



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH VYHŘÍVANÉHO ATYPICKÉHO STOLU PRO 3D
TISKÁRNU**

DESIGN OF ATYPICAL HEATED BED FOR 3D PRINTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Strnad

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Strnad**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh vyhřívaného atypického stolu pro 3D tiskárnu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce obsahuje konstrukční část, včetně vyhodnocení teplot s využitím MKP, a následnou výrobu vyhřívaného stolu pro FDM 3D tisk. Součástí je rovněž rešerše problematiky a technicko-ekonomické vyhodnocení.

Cíle diplomové práce:

- rešerše problematiky
- konstrukční návrh
- kontrolní výpočty MKP
- výroba atypického vyhřívaného stolu
- vyhodnocení a doporučení do budoucna

Seznam literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.

ZEMČÍK, Oskar. Technologická příprava výroby. Brno: Cerm, 2002, 158 s. ISBN 80-214-2219-X.

Springer handbook of mechanical engineering. 1st ed. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-354-0491-316.

MOAVENI, Saeed. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008, xv, 861 s. Pearson education international. ISBN 978-0-13-241651-1.

LAWRENCE, Kent L. ANSYS workbench tutorial: structural. Mission: SDC Publications, 2012, 1 sv. (různé stránkování). Tickoo-CADCIM series. ISBN 978-1-58503-754-4.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, 322 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.

CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 25. 11. 2015



VZ. 

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

VZ. 

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem atypického vyhřívaného stolu pro FDM 3D tiskárnu. Jsou představeny nejčastěji používané způsoby vyhřívání, z nich je vybrána varianta stolu realizovaná rezistory. Dále jsou diskutovány tři způsoby rozmístění rezistorů na ploše základní desky. Ty jsou namodelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2016 a exportovány do programu Autodesk Fusion 360, kde jsou provedeny výpočty MKP. Optimální varianta je vyrobena a otestována. Výsledky testování jsou porovnány s výsledky tepelných simulací v programu Autodesk Fusion 360.

Klíčová slova

Vyhřívání stůl, MKP, 3D tisk, FDM, Autodesk Fusion 360.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with an atypical heated bed for FDM 3D printer. It presents the most commonly used ways of heating and the chosen variant of the heated beds is realized by powerful resistors. There are also discussed three ways of placement of the resistors on the desktop of motherboards, that are modeled in Autodesk Inventor Professional 2016 and exported to Autodesk Fusion 360, where FEM calculations are made. The optimal alternative is made and tested. The test results are compared with the results of thermal simulations in Autodesk Fusion 360.

Key words

Heated bed, FEM, 3D printing, FDM, Autodesk Fusion 360.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRNAD, J. *Návrh vyhřívaného atypického stolu pro 3D tiskárnu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh vyhřívaného atypického stolu pro 3D tiskárnu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jan Strnad

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Aleši Polzerovi Ph.D. za propůjčení termografické kamery a podporu při testování, Ing. Jindřichu Machovi Ph.D. za propůjčení výkonného zdroje a Ing. Lubomíru Klimešovi Ph.D. za rady v oblasti teorie šíření tepla.

Také děkuji rodině, především otci za pomoc při výrobě vyhřívaného stolu, ale i přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH	8
ÚVOD	10
1 Rapid prototyping	11
1.1 Metody 3D tisku.....	12
1.1.1 Metoda SL.....	12
1.1.2 Metoda SLS;	13
1.1.3 Metoda FDM.....	14
1.2 Volba 3D tiskárny	15
1.2.1 Hlavní části 3D tiskárny	16
1.3 Problematika vyhřívaných stolů.....	17
1.3.1 PCB vyhřívaná deska.....	18
1.3.2 Stůl vyhřívaný spirálou z měděného drátu	19
1.3.3 Vyhřívaný stůl s topnými tělisky	20
1.3.4 Silikonová podložka	21
1.4 Výrobci vyhřívaných stolů	22
2 Teorie šíření tepla	24
3 Návrh atypického vyhřívaného stolu	31
3.1 Konstrukční návrh.....	32
3.1.1 Základní deska	33
3.1.2 Upevnění desky.....	35
3.1.3 Topná těliska a jejich rozmístění	35
3.1.4 Zdroj el. proudu	39
4 Rozmístění rezistorů na desce a kontrolní výpočet MKP	40
4.1 Rozmístění rezistorů	40
4.2 Výpočty MKP	42
4.2.1 Software pro výpočet MKP	42
4.2.2 Autodesk Fusin 360	43
5 Výroba Vyhřívaného stolu a měření	46
5.1 Výroba atypického vyhřívaného stolu	46
5.2 Měření termografickou kamerou FLIR ThermoCAM SC2000	48
5.2.1 Postup měření	49

5.2.2	Výsledky měření	49
6	Vyhodnocení a doporučení do budoucna.....	53
6.1	Porovnání naměřených hodnot s vypočtenými	53
6.2	Doporučení do budoucna	54
7	Technicko – ekonomické vyhodnocení	55
7.1	MK2a podložka výrobce Prusa Research s.r.o.	55
7.2	Atypický vyhřívaný stůl s hliníkovou základní deskou, realizovaný rezistory	56
8	Závěr	57
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
	SEZNAM PŘÍLOH.....	64

