit a tvoří tak vodivou část, druhý materiál je obvykle polykarbonát, který plní funkci izolantu a mechanické

podpory [6], [7]. Po vylisování izolačního materiálu jsou v dalším kroku vyplněny dutiny materiálem, který lze pokovit (obr. 8). Druhým možným způsobem je vylisování materiálu, který lze pokovit, a následné překrytí izolačním materiálem. Hodnoty teplotních součinitelů roztažnosti obou materiálů se sobě musí co nejvíce blížit, problémem bývá dostatečně pevné spojení obou materiálů [7], [25]. Po chemické aktivaci povrchu je obohacená část chemicky pokovena. Minimální šířka vodivých čar a izolačních mezer je 200 - 250 μm , výhodou je malá cena za kus při velkovýrobě a možnost výroby libovolných tvarů [3].



Obr. 8 Postup výroby Two-shot (překresleno z [3])

1.1.3 Insert Molding (In-Mold)

In-Mold kombinuje flexibilní plošný spoj vyrobený v odděleném procesu s plastem, který tvoří mechanickou oporu. Flexibilní plošný spoj je vytvořen konvenčními technikami a plní tak spolehlivě funkci elektrického obvodu. Další možností je natisknutí vodivého inkoustu na fólii [26]. Fólie je vložena do formy, do které je následně vstříknut roztavený plast. V závislosti na způsobu vstříkování může být vytvořena různá struktura. Vstříknutím roztaveného plastu do uzavřené formy a následným částečným otevřením formy vznikne díky plynu odpařujícímu se z plastu lehký materiál s pórovitou strukturou, který je na povrchu hladký. Vstříknutím plastu do částečně otevřené formy a následným uzavřením vznikne díky tlaku plný pevný materiál. Vstříknutím plastu do otevřené formy (30 mm) a následným uzavřením pod tlakem se roztavený plast a fólie dostane do kontaktu až po uzavření formy. To sníží její teplotní namáhání a zároveň vznikne silná mechanická vazba mezi fólií a plastem [3].

Tab. 1 Srovnání technologií (převzato z [3])

	Minimální šířka vodiče [μm]	Svoboda 3D návrhu	Změna návrhu	Výběr materiálů	Počet kusů	Cena materiálu	Cena nástrojů	Investice do technologie
LPKF-LDS®	100	vysoká	snadná	střední	velký	vysoká	velmi nízká	střední - velká
ADDIMID	-	vysoká	snadná	velký	velký	střední	velmi nízká	střední - velká
MIPTec	50	vysoká	snadná	velmi malý	velký	vysoká	velmi nízká	střední - velká
Aerosol-Jet®	10	vysoká	snadná	velmi velký	malý	střední	střední	střední - velká
Inkjet	50	nízká	snadná	velmi velký	velký	střední	velmi nízká	velká
Hot Embossing	300	nízká	střední	velmi velký	velký	nízká	střední	nízká
Two-shot molding	150	velmi vysoká	velmi náročná	malý	velmi velký	nízká - střední	velmi vysoká	velmi velká
Insert molding	100	střední	snadná	velmi velký	velký	nízká - střední	vysoká	velmi velká
Flamecon®	-	střední	snadná	velký	střední	nízká	velmi nízká	střední - velká
Plasmadust®	200	střední	snadná	velký	střední	nízká	velmi nízká	střední - velká

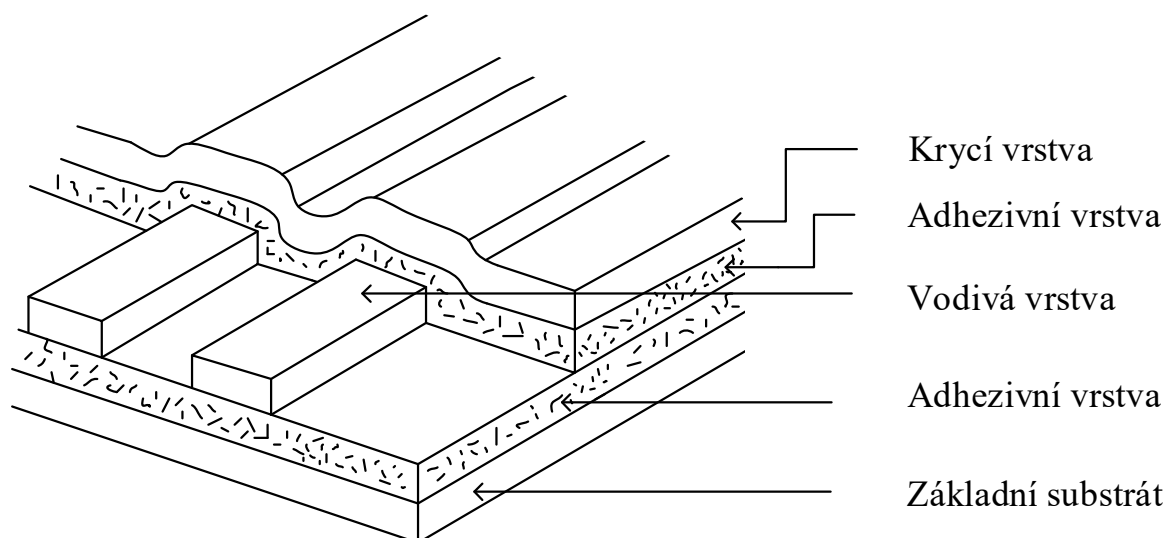
1.2 Flexibilní plošné spoje

Flexibilní plošné spoje jsou charakteristické svou ohebností. Na materiály používané při výrobě flexibilních plošných spojů jsou kladeny mnohé, někdy si přirozeně odporující, požadavky. Jedním z parametrů je rozměrová stabilita. Smrštění či roztažení základního materiálu může vést k chybám při výrobě či k selhání při provozu. Dále po základním materiálu požadujeme, aby byl teplotně odolný a odolal teplotám, kterým je vystaven při pájení. Na tento požadavek je třeba obzvláště dbát po nástupu bezolovnatých pájek. Ohebnost plošného spoje musí být zaručena při všech provozních teplotách a to zejména při teplotách nízkých, kdy se materiály stávají křehkými. Tenké vrstvy materiálu jsou náchylné k natržení, ovšem silnější vrstvy negativně ovlivňují ohebnost plošného spoje. Odolnost proti navlhnutí je důležitá jak při výrobě (laminace vrstev), tak i při provozu, kdy může dojít ke zhoršení dielektrických vlastností. Obvyklá hodnota dielektrické pevnosti materiálů používaných pro flexibilní plošné spoje je 1000–4000 V/mil. U vysokofrekvenčních obvodů je důležité impedanční přizpůsobení cest, nízký ztrátový činitel a relativní permitivita a navržení s ohledem na možné rušení. Tyto obvody obvykle mají více napájecích a zemnicích vrstev, které však snižují flexibilitu plošného spoje. Dalšími parametry při výběru vhodného materiálu jsou cena, dostupnost technologií pro jeho zpracování a složitost následné výroby, požadavky na skladování či vzájemná kompatibilita použitých materiálů. Výběr materiálů, který se řídí zmíněnými požadavky, je tedy vždy kompromisem mezi mechanickými a elektrickými vlastnostmi [27], [28].

1.2.1 Typy

1.2.1.1 Jednovrstvý

Jednovrstvý flexibilní plošný spoj se skládá z jediné vodivé vrstvy na základním substrátu (obr. 9). Z druhé strany vodivé cesty obklopuje a mechanicky chrání krycí vrstva, která je ekvivalentem nepájkivé masky z rigidních DPS. Na rozdíl od nepájkivé masky ovšem tato krycí vrstva odolává ohýbání. Mezi každou z vrstev se nachází adhezivní vrstva, s výjimkou konstrukcí, jež využívají laminátů bez adheziva. Každá z adhezivních vrstev má tloušťku 25–50 μm a navyšuje tak tloušťku celkové konstrukce. Substráty mají tloušťku 12,5–200 μm , nejčastěji bývá využita PI fólie o tloušťce 25 μm . Standardní vodivé vrstvy tvoří měděné fólie o tloušťce 18 a 35 μm . Tenké měděné fólie (9 a 12 μm) nejsou výjimkou [29].



Obr. 9 Struktura jednovrstvého flexibilního plošného spoje (překresleno z [29]).

Pomocí laseru je možné na požadovaných místech odstranit základní substrát a vytvořit tak flexibilní plošný spoj, jehož vodivé cesty jsou přístupné z obou stran (tzv. double access či back bared) [27].

1.2.1.2 Dvouvrstvý

Dvouvrstvý flexibilní plošný spoj obsahuje dvě vodivé vrstvy, které mohou a nemusí být vzájemně propojeny prokovenými otvory. K vodivým cestám lze tedy bez dalších výrobních procesů přistupovat z obou stran. Prokovené otvory jsou křehké a neměly by proto být umístěny do míst, kde je plošný spoj dynamicky ohýbán [27], [29].

1.2.1.3 Vícevrstvý

Jako vícevrstvé flexibilní plošné spoje se označují plošné spoje s více jak dvěma vodivými vrstvami. Jednotlivé vrstvy jsou vzájemně propojeny prokovenými otvory. Vrstvy k sobě nemusí být laminovány po celém obsahu. Toho se využívá zejména u aplikací vyžadujících maximální flexibilitu. Kolem prokovených otvorů musí být vrstvy vždy pevně propojeny [27], [29].

1.2.1.4 Flex-rigid

Flex-rigid plošné spoje kombinují rigidní a flexibilní plošné spoje laminované do jedné struktury. Rigidní části přináší výhodu rychlých výkonných obvodů, flexibilní části umožňují propojení a přizpůsobené umístění celého plošného spoje jako celku do zařízení, pro které je určen a vhodně navrhnut. Počet vrstev jednotlivých částí plošného spoje může být odlišný.

1.2.2 Materiály

1.2.2.1 Substráty

Substráty slouží jako základní nosná dielektrická vrstva, na kterou se za vysokého tlaku a teploty lisují další vrstvy. Většina substrátů je ve formě tenkých fólií průhledná (PET, PEN, LCP, PEEK a skloepoxid). Tenké PI fólie (Kapton®) jantarové barvy si zachovávají svou částečnou průhlednost. Se zvyšující se tloušťkou substrátu se fólie stávají matné a neprůhledné.

- ***Polyimid (PI)***

Polyimidové fólie jsou nejrozšířenějším substrátem. Jejich výhodou je výborná flexibilita ve velkém rozmezí teplot, dobré elektrické vlastnosti a mechanická odolnost (pevnost v tahu, odolnost proti roztržení). Jsou málo hořlavé a odolávají záření. Využívají se pro aplikace vyžadující vysokou spolehlivost a pro aplikace, kde je plošný spoj opakovaně ohýbán. Díky vysoké teplotní odolnosti jsou vhodné pro pájení. Nevýhodou je vyšší nasákavost, malá rozměrová stabilita a vyšší cena v porovnání s alternativními substráty. Na trhu se vykytují pod obchodními názvy Kapton®, Apical®, Kinel®, Vespel® nebo Upilex® [27], [29].

- ***Polyethylentereftalát (PET)***

PET fólie jsou dalším rozšířeným materiálem využívaným jako substrát pro flexibilní plošné spoje. Jde o nejčastěji využívaný termoplastický polyester, z toho důvodu je často

označován pouze jako polyester. Jako termoplast se při vyšších teplotách stává tvárným. Výhodou je jeho nízká cena, mechanická odolnost při běžných teplotách, nízká nasákavost a výborná rozměrová stabilita. Tenké vrstvy jsou průhledné, silnější vrstvy jsou matné. Zásadní nevýhodou je nemožnost pájení (výjimkou jsou speciální technologie pájení vyvinuté pro PET substráty). Při nízkých teplotách se materiál stává křehkým. Provozní teplota polyesteru je od -60 do 105 °C, zatímco polyimid je schopen pracovat v teplotách od -200 do 300 °C [30]. PET fólie jsou hořlavé a většina produktů nesplňuje bezpečnostní standard UL-94. Na trhu se vyskytují pod obchodními názvy Mylar®, Melinex® nebo Celanar® [27], [29].

- ***Polyethylennaftalát (PEN)***

PEN je po chemické stránce podobný PET. Jeho výhodou je vyšší teplotní odolnost. Zatímco PET fólie se začínají smršťovat při 150 °C, PEN fólie se smršťují od 190 °C a mohou být dlouhodobě provozovány při 155 °C. Také jsou odolnější vůči UV záření. Nevýhodou je jejich vyšší cena oproti PET a kratší životnost (méně ohýbacích cyklů). Na trhu se vyskytují pod obchodními názvy Teonex®, Kaladex® nebo Kalidar®.

