

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2023

Martin Šomšák



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ELEKTRICKY VODIVÉ POVRCHY PRO 3D TIŠTĚNÉ STRUKTURY

ELECTRICALLY CONDUCTIVE SURFACES FOR 3D PRINTED STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Šomšák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Láčák, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Martin Šomšák

ID: 219077

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Elektricky vodivé povrchy pro 3D tištěné struktury

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s oblastí 3D tištěných dielektrických struktur a blíže se zaměřte na různé způsoby realizace elektricky vodivých povrchů (pokovení, měděná fólie, elektricky vodivý sprej a filameny). Porovnejte dosažitelné elektrické parametry. Po dohodě s vedoucím pro technologii 3D tisku FDM a stereolitografie vyrobte rozličně tvarované povrchy (ploché, zahnuté, děrované) a realizujte na nich elektricky vodivé povrchy. Porovnejte výhody a nevýhody jednotlivých způsobů realizace.

:

Změřte elektrické vlastnosti vyrobených struktur v předcházejícím kroku řešení a perspektivní způsoby využijte pro realizaci jednoduché flíčkové antény. Změřte parametry jednotlivých antén a diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JUN-KIM, M., et al. One-step electrodeposition of copper on conductive 3D printed objects. In: Additive Manufacturing, vol. 27, pp. 318-326, 2019.

[2] PIZZARO, F., SALAZAR, R., RAJO-IGLESIAS, E., RODRIGUEZ, M., DINGERHUTH, S., HERMOSILLA, G. Parametric Study of 3D Additive Printing Parameters Using Conductive Filaments on Microwave Topologies. In: IEEE Access, vol. 7, pp. 106814-106823, 2019.

[3] DIOGO, H., RAMOS, A., VARUM, T., MATOS, J. N. The Use of 3D Printing Technology for Manufacturing Metal Antennas in the 5G/IoT Context. In: Sensors, vol. 21, no. 10, art. no. 3321, 2021.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.

Konzultant: Ing. Petr Kaděra

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce popisuje technické možnosti pokovení různých 3D tištěných struktur různými metodami pokovení. Byly vytvořeny různé struktury povrchů na dvou modelech pro dvě technologie 3D tisku. Byly simulovány antény na FR4 a PLA substrátech. Po úpravách rozměrů antén v simulacích a získaných výsledků ze simulací byly vytvořeny dvě flíčkové antény na PLA substrátu. Pro vytvoření antény byl substrát pokoven měděnou fólií a elektricky vodivým sprejem. Následně byly antény změřeny a výsledky porovnány se simulacemi.

Klíčová slova

3D tisk, pokovení, materiál pro 3D tisk, technologie 3D tisku, měděná folie, elektricky vodivý sprej, filament, simulace.

Abstract

This thesis describes the technical possibilities of coating various 3D printed structures by different coating methods. Different surface structures have been created on two models for two 3D printing technologies. Antennas on FR4 and PLA substrates were simulated. After adjusting the dimensions of the antennas in the simulations and the results obtained from the simulations, two speckle antennas on PLA substrate were created. To form the antennas, the substrate was coated with copper foil and electrically conductive spray. Subsequently, the antennas were measured, and the results were compared with the simulations.

Keywords

3D printing, plating, materials for 3D printing, 3D printing technology, copper foil, electrically conductive spray, filament, antenna, simulation.

Bibliografická citace

ŠOMŠÁK, Martin. *Elektricky vodivé povrchy pro 3D tištěné struktury* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151727>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Jaroslav Láčik.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Martin Šomšák
VUT ID studenta:	219077
Typ práce:	Semestrální práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Elektricky vodivé povrchy pro 3D tištěné struktury

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 29.května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
ÚVOD.....	10
1. SEZNÁMENÍ S 3D TISKEM	11
1.1 HISTORIE 3D TISKU	11
1.2 3D TISK	11
1.3 NÁVRH 3D TISKU	12
2. TECHNOLOGIE 3D TISKU.....	13
2.1 TECHNOLOGIE FDM	13
2.2 TECHNOLOGIE LOM	14
2.3 TECHNOLOGIE SLS	15
2.4 TECHNOLOGIE SLA.....	16
2.5 TECHNOLOGIE DLP.....	17
3. POLYMERNÍ MATERIÁLY PRO 3D TISK	18
3.1 ABS	18
3.2 PLA	18
3.3 TPE.....	19
3.4 PET-G.....	19
3.5 PMMA.....	19
3.6 VODIVÉ FILAMENTY	19
3.6.1 <i>Electrifi</i>	19
3.6.2 <i>Vodivý ABS-CE</i>	20
3.6.3 <i>Vodivý PLA</i>	20
3.6.4 <i>Vodivý PET-G/CF</i>	20
4. ÚPRAVA POVRCHŮ.....	21
4.1 BROUŠENÍ.....	21
4.2 POKOVÁNÍ.....	21
4.2.1 <i>Měděná folie</i>	21
4.2.2 <i>Galvanické pokovování</i>	22
4.2.3 <i>Elektricky vodivý sprej</i>	23
4.2.4 <i>Chemické pokovování</i>	23
4.2.5 <i>Pokovení ve vakuu</i>	23
4.2.6 <i>Další způsoby pokovování</i>	24
5. PRAKTICKÁ ČÁST.....	25
5.1 MODELOVÁNÍ	25
5.2 3D TISK FDM	26
5.3 OPRACOVÁNÍ FDM.....	27
5.4 POKOVENÍ FDM	28
5.4.1 <i>Měděná folie</i>	28
5.4.2 <i>Elektricky vodivý sprej</i>	29

5.5	3D TISK SLA	30
5.6	POKOVENÍ SLA	31
5.6.1	<i>Měděná folie</i>	31
5.6.2	<i>Elektricky vodivý sprej</i>	32
5.7	ZHODNOCENÍ POKOVOVACÍCH TECHNIK	32
6.	PRAKTICKÁ ČÁST ANTÉNY	34
6.1	SIMULACE VEDENÍ	34
6.2	FLÍČKOVÉ ANTÉNY	35
6.2.1	<i>Flíčková anténa z měděné folie</i>	39
6.2.2	<i>Flíčková anténa z vodivého spreje</i>	41
6.3	MĚŘENÍ	42
7.	ZÁVĚR	47
	LITERATURA	48
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1	Schéma FDM tisku [5]	13
Obrázek 2.2	Schéma LOM tisku [7]	14
Obrázek 2.3	Schéma SLS tisku [9]	15
Obrázek 2.4	Schéma SLA tisku [11]	16
Obrázek 3.1	Cívky s barevným materiálem [14]	18
Obrázek 4.1	Ukázka samolepící měděné folie [28]	22
Obrázek 4.2	Schéma galvanického pokovování [29]	23
Obrázek 4.3	Ukázka vakuové napařovačky [32]	24
Obrázek 5.1	Ukázka modelů vytvořených v HFSS	25
Obrázek 5.2	Ukázka modelů připravených pro vygenerování G-code v programu PrusaSlicer	26
Obrázek 5.3	Ukázka jednoho vytištěného modelu s podpěrami	27
Obrázek 5.4	Detail upravení vrstev 3D tisku v okolí děr	27
Obrázek 5.5	Model pokovený měděnou folií	28
Obrázek 5.6	Detailní záběr děr pokovených folií	28
Obrázek 5.7	Model pokovený elektricky vodivým sprejem	29
Obrázek 5.8	Detailní záběr děr pokovených sprejem	29
Obrázek 5.9	Ukázka nahromaděného spreje na hranách rovných ploch	30
Obrázek 5.10	HFSS návrh kostky pro SLA tisk	30
Obrázek 5.11	Ukázka modelu připraveného pro 3D tisk	31
Obrázek 5.12	Stěna SLA kostky pokovena měděnou folií	31
Obrázek 5.13	SLA kostka pokovena vodivým sprejem	32
Obrázek 5.14	Detail vnitřní stěny děr	32
Obrázek 6.1	Simulovaný model vedení	34
Obrázek 6.2	Simulace přenosových ztrát mikropáskového vedení z měděné folie	35
Obrázek 6.3	Simulace přenosových ztrát mikropáskového vedení z vodivého spreje	35
Obrázek 6.4	Simulovaný činitel odrazu pro flíček na FR4 substrátu	36
Obrázek 6.5	Simulovaný zisk antény na FR4 substrátu	37
Obrázek 6.6	Simulace vyzářovacích diagramů v rovině E na frekvenci $f = 2,45\text{GHz}$	38

Obrázek 6.7 Simulace vyzařovacích diagramů v rovině H na frekvenci $f = 2,45$ GHz	38
Obrázek 6.8 Popis rozměrů flíčkové antény	39
Obrázek 6.9 Simulovaný činitel odrazu pro anténu z měděné folie	40
Obrázek 6.10 Simulovaný zisk antény na PLA z měděné folie	40
Obrázek 6.11 Simulovaný činitel odrazu pro anténu z vodivého spreje	41
Obrázek 6.12 Simulovaný zisk antény na PLA z vodivého spreje	42
Obrázek 6.13 Flíčková anténa z měděné folie	43
Obrázek 6.14 Flíčková anténa z vodivého spreje	43
Obrázek 6.15 Porovnání měřeného a simulovaného činitele odrazu antén	44
Obrázek 6.16 Měření a simulované vyzařovací diagramy v rovině E	45
Obrázek 6.17 Měření a simulované vyzařovací diagramy v rovině H	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozměry pro flíčkovou anténu z měděné folie	39
Tabulka 2 Rozměry pro flíčkovou anténu z vodivého spreje	41
Tabulka 3 Zisky a porovnání změřených dat antén se simulacemi	46

ÚVOD

Se stále rostoucím zájmem o 3D tisk plastových modelů i větších prototypů. Je stále aktuálnější téma tisku kovových struktur. Toho lze dosáhnout právě pokovením povrchu 3D tištěných plastových modelů. 3D tisk se řadí mezi aditivní metody výroby a dokáže vytvářet i složité modely, které jsou jinými metodami náročné nebo dokonce nemožné.

Teoretická část práce se zabývá obecně 3D tiskem. Různými technologiemi 3D tisku. Vlastnostmi jednotlivých materiálů pro 3D tisk. Opracování a dokončení 3D tištěných dílů. Hlavní kapitola teoretické části se věnuje technikám pokovování 3D tištěných struktur.

Praktická část se zabývá vytvářením 3D modelů, 3D tisku na tiskárně Prusa i3 MK3S a SL1, následného opracování a pokovení různými zmíněnými technikami a tvorbou flíčkových antén. Cílem práce je vyzkoušet a porovnat různé způsoby pokovení různě tvarovaných 3D tištěných struktur a využití v realizaci antén. Prakticky byly vyzkoušeny dvě nejčastější metody pokovení.

1. SEZNÁMENÍ S 3D TISKEM

1.1 Historie 3D tisku

V roce 1986 si nechal Chuck Hull patentovat technologii stereolitografie. Před koncem 90. let pak vytvořil první zařízení pro 3D tisk tzv. stereolitografický aparát SLA-1. Systémy SLA se staly základem vývoje moderních 3D tiskáren.

Stereolitografie je technika vytváření objektů, která spočívá v trojrozměrném tisku pomocí laseru, nejčastěji UV záření, a tekutého polymeru.

V roce 1988 Scott Crump představil další technologii 3D tisku podobnou stereolitografii a to Fused Deposition Modeling (FDM). Dále následovala technologie Selective Laser Sintering (SLS). V roce 2008 pak byla vytvořena 3D tiskárna Darwin, která byla schopna tisknout většinu svých součástí. O dva roky později společnost Startasys prezentovala službu 3D tisku nadrozměrných objektů. Mezi kterými předvedla i prototyp automobilu, který byl z velké části vytvořen pomocí 3D tisku [1].



Obrázek 1.1 1 Stereolitografický aparát SLA-1 [1]

1.2 3D tisk

3D tisk je označení tzv. aditivní výroby, kde výrobek vzniká postupným nanášením materiálu v tenkých vrstvách, které jsou postupně spojovány tavením. Na rozdíl od konvenční výroby, kde se materiál odebrá, např. třískové obrábění, lze pomocí 3D tisku vytvářet složité a tvarově náročné výrobky, které by jiným způsobem nebylo možné vyrobit. 3D tisk je svojí rychlou přípravou vhodný zejména pro malosériovou a kusovou výrobu nebo výrobu prototypů [2].

1.3 Návrh 3D tisku

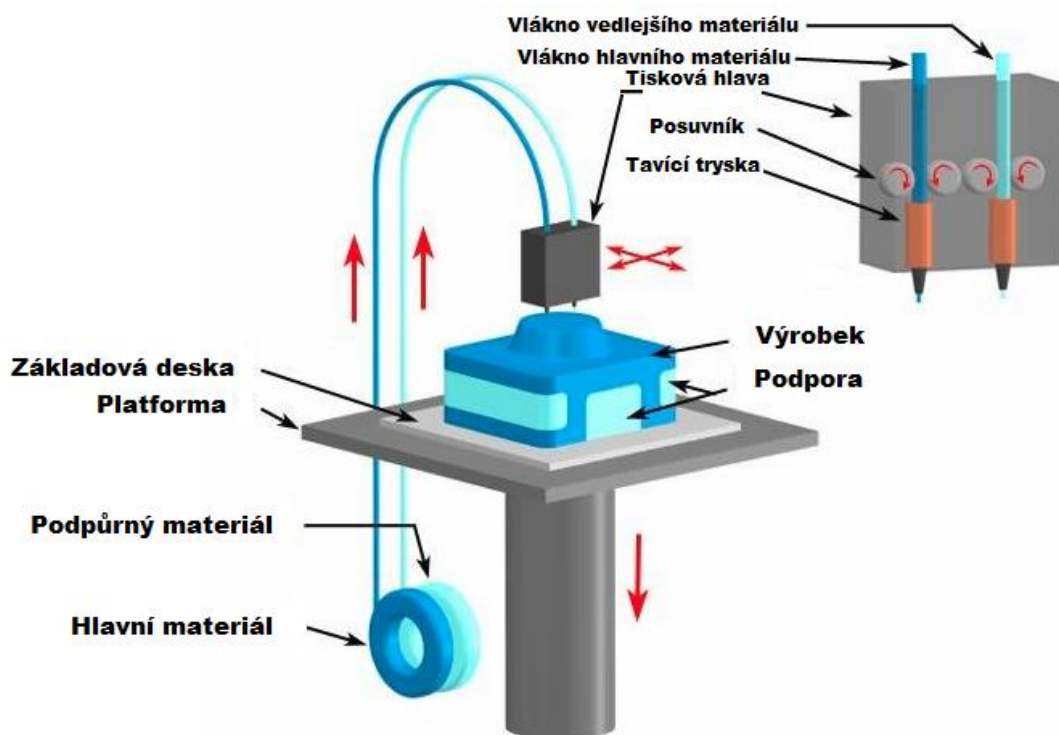
3D tiskárny a přístroje pro tisk 3D modelů fungují tak, že se objekt rozdělí na jednotlivé vrstvy a ty se postupně tisknou. Po nanesení jedné vrstvy se deska, na kterou je výrobek tištěn, sníží o právě tloušťku vrstvy.

Před samotným 3D tiskem je ale nutné vytvořit samotný model výrobku. K tomu se nejčastěji využívá Computer Aided Design (CAD) software. Jedná se o jednoduchý modelovací program, avšak je zapotřebí znát postup v daném programu. Další složitější způsob modelování pro 3D tisk může být např. 3D skener. Tím lze výrobek trojrozměrně naskenovat a poté převést do digitální podoby. Dá se ale také využít digitální kamery a fotogrammetrického softwaru. Po vytvoření 3D modelu zapotřebí jej převést do formátu stereolitography (.STL). Musí se také vytvořit kód (G-code), který bude obsahovat instrukce pro tiskárnu, např. kam se posunout, ovládání trysky atd. K tomu se nejčastěji používají programy Skeinforge, Slic3r nebo Cura. Po nahrání G-Codu do tiskárny tiskárna výrobek vytiskne a výrobek je připraven k dalšímu zpracování [3].