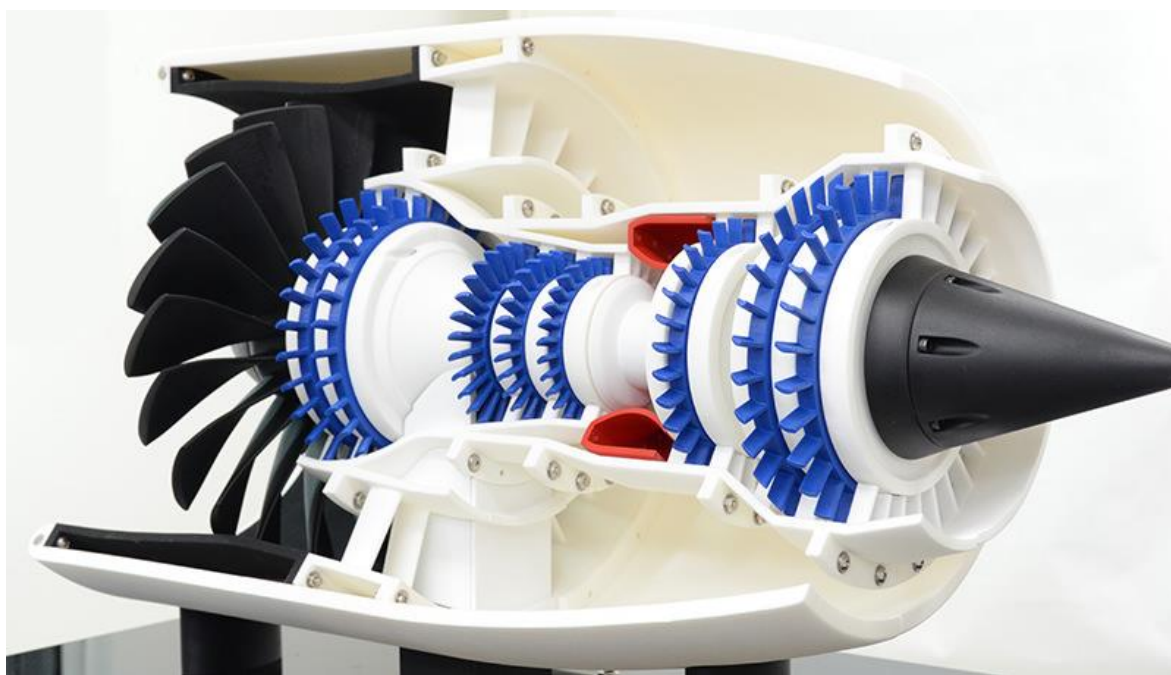
ÚVOD

3D tisk je proces, při kterém se vytvářejí trojrozměrné objekty z vhodného materiálu. Zařízení, které jej provádějí, se nazývají 3D tiskárny. Do roku 2003 byl jejich vývoj brzděn patenty. Po tomto roce však dochází k vypršení některých patentů, což přispívá k vývoji 3D tisku a tiskáren všeobecně.

V současné době je 3D tisk na takové úrovni, že se běžně tisknou, jak umělecké předměty (např. bysty či sochy), tak i funkční technické sestavy (např. replika proudového motoru, viz obr. 1). Velikosti produktů jsou limitovány velikostí 3D tiskárny (nemusí být výjimkou výrobek o velikosti rodinného domu) a tedy velikostí použitých jednotlivých komponent 3D tiskárny. Volba komponent o konkrétních vlastnostech a parametrech, dále pak volba softwaru je důležitým aspektem při stavbě a správné funkci 3D tiskárny.

Důležitou revoluci v jejich stavbě odstartoval mezinárodní komunitní projekt RepRap. Jedná se o projekt 3D tiskárny vyvíjené na principu otevřeného hardware. RepRap je složený převážně z plastových dílů a tedy je schopný sebereplikace. Uživatelé si vyměňují zkušenosti a poznatky na veřejném webu, dle kterých mohou jiní stavět, nebo vylepšovat své 3D tiskárny, další zkušenosti mohou vrátit komunitě ve formě fotografií, videí či článků.

Diplomová práce se zabývá návrhem vyhřívaného atypického stolu pro 3D tiskárnu Sinuhed Mendel, kterou sestavil Ing. Oskar Zemčík, Ph.D. Konstrukce tohoto atypického vyhřívaného stolu by umožnila tisknout na větší a lépe vyhřátou plochu s menšími tepelnými ztrátami.



Obr. 1 Replika proudového motoru vyrobená 3D tiskárnou [1].

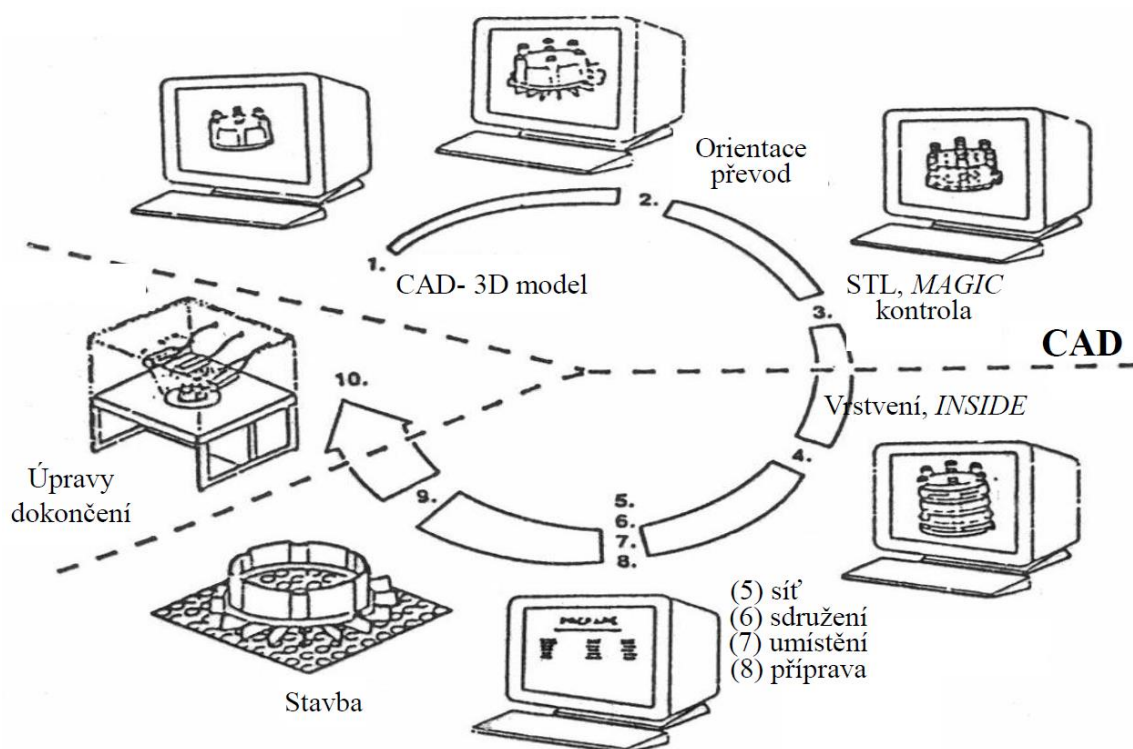
1 RAPID PROTOTYPING

Rapid prototyping (dále jen RP) je progresivní metoda, která slouží k tvorbě modelů, komponentů a prototypů na základě 3D dat. Jedná se o aditivní metodu, která spočívá v opakovaném, postupném nanášení vrstev materiálu o určité tloušťce na pracovní desku neboli stůl [2].