- ***Polymery tekutých krystalů (LCP)***

Substráty na bázi tekutých krystalů se vyznačují výbornou rozměrovou stabilitou a vysokofrekvenčními vlastnostmi. Permittivita činí 2,9 a ztrátový činitel je 0,003. Z toho důvodu je jejich aplikace především v oblasti telekomunikací [31]. Díky nízké nasákavosti (0,02 – 0,1 %) není nutné fólii zbavovat vlhkosti jako je tomu například u PI fólií [27]. Na trhu se vyskytuje pod obchodním názvem Felios®.

- ***Polytetrafluorethylen (PTFE)***

PTFE fólie se vyznačují výbornou odolností proti většině chemikálií a stabilitou při vysokých teplotách. Nízké ztráty je předurčují pro vysokofrekvenční aplikace [29]. Mají špatné mechanické vlastnosti a rozměrovou stabilitu, malou odolnost proti záření a jejich

cena je vysoká [32]. Na trhu se vyskytují pod obchodními názvy Fluon®, Hostaflon® nebo Teflon®.

- ***Polyetheretherketon (PEEK)***

PEEK fólie jsou pevné, tvrdé, málo hořlavé a odolné vysokým teplotám, chemikáliím a záření. Mají dlouhou životnost při dynamickém namáhání. Díky nízké permitivitě a ztrátovému činiteli jsou vhodné pro vysokofrekvenční aplikace [29]. Jejich výroba je složitá a drahá. Na trhu se vyskytují pod obchodními názvy Victrex® nebo Vestakeep® [33].

- ***Tenká tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí)***

Tenký (< 200 μm) skloepoxidový substrát známý z rigidních plošných spojů lze použít také pro flexibilní plošný spoj. Jeho flexibilita však nedosahuje kvalit alternativních substrátů. Není vhodný pro dynamické ohýbání. Výhodou je možnost použití standardních výrobních a osazovacích procesů z rigidních plošných spojů [29].

Tab. 2 Přehled vlastností materiálů flexibilních substrátů [27], [29]

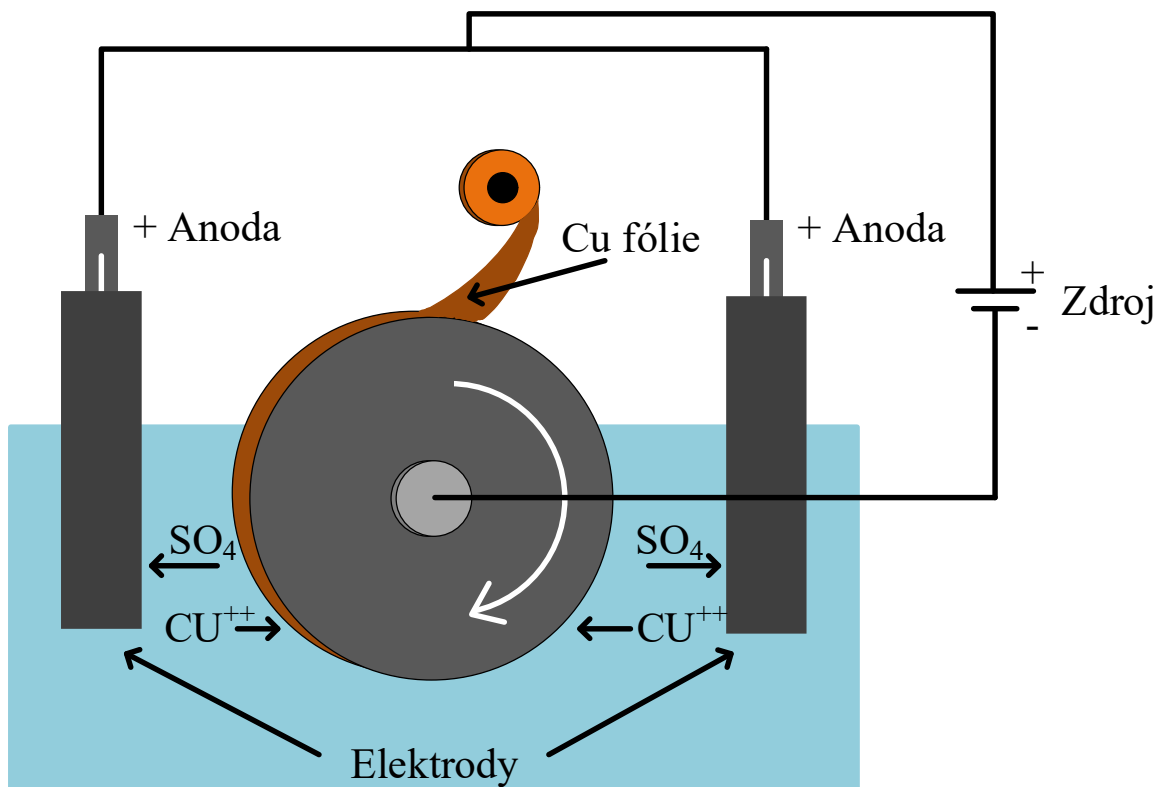
	PI (Kapton)	PET (Mylar)	PEN (Teonex)	LCP (Felios)	PTFE (Teflon)	PEEK	Skloepoxid
T_g [°C]	360	78	120	343	260	289	140
T_m [°C]	-	250	>250	626	335	644	-
Pájitelnost	Ano	Omezená	Omezená	Ano	Ano	Ano	Ano
Tloušťka [μm]	12,5-125	25–188	12–250	25–100	>25	50	100–200
ε_r	3,5	3,2	2,9	2,9	2,5	3,3	4,7
tg δ	0,003	0,005	0,004	0,003	0,0002	0,005	0,015
E_p (25 μm) [kV/mm]	303	275,6	295,3	236,2	196,9	110–150	-
Nasákavost (24 h) [%]	1,3–3,0	<0,08	1,00	0,02–0,10	<0,01	0,10	0,18
CTE [10⁻⁶ K⁻¹]	20	20–80	20	18	0,013	47	36
Cena	Vysoká	Nízká	Střední	Nízká	Vysoká	Vysoká	Střední

1.2.2.2 Vodivé vrstvy

Jako vodivé vrstvy se ve většině případů používají měděné fólie. Struktura fólie, která je dána způsobem výroby, určuje vhodnost pro využití ve flexibilních plošných spojích.

- **Elektrolytická měď (ED)**

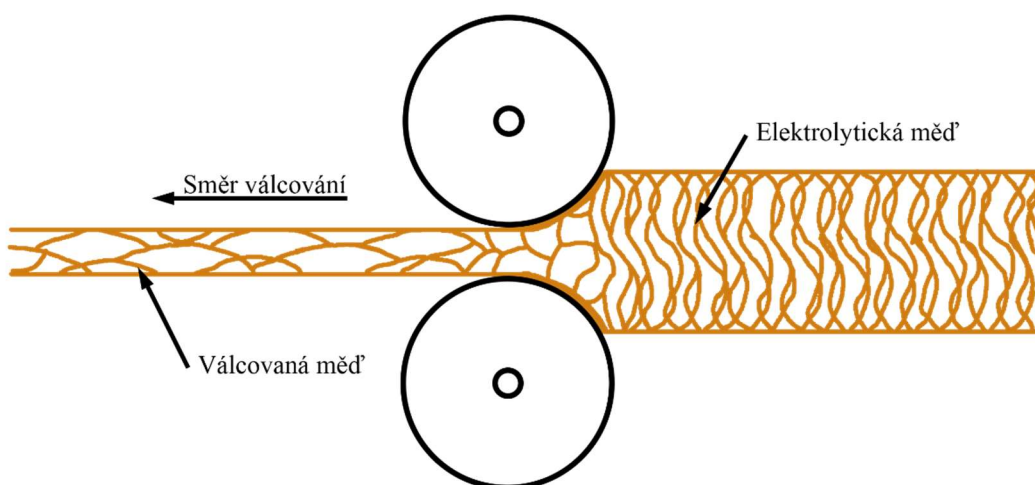
Struktura elektrolytické mědi není vhodná pro ohyb. Částice mědi vytvoří sloupcovitou strukturu a měděná fólie má tendenci praskat. Během výroby přechází částice mědi z elektrod na otáčející se válec a tvoří tak fólii (obr. 10). Zušlechťováním při vysoké teplotě je však možné upravit strukturu částic tak, aby byla po rekrystalizaci podobná struktuře RA mědi. Takto upravená měď se označuje ED-HD [27].



Obr. 10 Výroba elektrolytické mědi (překresleno z [34])

- **Válcovaná měď (RA)**

Částice RA mědi mají vodorovné uspořádání a jsou vhodné pro ohýbání (obr. 11). Tato struktura ovšem komplikuje leptání. Mimo flexibilní plošné spoje se RA fólie používá také pro vysokofrekvenční obvody, kde lze díky jejímu hladkému válcovanému povrchu dosáhnout menších ztrát. Nevýhodou hladkého povrchu je špatná adheze dalších vrstev [35]. RA fólie jsou dražší než ED, a to zejména při tloušťce menší než 18 μm [27].



Obr. 11 Proces válcování mědi – sloupcovitá struktura se mění na vodorovnou (překresleno z [36]).

Tab. 3: Porovnání vlastností vodivých vrstev [27], [29]

	Drsnost povrchu [μm]	Cena	Standardní tloušťky [μm]	ρ [$\Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{-6}$]	Pevnost v tahu [Mpa]
ED	8	Nízká	9, 12, 18, 35, 70	1,77	172,4
ED-HD	10	Střední	18, 35		
RA	<3,5	Vysoká	12, 18, 35, 70	1,67	220,6

- ***Přímé pokovení substrátu***

Měděnou vrstvu lze na substrát také přímo nanést kombinací chemického a galvanického pokovení bez použití adheziv [36]. Takto vytvořená vodivá vrstva má amorfni strukturu a může vykazovat stejné, či dokonce lepší vlastnosti než válcovaná měď [27].

1.2.2.3 Adhezivní vrstvy

Adhezivní vrstvy jsou použity pro spojení vodivé vrstvy se substrátem, stejně tak jako pro spojení laminátu (substrát, adhezivní a vodivá vrstva) při výrobě vícevrstevých flexibilních plošných spojů. Použitý materiál musí být kompatibilní s materiálem použitým pro substrát [27], [29].

- ***Polyimid***

Polyimidové adhezivní vrstvy vyžadují vysoký tlak a teplotu při laminaci. Z tohoto důvodu je jejich využití omezeno pouze pro PI substráty. Objevuje se tedy především v aplikacích vyžadujících vysokou teplotní odolnost. Výhodou je nízký koeficient teplotní roztažnosti [27].

- ***Polyester***

PET adhezivní vrstvy jsou obvykle používány s PET substráty, mohou však být využity i pro jiné substráty. Výhodou je nízká cena a nízká teplota potřebná při laminaci vrstev. Nevýhodou je stejně jako pro PET substrát nízká teplotní odolnost limitující oblasti využití [27].

- ***Epoxidová pryskyřice***

Epoxidová pryskyřice jako adhezivní vrstva je schopna vytvořit pevnou vazbu mezi různými materiály od kovů, keramik po polymery. Odolává vysokým teplotám. Nevýhodou je vyšší nasákavost a její křehkost [27].

- ***Akrylová pryskyřice***

Akrylová pryskyřice byla zprvu nejpopulárnější adhezivní vrstvou díky výborné adhezi k různým materiálům, snadnému zpracování a dobré teplotní odolnosti umožňující pájení. Není odolná alkalickým roztokům. Vyšší koeficient teplotní roztažnosti způsobuje praskliny při využití u vícevrstvých a flex-rigid plošných spojů [27].