2. TECHNOLOGIE 3D TISKU

2.1 Technologie FDM

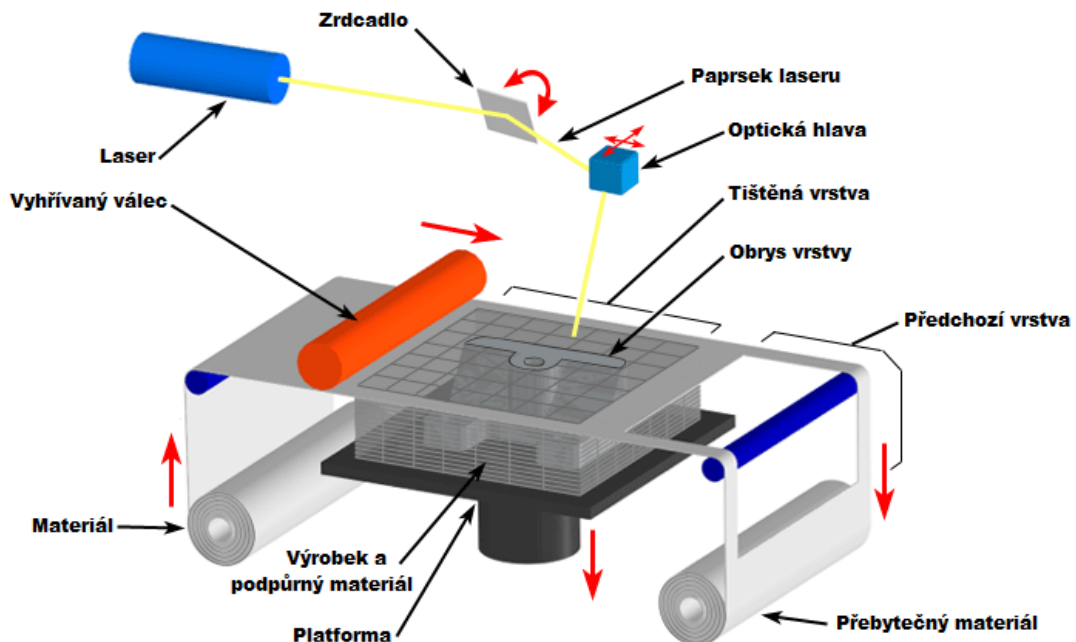
Technologie Fused Deposition Modeling (FDM) využívá, jako další technologie tisku z pevnolátkových materiálů, nanášení roztaveného polymeru. Technologie spočívá v nanášení termoplastického materiálu jako slabé vlákno roztavené pomocí nahřáté trysky, která se pohybuje ve dvou osách. Nahřáté vlákno rychle tvrdne. Po nanesení celé vrstvy se deska, na které je výrobek tištěn posune dolů o tloušťku vrstvy, čímž přidá třetí osu. Při tisknutí složitých tvarů se dá využít lehce odstranitelných materiálů jako podpory. Výhodou této metody je malý odpad, velký výběr materiálů a jednoduchá obsluha. Naopak nevýhodou může být nerovný povrch a nedokonalé vytváření detailů jako jsou například malé díry [4], [5].



Obrázek 2.1 Schéma FDM tisku [5]

2.2 Technologie LOM

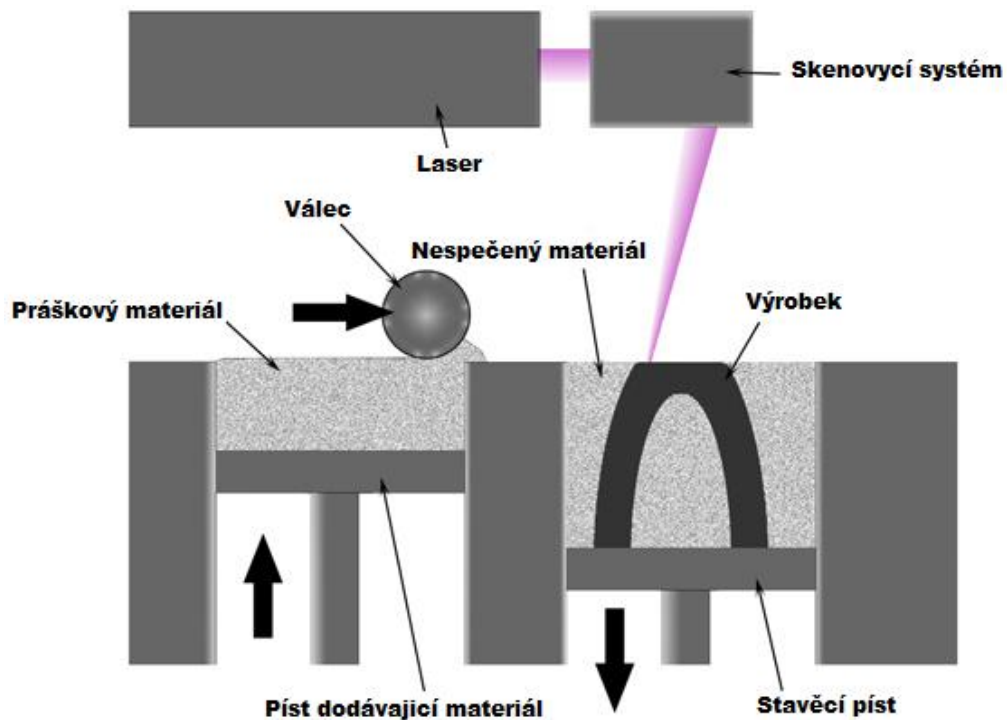
Technologie Laminated Object Manufacturing (LOM) je další technologie 3D tisku z pevnolátkových materiálů. Má ale odlišný princip od FDM. U technologie LOM, kterou vyvinula firma Helix v 90 letech, je principem kladení vrstev na sebe. Kde jednotlivé vrstvy jsou tvořeny pomocí laserového paprsku, který vyřezává obrysy tištěného objektu a přebytečný materiál rozřeže na čtverce. Pomocí žhavého válce a tlaku, se jednotlivé vrstvy spojí. Celá pracovní plocha je pokryta materiálem, který je zcela využit. Stejně jako u FDM je po dokončení vrstvy platforma posunuta dolů o tloušťku vrstvy. Je vhodná pro tvorbu větších modelů. Další výhodou je velice rychlá výroba a prakticky žádné nežádoucí deformace, díky nulovému vnitřnímu napětí. Nevýhodou je že je méně přesná v porovnání s technologiemi SLA nebo SLS. Zároveň produkuje velké množství přebytečného materiálu, který nelze dále použít. Modelace tenkých stěn nebo prázdné uzavřené dutiny je prakticky nemožná [6], [7].



Obrázek 2.2 Schéma LOM tisku [7]

2.3 Technologie SLS

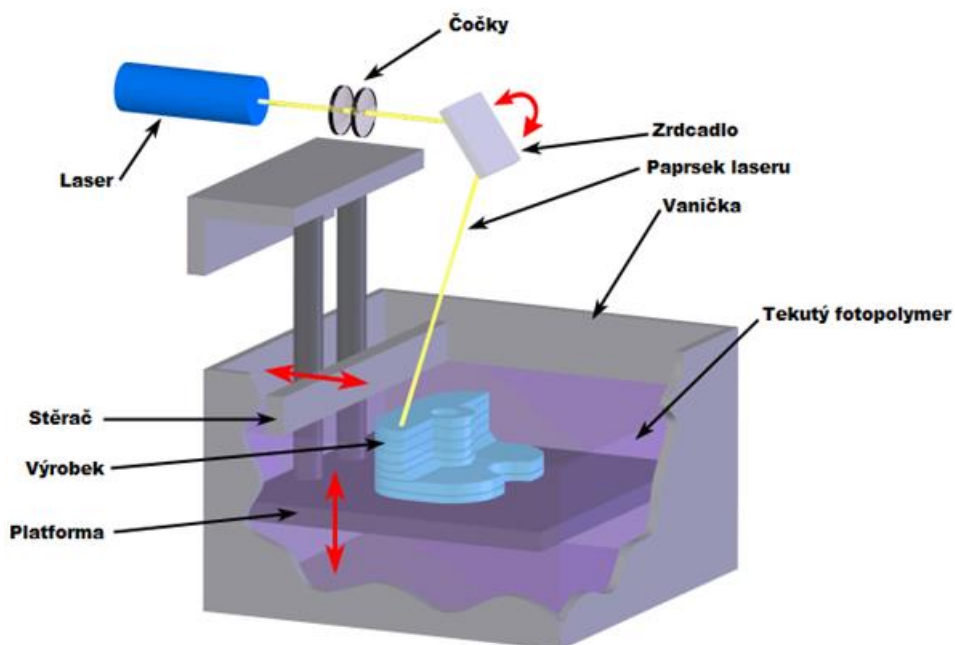
Technologie Selective Laser Sintering (SLS) využívá při tisku materiál, který je ve formě jemného prášku o velikosti částice 20 až 100 μm . Metoda SLS patří mezi nejstarší technologie 3D tisku. Vytvořil ji doktor Carl Deckard v osmdesátých letech minulého století. Technologie využívá vysokovýkonný CO_2 laserový paprsek, který práškový materiál spéká vrstvu po vrstvě. Válec vytvoří tenkou vrstvu materiálu pro spečení aktuálního řezu pomocí laseru. Po spečení se opět podstava posune dolů o tloušťku vrstvy [8],[9].



Obrázek 2.3 Schéma SLS tisku [9]

2.4 Technologie SLA

Technologie Stereolithography (SLA) vytvrzuje vrstvu po vrstvě kapalinu fotosenzitivního polymeru pomocí UV laseru. Počítačem řízený UV laser kopíruje tvar modelu navrženého v CAD softwaru. Tekutý polymer se po zasažení UV laserem změní na pevný. Postupně se vytváří vrstva za vrstvou. Aby se po dokončení 3D tisku odstranil přebytečný tekutý polymer je model vložen do roztoku rozpouštědla. Jako poslední krok se model vloží do UV pece pro vytvrdnutí. Výhodou je hladší povrch než u aditivních technologií tisku a také velká tvarová a rozměrová přesnost. Technologie SLA má většinou toleranci $<0,5\text{mm}$ [10],[11].



Obrázek 2.4 Schéma SLA tisku [11]

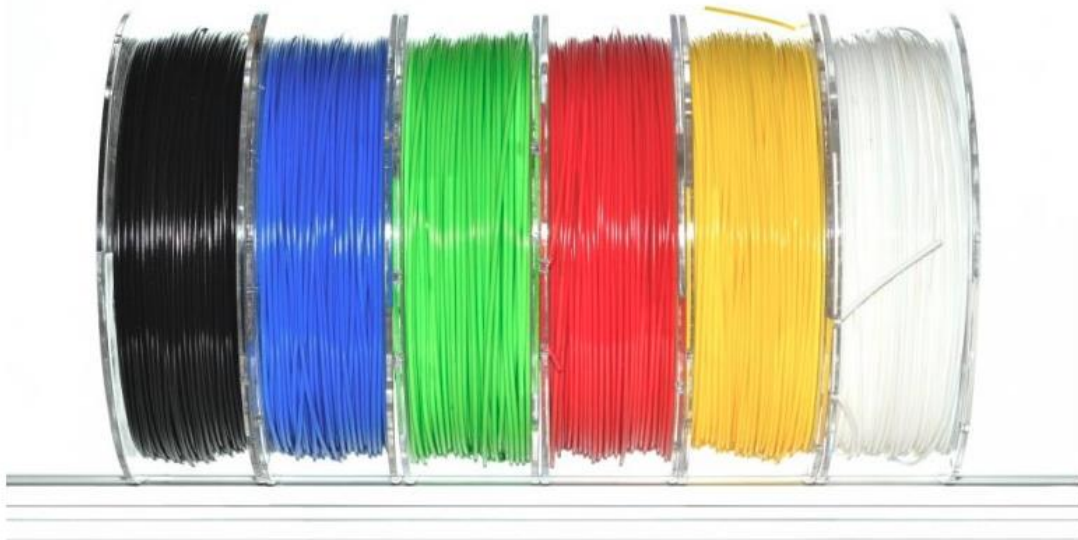
2.5 Technologie DLP

Technologie Digital Light Processing (DLP) je velmi podobná stereolitografii. Využívá digitální mikrozrcadla. Rozdíl od SLA je v tom, že technologie DLP používá jiný zdroj světla např. obloukové lampy. Při výrobě se používá i LCD panel, který se přikládá na povrch materiálu. Materiál je umístěn v průhledné nádobě a za působení světla ztuhne. Výhodou oproti SLA je velká rychlost tisku, i několik vteřin na vrstvu. A menší spotřeba materiálu [12].

3. POLYMERNÍ MATERIÁLY PRO 3D TISK

3.1 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) patří spolu s PLA mezi nejpoužívanější materiály pro tisk FDM technologií. Jde o termoplast s hustotou 1045 kg/m^3 . Je odolný proti chemikáliím, vysokým i nízkým teplotám a má velkou tuhost. Při tisku pomocí ABS není potřeba příliš přesné nastavení extruzní hlavy a sklonu ke kroucení. Teplota pro tisk pomocí ABS je mezi $200 \text{ }^\circ\text{C}$ a $230 \text{ }^\circ\text{C}$. ABS lze jednoduše opracovávat např. vrtáním, broušením apod [13], [14].



Obrázek 3.1 Cívky s barevným materiálem [14]

3.2 PLA

Polylactic acid (PLA) je termoplastický polyester. PLA se oproti ABS snadněji a rychleji zpracovává, nicméně je méně odolný proti vysokým teplotám. PLA začíná měknout již kolem $60 \text{ }^\circ\text{C}$ zatím co ABS až kolem $100 \text{ }^\circ\text{C}$. S teplotou tisku mezi $195 \text{ }^\circ\text{C}$ a $210 \text{ }^\circ\text{C}$. Výhodou PLA je menší náchylnost k deformacím způsobené chladnutím materiálu, a proto není nutné používat vyhřívané podložky. Kromě výhod spojených s teplotou je velmi významný i nepatrný sklon ke kroucení. Výhodou je také, že PLA

lze získat z obnovitelných zdrojů např. bramborový škrob. PLA se hodí i pro tisk velkých modelů. Nevýhodou je pak u výrobků z PLA oproti ABS menší pružnost [15].

3.3 TPE

TPE je plast, který je pro svojí flexibilitou a pružnost vhodný například pro výrobu těsnění. Podobně jako PLA, se tiskne snadno avšak není možné jej použít pro tisk na tiskárnách s bowdenovým extruderem. TPE je k dostání ve dvou variantách, které se liší svojí pružností a teplotním rozsahem pro tisk. Varianta TPE 32 má rozsah 220 – 250 °C a TPE 88 210 – 225 °C. Největší výhodou je pak právě jeho pružnost a flexibilita [16].

3.4 PET-G

PET-G je termoplast podobný PET. Teplota tisku je 220 – 250 °C. Výhodami jsou odolnost proti kyselinám a tepelná odolnost. Kdy si PET-G dokáže zachovat mechanické vlastnosti od -70 °C do 120 °C [17].