Standartní postup při vytváření prototypu [3]:

- **Návrh** - CAD data (digitalizovaný fyzický model)
- **Kontrola** – orientace, úplnost povrchu, převod STL formátu
- **Vrstvení** – tvorba řezů, podpurné konstrukce
- **Stavba** – tvorba fyzického modelu nanášením vrstev
- **Dokončení** – úprava povrchu, dotvrzení, testování

Po dokončení je možné zařadit pokračující činnosti, jako jsou např.: vizuální hodnocení, testy montáže, testy funkčnosti. Pokud vyrobená součást slouží pro výrobu silikonových forem nebo keramických skořepin, následují činnosti s tím související. Schéma postupu výroby prototypu je zobrazeno na obr. 2 [3].



Obr. 2 Schéma postupu výroby prototypu [3].

1.1 Metody 3D tisku

Doposud bylo vyvinuto více než 30 variant technologie RP. V diplomové práci budou stručně představeny metody SL, SLS a FDM. Při všech metodách se využívá formát STL (STereoLithography, v češtině stereolitografie). Model součásti se nejprve vymodeluje v některém z CAD programů (SolidWorks, Autodesk Inventor 2016, CATIA a jiné) a následně se převede do formátu STL, který umožňuje model virtuálně rozřezat na jednotlivé vodorovné vrstvy o tl. 0,05 – 0,2 mm. Následuje samotné nanášení vrstev, nejen, kterým se jednotlivé metody liší.

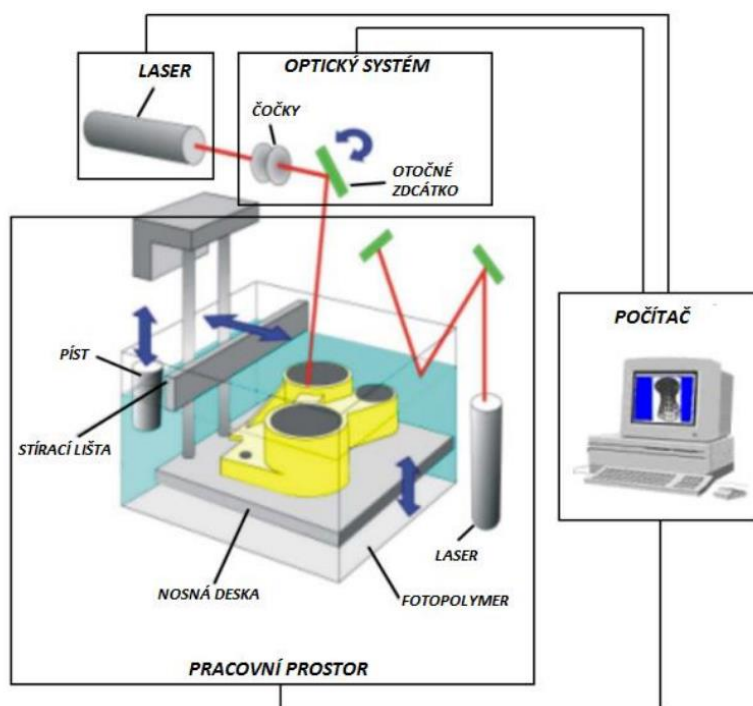
Rozlišujeme tři základní fyzikální principy jednotlivých metod: Světelné (SL, SLS), tepelné (FDM) a spojovací (LOM, 3DP) [4,5].

Metodou FDM, konkrétněji návrhem atypického vyhřívaného stolu, se bude zabývat i další část DP.

1.1.1 Metoda SL

Stereolitografie (STereoLithography) – SL

Světelná metoda, vznikla v r. 1986, jedná se o první metodu RP. Po zkonstruování 3D modelu v některém z CAD programů a jeho převedení do formátu STL, následuje zpracování dat přímo daným přístrojem. Funguje na principu nanášení vrstev fotopolymeru (plastická hmota, citlivá na světlo) vytvrzující se UV laserem. Laserový paprsek je zaměřován pomocí optické soustavy na základě dat o příčných řezech modelu na místo vzniku budoucí pevné struktury. Děje se to pouze ve dvou osách (ose X a Y). Pohyb ve třetí ose, čímž se řídí tloušťka jednotlivých vrstev, se uskutečňuje pohybem nosné desky, na které je model tvořen. Schéma principu metody SL znázorňuje obr. 3. Výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny v tab. 1.1 [4,5].



Obr. 3 Schéma metody SL [6].

Vhodné materiály

Původně se využívaly materiály na bázi **akrylátů**, v současné době se však kvůli velké smrštivosti a tak i nepřesnosti nepoužívají. Nejsou také příliš vhodné k životnímu prostředí. Dalším používaným materiálem jsou **epoxidy**, vyznačují se minimální smrštivostí. Nejpoužívanějším materiálem jsou **plněné pryskyřice**. Jejich největší výhoda spočívá v obohacení jejich základu o kovové, nebo i keramické materiály, čímž se mění výsledné mechanické vlastnosti oproti předchozímu materiálu [4].

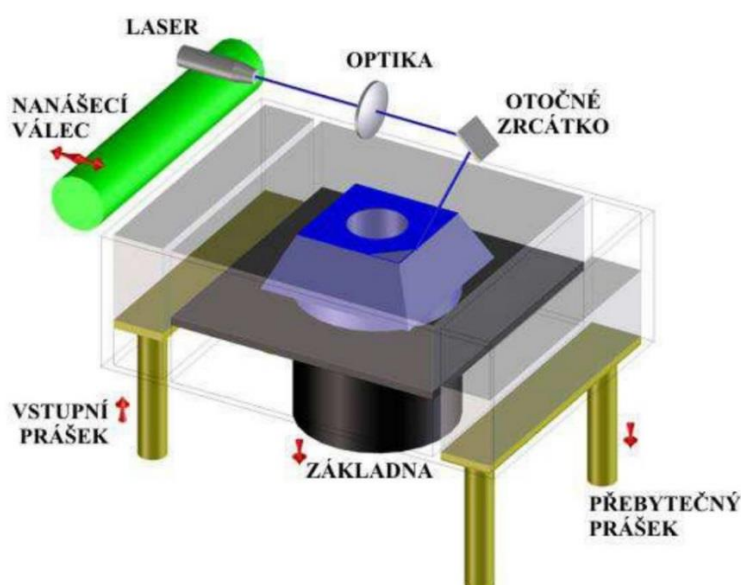
Tab. 1.1 Výhody a nevýhody metody SL [4].