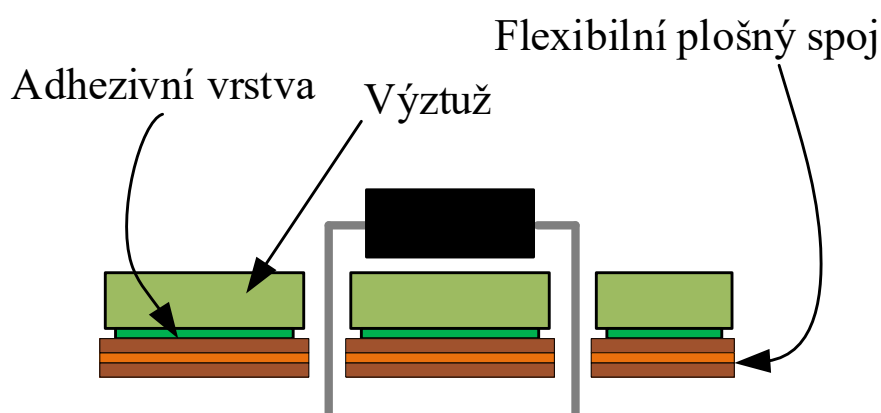
1.2.2.4 Krycí vrstvy (coverlay)

Ze stejných materiálů jako substráty jsou vyrobeny také krycí vrstvy. Ty slouží jako nepájitvá maska, ale také jako ochrana před mechanickým poškozením vodivých cest. Mohou být nanášeny ve formě fólie, která je pokryta pryskyřicí pro zajištění přilnavosti. I při skladování za vyhovujících podmínek však u pryskyřice dochází ke ztrátě schopnosti vytvoření dostatečné adheze a musí být proto zpracována v řádu několika týdnů. Další možností je nanesení vrstvy pomocí sítotisku. K tomu musí být využito speciálních pryskyřic, které po vytvrzení odolají ohýbání. Standardní materiály používané pro rigidní DPS při ohýbání praskají či se vrstva odloupne. Nevýhodou sítotisku je malé rozlišení tisknutého vzoru, které může být limitující. Zároveň i přes použití speciálních pryskyřic nejsou vhodné pro dynamické ohýbání. Posledním typem jsou fotocitlivé vrstvy (PIC) nanášené ve formě kapaliny (nízká cena) či fólie (lepší vlastnosti), které mají větší rozlišení než při nanášení pomocí sítotisku [27], [29].

1.2.2.5 Výztuže

Výztuže nejsou součástí elektrického obvodu desky plošného spoje. Používají se tam, kde je potřeba vytvoření rigidní části na flexibilní oblasti plošného spoje. Obvykle jsou

umístěny na namáhaná místa, jako jsou konektory nebo například na místa osazení součástek, kde je potřeba spoj vyztužit tak, aby byl připraven nést váhu součástky (obr. 12) [37]. Výztuže jsou na flexibilní plošný spoj aplikovány pomocí stejných adheziv, které se používají pro laminaci vrstev. Je také možné použít adheziva citlivá na tlak (PSA), tekutá adheziva na bázi pryskyřice nebo adheziva, která jsou vytvrzována UV zářením [27]. Volba materiálu nejvíce záleží na požadované tloušťce. Nejtenčí jsou materiály jako polyimid (25-125 μm) a polyester (25-250 μm). Další používané materiály jsou papír a fenol (500-2500 μm) nebo kovy (hliník, korozivzdorná ocel). Častou metodou vyztužení části plošného spoje je přidání další krycí vrstvy [27], [29].



Obr. 12 Způsob využití výztuže pro podporu osazené součástky (překresleno z [27])

2 Přehled návrhových programů

Návrhové programy přináší nespočet výhod a proto se staly nezbytnou součástí vývoje elektronického zařízení – umožňují vytvoření modelu a otestování jeho funkcí pomocí simulací, vizualizaci finálního výrobku s možností včasné změny návrhu, simultánní práci na výrobku mezi odděleními a rychlé uvedení na trh. Běžné je paralelní využití 2D ECAD a 3D MCAD programů, které si mezi sebou předávají data ve speciálních formátech (IDF, IDX, STEP) [38]. Tento způsob návrhu je však zbytečně komplikovaný a vyžaduje opakované předávání si návrhu při úpravě mechanické či elektrické části. Základní tvar je navržen v MCAD programu, ten je poté převeden do formátu, který je kompatibilní s oběma návrhovými prostředími, a jeho obrys naimportován do ECAD programu, kde se umístí komponenty, vytvoří vodivé cesty a proběhnou elektrické simulace (EMC, SI). Po převedení do MCAD proběhnou mechanické simulace a ověří se, že obrysy součástek nezasahují do stejného prostoru a že jsou všechny konektory dostupné. V případě nevyhovujícího

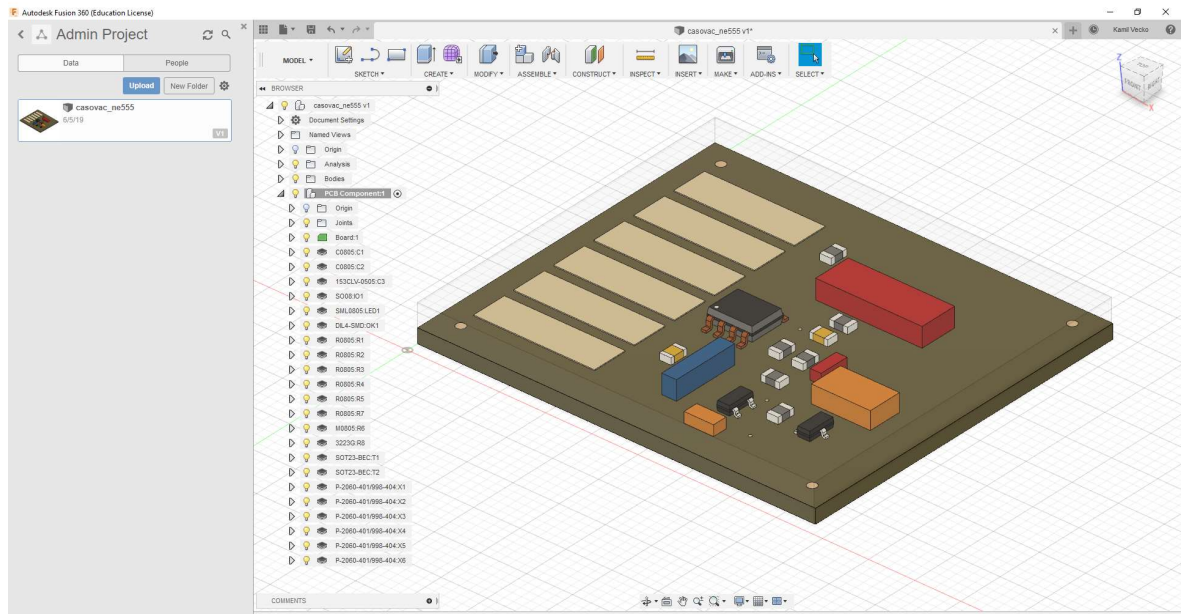
výsledku musí dojít ke změně rozmístění součástek a k novému rozmístění vodivých cest, tím se celý proces vrací o krok zpět a zpomaluje [3].

Většina ECAD návrhových programů dnes umožňuje 3D vizualizaci rovinné DPS, knihovny součástek obsahují 3D pouzdro (footprint) součástky, chybějící pouzdro je možné vytvořit. Díky tomu lze odhalit kolize osazených součástek v prostoru. Navrhování plošných spojů přímo na 3D nebo flexibilní substrát není standardem, ale je jedním ze směrů, kam se vývoj návrhových programů ubírá. Vznikají tak nástroje propojující dvě disciplíny kombinující ECAD a MCAD.

2.1 Autodesk Eagle (verze 9.4.1)

Autodesk Eagle nepodporuje návrh 3D plošných spojů. Možné je pouze vytvoření rovinné DPS a její propojení s mechanickou částí. Možností, jak navrhnout flexibilní plošný spoj, je využití dalších vrstev, na kterých definujeme jednotlivé vrstvy flexibilního plošného spoje. V takovém případě je při tvorbě výrobních podkladů nutné každou z vrstev exportovat individuálně a předat výrobcí plošného spoje spolu s informací o její funkci.

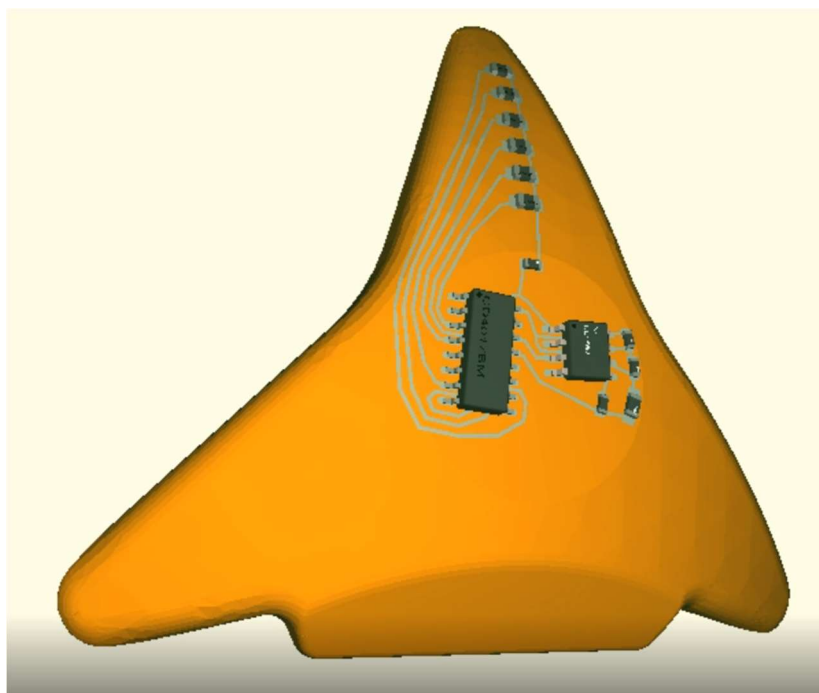
Eagle od verze 8.3 umožňuje spolupráci s programem Fusion 360 bez nutnosti využití meziformátů, které se běžně využívají pro přenos dat mezi ECAD a MCAD. Návrh elektrické a mechanické části je spolu provázán a během vývoje synchronizován. Změny provedené na jedné straně návrhu se projeví na straně druhé. Fusion 360 slouží také jako vizualizace plošného spoje (obr. 13). Součástky, které neobsahují 3D model svého pouzdra jsou vykresleny jako kvádry. V případě nalezené kolize součástek lze součástky přemístit i v mechanické části návrhu. S návrhem lze začít v obou programech. Eagle umožňuje tvar desky definovat importováním DXF souboru či nakreslením na plátně a předat programu Fusion 360 (Push to Fusion). Druhou možností je tvar desky určit ve Fusion 360 a předat programu Eagle (Pull from Fusion). V případě, že při dalším návrhu zjistíme kolizi mezi mechanickou částí a deskou, lze přímo ve Fusion 360 upravit její tvar. Celý návrh mechanické části s umístěnou deskou lze zobrazit také v řezu.



Obr. 13 Vizualizace plošného spoje ve Fusion 360

2.2 Target 3001!

Target 3001! je zajímavý zejména podporou návrhu MID (obr. 14), která není u ECAD programů obvyklá. Dalším zástupcem programů podporující návrh MID je například Nextra® od společnosti Mecadtron. Ta je sice komplexnějším nástrojem umožňující MID i flex návrh, jeho dostupnost však není na úrovni programů zmiňovaných v této práci.



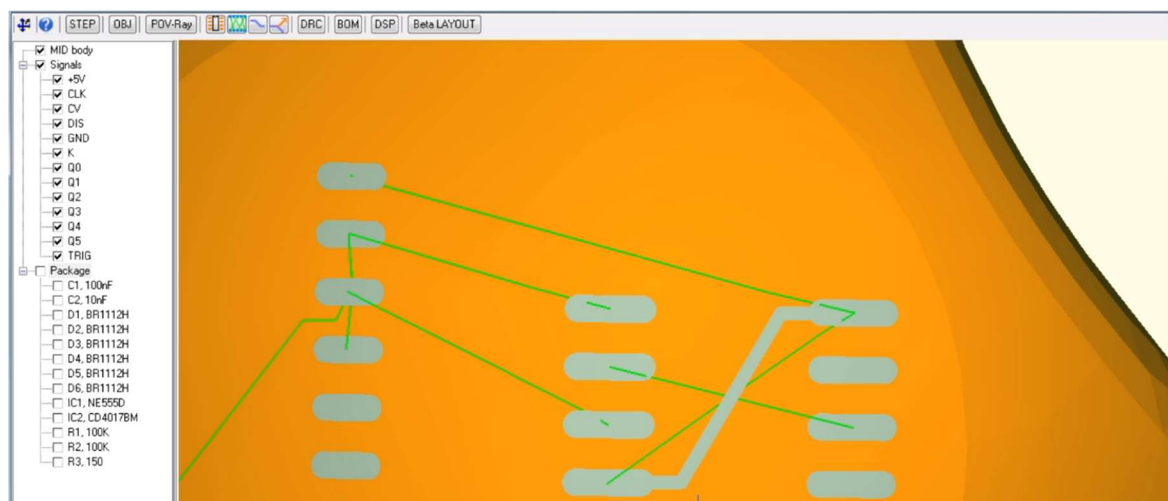
Obr. 14 Návrh na 3D substrátu v prostředí Target 3001!