3.5 PMMA

Za zmínku určitě stojí i PMMA, známý jako plexisklo nebo akrylové sklo. Největší výhodou a důvodem proč se používá je jeho úplná bezbarvosť a čírosť. Teplota tisku je opět 220 °C - 250 °C. Výhodou jsou dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti a propustnost UV záření a světla. Nevýhodou pak může být nízká povrchová tvrdost [18].

Dále existuje ještě mnoho materiálů pro 3D tisk pomocí technologie FDM. Polykarbonát, Nylon, PVA, polypropylen.

3.6 Vodivé filamenty

3.6.1 Electrifi

Existuje i možnost tisku pomocí vodivého materiálu. Electrifi je jediný dostupný materiál pro 3D tisk, který se dá opravdu nazývat vodivým s odporem 0,006 Ω. Teplota tisku je 130 °C - 160 °C s rychlostí tisku 10-30 mm/s. Ze zmíněných materiálů se jedná definitivně o nejdražší z nich [19].

3.6.2 Vodivý ABS-CE

Jedná se o termoplastický polymer s příměsí uhlíku. Vzhledem k náchylnosti na deformace je důležité brát ohled nejen na teplotu tisku, ale i na teplotu podložky. Ta by měla mít teplotu alespoň 90 °C. Teplota trysky by pak měla být vyšší než 205 °C [20].

3.6.3 Vodivý PLA

Vodivý PLA může mít až 20% příměs uhlíku. Čímž se zajistí nejen vodivost filamentu, ale i matný vzhled vytištěných součástí. Oproti ABS nebo ABS-CE není odolný na vysoké teploty, proto ani nevyžaduje vyhřívanou podložku při tisku. Příkladem může být třeba filament Proto-Pasta. Měkne už při 70 °C. Rezistivita na vrstvách X, Y je 30 Ω-cm a na vrstvě Z 115 Ω-cm. Odpor 10 cm filamentu před tiskem se pohybuje kolem 2-3 kΩ [21],[23].

Mezi vodivé PLA filamenty se řadí například i Black Magic 3D s rezistivitou 0,6 Ω-cm [22][23].

3.6.4 Vodivý PET-G/CF

Jedná se o kombinaci polyethylentereftalátu-glykolu a uhlíkového vlákna, opět s příměsí až 20 %. Na rozdíl od PLA je zde, jako u ABS-CE, potřeba vyhřívaná podložka pro tisk s teplotou 60 – 80 °C. Teplota pro tisk je pak 220 – 250 °C [24].

4. ÚPRAVA POVRCHŮ

Úprava povrchu je součástí dokončení 3D tištěného modelu. Slouží k odstranění podpěr, k aplikaci povrchových vrstev např. pokovení, zjemnění a vyhlazení povrchu po tisku. Nejčastěji se jedná o broušení, leštění nebo tavení. Tyto práce se vykonávají ručně, tudíž čím složitější model tím delší úprava [25].

4.1 Broušení

Většinou jsou po tisku vidět jednotlivé vrstvy, a tak je potřeba je zahladit do sebe. Brousit lze smirkovým papírem nebo páskovými bruskami. Jedná se o nejčastější a nejrozšířenější povrchovou úpravu. Pro zarovnání velmi jemných nerovností např. zbytků po podpěrách, lze použít i ostrou žiletku která nijak nepoškodí samotný výrobek a tenké zbytky odstraní bez problémů. Nevýhodou broušení je pak broušení špatně dostupných míst, malých otvorů apod [26].

Dalších možností úpravy nerovností povrchů po 3D tisku je mnoho např. tryskání, napařování, omílání, leštění apod.

4.2 Pokovování

Pokovením je myšleno nanesení tenké vrstvy kovu na převážně plastový 3D tištěný výrobek. Vylepší se tak jeho mechanické vlastnosti, zmenší se propustnost pro kapalinu, zvětší se odolnost vůči chemikáliím a sníží se stárnutí plastu. Zejména pak lze tento díl použít jako povrchově vodivý. Metody nanesení kovu se dají rozdělit jako galvanické, chemické, vakuové a speciální. Před pokovením musí být povrch odmaštěný a jemně zdrsňený pro maximální přilnutí kovu. Zároveň však musí být povrch čistý, aby se kov nenanesl na nečistoty [27].

4.2.1 Měděná folie

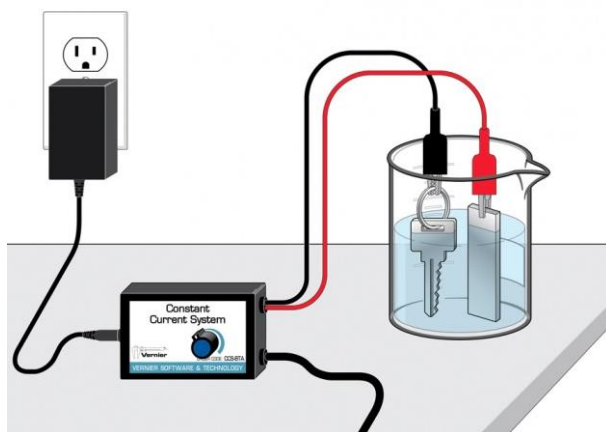
Pokovení měděnou folií se jeví jako nejjednodušší realizace pokovení povrchu. Měděnou folii lze nastříhat na přesně velké části a postupně polepit celý výrobek, nebo potřebnou část. Výhodou je dostupnost, kde se 0,045m² o tloušťce nosiče 0,035mm prodává za zhruba 200kč, a jednoduchost aplikace. Nevýhodou je pak pokovování malých otvorů nebo vnitřních záhybů, kde se malé množství folie nedokáže pořádně přilepit [28].



Obrázek 4.1 Ukázka samolepící měděné folie [28]

4.2.2 Galvanické pokovování

Galvanické pokovování se provádí v roztoku kovu za pomoci stejnosměrného proudu. Základní vodivá vrstva se ale vytváří chemickým pokovením. Galvanicky se pak pokovují téměř všechny termoplasty, především pak ABS s nejlepší adhezí. [27], [29].



Obrázek 4.2 Schéma galvanického pokovování [29]

4.2.3 Elektricky vodivý sprej

Pokovení sprejem je spolu s pokovením měděnou folií nejjednodušší a nejdostupnější možností. Spreje jsou různé a musí se u nich dávat pozor na postup nanášení. Na rozdíl od měděné folie dokáže sprej pokovit i menší a méně dostupná místa, jako například otvory pro šrouby nebo malé záhyby. Nevýhodou je pak nerovnoměrná vrstva kovu, která vzniká na okrajích ploch nebo v záhybech, kam sprej stéká (obr. 5.7). Zároveň je kvůli dlouhému schnutí kovu tato technika časově náročnější.

4.2.4 Chemické pokovování

V pokovovací lázni je kov vylučován na povrch předmětu z roztoku soli povlakového kovu působením redukčního činidla. Obsaženého buď v lázni nebo naneseného na povrch předmětu. Tímto způsobem lze pokovit mědí, niklem, stříbrem a zlatem. Vrstva kovu je rovnoměrná s tloušťkou okolo 10 μm . Výhodou pak je, že se bez problémů pokoví i těžko přístupná místa a záhyby u složitějších struktur [30].

4.2.5 Pokovení ve vakuu

Pokovení ve vakuu se nejčastěji používá při pokovení hliníkem. Jde o metodu napařování kovu na plast za velmi nízkého tlaku a při teplotě odpařování kovu. Tloušťka nanesené vrstvy je pak 0,1 až 1 μm . Pokovení se provádí ve třech krocích. První krok je vytvoření nízkého vakua a nanesení volných elektronů na povrch výrobku. Ve druhém kroku se dosáhne vysokého vakua a olej v difuzním lapači se

zahřeje na teplotu 200 °C, při které se začne odpařovat. To má za důsledek, že zbylé molekuly kyslíku ulpí na stěnách lapače. Kdyby se tak nestalo, hliník by se vypařil bez užitku. Poslední krok je samotné pokovení. Pomocí napětí se zahřejí wolframové meadry na teplotu 1400-1600 °C kdy se hliník odpaří. Vzniklá pára pak na výrobku zkondenzuje a vyrobí tak tenkou souvislou vrstvu [27], [31], [32].



Obrázek 4.3 Ukázka vakuové napařovačky [32]

4.2.6 Další způsoby pokovování

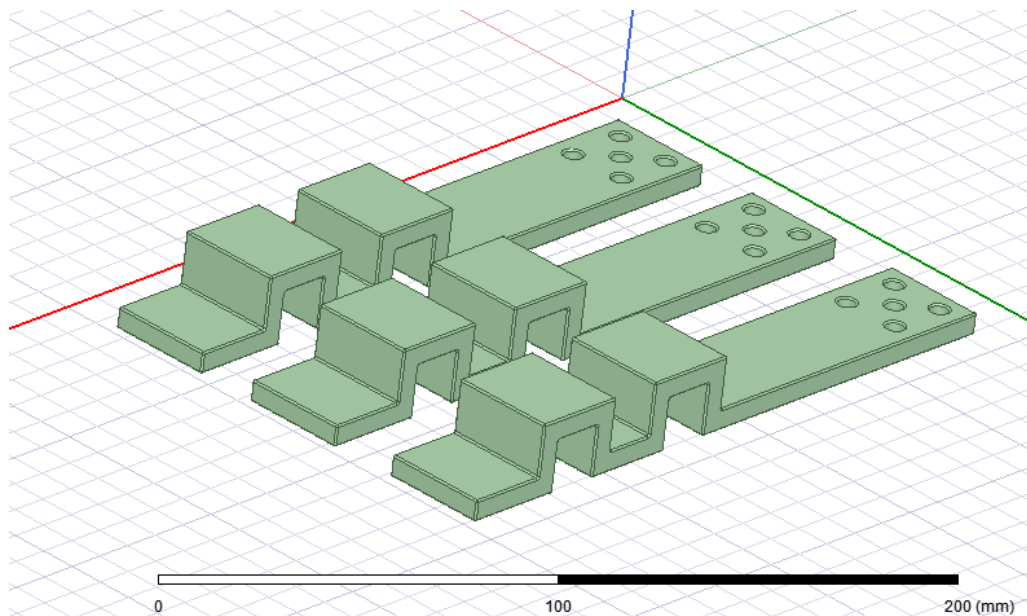
Dalšími způsoby pokovení může být například žárové stříkání kovů nebo pokovení za použití plynné fáze kovu pomocí tepla.

5. PRAKTICKÁ ČÁST

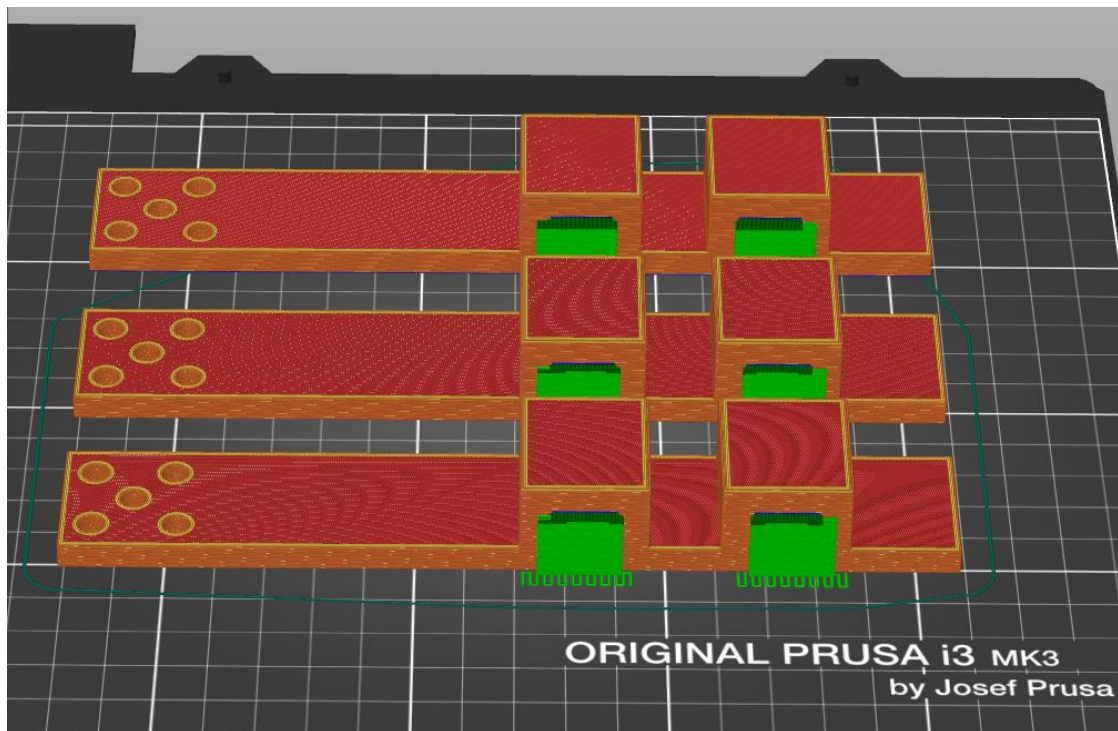
Tato část je zaměřena na praktický proces 3D modelování, přípravy dat, samotného 3D tisku, úpravy a následného pokovení různých struktur různými technikami.

5.1 Modelování

Jako první bylo potřeba vytvořit model se zahnutými a děrovanými strukturami, aby později bylo možné vyzkoušet různé způsoby pokovení na různých tvarech. K modelování se dá použít například program Ansys HFSS, který se používá pro modelování antén. V tomto programu se jednoduše vytvoří model, který bude mít přiměřené rozměry, aby se dal vytisknout na 3D tiskárně Prusa i3 MK3S a zároveň aby obsahoval rovnou plochu, díry a záhyby. Po vytvoření modelu a nakopírování množství potřebných kopií, bylo potřeba soubor s modely převést do formátu, který lze nahrát do programu PrusaSlicer. Jedná se o formát STL. Nicméně HFSS neumožňuje přímý export do formátu STL, a tak bylo použito online převodníku, který převede soubor .step na .STL. Poté se daný soubor ve formátu STL nahraje do programu PrusaSlicer, ve kterém se zvolí konkrétní tiskárna tedy Prusa i3 MK3S, tryska 0,4mm a filament konkrétně tedy Prusament PLA. Dále program vyhodnotí potenciální riziko nestability a doporučí přidělení podpěr. Podpěry byly použity i v této realizaci. Program pak ukáže čas, jak dlouho se bude tisknout a kolik se spotřebuje materiálu. Pak program vytvoří G-code pro tisk.