Výhody metody:	Nevýhody metody:
Jedna z nejpřesnějších metod.	Poměrně pomalý proces vytvrzování plastu.
Vysoká tvarová a polohová přesnost.	Malá tepelná odolnost některých materiálů.
Široké možnosti použitých materiálů.	Problematika zakomponování podpor.
Využití ve slévárenství.	Relativně velké náklady na fotopolymer.
Dosažení relativně dobré drsnosti povrchu.	

1.1.2 Metoda SLS;

Selektivní spékání laserem (Selective Laser Sintering) – SLS

Opět se jedná o světelnou metodu s využitím laseru. Jde o novější metodu, která se liší oproti metodě SL odlišnou technologií tvorby modelu. Laser spéká jednotlivé vrstvy materiálu. Ty jsou tvořeny nanášením jemného prášku, uhlazením a spečením k již nanesené vrstvě, nebo k povrchu pracovní desky. V praxi probíhá nanášení práškového materiálu (vrstvy od 0,02mm až desetiny milimetru) tak, že se nanese prášek na celou uzavřenou plochu. Následně CO₂ laser, řízen optickou soustavou, speče prášek pouze v místech průřezu modelu. Po dokončení operace se pracovní deska posune o úroveň níže. Proces se opakuje až do vyrobení modelu. Nespečený prášek slouží jako podpora spékajícího se prášku. Proces probíhá v inerte atmosféře (nejčastěji dusík, argon). Schéma principu metody SLS znázorňuje obr. 4. Výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny v tab. 1.2 [4].



Obr. 4 Schéma principu metody SLS [7].

Vhodné materiály

Se všemi materiály lze pracovat na jednom stroji.

Podle druhů použitelných materiálů se tato technologie dělí na čtyři základní metody:

- **Laser Sintering – Metal** (Laserové spékání kovu)

Výroba forem pro lisování a vstřikování plastů.

- **Laser Sintering – Plastic** (Laserové spékání plastu)

Výroba modelů z polystyrenu pro lití vypařitelných modelů. Použití nylonu.

- **Laser Sintering – Ceramic** (Laserové spékání keramiky)

Keramický prášek je míchán s pojivem. Výroba jader a forem pro technologii přesného lití.

- **Laser Sintering - Foundry Sand** (Laserové spékání slévárenského písku)

Přímá výroba pískové formy [4].

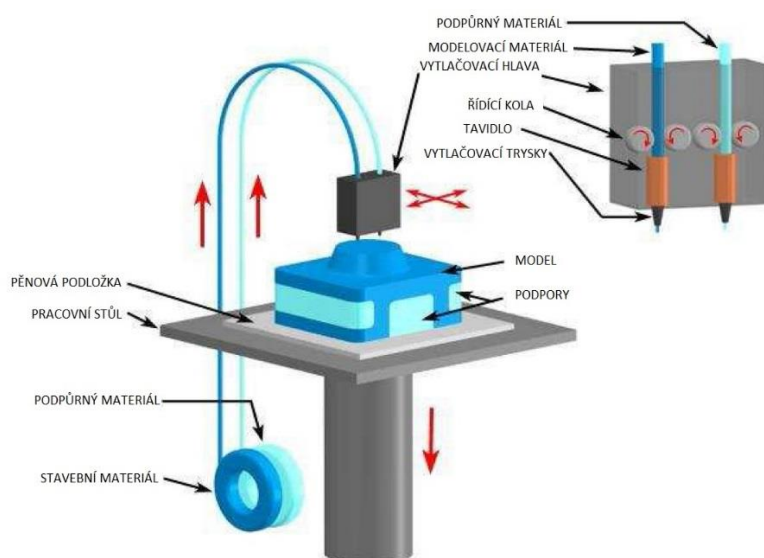
Tab. 1.2 Výhody a nevýhody metody SLS [4].

Výhody metody:	Nevýhody metody:
Není nutná tvorba podpor.	Tvorba staženin při spékání.
Relativně vysoká rychlost zhotovení.	Výskyt vnitřních napětí modelu.
Dobré mechanické vlastnosti modelů.	Obtížnější opracování modelů.
Ekonomičnost, ekologičnost.	Potřebná velká vstupní energie.
Široký rozsah použitých materiálů.	

1.1.3 Metoda FDM

Modelování za pomoci pokládání roztaveného (Fused Deposition Modeling) - FDM

Jedná se o tepelnou metodu RP. Roztavený materiál je nanášen tryskami tak, že nejprve vstupuje do vytlačovací hlavy v podobě plastového drátu. Dále je podávacím mechanismem dávkován skrz ohřívanou trysku na pracovní desku či předešlou nanesenou vrstvu. Teplota ohřevu je teoreticky jen o 1° vyšší než teplota tavení materiálu. Hlavní pohyby se, jako v předchozích metodách odehrávají ve dvou osách (osa X a Y), posuv součástí ve vertikální ose se uskutečňuje posuvem pracovního stolu. Schéma principu metody FDM je znázorněno na obr. 5. Výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny v tab. 1.3 [4].



Obr. 5 Schéma Principu metody FDM [8].

Vhodné materiály

ABS (akrylonitril-butadien-styren) - velmi odolný termoplast, využívá se pro funkční prototypy. Je oblíbený i pro možnost různých barevných provedení.

PC thermoplastic (polykarbonát) - materiál s velmi dobrou tepelnou odolností.

PC-ABS – spojuje výhody obou předchozích materiálů.