- **Flex a Flex-rigid**

Pro definování flexibilní části je vytvořena zvláštní vrstva Flexoutline, která slouží k definování obrysu flexibilní fólie. Rigidní části jsou definovány na vrstvě Outline. Software vyhodnotí překrytí vrstev a barevně odliší flexibilní a rigidní části plošného spoje. Nelze definovat místa ohybu, jejich vlastnosti ani vizualizovat plošný spoj v ohnutém stavu. Z praktického hlediska se tedy nejedná o velký přínos oproti Autodesk Eagle.

- **MID**

Target3001! umožňuje importování 3D modelu ve formátu STEP vytvořeného v MCAD návrhovém programu. Na ten lze v 3D zobrazení umístit 3D motivy komponent použitých ve schématu. Komponenty lze rotovat a rozmístit po celém obsahu 3D modelu (substrátu). Po umístění komponent se zobrazí propojení dle schématu tak, jak je tomu zvykem u 2D ECAD návrhových prostředí (obr. 15). Na 3D prostoru probíhá také kreslení vodivých cest. DRC je upraveno pro správné fungování nejen v planární oblasti. Program generuje výstupní data ve formátu 3D STEP vhodná pro komunikaci s programem LPKF Circuit-Pro, který se používá při výrobě MID technologií LPKF-LDS®.



Obr. 15 Vodivé cesty na 3D substrátu

2.3 OrCAD PCB Designer Lite 17.2

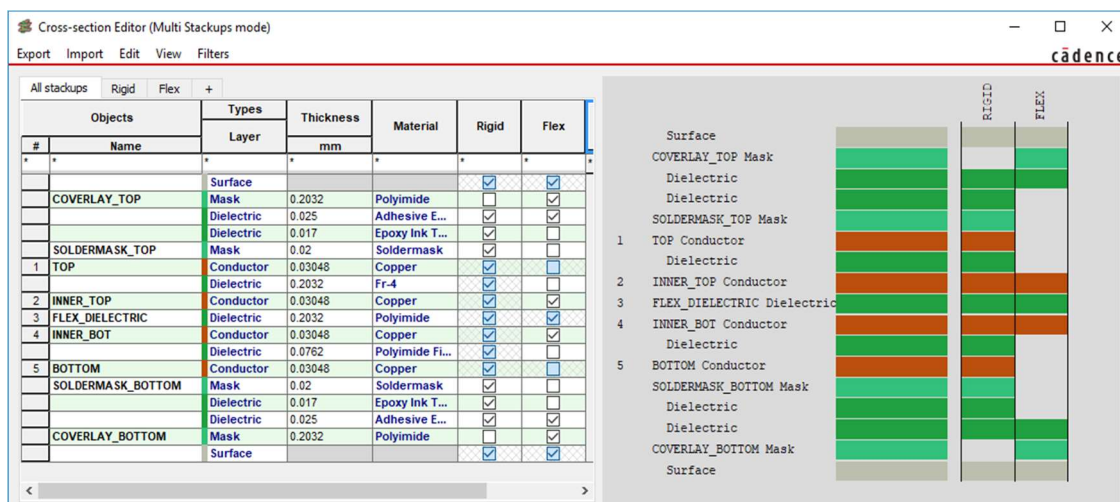
OrCAD PCB Designer Lite je časově neomezená verze, která obsahuje všechny funkce komerčně využívaných verzí. Omezení této zkušební verze je pouze ve velikosti a složitosti

návrhu. Profesionálně využívané verze se dělí podle počtu funkcí na základní verzi Standard, vyšší verzi Professional a nejvyšší verzi Allegro.

- ***Flex a Flex-rigid***

Podporu návrhu flexibilních plošných spojů obsahují pouze vyšší verze Professional a Allegro. Allegro nemá žádné přidání funkce pro návrh flexibilních plošných spojů a proto jsou obě verze z tohoto hlediska rovnocenné.

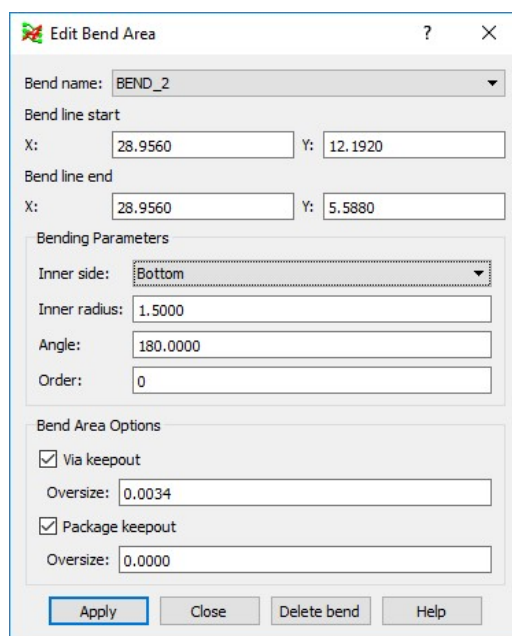
Obrys desky je možné definovat pomocí funkcí pro kreslení tvarů nebo importovat v některém z formátů DXF, IDF a IDX. Rozdělení do jednotlivých oblastí probíhá v okně Zone Manager. Ke každé zóně je přiřazen laminát, ze kterého je tvořena. Jednotlivé vrstvy použitých materiálů jsou definovány v Cross-section editoru (obr. 16). Každá z vrstev je jednoznačně pojmenována, je definován její účel, tloušťka a materiál. Pro definování více typů vrstev je nutné aktivovat možnost Multi Stackups mode. Nadefinované složení vrstev zde lze také importovat ve formátu IPC-2581.



Obr. 16 Návrhové prostředí OrCAD PCB Designer – definování vrstev použitého materiálu pro flex a rigid část návrhu

OrCAD PCB Designer má předdefinované vrstvy rozdělené do tříd dle jejich využití. Aby bylo možné nastavit místa ohybu, je nutné definovat obrys desky na vrstvě Design_Outline ze třídy Board Geometry. Vrstva Outline ze stejné třídy slouží pouze jako grafický obrys a přidání ohybů neumožňuje.

Vrstvami určujícími místa ohybu jsou Bend_Area a Bend_Line třídy Rigid Flex. V okně Edit Bend Area (obr. 17) je ohyb definován čarou, která prochází přes zónu s definovaným flexibilním laminátem. Dále je určen poloměrem a maximálním úhlem. Směr ohybu se nastaví určením strany (Top/Bottom). Pro případ více míst ohybu na plošném spoji se určuje pořadí, ve kterém se plošný spoj skládá. Před přechodem do 3D zobrazení je nutné určit část spoje, vůči které se budou ostatní části pohybovat. K tomu slouží funkce Anchor 3D View.



Obr. 17 Nastavení parametrů ohybu

Po přechodu do 3D zobrazení lze ověřit správnost návrhu v celém rozsahu ohybu. Zde je také záložka Collision Detection, kde se po spuštění testu vypíše případné kolize mezi součástkami či částmi plošného spoje. V případě kolize částí plošného spoje či osazených součástek dojde k zvýraznění blikáním a výpisu informací o místech kolize. Označení součástky či vodivé cesty na 2D nebo 3D plátně při spuštění 3D zobrazení způsobí zvýraznění stejného objektu na druhém plátně.

Pouzdra součástek lze importovat ve formátu STEP a přiřadit pomocí funkce STEP Mapping. Stejnou funkcí lze importovat mechanické části a kryty. Pro přehlednost lze v 3D zobrazení deaktivovat viditelnost těchto částí. Zároveň je možné zobrazit řez celým plošným

spojem včetně mechanických částí. Funkce pro výpočet kolizí je tedy vhodná i pro ověření správného rozmístění součástek vzhledem k mechanické části, například krytu zařízení, a dostupnosti konektorů či viditelnosti indikačních LED.

2.4 Mentor PADS Pro Layout VX.2.5

- *Flex a Flex-rigid*

Obrys desky plošného spoje lze nakreslit na plátně pomocí funkcí pro kreslení a nebo importovat z MCAD programů ve formátu DXF a IDF. Pro práci na flex-rigid plošném spoji je nutné program přepnout do licence PADS Professional Rigid Flex. V dalším kroku je potřeba v nastavení změnit technologii desky z PCB na RigidFlex. Tím je aktivována možnost rozdělení desky do regionů, určení míst ohybu a přidány další typy dielektrických vrstev.

Složení vrstev laminátů se nastaví ve Stackup Editoru. Každá vrstva obsahuje jednoznačný název, typ (dielektrická, vodivá), informace o využití (substrát, flexibilní substrát, adhezivní vrstva, ...), tloušťce, permitivitě a dalších vlastnostech. Nejprve je definován laminát obsahující všechny vrstvy (Master Stackup) a z něho jsou vybírány jednotlivé vrstvy pro lamináty využívané v regionech. Regiony jsou kresleny funkcí Board Outline. Takto nakreslené regiony musí mít nejméně jednu společnou stranu s dalším regionem. Regionům, které se překrývají, není možné přiřadit stejnou vrstvu. V nastavení regionu se definuje jeho typ (Flex, Rigid) a přiřadí laminát (Stackup).

Místo ohybu se definuje funkcí Bend Area. Po vyvolání funkce se zobrazí okno vlastností ohybu s nabídkou přednastavených regionů. Zde se také nastavuje poloměr ohybu, jeho směr a maximální úhel. Po přepnutí do 3D zobrazení lze ověřit správnost návrhu. Případné změny lze provést ve 3D zobrazení a projeví se ve 2D návrhu.

2.5 Altium Designer (verze 19.1.5)

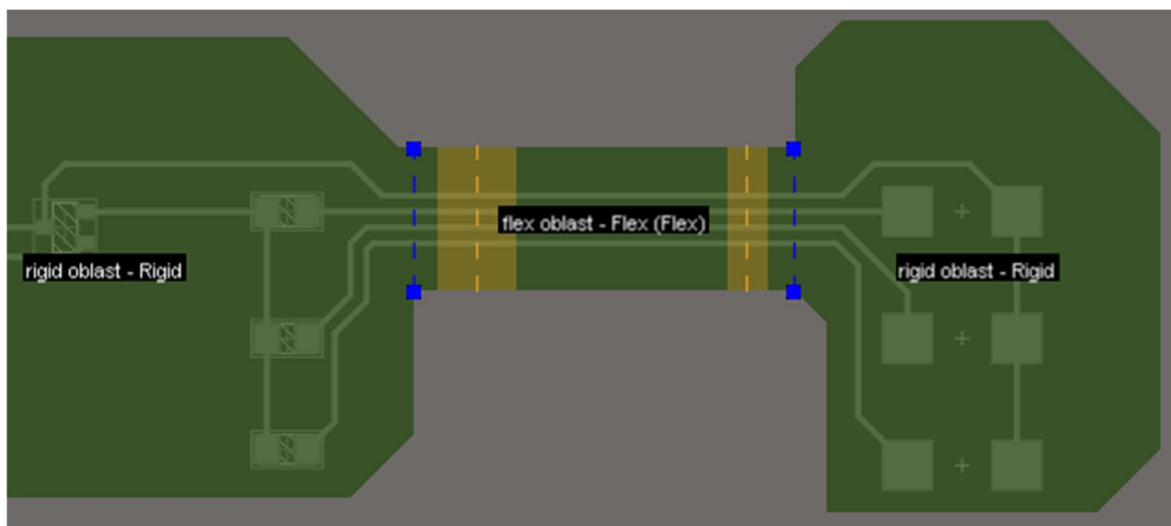
- *Flex a Flex-rigid*

Altium Designer (AD) pracuje v režimu návrhu DPS, ve 2D a 3D režimu zobrazení, mezi kterými lze jednoduše přepínat pomocí klávesových zkratk. Obrys desky plošného

spoje lze definovat v AD, importovat ve formátu DWG/DXF nebo definovat z importovaného 3D modelu ve formátu STEP. Výsledný tvar desky bude kopírovat tvar 3D objektu v rovině XY, není tedy možné vytvořit jinou než rovinnou desku.

Celá DPS se dále rozdělí do podoblastí (obr. 18), kterým lze následně přiřadit různé druhy laminátu a definovat jejich vlastnosti. K tomu slouží Layer Stack Manager (příloha H), kde je možné nakonfigurovat lamináty složené z jednotlivých vrstev. Každá z vrstev obsahuje informace o materiálu, tloušťce, funkci, teplotě skelného přechodu, výrobci, dielektrika obsahují hodnoty permitivity a ztrátový úhel. Lze vytvořit libovolné množství rozdílných flexibilních i rigidních laminátů, které je možné vizualizovat a porovnat jednotlivé na sebe navazující vrstvy přehledně vedle sebe. Každé z podoblastí je přiřazen druh nakonfigurovaného laminátu, jedna z podoblastí musí být pevně uzamčena, ostatní podoblasti se při 3D vizualizaci ohýbají vzhledem k této oblasti.