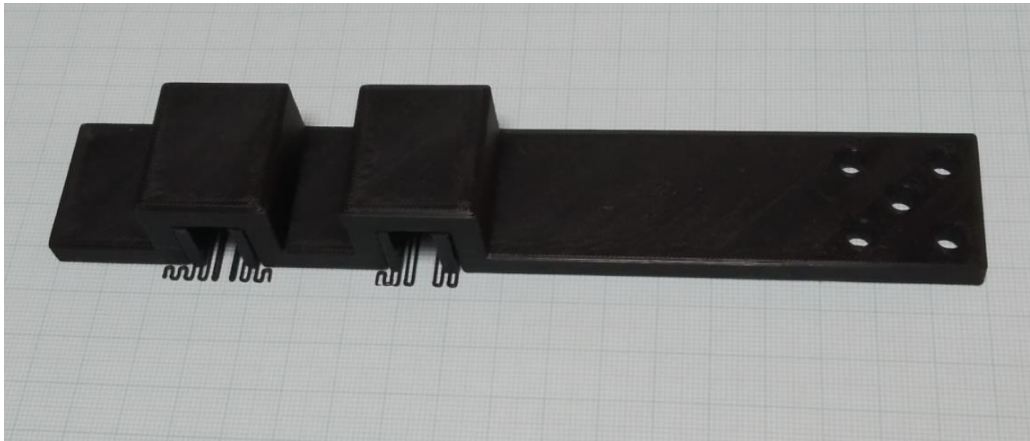
Obrázek 5.1 Ukázka modelů vytvořených v HFSS



Obrázek 5.2 Ukázka modelů připravených pro vygenerování G-code v programu PrusaSlicer

5.2 3D tisk FDM

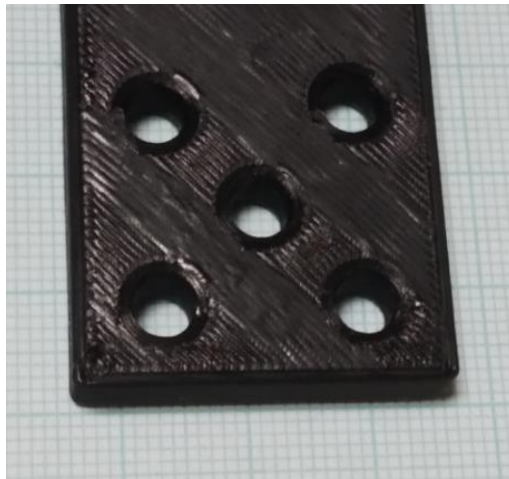
První 3D tisk probíhal na tiskárně Prusa i3 MK3S s tryskou 0,4 mm, filamentem PLA. Pro tuto realizaci se spotřebovalo 130 g materiálu a tisk trval 7 hodin. Výsledkem tisku byly tři modely s podpěrami, které bylo potřeba odstranit.



Obrázek 5.3 Ukázka jednoho vytištěného modelu s podpěrami

5.3 Opracování FDM

Po vytisknutí modelů bylo potřeba odstranit podpěry a zahladit nerovnosti po nich a v oblasti děr. Na opracování a obroušení bylo použito pilníku, hrubšího a jemnějšího. Následně bylo potřeba model očistit od kousků plastu zbylých po broušení.



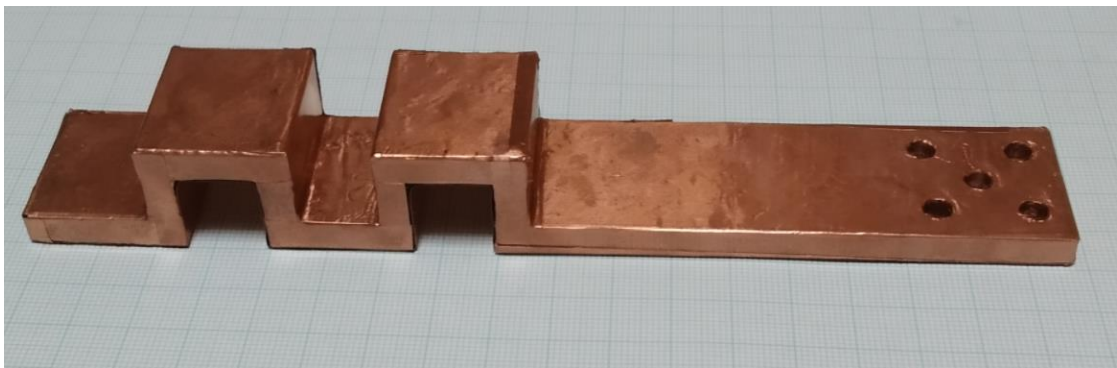
Obrázek 5.4 Detail upravení vrstev 3D tisku v okolí děr

5.4 Pokovení FDM

Pokovení bylo provedeno dvěma způsoby. Měděnou folií a elektricky vodivým sprejem. Pokovení bylo provedeno na FDM tištěných modelech (obr. 5.3).

5.4.1 Měděná folie

Postupným stříháním menších kousků měděné folie (obr. 4.1) se podařilo celý povrch model pokovit (obr. 5.5 a 5.6). Bylo potřeba jednotlivé části modelu přesně změřit a nastříhat příslušně velké kusy měděné folie za použití nůžek na plech, jehly, a železného pravítka. Kraje jednotlivých úseků se musely lehce překrývat, aby bylo dosaženo vodivosti po celém povrchu. Na pokovení měděnou folií bylo spotřebováno zhruba 270 cm² folie.



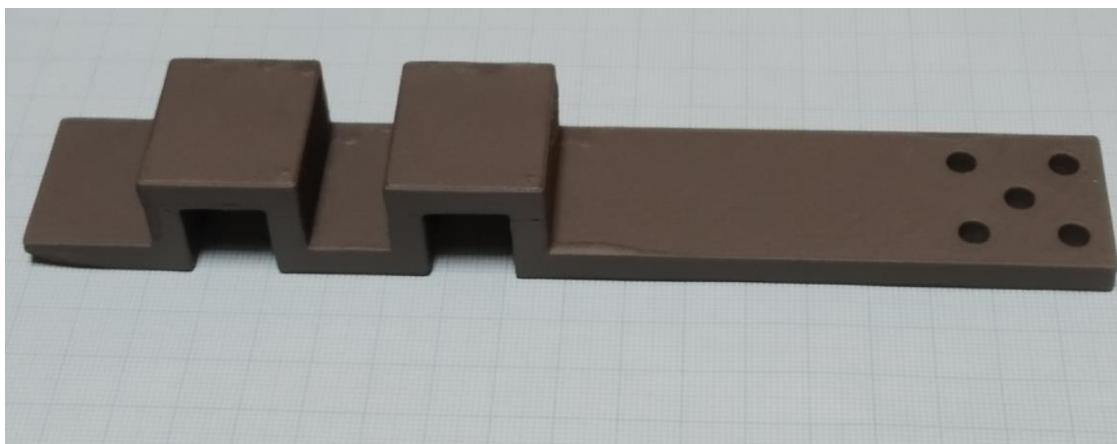
Obrázek 5.5 Model pokovený měděnou folií



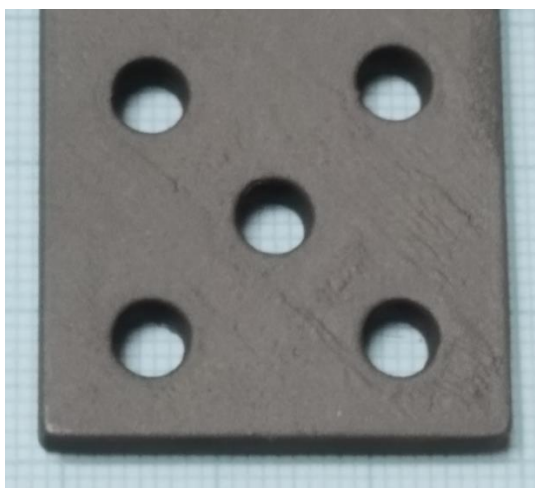
Obrázek 5.6 Detailní záběr děr pokovených folií

5.4.2 Elektricky vodivý sprej

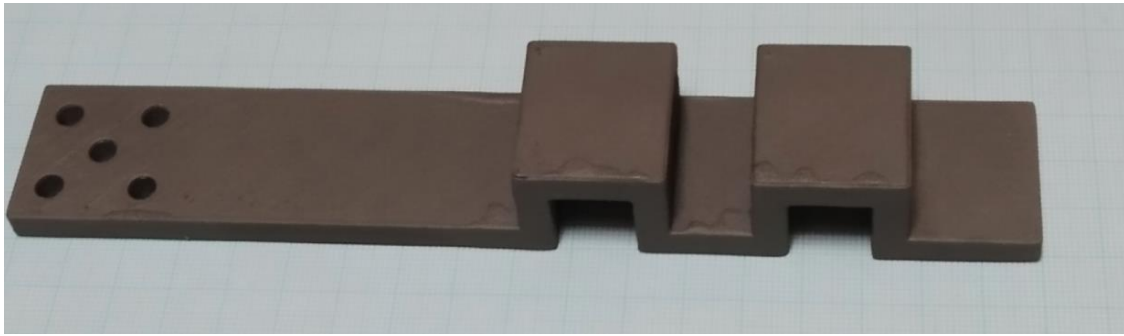
Pokovení bylo provedeno elektricky vodivým sprejem (obr. 5.7 a 5.8) s příměsí niklu značky MG Chemicals [35]. Pokovení sprejem bylo časově náročné kvůli schnutí jednotlivých vrstev. Bylo zapotřebí použít ochranných pomůcek jako rukavice, ochranné brýle a respirátor, jak udává výrobce. Samotné pokovení sprejem je velmi jednoduché. Musí se jen dávat pozor na úplné zaschnutí předešlé vrstvy. Z dat od výrobce [35] kde se uvádí že vrstvou 2 mm se pokoví 2500 cm² povrchu, bylo jednoduché spočítat že na pokovení plochy modelu s povrchem přibližně 270 cm², doporučenými dvěma vrstvami, bylo spotřebováno přibližně 35,2 ml spreje.



Obrázek 5.7 Model pokovený elektricky vodivým sprejem



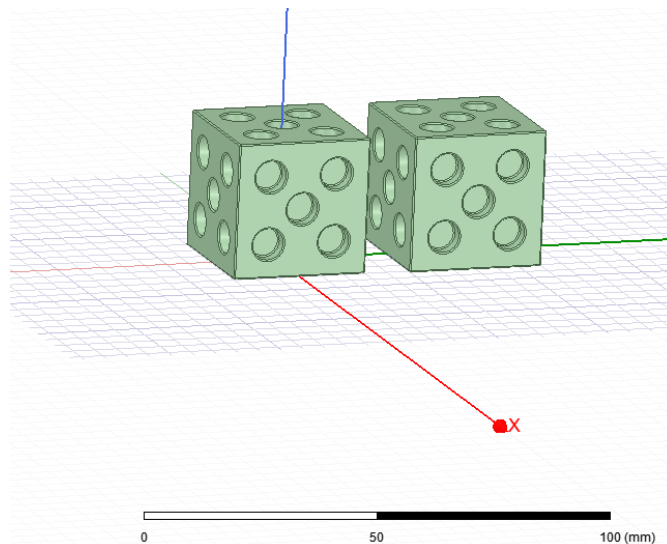
Obrázek 5.8 Detailní záběr děr pokovených sprejem



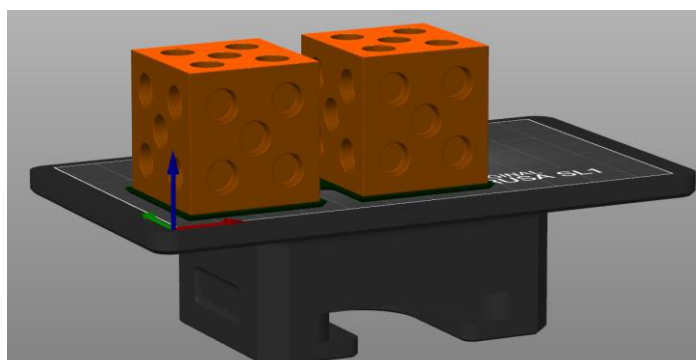
Obrázek 5.9 Ukázka nahromaděného spreje na hranách rovných ploch

5.5 3D tisk SLA

Následně byl vytvořen i model pro tisk pomocí SLA technologie (obr. 5.10 a 5.11). Model struktury musel být menších rozměrů kvůli samotným rozměrům 3D tiskárny. Byla vytvořena malá kostka 3x3x3cm s podobným rozložením děr o průměru 4 mm a hloubce 3 mm s jednou stěnou bez děr jako podsadu, aby nebylo nutné využít podpěr při tisku. S tím rozdílem že díry byly zhotoveny stylem prohlubní tudíž mají pevné dno pro porovnání usazení spreje na vnitřních stěnách děr. 3D tisk probíhal na SL1 tiskárně značky Prusa. Díky vlastnostem SLA tisku, nebylo nutné již hladký povrch tištěné struktury výrazně opracovat, stačilo očistit lihem a připravit na pokovení.



Obrázek 5.10 HFSS návrh kostky pro SLA tisk



Obrázek 5.11 Ukázka modelu připraveného pro 3D tisk

5.6 Pokovení SLA

Pokovení SLA struktur bylo zhotoveno pro porovnání opět pomocí měděné folie a elektricky vodivého spreje.

5.6.1 Měděná folie

Pokovení tenkou samolepící měděnou folií bylo kvůli neprůchodnosti děr v podstatě nemožné (obr. 5.12). Rovné plochy kostky bylo možné pokovit bez problémů, ale prohlubně děr s tak malými rozměry nebylo možné pokovit pomocí ruční práce a manipulace s lepicí folií. Je při takto malých rozměrech a uzavřených prostorech nepřesná a v podstatě nepoužitelná. Na pokovení takto malé struktury by bylo potřeba 110 cm² měděné folie.



Obrázek 5.12 Stěna SLA kostky pokovena měděnou folií

5.6.2

Elektricky vodivý sprej

Pokovení tenkou vrstvou elektricky vodivého spreje bylo snadné. Sprej na SLA materiál přilnul velmi dobře. A nedošlo k nanesení větší vrstvy spreje na dně děr (obr. 5.14). Za použití dat od výrobce [35] a z rozměrů z bodu 5.5 bylo vypočteno že na pokovení kostky bylo využito přibližně 11,9 ml spreje.



Obrázek 5.13 SLA kostka pokovena vodivým sprejem



Obrázek 5.14 Detail vnitřní stěny děr

5.7 Zhodnocení pokovovacích technik

Při pokovování měděnou folií bylo opravdu náročné pokovit vnitřní prostory děr (obr. 5.6 a 5.14) na použitých modelech (obr. 5.1 a 5.10), které měly průměr 5 a 4 mm. Měděná folie pak nemá dost lepivé plochy na přilepení a při jejím ohnutí se folie odlepuje. Proto je potřeba u takovýchto malých rozměrů opravdu velká přesnost při stříhu a samotném lepení folie nebo použít jinou techniku. Sprej dokáže pokovit tyto díry velice snadno (obr. 5.8 a 5.13). Je zde ale problém s nashromážděním ještě tekutého spreje právě v samotné díře (obr. 5.9). Proto je potřeba z dostatečné vzdálenosti, opatrně a jednou vrstvou právě tyto místa pokovit a dbát na správné