PLA (polymléčná kyselina) – jedná se o polyester na bázi kukuřičného škrobu vázaný na kyselinu mléčnou. Je dobře biologicky odbouratelný [4].

Tab. 1.3 Výhody a nevýhody metody SL [4].

Výhody metody:	Nevýhody metody:
Dobré mechanické vlastnosti termoplastů.	Vyžaduje tvorbu podpor.
Možnost tvorby funkčních modelů.	Nutnost povrchové úpravy modelu.
Rychlejší výroba modelů (< 4x než u SL).	Omezené možnosti modelování.
Poměrně velký výběr materiálů.	Výhodná jen při výrobě menších kusů.
Dobrá tepelná odolnost některých materiálů.	

1.2 Volba 3D tiskárny

Po roce 2003, ve kterém dochází k vypršení některých patentů, které brzdily vývoj 3D tisku celkově, začínají vznikat nové typy 3D tiskáren. V současné době je jich nepřeberné množství. Pro optimální výběr správné metody a tiskárny samotné je důležité znát požadavky na vyrobený model. Rozhodující faktory při výběru tiskárny jsou [9].

- Velikost tiskové plochy

Zásadním faktorem pro volbu tiskárny je velikost vyrobené součásti. Není moudré zvolit tiskárnu s velkou tiskovou plochou pro malou součást a naopak malou tiskárnu pro výrobu modelu, který by se na tiskovou plochu nevlezl.

Pro tisknutí objektů větších 20ti cm se nejlépe použijí materiál z PLA. Materiály jako jsou ABS se kvůli vysoké tepelné roztažnosti při nanášení vrstev kroutí a deformují. Částečně se tomuto dá předejít použitím vyhřívaného pracovního stolu. Úplné řešení tohoto

problému představuje tepelně kontrolovaná komora. Bohužel je toto řešení patentováno firmou Stratasys a jeho použití bez souhlasu této firmy by bylo nelegální.

- Kvalita tisku

Kvalita uváděná výrobcí může být (podle Josefa Průši, hlavního vývojáře 3D tiskáren v České republice) klamná. Uvádějí totiž přesnost výšky jednotlivé nanesené vrstvy, ne přesnost celkovou. Například při testování tiskárny, která měla mít přesnost 20 mikronů, bylo při testu dosaženo přesnosti 50 mikronů nejlépe.

- Materiály

Základní dva materiály – ABS a PLA by měla podporovat každá tiskárna.

- Otevřený zdroj (open source) nebo uzavřený design

K otevřenému zdroji je dostupná veškerá dokumentace včetně dokumentace sestavy a plánů všech dílů. Náhradní díly jsou dostupné od několika výrobců. U uzavřeného zdroje designu je dostupnost poněkud limitovaná.

- Zkušenosti ostatních

Zkušenosti důvěryhodných uživatelů mohou přispět nejen k volbě tiskárny, ale také při její údržbě, opravách, stavbě či přestavbě.

1.2.1 Hlavní části 3D tiskárny

Diplomová práce se zabývá návrhem atypického vyhřívaného stolu pro FDM 3D tiskárnu. Tyto tiskárny lze rozdělit do dvou základních kategorií: Tiskárny typu delta (využívají paralelní kinematický systém pohybu) a standartního typu (využívají kartézský kinematický systém pohybu). Hlavní části [10]:

- Rámová konstrukce

Mezi nejčastěji používané tiskárny patří Mendel Průša (viz obr. 6) či Průša i3, jsou vyrobeny z relativně levných a dostupných součástí jako jsou plastové či dřevěné díly v kombinaci se závitovými tyčemi. Mohou být doplněny o plechové či plastové krytování.



Obr. 6 3D tiskárna Mendel Průša [11].

- Pojezdové systémy

Základní vedení v rovině XY se uskutečňuje lineárními tyčemi s lineárními ložisky či pojezdovými kladkami pohybujícími se po rámové konstrukci. Přesnějšího vedení se dosáhne podepřenými lineárními se zdvojnásobenými lineárními ložisky nebo přesnými lineárními kolejnicemi s vozíčkem. Pohyb na ose Z se uskutečňuje závitovými tyčemi u levnějších tiskáren, metrických matic u klasických a trapézových či kuličkových šroubů u strojů střední a nejvyšší kategorie.

- Motory a přenos sil

Používají se krokové motory bez zpětné vazby u méně přesných strojů, u přesnějších strojů krokové motory se zpětnou vazbou. Použití motorů se zpětnou vazbou se podmiňuje použitím dražší elektronikou a složitějším řídicím softwarem. Použití krokových motorů o kroku $1,8^\circ$ či $0,9^\circ$ zajistí dostatečnou přesnost. Pro generování pulzů těchto motorů slouží drivery. Většina z nich umožňuje rozdělení celého kroku na kroky menší.

- Tryska

Přímo charakterizuje kvalitu a vzhled vytisknutého modelu. Zajišťuje dokonalé natavení materiálu, proto musí mít dobré tepelné vlastnosti. Nejčastěji je vyrobena z mědi či mosazi. Je nutné povrch trysky upravovat kvůli katodickému rozkladu při kontaktu plastového materiálu s mědí. Výstupní průřez nanášeného vlákna určuje průměr, materiál a drsnost povrchu trysky. V tab. 1.2 jsou uvedeny vlastnosti materiálů pro výrobu trysek [12].

Tab. 1.4 Vlastnosti materiálů pro výrobu trysek [12].

	Tepelná vodivost λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Hustota ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Teplota tání T_m ($^\circ\text{C}$)	Měrná tepelná kapacita C ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Mosaz	120	8400	850 – 920	385
Měď	386	8900	1064	390
Hliník	237	2700	660	920
Ocel	50	7850	1539	460

- Systém vyhřívání

Během procesu tisknutí se kontrolují tři tepelné okruhy. Každá tiskárna obsahuje okruh vyhřívání trysky, které slouží k natavení materiálu. Uskutečňuje se pomocí topných patron o výkonu 40W a napájecím napětím 12 až 24 V. Ty jsou schopny vyhřát trysku až na teplotu 350°C . Druhým tepelným okruhem, který však není součástí každé tiskárny, je vyhřívání stůl. Umožňuje lepší adhezi mezi tisknutým materiálem a povrchem pracovního stolu. Další výhodou je možnost použití více materiálu pro tisk a menší deformace vyrobeného modelu. K vyhřívání stolu mohou sloužit např. tepelné odpory nebo tištěné plošné spoje napájeny většinou napětím 24 V. Vyhřívání tiskové komory je třetím tepelným okruhem, které taktéž nemusí být součástí všech tiskáren. Vyhřívání se uskutečňuje prouděním vzduchu přes topný člen do tiskové komory.