Každé flexibilní oblasti je nastaveno minimálně jedno místo ohybu (obr. 18). Ohyb je definován úhlem při maximálním složení, poloměrem oblouku či jeho délkou. Každý ohyb obsahuje index, který určuje v jakém pořadí dojde ke složení jednotlivých oblastí.



Obr. 18 Deska obsahující dvě rigidní a jednu flexibilní oblast se dvěma místy ohybu

- ***Tištěná elektronika***

AD od verze 19 podporuje také tištěnou elektroniku. Na vývoji se podílela firma TactoTek [26], která pro svou výrobu využívá technologie In-Mold (kapitola 1.1.3), ovšem pro jednoduchost návrhu, výroby i osazení dochází k vytvarování do konečného 3D tvaru

až v posledním kroku celého procesu. Opět se tedy jedná o návrh ve 2D prostou s výhodami pro 3D aplikaci.

Tištění vodivých cest je aditivní proces, výrobek se tedy neskládá z několika vrstev a každá z cest leží přímo na substrátu. V případě křížení cest různých signálů je část, kde se spoje kříží, potištěna vrstvou dielektrika. Layer Stack Manager umožňuje přepnutí do režimu tištěné elektroniky (příloha x) a definování vrstev vodivých a nevodivých inkoustů. Vytváření vodivých cest musí proběhnout na vodivých vrstvách s využitím prokovených otvorů. Na místa křížení je možné nanést nevodivou vrstvu manuálně (pomocí funkcí pro kreslení geometrických tvarů), nebo využít automatického generátoru tvarů, který na místech křížení vytvoří vrstvu dielektrika. K tomu je potřeba mít nainstalované rozšíření Patterns Generator. Fungování DRC je při režimu tištěné elektroniky odlišné. Kontrola návrhových pravidel neprobíhá izolovaně na jednotlivých vrstvách, ale na návrhu jako celku (ve skutečnosti se nejedná o vrstvy, pouze je s nimi tak pracováno).

Tab. 4 Porovnání návrhových programů

	Import (výběr)	Export (výběr)	Vizualizace rovinné DPS	Vizualizace 3D DPS	Flex-rigid	MID
Autodesk Eagle	BMP, DXF	DXF, IDF 3D, IPC	Ano	Ne	Ne	Ne
Target3001!	DXF, BMP, STEP 3D	STEP 3D, OBJ	Ano	MID	Omezeně	Ano
OrCad PCB Designer	DXF, IDF, IDX	ODB++, DXF, IDF, IDX, STEP, 3D PDF	Ano	Ano	Ano	Ne
Mentor PADS	DXF, IDF, IDX, STEP	ODB++, DXF, STEP	Ano	Ano	Ano	Ne
Altium Designer	DXF, DWG, STEP	ODB++, DXF, STEP	Ano	Ano	Ano	Ne

3 Realizace plošného spoje

3.1 Představení plošného spoje

Navrhovaný flexibilní plošný spoj je určen pro osazení do modelu ruky (příloha A), který slouží pro testování úrovně tepelné ochrany rukavic. Model je osazen více jak 200 teplotními senzory.

V dutém modelu ruky je z vnitřní strany vytvořeno několik drážek určených pro osazení plošným spojem se senzory. Drážky jsou orientovány v podélném směru od předloktí až ke konečkům jednotlivých prstů a jsou rozmístěny po celém obvodu ruky pro potenciální získání co možná největšího počtu dat při testování. Každá z drážek obsahuje rovnoměrně rozmístěné dutiny prostupující na vnější povrch pro umístění senzorů. Úkolem bylo navrhnout plošný spoj pro drážku mezi palcem a ukazováčkem na levé straně dlaně (příloha B) obsahující celkem 12 teplotních senzorů TMP05.

TMP05 je monolitický teplotní senzor, který na výstupu generuje PWM signál přímo úměrný teplotě. Doba T_H [ms], po kterou se signál nachází ve stavu log 1, je konstantní, zatímco doba T_L [ms] pro log 0 se mění spolu s teplotou. Výsledná teplota je dána vztahem:

$$t = 421 - 751 \cdot \frac{T_H}{T_L}, \quad (1)$$

kde t je teplota [°C], T_H je doba trvání signálu log 1 [ms] a T_L je doba trvání signálu log 0 [ms].

Senzor má celkem 5 pinů:

- GND
- V_{DD} – je doporučeno co nejbližší umístění 100 nF blokovacího kondenzátoru
- IN – digitální vstup
- OUT – digitální výstup
- FUNC – digitální vstup pro volbu pracovního módu

Pro navrhovaný plošný spoj je vhodné zapojení senzorů do série. Tomuto módu (Daisy-Chain Mode) odpovídá log 1 na vstupu FUNC. Počáteční pulz prostupuje z výstupu prvního senzoru na vstup následujícího senzoru. Každý senzor uchovává informaci o předchozím měření teploty (průběh signálu) a předává ji dále.

Tab. 5 Technické údaje TMP05B [39]

Přesnost	[°C]	Podmínky			
		±1	0	- +70 °C,	3,135
		-1/+1,5	0	- +70 °C,	4,5 - 5,5 V
		±1,5	-40	- +70 °C,	3,0 - 3,6 V, 4,5 - 5,5 V
		±2	-40	- +100 °C,	3,0 - 3,6 V, 4,5 - 5,5 V
		±2,5	-40	- +125 °C,	3,0 - 3,6 V, 4,5 - 5,5 V
		±4,5	-40	- +150 °C,	3,0 - 3,6 V, 4,5 - 5,5 V
V _{DD}	[V]	3,3-5,5			
I _{OUT} (max)	[mA]	10			
T _H	[ms]	34 25 °C			
T _L	[ms]	65 25 °C			

3.2 Postup návrhu

3D model ruky byl dodán ve formátu STEP. Vzhledem k tomu, že žádný z ECAD programů studovaných v této práci neumožňuje vytvoření plošného spoje na základě modelu používaného v této práci, bylo nutné využití MCAD programu pro převod 3D tvaru do 2D. Altium podporuje vytvoření DPS na základě importovaného 3D modelu, ovšem výsledný tvar je pouze průmětem roviny a 3D modelu. Z modelu by tedy nebylo možné získat 3D tvar drážky. Target3001! podporuje přímé nanášení cest na 3D model, proto také není vhodný pro vytvoření požadovaného flexibilního plošného spoje.

Pro převod do 2D byl zvolen program Rhinoceros 5.0. Z 3D modelu byly nejprve odstraněny ostatní části ruky nepodstatné pro návrh do určené drážky. V tento moment byla zároveň připravena a vyexportována ta část ruky, kde je drážka přístupná (příloha B) pro závěrečné umístění plošného spoje. Následovalo rozložení objektů na základní křivky a plochy pomocí funkce Explode (příloha C). Plochy tvořící drážku, ohyby a otvory byly nakopírovány do nové vrstvy a dále zpracovávány pouze v této vrstvě. Zároveň byl změřen

úhel mezi jednotlivými částmi pro snadné nastavení ohybů v pozdější fázi návrhu (příloha C). V dalším kroku byly všechny tři planární části spojeny a první z nich byla umístěna do roviny XY. Díky tomu, že na sebe všechny tři části navazovaly, bylo možné využít jejich společné strany jako osy rotace. S využitím pomocné přímky a funkce Rotate 3-D byla další část umístěna do roviny XY. Na poslední část byl aplikován stejný postup. Tím byla celá drážka položena do roviny XY a připravena na export ve formátu DXF. Pro zpracovávání složitějších povrchů je vhodnější využití funkce UnrollSrf, která je pro vyrovnávání zakřivených objektů do ploch přímo navržena.

Pro návrh DPS byl zvolen program Altium Designer. Nejprve bylo vytvořeno schéma zapojení obsahující senzory teploty TMP05 s blokovacími kondenzátory 100 nF zapojené do série (příloha D). Následoval návrh DPS. Importováním DXF souboru byly do mechanické vrstvy přeneseny informace o tvaru a rozměrech desky, pozici ohybů a pozici otvorů pro senzory. Z obrysů importovaného tvaru byl definován tvar DPS (příloha E). Po načtení součástek ze schématu byly senzory umístěny do otvorů vyznačených na mechanické vrstvě, blokovací kondenzátory byly umístěny na druhou stranu DPS tak, aby byly co nejbližší napájení senzoru. Rozmístění je dané rozměrem a tvarem drážky a otvorů a nebylo k němu mnoho alternativ. Deska byla osazena koaxiálními konektory o vlnové impedanci 50 Ω . Všechny použité součástky jsou určené pro povrchovou montáž (SMT). Před začátkem kreslení vodivých cest byl zvolen základní materiál pro výrobu plošného spoje. Z nabídky firmy PragoBoard s.r.o. byl vybrán bezlepidlový materiál Dupont Pyralux AP 8545R, který je tvořen dvěma vodivými vrstvami mědi o tloušťce 18 μm a dielektrickou vrstvou Kaptonu o tloušťce 100 μm . Relativní permitivita izolačního materiálu je 3,4 při 1 MHz. Na základě zvoleného materiálu byla vypočtena šířka vodivých cest a izolačních mezer pro dosažení impedančního přizpůsobení na 50 Ω . Altium designer obsahuje funkce pro vypočtení potřebné šířky cest vzhledem k požadované impedanci. Hodnoty je možné uložit jako impedanční profil (příloha F) a v návrhových pravidlech přiřadit zvoleným signálům (příloha G). Tato funkce ovšem podporuje pouze rozložení typu microstrip a stripline. Navrhovaný plošný spoj využívá koplanární rozložení. Proto bylo využito webové kalkulačky [40] pro vypočtení šířky vodivých cest a izolačních mezer. Šířka signálové cesty byla nastavena na 236 μm s izolační mezerou 200 μm . Pro napájecí cestu byla zvolena šířka 400 μm .

Při umístování prokovených otvorů bylo dbáno na vyhnutí se místu ohybu. Zároveň čáry byly kresleny tak, aby přes ohyb na DPS procházely v kolmém směru. To je důležité zejména pro dynamicky ohýbané plošné spoje. Po nakreslení čar byl vytvořen polygon pro rozlité vrstvy signálu GND na obou stranách DPS. Ten slouží jako stínění plošného spoje. Pro flexibilní plošné spoje se využívá šrafovaných zemnicích ploch, které snižují hmotnost a zvyšují flexibilitu. Nevýhodou je nižší stínící schopnost. Na závěr byl spuštěn DRC test a vyřešeny přestupky proti pravidlům.

Rozdělení desky do podoblastí, přiřazení vrstev a nastavení ohybů probíhá v módu Board Planning Mode (příloha CH). Aby bylo možné na desce definovat místa ohybu, je nutné, aby byla rozdělena do minimálně dvou podoblastí. Každé z těchto oblastí je přiřazen typ substrátu a vodivých vrstev, které se tvoří v okně Layer Stack Manager (příloha H). Ve stejném okně probíhá přepnutí návrhu do flex-rigid módu. To umožní přidávání a úpravu dalších typů vrstev. U substrátů, které budou ohýbány, je nutné zaškrtnout pole Is Flex. Jedna z podoblastí DPS musí mít ve vlastnostech vybranou možnost 3D Locked. Tato oblast je oblastí vzhledem ke které se ostatní části ohýbají. Touto oblastí byla zvolena část spoje, která se v drážce nachází na straně prstů. Drážka v modelu ruky má v tomto místě pravoúhlý tvar a to usnadní umístění STEP modelu kolem DPS. V případě nedefinování oblasti se zaškrtnutou možností 3D Locked není ohýbání desky možné. Pro nastavení míst ohybu bylo opět využito mechanické vrstvy importované z DXF souboru. Ohyby byly nastaveny podle úhlů dříve změřených v programu Rhinoceros (příloha C).