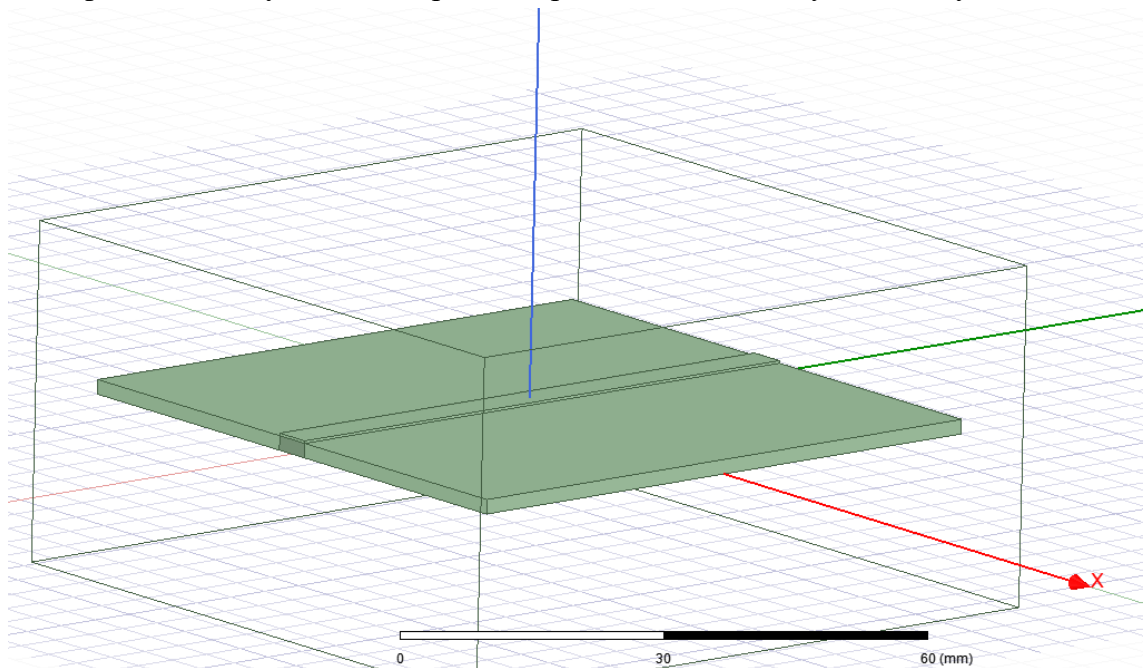
natočení pokovovaného výrobku, aby se vlivem gravitace díra neucpala kompletně. Stejný problém nastává při pokovení zahnutých úseků a na hranách rovných částí modelu, kde oproti měděné folii s konstantní tloušťkou mohou vznikat nerovnoměrné nánosy spreje (obr. 5.9). V konečném zhodnocení vyjde lépe pro pokovení větších struktur třeba pro tisk pomocí FDM měděná folie, která má i lepší elektrické vlastnosti, odpor $0,0000000176 \Omega \cdot m$ a tím pádem vodivost $56\,818\,182 \text{ S/m}$ a dokáže i celý model zpevnit. Přesný opak nastává u menších struktur modelovaných pro tisk SLA technologií. Kvůli rozměrům SL1 tiskárny byly vytvořeny modely malé (5.10) a nyní s neprůchozími děrami. Zde se ukázalo že pokovení vodivým sprejem je výhodnější než měděná folie, a to hlavně s ohledem na manipulaci s folií. Časová náročnost a nutná zručnost se u pokovení pomocí měděné folie projeví ještě více. A tím pádem pro malé struktury získává více výhod pokovení pomocí vodivého spreje. Pokovení vodivým nebo částečně vodivým filamentem je velmi přesné, neboť při pokovení využíváme přímo souřadnic programu a 3D tisku. Sprej má však horší elektrické vlastnosti a to odpor $0,0076 \Omega \cdot cm$ a tím pádem vodivost $13\,158 \text{ S/m}$. Filament je ovšem velmi drahý a při jeho použití je nutná maximální opatrnost a přesnost s ohledem na trysky a celkovou bezpečnost tiskárny hlavně pak na teplotu tavení filamentu. Ten má lepší elektrické vlastnosti než vodivý sprej a to odpor $0,006 \Omega \cdot cm$ a tím pádem vodivost $16\,667 \text{ S/m}$.

6. PRAKTICKÁ ČÁST ANTÉNY

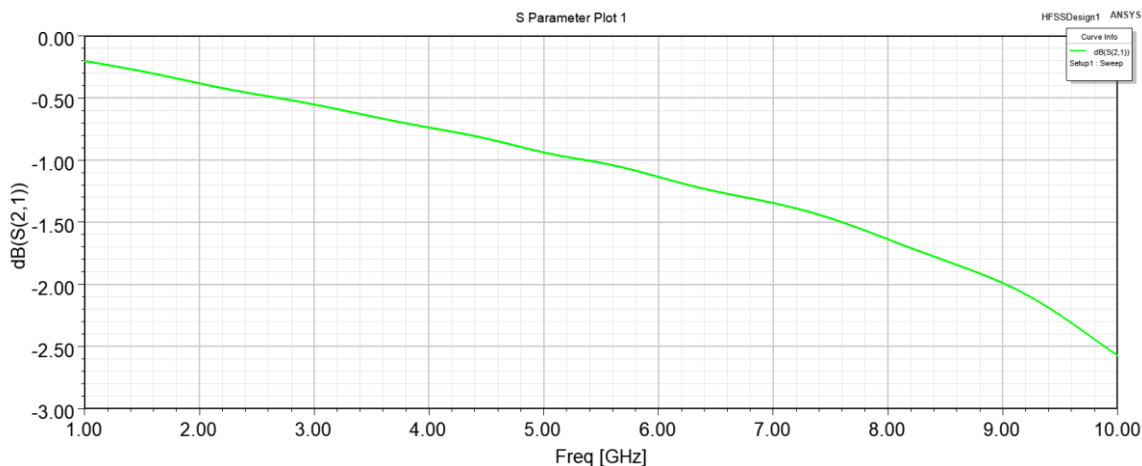
Tato část je zaměřena na praktickou realizaci flíčkových antén na 3D tištěný substrát.

6.1 Simulace vedení

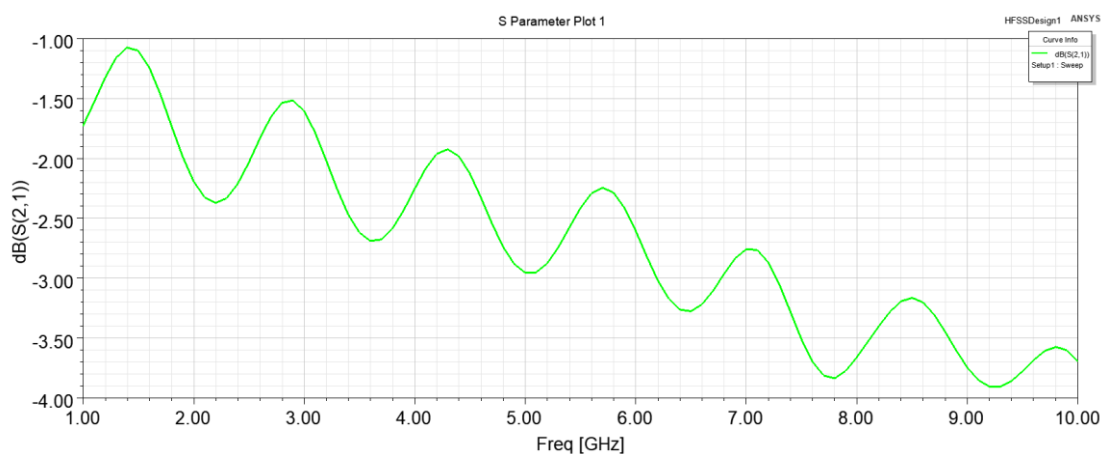
V programu HFSS byly vytvořeny dva modely mikropáskového vedení pro simulaci napájení flíčkových antén (obr. 6.1). Za použití dat o vodivosti $\sigma = 13158 \text{ S/m}$ a hustotě $\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$ vodivého spreje [35] byly nasimulovány charakteristiky přenosových ztrát vedení vodivého spreje (obr. 6.3). Pro měděnou folii byly zvoleny parametry vodivosti $\sigma = 58000000 \text{ S/m}$ a hustoty $\rho = 8933 \text{ kg/m}^3$ přímo z programu (obr. 6.2). Rozměry byly zvoleny s pomocí internetových kalkulaček pro výpočet mikropáskových vedení a předchozích zkušenostech z článku o 3D tisku antén [33]. Po výpočtech použitých u jiných realizací antén [34] byly rozměry simulovaného mikropáskového vedení stanoveny na 68 x 3 mm. Simulovány byly na substrátu s rozměry 68 x 68 x 1,7 mm a relativní permitivitou PLA filamentu $\epsilon_r = 2,55$. Šířka mikropásku 3 mm byla následně použita i pro realizaci samotných flíčkových antén.



Obrázek 6.1 Simulovaný model vedení



Obrázek 6.2 Simulace přenosových ztrát mikropáskového vedení z měděné folie



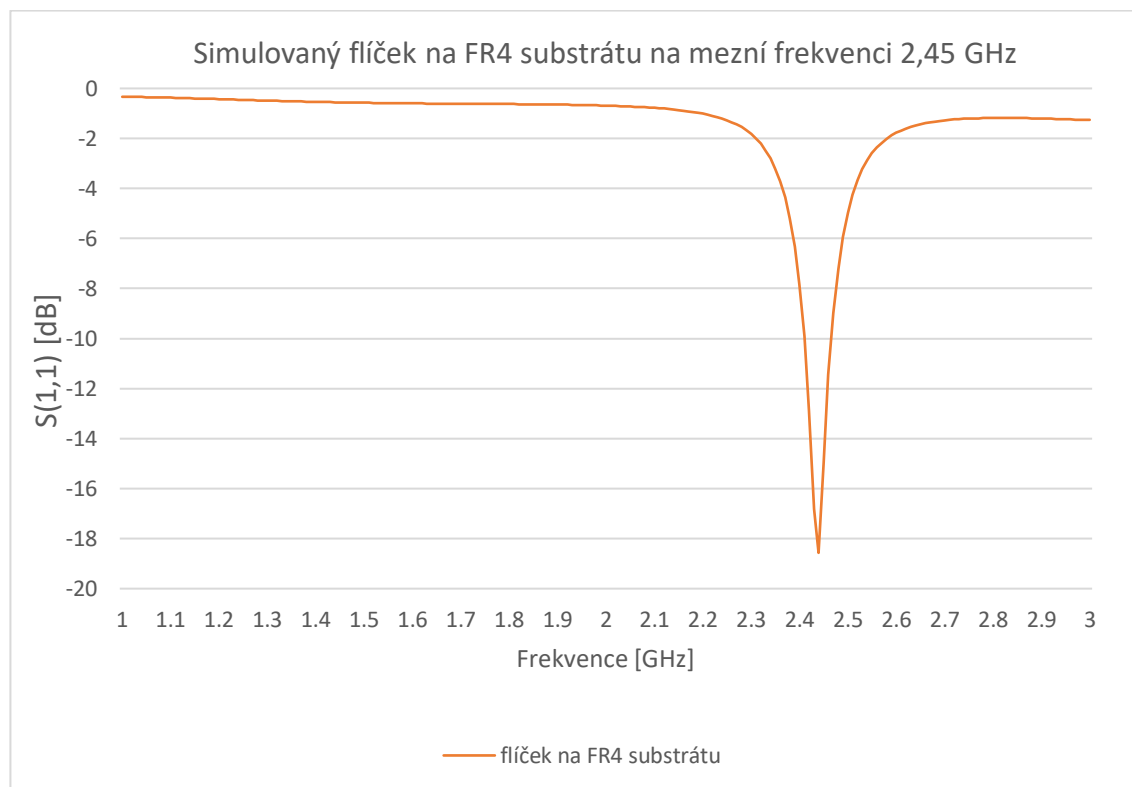
Obrázek 6.3 Simulace přenosových ztrát mikropáskového vedení z vodivého spreje

6.2 Flíčkové antény

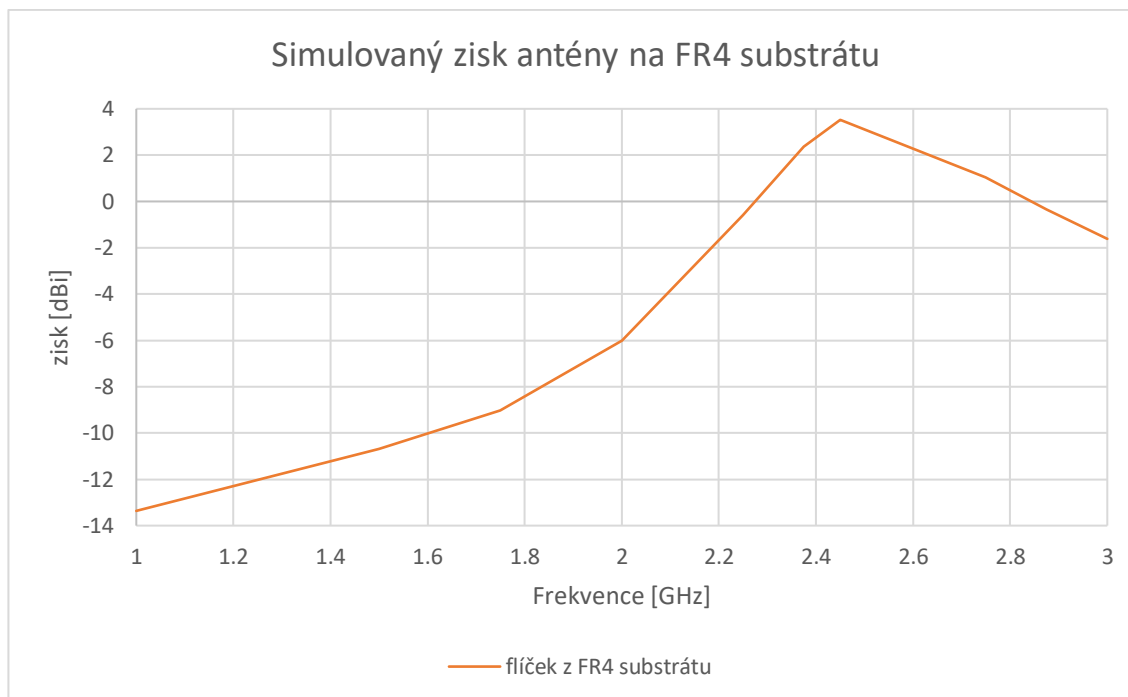
Hlavní částí práce bylo vytvořit flíčkovou anténu za použití informací získaných z průběhu testování pokovovacích technik. Jako předpoklad byla vytvořena simulace flíčkové antény na známém substrátu FR4 s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,2$ zhotovená leptací technikou (obr. 6.4 a 6.5). Rozměry antény byly vypočteny pomocí vzorců pro výpočet flíčkové antény [34], ověřeny pomocí online kalkulačky a následně v simulaci otestovány.

Dále byly vytvořeny simulace předběžných výsledků pro flíčkovou anténu zhotovenou vodivým sprejem a samolepící měděnou folií. Pro tyto simulace byla zvolena relativní permitivita substrátu pro 3D tisk PLA $\epsilon_r = 2,55$, elektrická vodivost mědi $\sigma = 58\,000\,000$ S/m, hustota mědi $\rho = 8933$ kg/m³, vodivost spreje $\sigma = 13\,158$ S/m a hustota spreje $\rho = 1380$ kg/m³. Výsledky simulací ukazují činitel odrazu (obr.