1.3 Problematika vyhřívání stolů

Pracovní stůl je jednou z nejdůležitějších částí 3D tiskárny. Je na něj pokládán natavený materiál, jehož interakce s povrchem stolu může mít zásadní vliv na vlastnosti budoucího modelu. V průběhu procesu nanášení materiálu dochází k jeho chladnutí. Ochlazující se vlákno má tendenci se smršťovat. Velikost smrštění se u jednotlivých materiálů liší. Pokud

se vrstvy naneseného materiálu neochlazují v celém objemu rovnoměrně, dochází k jeho nerovnoměrnému smršťování. Výsledkem může být nevyhovující pokřivená součást. Výjimkou mohou být méně rozměrné součásti z méně smrštivých materiálů (například PET), kde je pokřivení vlivem smrštění zanedbatelné.

Tisknutí na vyhřívaný stůl umožňuje materiálu zůstat na konstantní teplotě po celou dobu tisku, tudíž umožňuje rovnoměrnější tuhnutí plastu než u tiskáren, které vyhřívaný stůl ve výbavě nemají. Teplota stolu bývá zpravidla nižší než teplota tavení tisknutého materiálu. Teploty tisku nejčastěji používaných materiálů a doporučené teploty vyhřívání stolů pro 3D tisk jsou uvedeny v tab. 1.5 [13]. Existuje několik typů vyhřívání stolů nebo desek. Nejčastější z nich budou rozebrány v následujících podkapitolách [13].

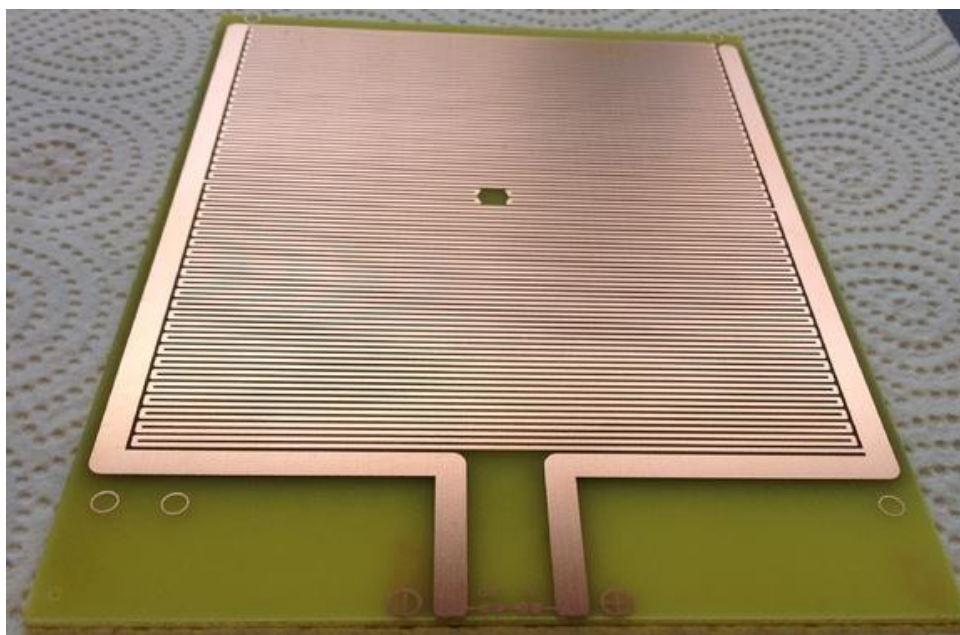
Tab. 1.5 Teploty tisku nejčastěji používaných mat. a doporučené teploty vyhřívání stolů [13].

	Teplota tisku	Teplota vyhřívání stolu
ABS	230°C	110°C
PLA - A	165°C	60°C
PLA - D	185°C	60°C
PVA	210°C	110°C
HIPS	175 – 250°C	0°C
Nylon	250°C	0°C
PET	210°C	0°C

1.3.1 PCB vyhřívání deska

Jedním z nejrozšířenějších způsobů vyhřívání je použití odporu plošného spoje jako topného elementu, tedy tzv. PCB (Polychlorované bifenyly) desky. Zmíněná deska (viz obr. 7) je pokryta měděnou fólií o tloušťce 35 μm , cesty fólie vedou po celé ploše desky. Při nerovnoměrném vedení měděných cest se deska nerovnoměrně ohřívá, což v důsledku vede i k nerovnoměrnému ochlazování. Dalším důležitým požadavkem je dodržení velikosti tloušťky měděné vrstvy. Při nedodržení konstrukčních parametrů desky či tloušťky měděné vrstvy může docházet k nedohřívání či nerovnoměrnému ohřívání PCB desky.

Její nevýhodou je nízká tepelná stabilita, dlouhá doba vyhřívání (deska 200 mm x 200 mm se vyhřívá až 30 minut) a omezená nabídka rozměrů na trhu. Výhodou je jednoduchost a bezúdržbové použití bez nutnosti použití základní desky. PCB deska se dá pořídit jako hotový stůl, který se připojí ke zdroji el. energie, nebo jako plošný spoj umístěný na plastové podložce sloužící k nalepení na desku, kterou bude vyhřívát. Používá se k vyhřívání do 110 °C [14, 15].



Obr. 7 PCB vyhříváná deska [14].