Nyní byla deska připravena pro umístění do drážky 3D modelu ruky (respektive naopak, při umístění se pohybuje STEP modelem, nikoliv DPS). Mód návrhového programu byl změněn na 3D Layout Mode. Volbou možnosti 3D Body z nabídky Place byl vybrán připravený STEP model s odkrytou drážkou, který byl umístěn na plátno. Nyní však ještě nebylo možné STEP model ruky umístit tak, jak byla DPS navržena. Model lze nejprve jen vložit na plátno a až v následujících krocích jej umístit na svou pozici. Při kolizi mezi DPS a STEP modelem jsou části v kolizi zvýrazněny zářivě zelenou barvou (dle nastavení), zároveň je zobrazen popis s údajem o velikosti kolize (příloha I). Pro umístění modelu ruky byla zvolena funkce Orient And Position 3D Body (příloha I). Nejprve bylo třeba zvolit STEP model, který bude umístěn. Následně definovat tři body na STEP modelu a odpovídající tři body na DPS ve stejném pořadí. Došlo k umístění desky na správnou pozici 3D modelu. Po složení desky dle přednastavených ohybů a jejich úhlů byl plošný spoj

správně umístěn v celé délce drážky. Závěrem byla upravena vzdálenost mezi plochou desky a drážkou změnou hodnoty parametru Standoff Height. Ten posune 3D model v ose Z (DPS je vždy umístěna v rovině XY). Původně definovaný tvar desky přesně kopíroval rozměr drážky, proto byl rozměr desky nepatrně zmenšen pro vytvoření odstupu mezi hranou a modelem ruky (příloha J). 3D model včetně umístěné DPS je možné exportovat ve formátech jako STEP, 3D PDF a dalších formátech pro MCAD pro programy.

Závěr

Pro výkonné vysokofrekvenční aplikace se i nadále využívá technologií pro výrobu tradičních rigidních DPS. Ty mohou mít až několik desítek vrstev a 3D plošné spoje z tohoto hlediska předčí. 3D plošné spoje však nachází uplatnění zejména tam, kde je potřeba co nejefektivněji využít prostoru, který mechanická část daného zařízení poskytuje, snížit váhu nebo dosáhnout netradičního technického řešení či designu. Toho může být dosaženo vytvořením vodivých cest přímo na mechanickou část. Tuhé 3D plošné spoje jsou nejčastěji tvořeny technologií LPKF-LDS®. Ta využívá laseru, který aktivuje aditivum obsažené v plastu vytvořeném technikou One-shot molding a umožní selektivní metalizaci. Technologie ADDIMID, jejíž princip je stejný, ale používá aditivum, které není odolné teplotám, jakým je vystaveno v tavícím se plastu, a proto musí být pokryto vrstvou SiO₂, které jej chrání před nechtěnou aktivací. Důležitými technologiemi jsou tiskové technologie Inkjet a Aerosol-Jet®, jimiž lze tisknout na různé druhy substrátů. Aerosol-Jet® umožňuje tisk s vyšším rozlišením a odstup trysky od materiálu nemusí být konstantní. Díky menším požadavkům na viskozitu inkoustu je možné nanášet více druhů materiálu. Technologie založené na plazmě nanáší roztavené částice na různé substráty bez nutnosti následného sintrování. Two-shot molding využívá obohaceného plastu v kombinaci s plastem, který slouží jako mechanická část a izolant. Problémem je špatné spojení různých materiálů. Technologie In-Mold tvaruje planární fólii do 3D tvaru. Výhodou zmíněných technologií je aditivní nanášení materiálů či selektivní metalizace.

Flexibilní a flex-rigid plošné spoje jsou nejčastějším typem 3D plošného spoje. Mimo využití přinášející výhody stejné jako pro 3D tuhé plošné spoje se flexibilní plošné spoje navíc využívají pro propojení pohyblivých částí. Pro často ohýbané části se jako vodivá vrstva používá válcovaná měď, která má lepší vlastnosti. S využitím teplotně odolných materiálů jako je PI lze na flexibilním plošném spoji pájet. Materiály jako je PET se vyznačují velmi nízkou cenou. Pro zlepšení mechanických vlastností se na namáhaných místech jako jsou části s osazenými součástkami nebo u konektorů aplikují výztuže.

I základní návrhové programy plošných spojů standardně umožňují vizualizaci rovinných DPS s osazenými součástkami. Je tak možné před zadáním výroby ověřit správné rozmístění součástek či jejich případnou kolizi. Schopnosti návrhových programů v oblasti

návrhu a vizualizace 3D plošného spoje korespondují s využitím technologií pro jejich výrobu. Pokročilé návrhové programy podporují návrh flexibilních plošných spojů a jejich vizualizaci v plném rozsahu ohybu. Přístupy jednotlivých programů se v zásadě neliší. Pro návrh složitých tvarů je nutné využít MCAD programů, ve kterých se model nejprve rozloží a převede do 2D a následně naimportuje do ECAD programu ve formátu určeném pro výměnu dat. Návrh vodivých cest přímo na 3D model je u komerčně dostupných programů spíše výjimkou.

Pro praktickou část byl navržen flexibilní plošný spoj obsahující teplotní senzory, který je určen pro testování ochranných rukavic. Ze 3D modelu přípravku pro testování byl získán tvar plošného spoje. Ten byl převeden do 2D prostoru a ve formátu DXF importován do návrhového programu Altium Designer. V tom byly rozmístěny součástky tak, aby odpovídaly mechanickým rozměrům 3D modelu, byly propojeny vodivými cestami, byla nastavena místa ohybu a hotový plošný spoj byl vizualizován na 3D plátně a propojen s 3D modelem, pro který byl navržen.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] P. Mach, V. Skočil, a J. Urbánek, *Montáž v elektronice, pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001.
- [2] S. Stafford, „What are molded interconnect devices?“, 24. 1. 2014. [Online]. Dostupné z: <https://www.edn.com/design/pc-board/4427506/What-are-molded-interconnect-devices->. [Viděno: 01-dub-2019].
- [3] J. Franke, *Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID)*. Mnichov: Hanser Publishers, 2014.
- [4] B. Hammack, „Plastic Injection Molding“, 2015. [Online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=RMjtmr3CqA>. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [5] LaserMicronics, „Laser Direct Structuring and Metallization for 3D Mechatronic Integrated Devices“. [Online]. Dostupné z: https://www.lasermicronics.com/_mediafiles/80-lds-technology-for-moulded-interconnect-devices.pdf. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [6] M. Pfeffer, C. Goth, D. Craiovan, a J. Franke, „3D-Assembly of molded interconnect devices with standard SMD pick & place machines using an active multi axis workpiece carrier“, in *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, ISAM 2011*, 2011.
- [7] C. Goth a M. Römer, „Laser direct structuring and two- component injection molding for MID series production“. [Online]. Dostupné z: http://www.harting-mitronics.ch/fileadmin/hartingmitronics/white_papers/Laser_direct_structuring_and_two-component_injection_molding_for_MID_series_production.pdf. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [8] LPKF Laser & Electronics AG, „Spray Coating of 3D Interconnect Devices with Coating 3D Parts with LPKF ProtoPaint LDS“. [Online]. Dostupné z: <https://www.lpkfusa.com/datasheets/mid/protopaint-lds-datasheet.pdf>. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [9] P. Amend, C. Pscherer, T. Rechtenwald, T. Frick, a M. Schmidt, „A fast and flexible method for manufacturing 3D molded interconnect devices by the use of a rapid prototyping technology“, *Phys. Procedia*, roč. 5, č. PART 2, s. 561–572, 2010.
- [10] M. Huske, J. Kickelhain, J. Muller, a G. Eber, „Laser supported activation and additive metallization of thermoplastics for 3D-MIDs“, *Proc. LANE*, roč. 3, s. 587–598, 2001.
- [11] Panasonic Corporation, „Panasonic MID Technology MIPTEC“, 2017. [Online]. Dostupné z: https://www.panasonic-electric-works.com/cps/rde/xbc/pew_eu_en/solution_miptec_en.pdf. [Viděno: 08-kvě-2019].

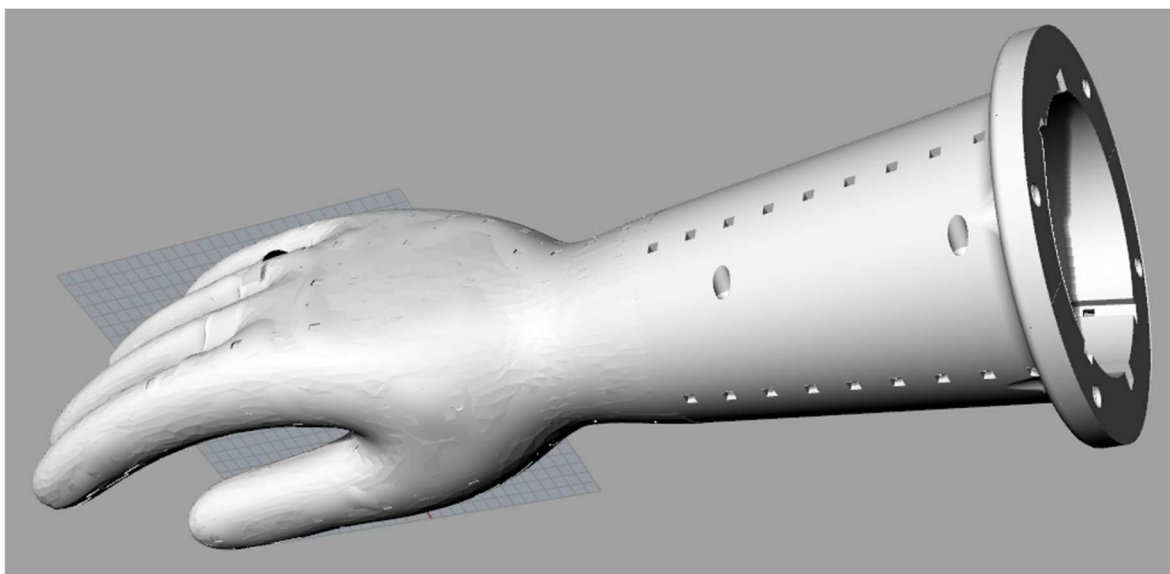
- [12] J. Řeboun, „Studijní materiál k předmětu ITE1, Tisková a flexibilní elektronika-tiskové technologie. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra technologií a měření.", 2017.
- [13] J. Řeboun, „Studijní materiál k předmětu ITE1, Tisková a flexibilní elektronika-tiskové materiály a substráty. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra technologií a měření.", 2017.
- [14] C. Goth, S. Putzo, a J. Franke, „Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications", in *Electronic Components and Technology Conference*, 2011, s. 1211–1216.
- [15] RICE, „Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou". [Online]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [16] Optomec, „AEROSOL JET ® 3MM WIDE FEATURE PRINT HEAD". [Online]. Dostupné z: https://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_3MM-wide-feature-print-head_datasheet.pdf. [Viděno: 28-kvě-2019].
- [17] Fraunhofer ENAS, „Aerosol Jet Printing". [Online]. Dostupné z: http://www.enas.fraunhofer.de/content/dam/enas/de/documents/Downloads/datenblaetter/AerosolJetPrinting_DE_web.pdf. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [18] J. A. Paulsen, M. Renn, K. Christenson, a R. Plourde, „Printing conformal electronics on 3D structures with aerosol jet technology", in *FIIW 2012 - 2012 Future of Instrumentation International Workshop Proceedings*, 2012, s. 47–50.
- [19] Optomec, „Aerosol Jet Materials". [Online]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/>. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [20] C. D. Bain, *Fundamentals of Inkjet Printing*. Weinheim: Wiley-VCH, 2015.
- [21] B. Derby, „Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution", *Annu. Rev. Mater. Res.*, roč. 40, č. 1, s. 395–414, 2010.
- [22] T. Hanemann, W. Bauer, R. Knitter, a P. Woias, „Rapid Prototyping and Rapid Tooling Techniques for the Manufacturing of Silicon, Polymer, Metal and Ceramic Microdevices", *Mems/Nems Handb. Tech. Appl.*, č. October, s. 211–212, 2007.
- [23] Leoni, „Thermokinetic Process Flamecon for Large Scale MID", 2010. [Online]. Dostupné z: http://www.jmid.gr.jp/jp/files/presentation/25_Süß-Wolf_Session6_Thermokinetic_Flamecon_Process_for_the_Production_of_Large_Scale_MID.pdf. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [24] J. Franke, A. Syed-Khaja, R. Schramm, a R. Ochs, „Investigations in the optimization of power electronics packaging through additive plasma technology", *Procedia CIRP*, roč. 37, č. June 2016, s. 59–64, 2015.