6.4, 6.9 a 6.11), vyzařovací diagram (obr. 6.6 a 6.7) a zisk antén (obr. 6.5, 6.10 a 6.12). Všechny simulace a následné rozměry antén byly navrženy pro mezní kmitočet 2,45 GHz



Obrázek 6.4 Simulovaný činitel odrazu pro flíček na FR4 substrátu

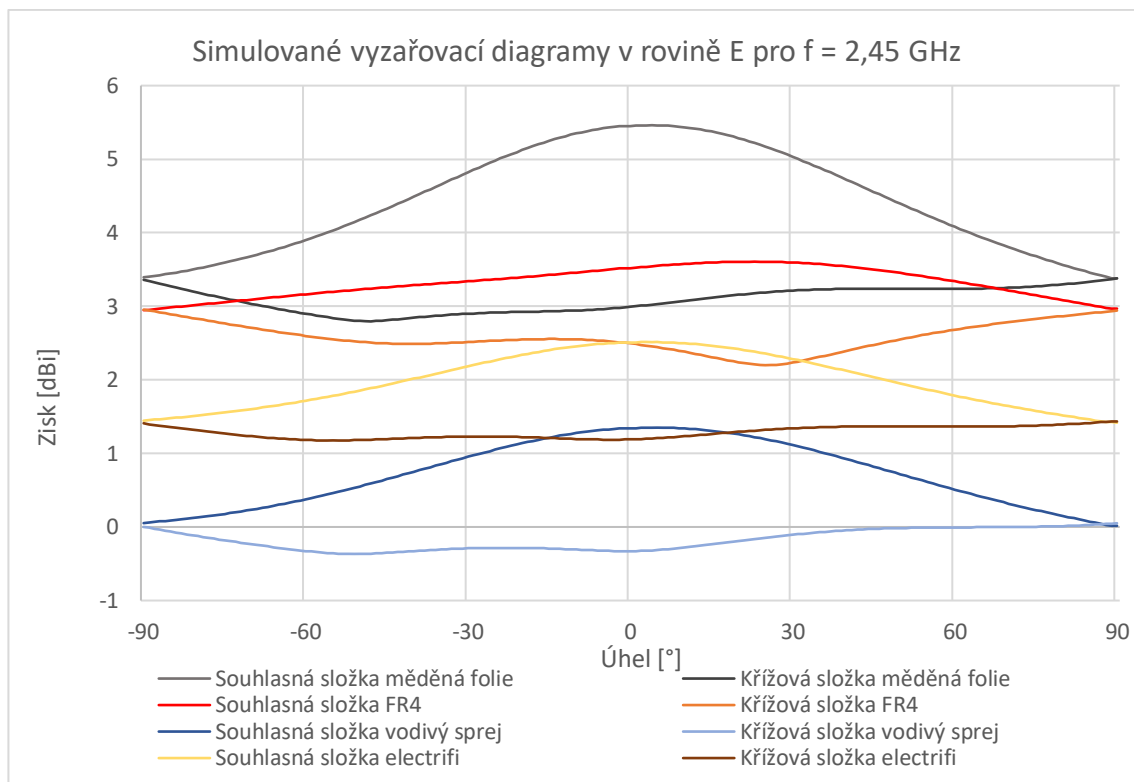


Obrázek 6.5 Simulovaný zisk antény na FR4 substrátu

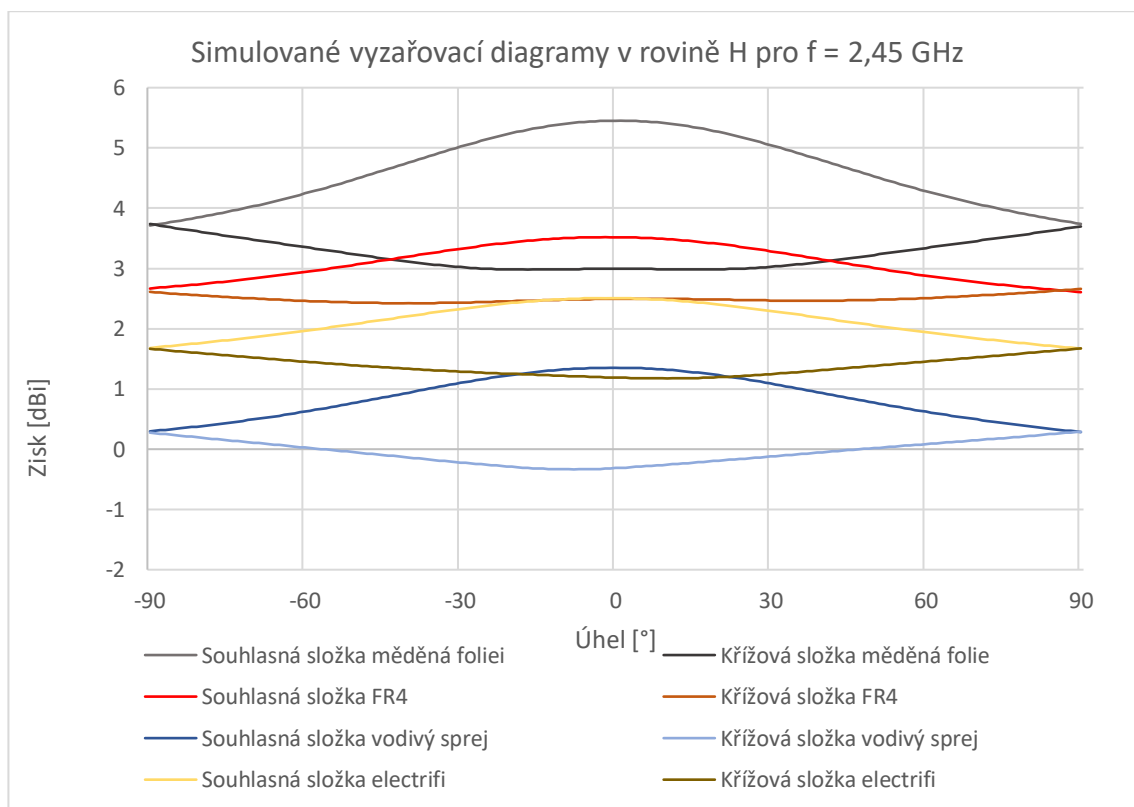
Pro realizaci bylo nejdříve nutné vytvořit model substrátu a vybrat filament. Pro zhotovení substrátu byla zvolena tiskárna Prusa i3 MK3S s filamentem PrusaPLA 1,75 mm s výplní 100 %. Rozměry substrátu $L = W = 100$ mm, $h = 1,7$ mm. Po vytisknutí se substráty museli lehce očistit lihem a připravit na pokovení. Jako první se na oba substráty přilepila vrstva měděné folie ze spodní strany jako zemnicí deska to i pro anténu z vodivého spreje kvůli následnému pájení konektoru a pro přidavnou stabilitu. Lepení konektoru pouze vodivým lepidlem by mohlo mít při měření a manipulaci za důsledek zničení antény.

Rozměry antén byly zvoleny po výpočtech pomocí vzorců použitých při dřívějších realizacích antén [34], pomocí internetových kalkulaček a simulacích na různých mezních frekvencích.

Rozměry antén jsou popsány v dalších bodech (tab.1, tab.2 a obr. 6.8). Po výpočtu rozměrů byly vytvořeny modely antén a nasimulovány grafy předpokládaných vyzářovacích diagramů antén zhotovených vodivým sprejem s vodivostí $\sigma = 13\,158$ S/m a měděnou folii s vodivostí $\sigma = 58\,000\,000$ S/m. K nim byly přidány i simulace antény z mědi na substrátu FR4 s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,2$. Přidána byla i anténa z elektriky vodivého filamentu electricí s vodivostí $\sigma = 16\,667$ S/m. Antény z vodivého spreje, měděné folie a vodivého filamentu byly simulovány na substrátu z PLA filamentu s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,55$.



Obrázek 6.6 Simulace vyzářovacích diagramů v rovině E na frekvenci $f = 2,45$ GHz



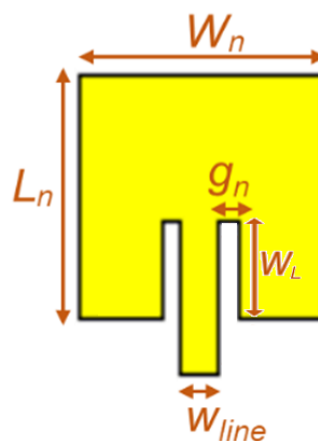
Obrázek 6.7 Simulace vyzářovacích diagramů v rovině H na frekvenci $f = 2,45$ GHz

6.2.1 Flíčková anténa z měděné folie

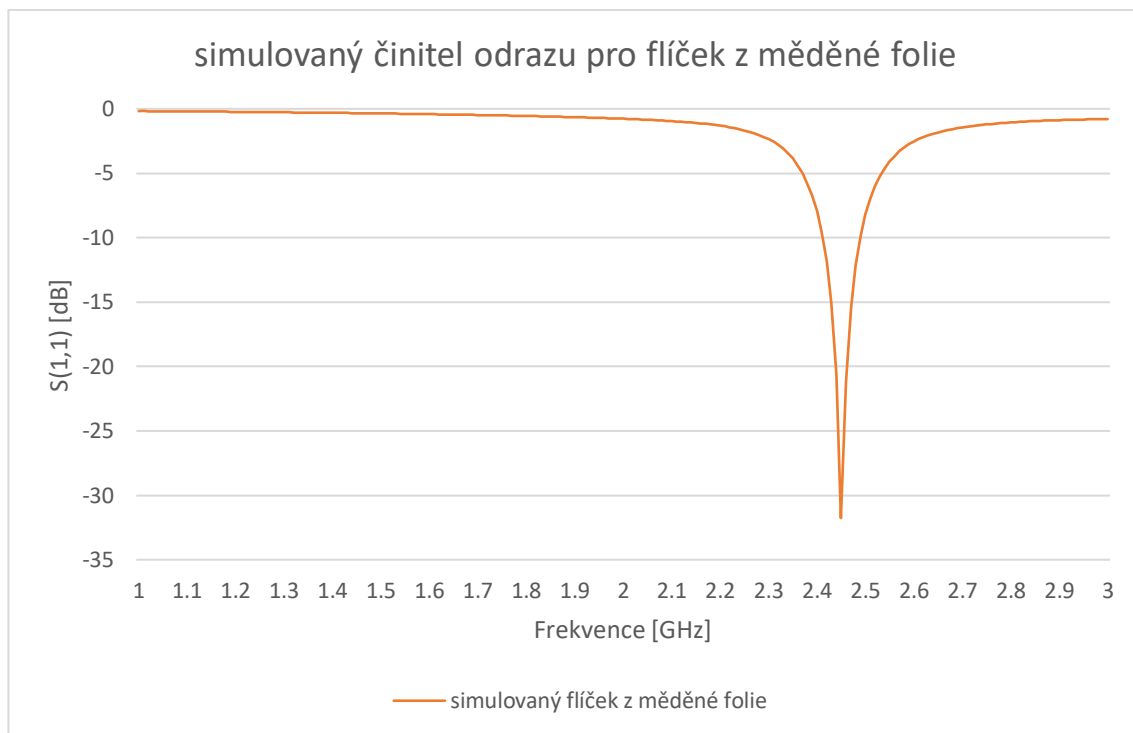
Flíčková anténa z měděné folie s vodivostí $\sigma = 58\,000\,000$ S/m a hustotou $\rho = 8933$ kg/m³ byla zhotovena na 3D tištěný PLA substrát s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,55$ o rozměrech 100 x 100 x 1,7 mm. Pro flíčkovou anténu z měděné folie byla vytvořena šablona s přesnými rozměry a následně přenesena na samolepící měděnou folii. Bylo nutné pracovat tak aby nepřišla měď do kontaktu s kůží pro zachování dobrých elektrických vlastností mědi. Zde nastávají dva problémy. První je že při stříhání samolepící měděná folie tak malých rozměrů se folie sama odlepuje od voskované vrstvy a ztrácí tak přilnavou schopnost. Druhý problém nastává při stříhání vnitřních stěn v okolí impedančního přizpůsobení, je těžké zachovat přesnost s velkými nůžkami na plech. Po vystřihnutí obrysu byla flíčková anténa nalepena na očištěnou plochu substrátu. Došlo k mírnému naklonění od hrany substrátu, ale šlo o zanedbatelnou odchylku. Jako poslední byl připojen SMA konektor pomocí pájení přímo na měď (obr. 6.13). Pájení konektoru dále způsobilo mírné vychýlení vyzářovací charakteristiky a zapříčinilo vznik parazitního vyzářování v rovině E (obr. 6.16). Rozměry antény byly po simulaci na 2,45 GHz zvoleny viz. tabulka 1.

Tabulka 1 Rozměry pro flíčkovou anténu z měděné folie

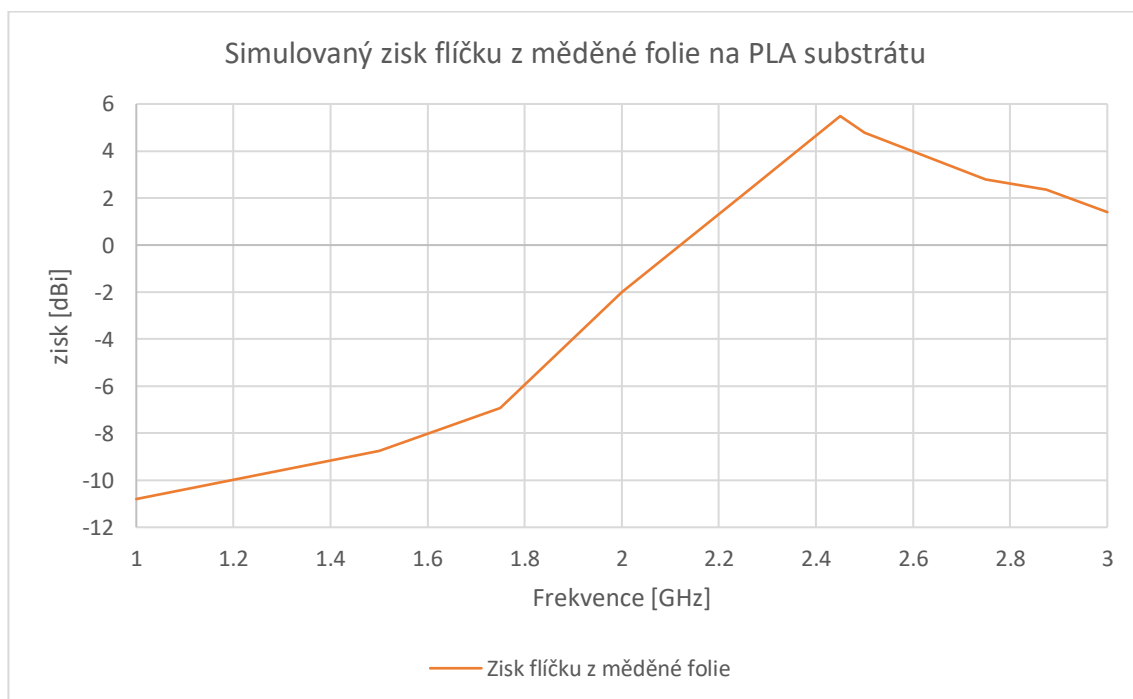
$f_m = 2,45$ GHz	W_n [mm]	L_n [mm]	g_n [mm]	W_L [mm]	W_{line} [mm]
měděná folie	45,58	37,31	2	10	3



Obrázek 6.8 Popis rozměrů flíčkové antény



Obrázek 6.9 Simulovaný činitel odrazu pro anténu z měděné folie



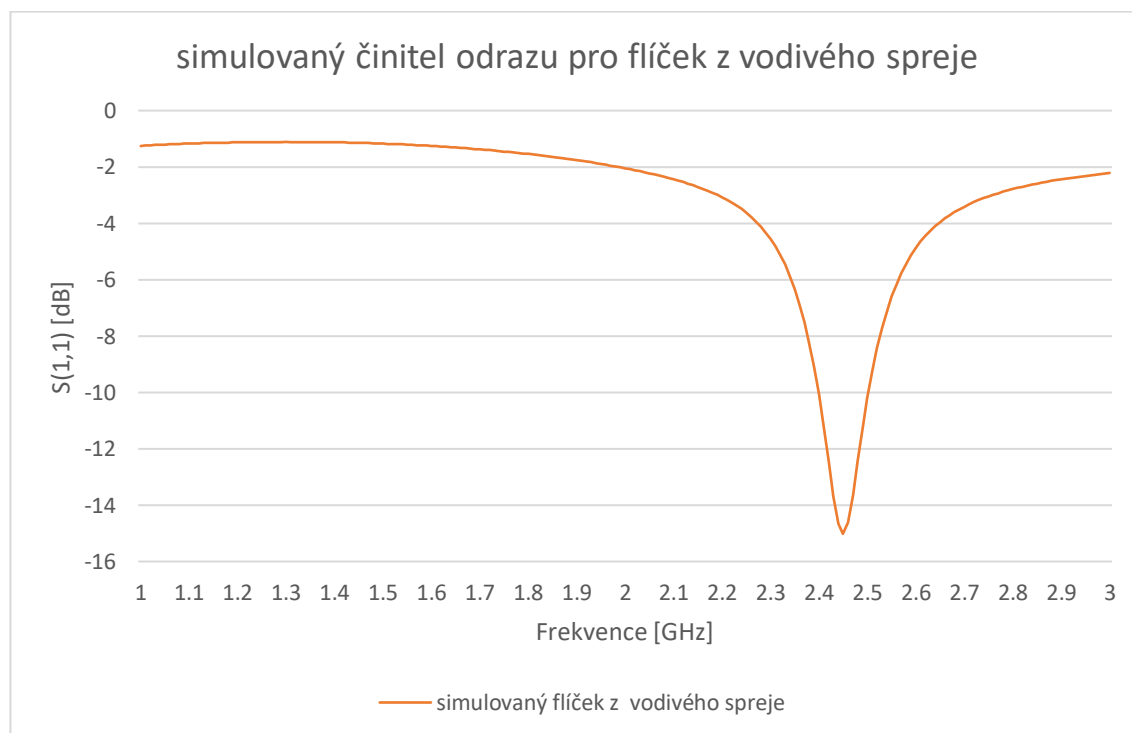
Obrázek 6.10 Simulovaný zisk antény na PLA z měděné folie