Řídící elektronika, napájená napětím 12 V či 24 V o proudu alespoň 15 A, zahřívá podložku až na teplotu 110 °C i když základní materiál desky je schopen vydržet teplotu 150 °C. Velikost Jouleova tepla Q vznikajícího ve vodiči, kterým protéká el. proud po dobu t , platí [15]:

$$Q = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1.1)$$

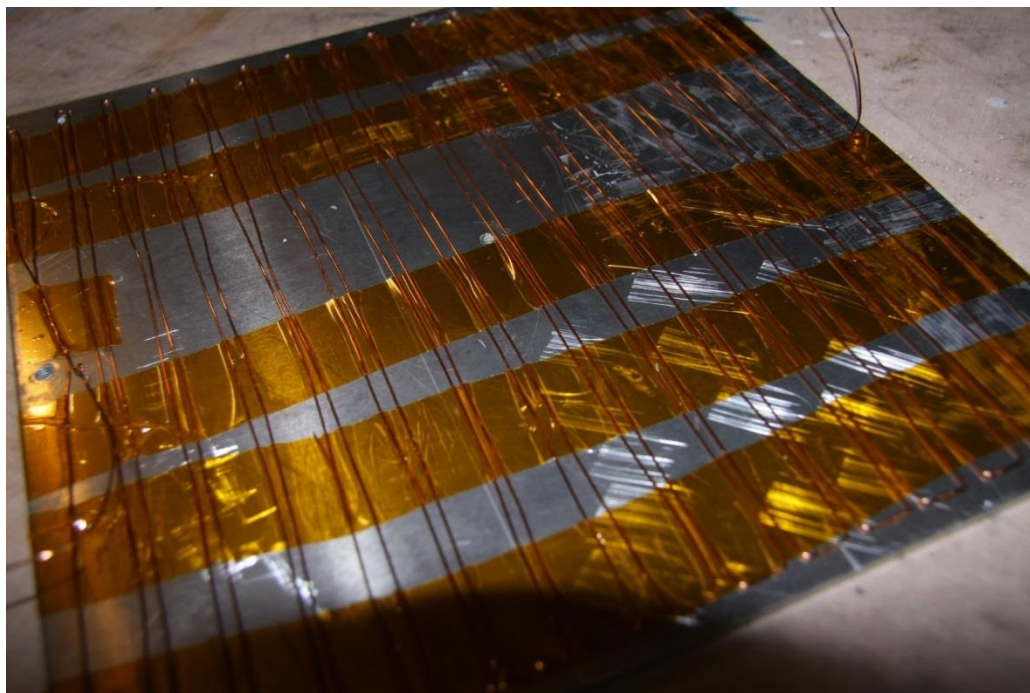
kde: Q [J] - množství tepla,
 P [W] - výkon,
 t [s] - čas,
 U [V] - napětí,
 R [Ω] - odpor,
 I [A] - proud.

1.3.2 Stůl vyhříváný spirálou z měděného drátu

Zahřívání stolu je realizováno pomocí smaltovaného měděného drátu (viz obr. 8), používaného na vinutí transformátorů a cívek. Stůl se skládá ze skleněné či kovové tiskací základny, na kterou je vysokoteplotní kaptonovou páskou přilepen měděný drát. Nalepením drátu se realizuje topná mřížka, která je napájena zdrojem o napětí 12 V nebo zdrojem s výkonem 350 W a napětí 230 V.

Nevýhodou je však váha stolu, která způsobuje pomalý tisk. Další nevýhoda je delaminace pásky z drátů a odlupování vrstev od základny, předimenzování tepelného výkonu, který není obsluha schopna využít. Dále není možné dosáhnout ideální hustoty závitů, tedy

rovnoměrné vyhřátí plochy desky. Výhodou je jednoduchost použitých součástek. Podobně jako u PCB desky se používá do 110 °C [15].



Obr. 8 Stůl vyhříváný spirálou z měděného drátu [16].

1.3.3 Vyhříváný stůl s topnými tělísky

Základem je kovová deska, na které jsou rozmístěny rezistory. Deska (viz obr. 9) je vyrobena z kovu, který má velkou tepelnou setrvačnost (rovnoměrně se zahřívá v závislosti na rozmístění rezistorů, drží si svoji teplotu a pomalu chladne). Pro vyhřívání jsou použity buď sériově, paralelně nebo kombinovaně zapojené rezistory. Ty jsou k desce přišroubovány nebo přilepeny. Jsou napájeny zdrojem el. energie o výkonu nejméně 200 W a o napětí 12 V. Jejich počet je stanoven z následujících dvou vztahů. Nejprve se podle vztahu 1.2 vypočítá celkový odpor R potřebný k zahřátí desky, dále se ze vztahu 1.3 vypočte potřebný počet rezistorů n :

$$R_s = \frac{U^2}{P} \quad (1.2)$$

$$n = \frac{R_s}{R_1} \quad (1.3)$$

kde: R_s [Ω] - celkový odpor,
 R_1 [Ω] - odpor rezistoru,
 n [-] - počet použitých rezistorů.

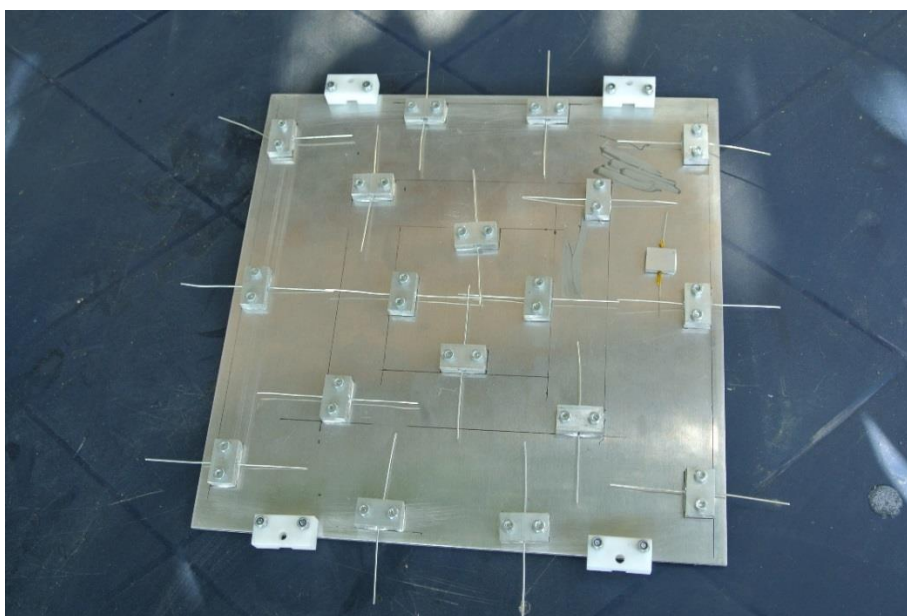
Materiál základních desek vyhříváných stůlů je kov s velkou měrnou tepelnou kapacitou, např. hliník. Hodnoty měrných tepelných kapacit některých kovů jsou uvedeny v tab. 1.6. Důležitá je jeho rovinnost. Doporučuje se dosáhnout rovinnosti do 0,1 mm na stůl 210 mm². Používá se k dosažení teplot 250 °C ÷ 500 °C. Nevýhoda tkví v počtu použitých

součástek a v pracnosti výroby. Výhodou tohoto stolu jsou vysoké teploty, jichž je možné dosáhnout, vysoká tepelná stabilita a výhodná cena [17, 18, 19].