- [25] LDKF Laser & Electronics AG, „LDKF LDS: Laser Direct Structuring for 3D Molded Interconnect Devices". [Online]. Dostupné z: https://www.lpkf.com/fileadmin/mediafiles/user_upload/Produkte/PDFs/EQ/3D-MID_LDS/brochure_lpkf_laser_direct_structuring_en.pdf. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [26] J. Warner, „No Title", 2018. [Online]. Dostupné z: <https://resources.altium.com/altium-podcast/injection-molded-structural-electronics-and-designing-in-a-3d-space>. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [27] J. Fjelstad, *Flexible circuit technology*, Čtvrté vyd., roč. 34. Seaside: BR Publishing, 2011.
- [28] Minco, „Balancing the Electrical and Mechanical Requirements of Flexible Circuits", 2016. [Online]. Dostupné z: https://www.minco.com/~media/files/minco/whitepapers/flex_circuits/balancing_the_electrical_and_mechanical_requirements_of_flexible_circuits.ashx. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [29] J. Clyde F. Coombs, *Printed Circuits Handbook*, Šesté vydá., roč. 22, č. 1. McGraw-Hill, 2007.
- [30] Parlex Corporation, „Flexible circuit dielectric base material options". [Online]. Dostupné z: <http://www.johnsonelectric.com/en/resources-for-engineers/parlex/~media/bd8847bb26c44c54b2d579c506c36d85>. [Viděno: 08-kvě-2019].
- [31] Panasonic, „Flexible Circuit Board Materials", 2013. [Online]. Dostupné z: https://industrial.panasonic.com/content/data/EM/PDF/ipcdatasheet_1312_R-F705T.pdf. [Viděno: 25-kvě-2019].
- [32] „Technical Information - Polytetrafluoroethylene". [Online]. Dostupné z: http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=oibBqeKhx62HCS6veXDHmUliX5leYS&n=1Rp1aqbt4rpI9Tm4doJ9o4hzy8dXS5&ewd_urlNo=GFCat411&Catite=FP301200&CatSearNum=1. [Viděno: 25-kvě-2019].
- [33] „Technical Information - Polyetheretherketone". [Online]. Dostupné z: http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat4I.php?ewd_token=EmtQKEFvbqkCmn6f6kFSbQSYEJtZMA&n=gGGWuhjct01FBHkvRJ6MxXMXTFnt6G&ewd_urlNo=GFCat411&Catite=EK301025&CatSearNum=1. [Viděno: 23-kvě-2019].
- [34] „Copper Foil Manufacturing", 2015. [Online]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=352>. [Viděno: 28-kvě-2019].
- [35] J. Coonrod, „Different Copper Foils for Different Reasons", *The PCB magazine*, s. 60–64, 2012.
- [36] Altium, „RIGID-FLEX CIRCUITS". [Online]. Dostupné z: <https://www.altium.com/rigid-flex-circuits-resources>. [Viděno: 08-kvě-2019].

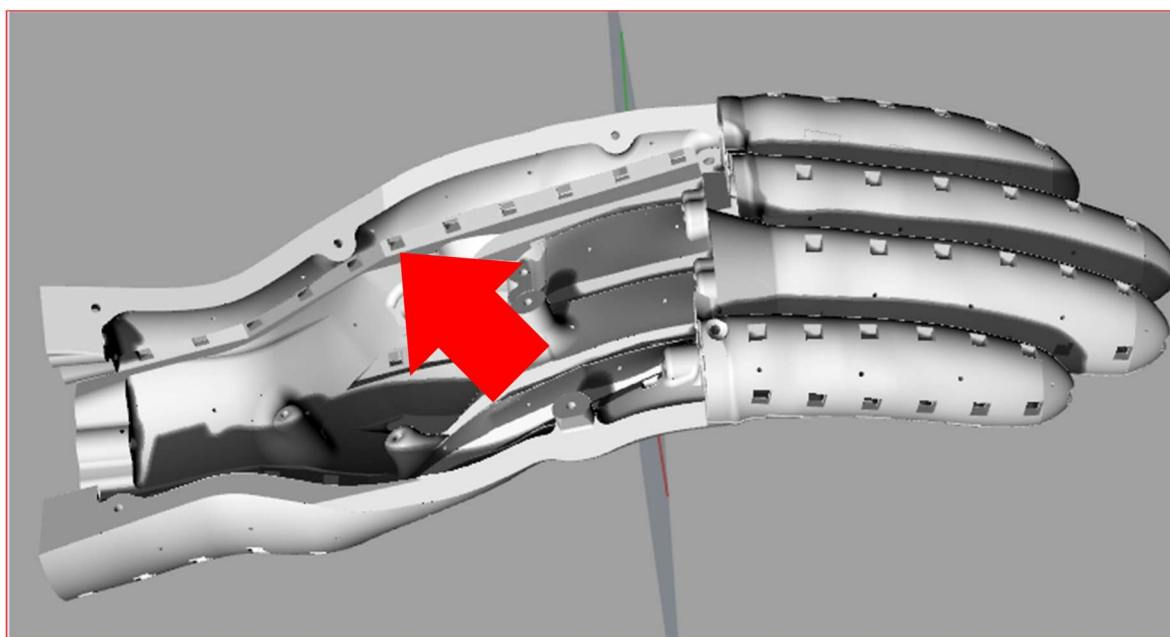
- [37] T. Chattopadhyay, „A Guide to PCB Stiffeners for Flex and Rigid-Flex“, 2019. [Online]. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/guide-pcb-stiffeners-flex-rigid-flex/>. [Viděno: 27-kvě-2019].
- [38] C. Emmer, A. Frohlich, V. Jakel, a J. Stjepandić, „Standardized approach to ECAD/MCAD collaboration“, *Adv. Transdiscipl. Eng.*, č. September, s. 587–596, 2014.
- [39] A. Devices, „TMP05 Data Sheet“. [Online]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMP05_06.pdf. [Viděno: 09-čer-2019].
- [40] „Coplanar Waveguide With Ground Characteristic Impedance Calculator“. [Online]. Dostupné z: <https://chemandy.com/calculators/coplanar-waveguide-with-ground-calculator.htm>. [Viděno: 10-čer-2019].

Přílohy

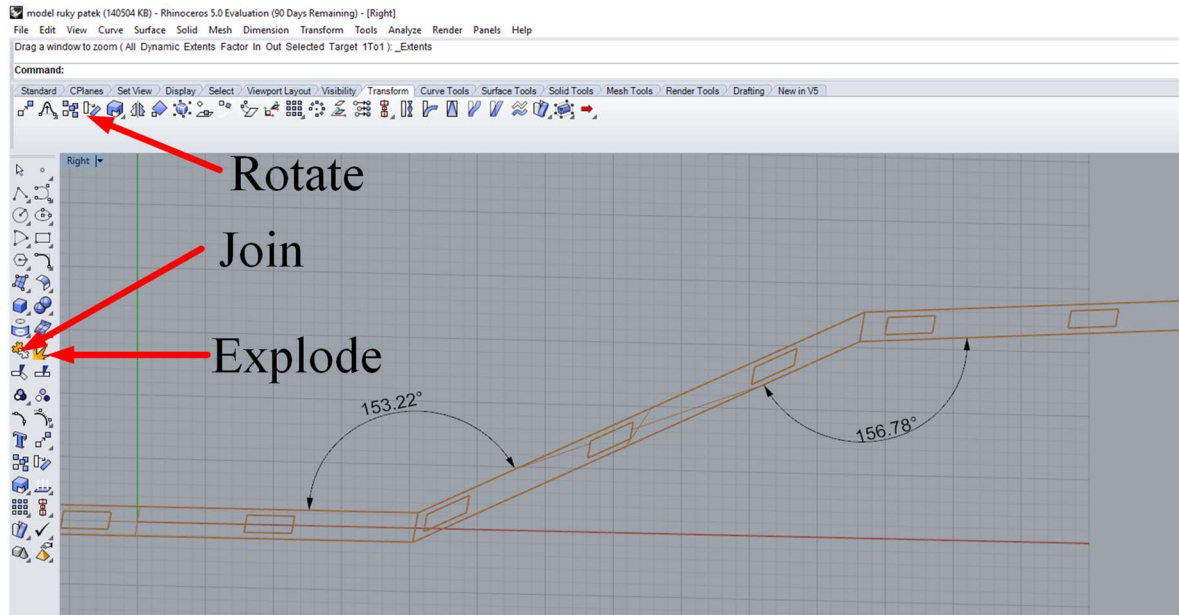
Příloha A – 3D model ruky pro testování rukavic



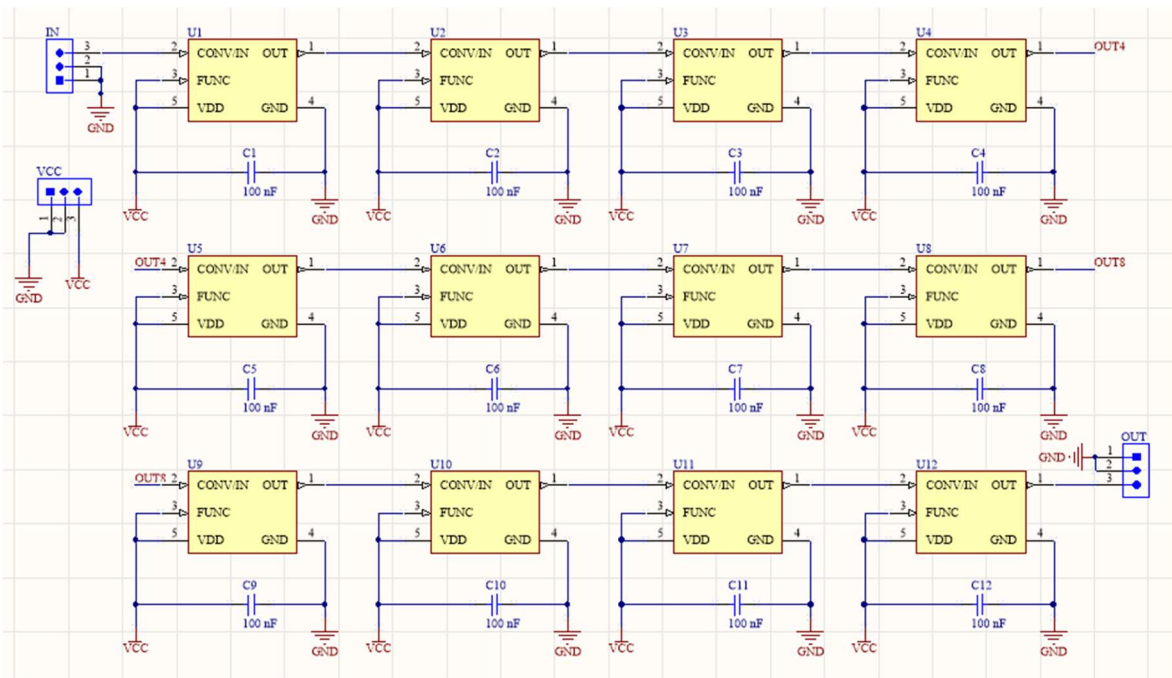
Příloha B – Vybraná drážka pro 12 senzorů



Příloha C – Oddělená drážka od zbytku ruky, úhel mezi jednotlivými částmi a funkce Rotate, Join a Explode