6.2.2 Flíčková anténa z vodivého spreje

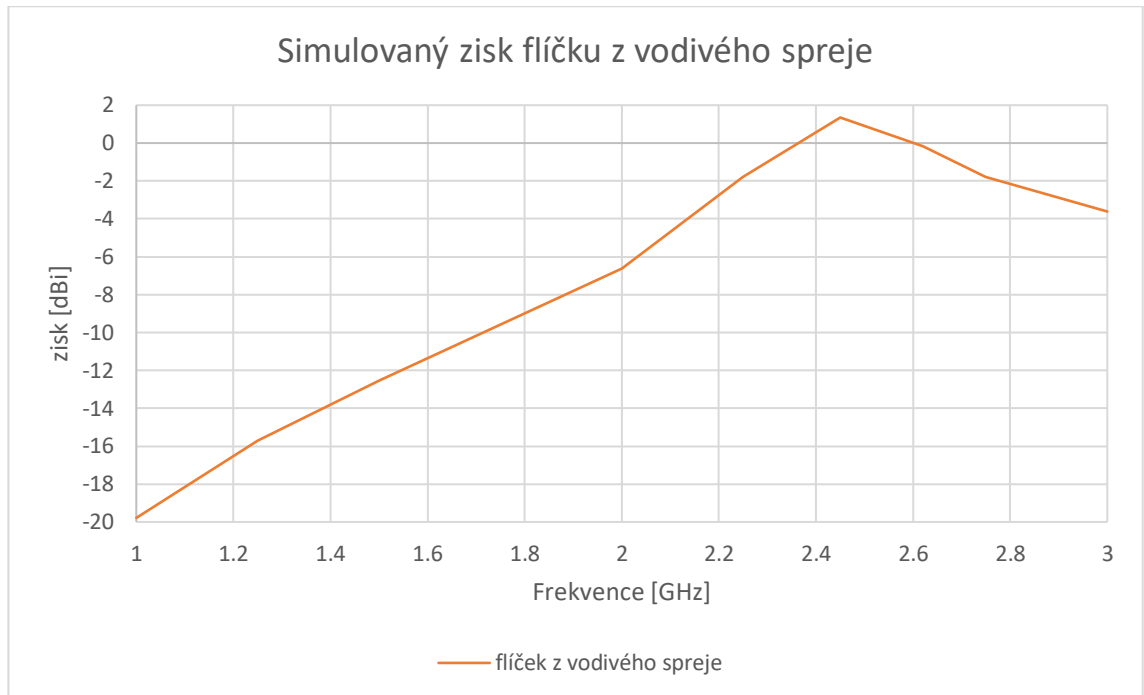
Flíčková anténa byla pomocí vodivého spreje s vodivostí $\sigma = 13158 \text{ S/m}$ a hustotou $\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$ zhotovena na stejný PLA substrát s rozměry $100 \times 100 \times 1,7 \text{ mm}$ a relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,55$. Pro flíček z vodivého spreje bylo potřeba vytvořit šablonu s prázdným flíčkem uvnitř. Ta byla zhotovena z tvrdého povoskovaného papíru a následně oboustrannou lepící páskou připevněna do středu plochy substrátu. Poté se velmi opatrně a kolmo, ze vzdálenosti minimálně 20 cm nanasla tenká vrstva vodivého spreje. Opět za použití ochranných pomůcek jako v bodě 5.4.2. Po zaschnutí spreje a odstranění šablony byl jako poslední přidán SMA konektor, který nebylo možné spojit s mikropáskovým napájením pomocí pájení. Bylo nutné použít elektricky vodivé lepidlo, které se míchá ze dvou složek a tuhne 24 hodin. Zemní deska byla po zatuhnutí lepidla spojena se zemí konektoru pájením (obr. 6.14). Rozměry antény pro mezní frekvenci 2,45 GHz byly zvoleny viz. tabulka 2.

Tabulka 2 Rozměry pro flíčkovou anténu z vodivého spreje

$f_m = 2,45 \text{ GHz}$	W_n [mm]	L_n [mm]	g_n [mm]	W_L [mm]	W_{line} [mm]
vodivý sprej	45,21	37,01	2	10	3



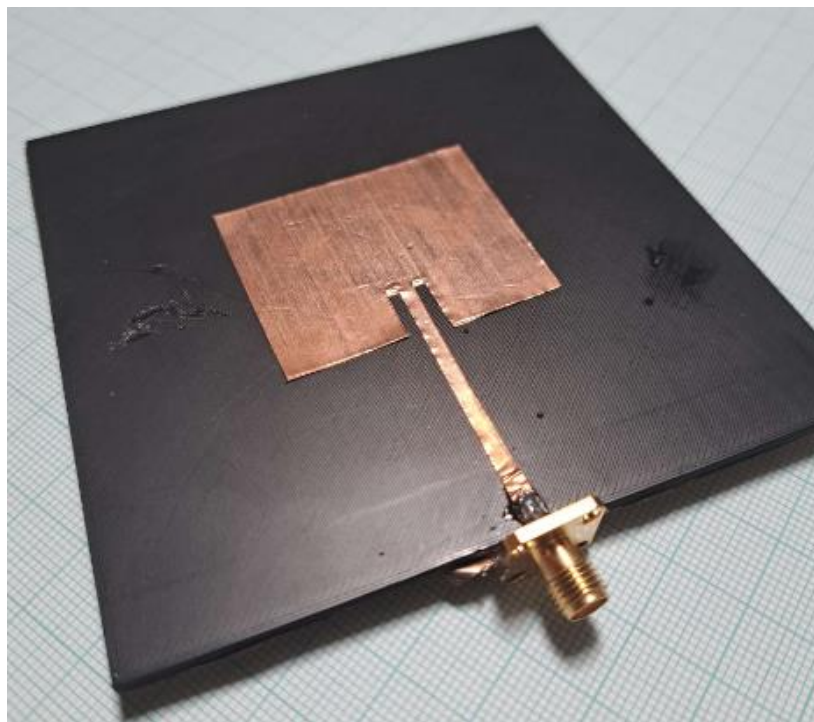
Obrázek 6.11 Simulovaný činitel odrazu pro anténu z vodivého spreje



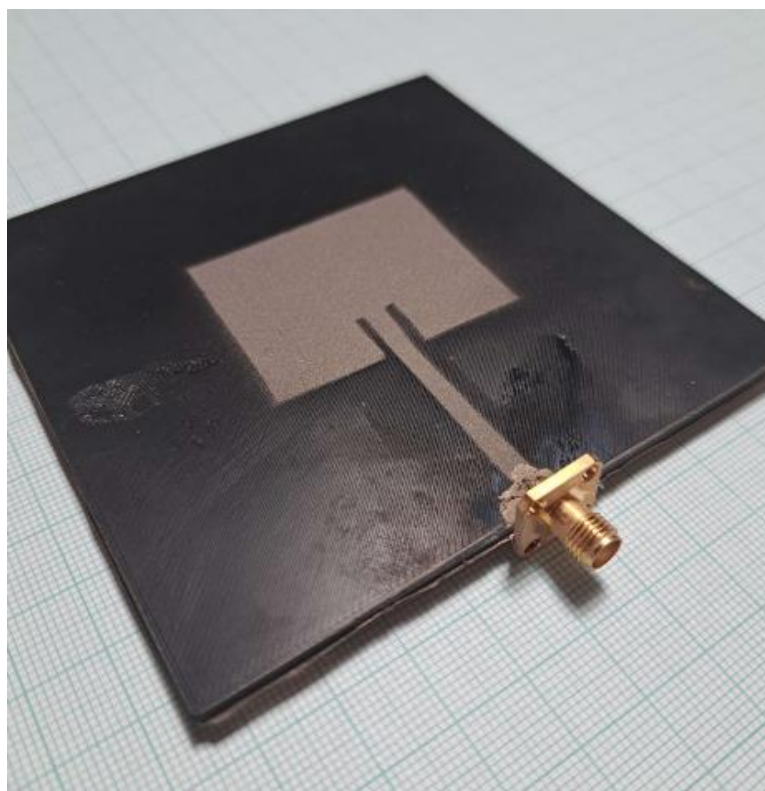
Obrázek 6.12 Simulovaný zisk antény na PLA z vodivého spreje

6.3 Měření

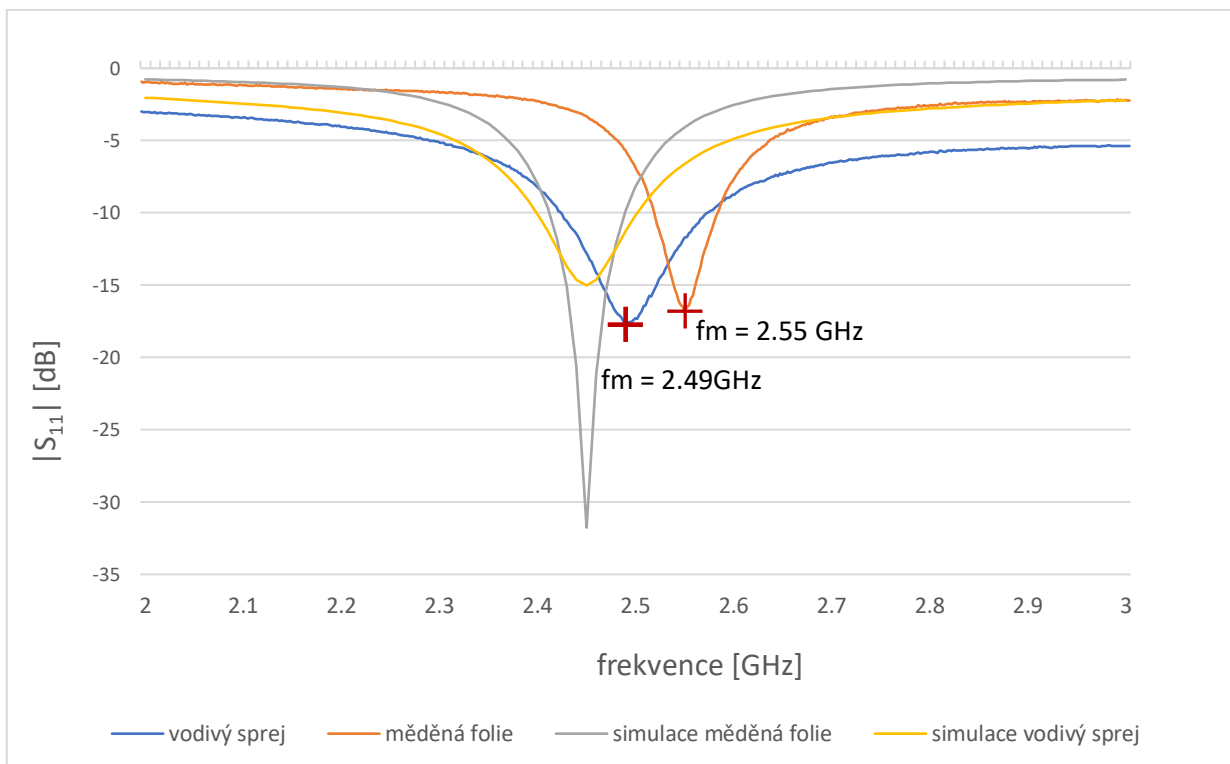
Při měření S parametrů antén se ukázalo, že mezní frekvence obou antén jsou lehce posunuty oproti původní simulované 2,45 GHz (obr. 6.15). A to konkrétně u antény z měděné folie na 2,55 GHz a u antény z vodivého spreje na 2,49 GHz. Tato odchylka byla pravděpodobně způsobena nepřesnou realizací šablon a odlišnou permitivitou substrátu oproti simulaci. Na frekvenční posun mělo i vliv nepřesné zhotovení flíčku zmenšení rozměrů flíčku při stříhání měděné folie viz. bod 6.2.1. Při takto malých rozměrech může i malá odchylka způsobit velký frekvenční posun. Následně byly změřeny vyzařovací diagramy (obr. 6.16 a 6.17) a zisky antén (tab. 3). Pro měření vyzařovacích diagramů byly zvoleny mezní frekvence, které byly změřeny (obr. 6.15) nikoliv simulovány. Takže anténa z měděné folie byla měřena na frekvenci 2,55 GHz a anténa z vodivého spreje na 2,49 GHz.