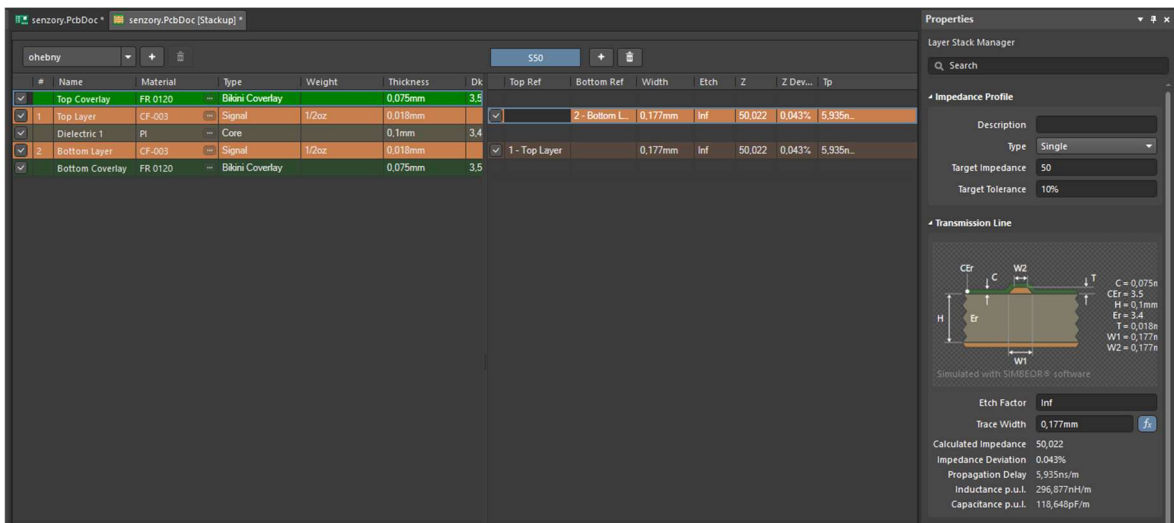
Příloha D – schéma zapojení



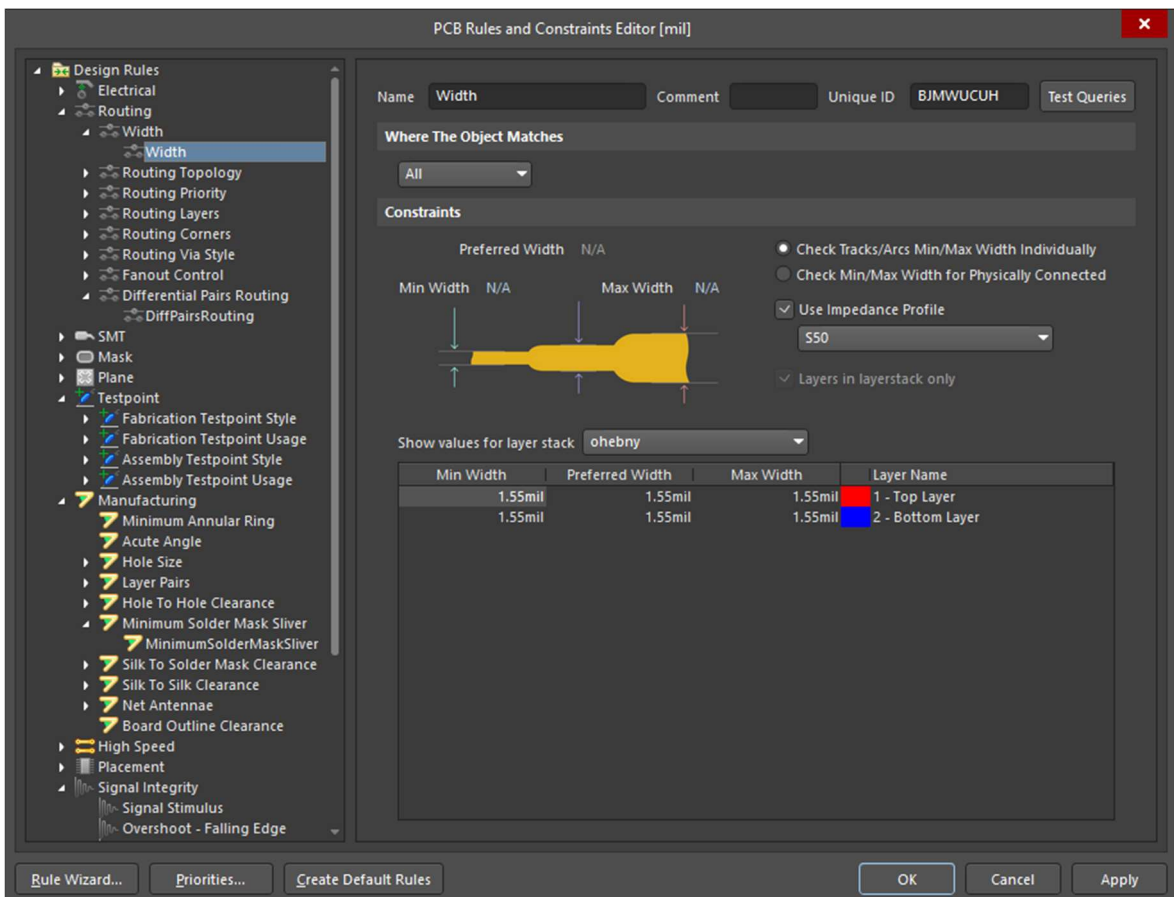
Příloha E – Definovaný tvar DPS, mechanická vrstva



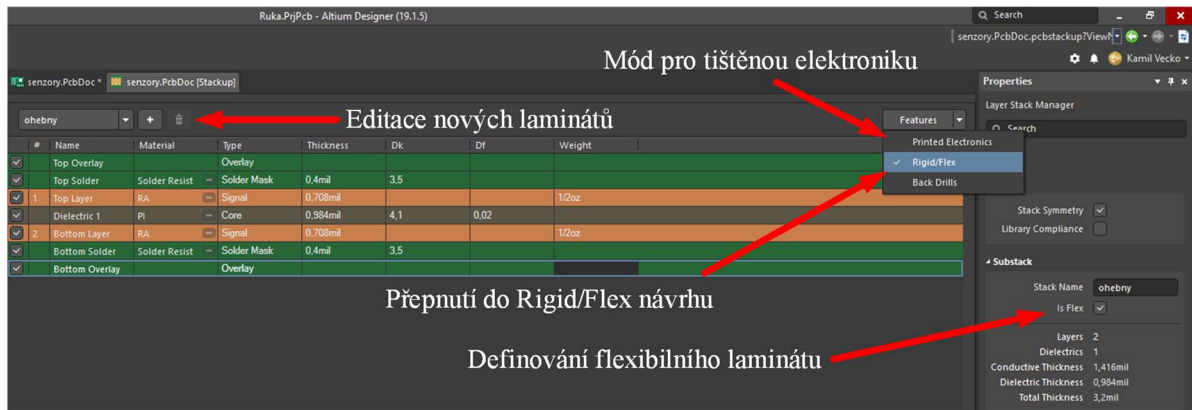
Příloha F – Impedanční profil



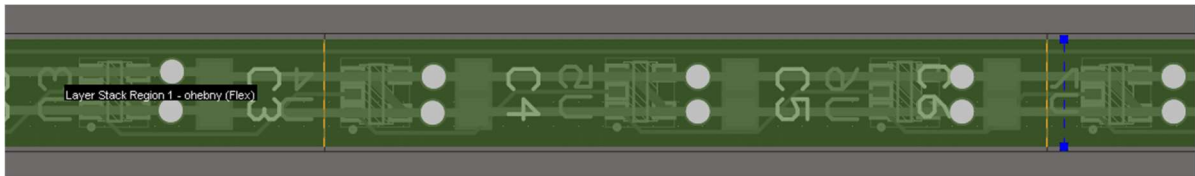
Příloha G – Přiřazení impedančního profilu vodivé cestě



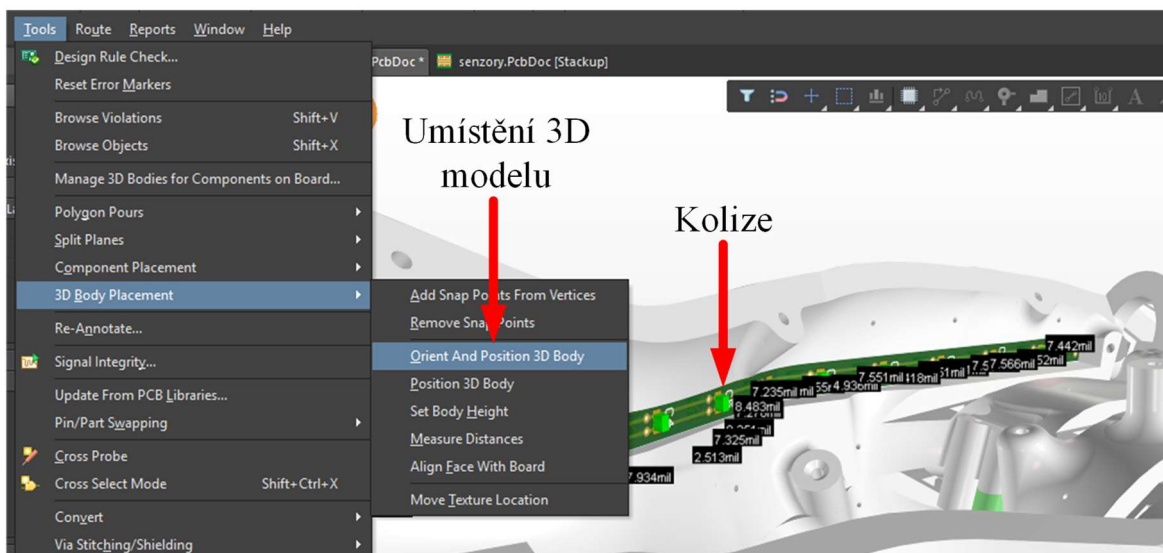
Příloha H – Layer Stack Manager

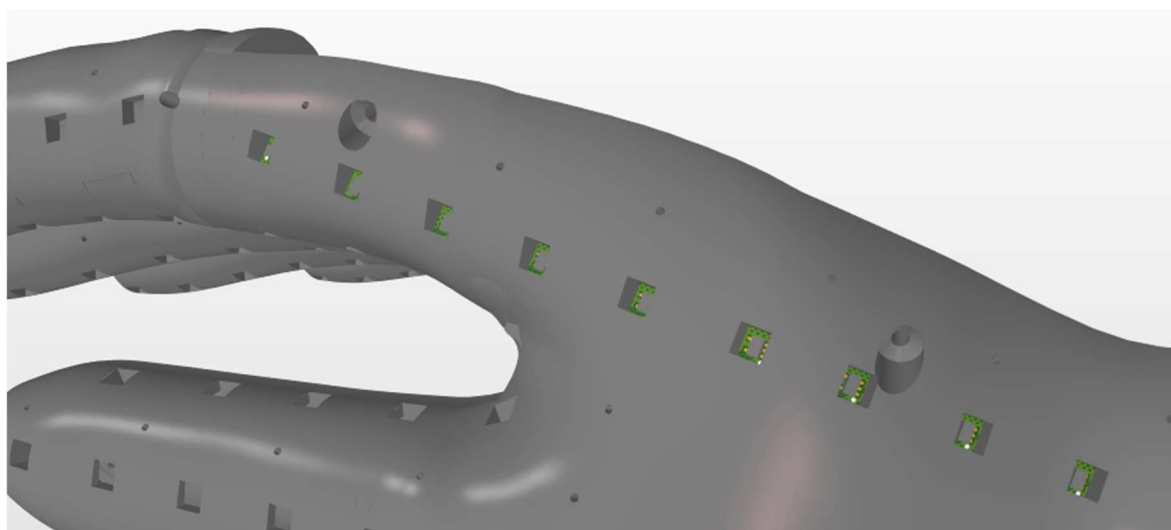
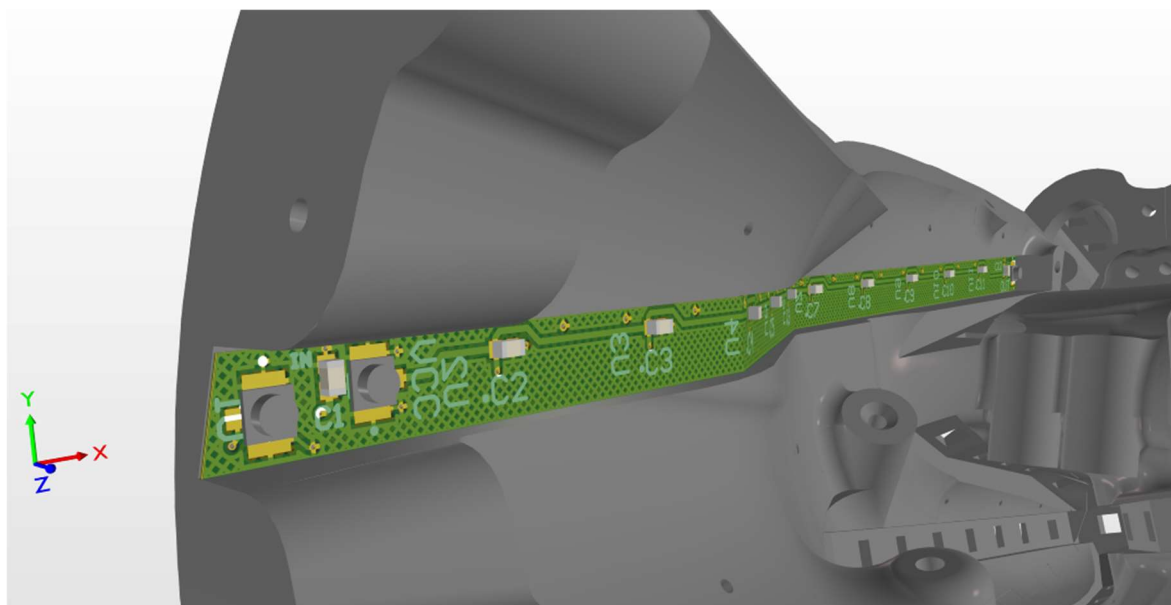


Příloha CH – Rozdělení do podoblastí a nastavení ohybů



Příloha I – Umístění 3D modelu, kolize částí



Příloha J – Navržený flexibilní plošný spoj umístěný v drážce**Příloha K – Altium projekt navrženého spoje**
- na přiloženém CD