Obrázek 6.13 Flíčková anténa z měděné folie



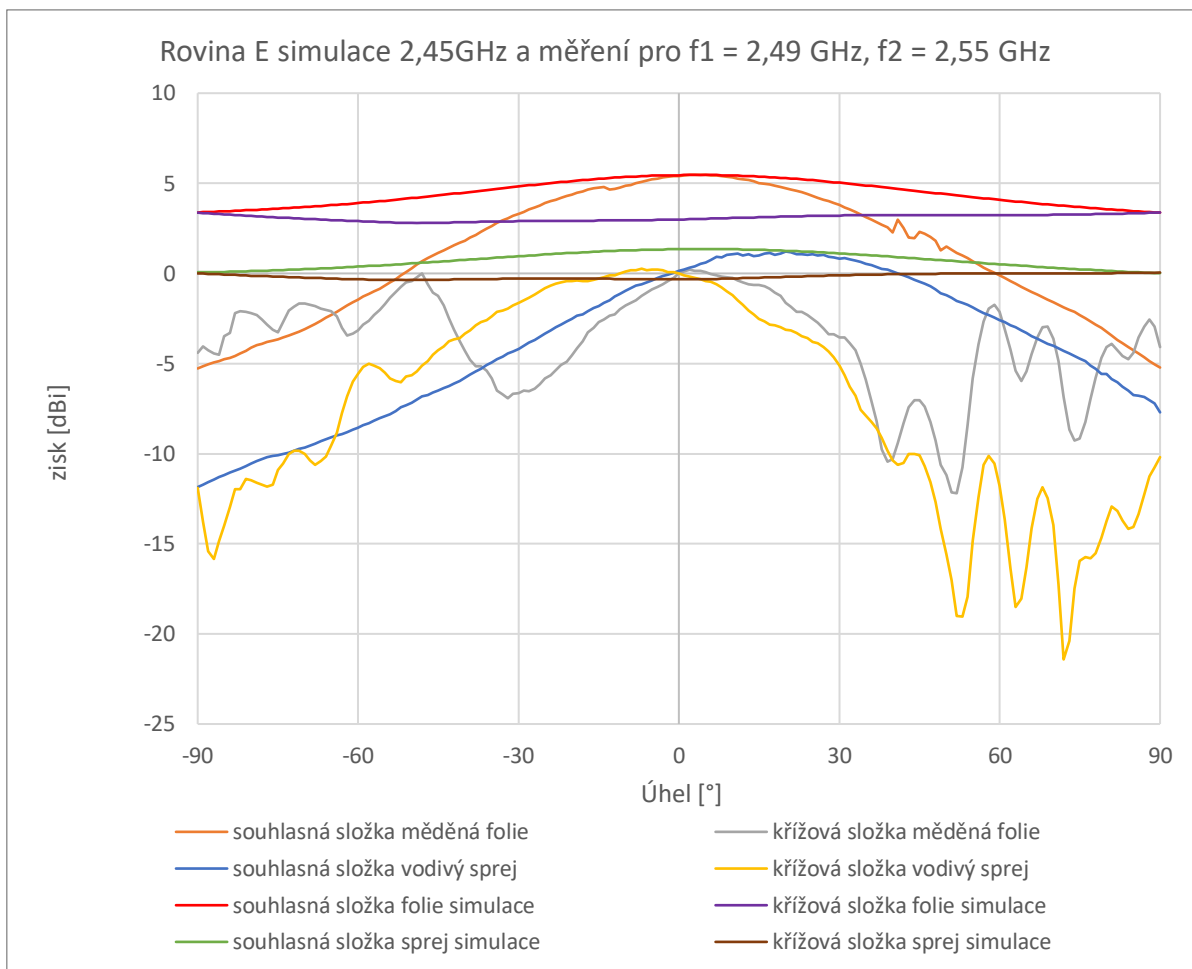
Obrázek 6.14 Flíčková anténa z vodivého spreje



Obrázek 6.15 Porovnání měřeného a simulovaného činitele odrazu antén

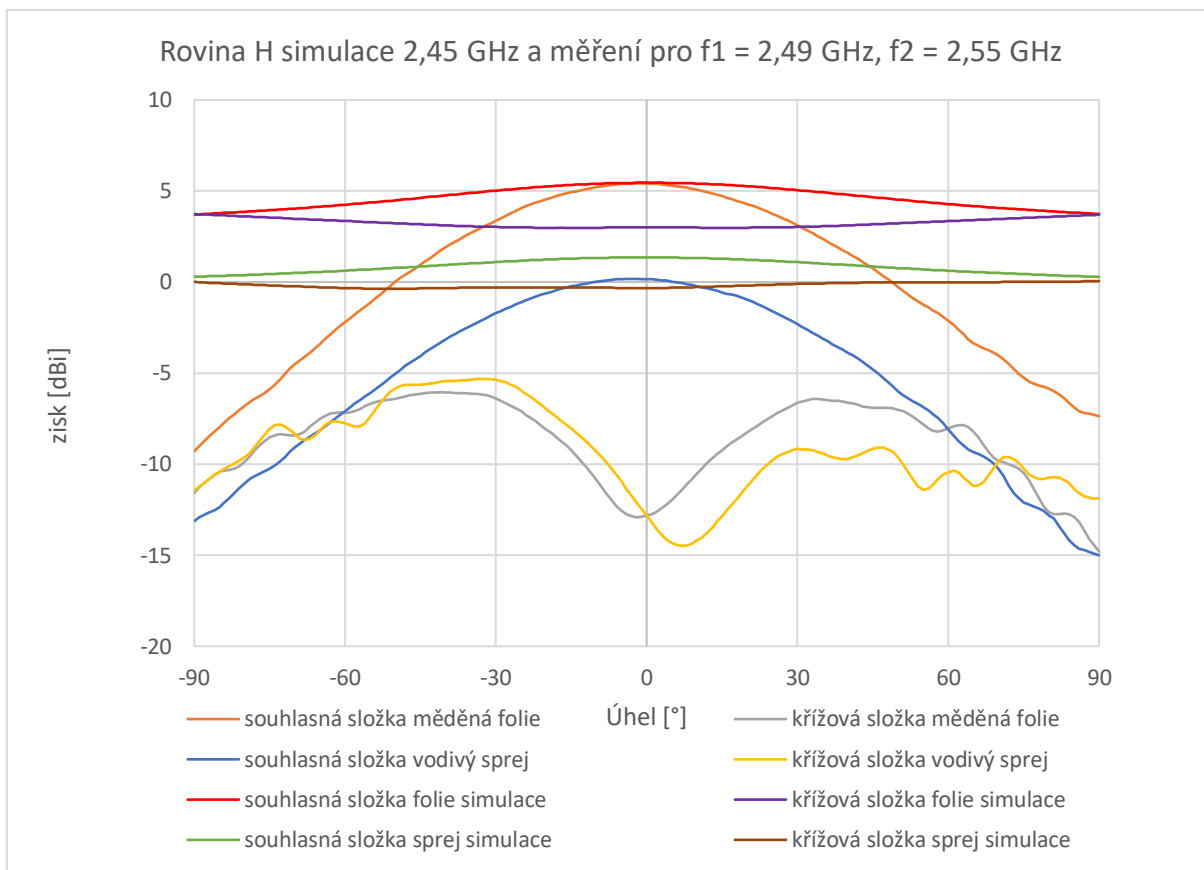
V porovnání se simulací jsou mezní kmitočty antén posunuty, v případě vodivého spreje o 40MHz, v případě měděné folie až o 100MHz. Stejně tak se liší i činitele odrazu. V případě flíčku z vodivého spreje je rozdíl 2,6 dB u flíčku z měděné folie je rozdíl oproti simulaci až 15 dB. Za tento posun může nepřesnost při výrobě antény, obzvláště při stříhu měděné folie.

Vyzařovací diagramy byly změřeny pro každou anténu na jiné frekvenci. Z výsledků měření S parametrů antén byly zvoleny frekvence měření flíčku z vodivého spreje $f_1 = 2,49$ GHz, a pro flíček z měděné folie $f_2 = 2,55$ GHz. Vyzařovací diagramy jsou vyneseny do dvou rovin E a H společně pro souhlasnou a křížovou složku (obr. 6.16 a 6.17).



Obrázek 6.16 Měřené a simulované vyzařovací diagramy v rovině E

Při měření se ukázalo že anténa pokovená vodivým sprejem je lehce odchýlena od osy substrátu pod úhlem $5,7^\circ$. Toto odchýlení od základny bylo způsobeno nepřesným přilnutím konektoru k mikropáskovému napájení při lepení. Na grafu (obr. 6.16) je vidět, jak úhel připojení konektoru k anténě způsobil vyosení vyzařovací charakteristiky souhlasné složky v rovině E a křížové složky v rovině H (obr. 6.17). To mělo za důsledek menší hodnotu zisku v normálovém směru, neboť maximální zisk byl posunut o $15-20^\circ$.



Obrázek 6.17 Měření a simulované vyzářovací diagramy v rovině H

V poslední řadě byl změřen zisk obou antén v normálovém směru (tab. 3).

Tabulka 3 Zisky a porovnání změřených dat antén se simulacemi

	Simulovaný zisk [dBi]	Měřený zisk [dBi]	Simulované S parametry na 2,45 GHz [dB]	Změřené S parametry na 2,55 GHz [dB]	Změřené S parametry na 2,49 GHz [dB]
Vodivý sprej	1,34	0,16	-15,01	—	-17,69
Měděná folie	5,48	5,41	-31,76	-16,77	—

7. ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byly vytvořeny a následně pokoveny čtyři modely (obr. 5.1 a 5.10) dvěma technologiemi 3D tisku s různými strukturami. Cílem bylo zjistit, jak se různé struktury, díry, záhyby, rovné plochy atd. dají pokovit různými technikami. Bylo zjištěno, že na rovné, velké plochy tvořené hlavně pomocí FDM je nejlepší měděná folie (obr. 5.5). Zatímco na malé díry a záhyby obzvláště pro tisk SLA technologií je lepší elektricky vodivý sprej (obr. 5.13). V hlavní části práce byly zhotoveny dvě flíčkové antény na 3D tištěném substrátu (obr. 6.13 a 6.14). A to pomocí měděné folie a elektricky vodivého spreje. Obě antény byly porovnány se simulací (bod 6.2) s již známými technikami jako je leptání na FR4 substrátu nebo již v textu zmíněný 3D tisk pomocí vodivého filamentu. Po zhotovení byly obě antény změřeny v laboratoři. Měření ukázalo že zhotovení antén tak malých rozměrů vyžaduje značnou zručnost, a i zde nastaly drobné chyby při realizaci. Mezní frekvence byla u antény z měděné folie posunuta až o 100 MHz to bylo způsobeno především zmenšením rozměrů antény během stříhání měděné folie. Ze stejného důvodu nastal posun i u antény z vodivého spreje nicméně kvůli tvorbě přímo ze šablony nevznikl posun tak velký a mezní frekvence se posunula o 40MHz. Poté při připojení konektorů k anténám vznikl u antény z vodivého spreje problém při tuhnutí vodivého lepidla. Lepidlo tuhne pomalu a při špatné fixaci konektoru došlo během tuhnutí k odchýlení konektoru o $5,7^\circ$ od základny antény. Což způsobilo při měření horší zisk v normálovém směru a posunutí vyzařovací charakteristiky o zhruba 17° v rovině E (obr. 6.16). U antény z měděné folie způsobil problém odvod tepla mědi, kde při pájení konektoru došlo k natavení malého kousku substrátu a nahromadění většího množství cínu na hraně konektoru antény, což následně způsobilo parazitní vyzařování v rovině E. Měřené zisky v normálovém směru se mírně lišili od výsledků simulací, pro vodivý sprej byla odchylka 1.18 dB a pro měděnou folii 0,07 dB (tab. 3). V případě správného připojení konektoru, a tím pádem posunutí maximálního zisku do normálového směru, u antény z vodivého spreje, by rozdíl zisku oproti simulaci byl jen 0,01 dB. S rostoucím úhlem klesal i zisk a zvětšovala se odchylka od simulace kde v krajních bodech (-90° a 90°) byl rozdíl až 10 dB oproti simulaci. Tvorba flíčkových antén pomocí pokovování 3D tištěných substrátů má určitě spoustu výhod jako třeba rychlost samotného návrhu i následného tisku a pokovení musí se ale dbát na přesné zhotovení a následnou opatrnou manipulaci při dokončování a připojování konektorů.

LITERATURA

- [1] Historie a současnost 3D tisku. 3D tisk na zakázku [online]. c2021 [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.html>
- [2] 3D tisk. 3D-tisk [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/3d-tisk/>
- [3] 3D tisk. Wikipedie otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk
- [4] Fused Deposition Modeling. 3D-tisk [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>
- [5] Fused deposition Modeling (FDM). Custompart [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [6] ROSSI, Sergio; PUGLISI, Alessandra; BENAGLIA, Maurizio. Additive manufacturing technologies: 3D printing in organic synthesis. *ChemCatChem*, 2018, 10.7: 1512-1525.
- [7] Laminated Object Manufacturing (LOM). Custompart [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [8] OLAKANMI, Eytayo Olatunde; COCHRANE, R. F.; DALGARNO, K. W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 401-477.
- [9] Informace o technologiích 3D tisku. Easycnc [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [10] Stereolithography. Custompart. [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [11] The beginner's Guide. 3DPrintingIndustry. [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#03-technology>
- [12] KADRY, Hossam, et al. Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2019, 135: 60-67.
- [13] GUIMARÃES, André Luiz Alves, et al. Influence of ABS print parameters on a 3D open-source, self-replicable printer. *Rapid Prototyping Journal*, 2020.
- [14] ABS+. Materialpro3D. [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/abs-1-75/abs-startpack-1-75mm-6x330g-dd/>
- [15] ASLANI, Kyriaki-Evangelia, et al. Quality performance evaluation of thin walled PLA 3D printed parts using the taguchi method and grey relational analysis. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2020, 4.2: 47.
- [16] TPE (flexibilní). ComputerLaboratory. [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://www.clexpert.cz/3dtisk/plast/tpe>

- [17] PETG. ComputerLaboratory. [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://www.clexpert.cz/3dtisk/plast/petg>
- [18] Polymethylmethakrylát. Wikipedie otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethakryl%C3%A1t>
- [19] Electrifi. Multi3D. [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://www.multi3dllc.com/product/electrifi/>
- [20] ABS Conductive filament. Elegant3D. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/ABS-Conductive-filament-cerna-1-75-mm-1-kg-d76.htm#detail-anchor-description>
- [21] PLA Conductive filament. Elegant3D. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/PLA-Conductive-filament-Proto-Pasta-cerna-1-75-mm-10-m-d222.htm#detail-anchor-description>
- [22] Black Magic 3D. 3DCompare. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://3dcompare.com/materials/product/black-magic-3d-conductive-graphene-composite-1-75-mm/>
- [23] KIM, Myung Jun, et al. One-step electrodeposition of copper on conductive 3D printed objects. *Additive Manufacturing*, 2019, 27: 318-326.
- [24] CFJet PET-G/CF tisková struna. Materialpro3D. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/s-karbonem/pet-g-cf-filament-1-75-cerny-pm/>
- [25] Dokončovací operace. 3D-tisk [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/dokoncovaci-operace/>
- [26] How to Smooth 3D-Printed Parts. MachineDesign. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21832012/how-to-smooth-3dprinted-parts>
- [27] LENFELD, Petr. Doplnkové technologie pro zpracování plastů: Technologie spojování plastů. *Technologie II*, 2005.
- [28] Leptací technika. Conrad. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/pb-fastener-medena-folie-samolepici-d-x-s-150-mm-x-30-mm-mnozstvi-10-ks-529532>
- [29] Galvanické poměďování. FyzWeb. [online]. [cit. 2021-28-12] Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=217>
- [30] PARK, Nowoo; KIM, Il Won; KIM, Jooyong. Copper metallization of poly (ethylene terephthalate) fabrics via intermediate polyaniline layers. *Fibers and Polymers*, 2009, 10.3: 310-314.
- [31] VÍTKOVÁ, Romana. Zlepšování v procesu pokovení. 2016.
- [32] Vakuové napařovačky. PZPKomplet. [online]. [cit. 2021-28-12]. Dostupné z: <https://www.pzp.cz/cs/m-34-vakuove-naparovacky#prettyPhoto>
- [33] PIZZARO, F., SALAZAR, R., RAJO-IGLESIAS, E., RODRIGUEZ, M., DINGERHUTH, S., HERMOSILLA, G. Parametric Study of 3D Additive Printing Parameters Using Conductive Filaments on Microwave Topologies. In:

- IEEE Access, vol. 7, pp. 106814-106823, 2019. [cit. 2023-3-05] Dostupné z:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8786183&tag=1>
- [34] HUBKA, P. Obdélníková flíčková anténa pro pásmo 60 GHz. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 47 s.. Diplomová práce. [cit. 2023-25-05]
- [35] 841AR Aerosol, Conductive Spray Paint data sheet. [cit. 2023-25-05] Dostupné z:
<https://www.mgchemicals.com/downloads/tds/tds-841ar-a.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
FDM	Fused Deposition Modeling
LOM	Laminated Object Manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
SLA	Stereolithography
DLP	Digital Light Processing
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PLA	Polylactic acid
TPE	Thermoplastic elastomers
PET	Polyethylene terephthalate
PET-G	Polyethylene terephthalate glycol
PMMA	Polymethyl methacrylate
STL	Standard Triangle Language
CAD	Computer-aided design
UV	Ultraviolet
SMA	Typ konektoru – SubMiniaturní verze A

Symboly:

R	odpor	(Ω)
t	teplota	($^{\circ}\text{C}$)
ϵ_r	relativní permitivita	(F m^{-1})
σ	elektrická vodivost	(S m^{-1})
ρ	hustota	(kg m^{-3})