Tab. 1.6 Měrná tepelná kapacita některých kovů [19].

Měrná tepelná kapacita při 20 °C [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	
Železo	450 ÷ 500
Měď	383 ÷ 393
Olovo	129
Cín	227
Mosaz	384
Hliník	879 ÷ 896

V některých 3D tiskárnách se používá kromě základní desky ještě podložka, která je umístěná na ni. Nejčastěji to bývá skleněná podložka, která vytváří hladký povrch a neohýbá se. Její další výhodou je nízká cena. Nevýhodou je váha a křehkost [17].



Obr. 9 Vyhřívaný stůl s topnými tělisky [18].

1.3.4 Silikonová podložka

Dalším typem vyhřívání stolu je silikonová podložka (viz obr. 10), která pracuje na stejném principu jako PCB deska. Napájí se napětím 12 V a více. Výhodou této podložky je její odolnost, rovnoměrný ohřev a dostupnost ve větších rozměrech. Podložka slouží k nalepení na základní desku (např. hliníkovou či skleněnou), na kterou se přímo tiskne. Nevýhodou je potřeba základní desky, silikonová podložka neslouží přímo pro tisk. Další nevýhodou je tendence odlepování podložky od základní desky při vyšších teplotách a nízká tepelná stabilita. Dosahují se s ní teploty do 110 °C [20].



Obr. 10 Silikonová vyhřívaná podložka [20].

1.4 Výrobci vyhřívaných stolů

V předchozích podkapitolách byly zmíněny základní druhy vyhřívaných stolů. Požadavky na ně a s tím související velikost tiskové plochy, jsou základním kritériem výběru 3D tiskárny. Některé 3D tiskárny vyhřívaným stolem nedisponují vůbec – koupí takové tiskárny se silně limitujeme v možnosti používání různých druhů materiálů, velikosti, vzhledu a funkčnosti budoucího vyrobeného modelu.

Jestliže se rozhodneme pro stavbu vlastní tiskárny, naše možnosti se výrazným způsobem rozšíří. V takovém případě je možné vyhřívaný stůl zakoupit jako samostatný prvek od firmy, která se jejich výrobou zabývá a zakomponovat ho do sestavy. Tudíž jsme limitováni jen nabídkou firem zabývajících se touto problematikou. Další možností je individuální výroba vyhřívaného stolu.

Převážná část sériové výroby stolů je zaměřena na výrobu PCB desek a silikonových podložek, proto budou zmíněni dva výrobci s parametry jejich výrobků.

Prusa Research s.r.o.

Nejznámější firmou v oblasti 3D tiskáren – stavebnic i náhradních dílů v České republice je Prusa Research s.r.o. Základem jejich nabídky a momentálně i jediným produktem v oblasti vyhřívaných stolů je vyhřívaná podložka MK2a, jedná se o nejpoužívanější vyhřívanou podložku, která vychází z výše zmíněné PCB desky, viz příloha 1. Parametry podložky MK2a jsou uvedeny v tab. 1.7 [21].

Tab. 1.7 Parametry vyhřívané podložky MK2a [21].

Velikost plochy	200 mm x 200 mm
Napájecí napětí	12 V
Proud	8 ÷ 22,5 A
Odpor	1 ÷ 1,5 Ω
Maximální pracovní teplota	110 °C
Doba vyhřátí na maximální teplotu	8 ÷ 30 min
Tloušťka	2 mm
Cena	539 Kč
Napájení	Centrální zdroj tiskárny RAMBo
Cena zdroje	3 499 Kč
Napětí zdroje RAMBo	12 ÷ 35 V
Proud	15 A

Quintessential Universal Building Device, Inc..

Další firmou zabývající se výrobou dílů do 3D tiskáren je Quintessential Universal Building Device, Inc.. V jejich nabídce můžeme mimo jiné nalézt silikonovou vyhřívanou podložku 12 V Silicone Rubber Heater Bed 300mm x 300mm (12"x12"), viz obr. 10. Její parametry jsou uvedeny v tab. 1.8.

Tab. 1.8 Parametry vyhřívané podložky 12 V Silicone Rubber Heater Bed 300mm x 300mm (12"x12") [20].

Velikost plochy	300 mm x 300 mm
Napájecí napětí	12 V
Proud	6 ÷ 20 A
Odpor plošného spoje	0,5 ÷ 1,5 Ω
Maximální pracovní teplota	120 °C
Doba vyhřátí na maximální teplotu	závisí na materiálu a parametrech základní desky
Tloušťka	0,15 mm ÷ 0,30 mm
Cena	\$59.99
Napájení	průmyslový zdroj
Cena zdroje	889 Kč
Napětí zdroje	12 V
Proud	20 A

2 TEORIE ŠÍŘENÍ TEPLA

Teplo je forma energie. Jeho přenos se uskutečňuje pohybem atomů nebo molekul. Způsoby přenosu tepla:

- šíření tepla vedením
- šíření tepla prouděním
- šíření tepla zářením

Sdílení tepla vedením i prouděním může probíhat jen za existence hmotného prostředí v tuhých, kapalných či plynných látkách. Avšak sdílení tepla zářením se může uskutečňovat i ve vakuu. Šíření tepla probíhá nejčastěji ve všech třech způsobech zároveň. Poměrově zastoupeny, ale mohou nastat situace, kdy jeden způsob převládá [22].

Šíření tepla vedením

Proces přenosu energie z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s nižší teplotou vedením (neboli kondukci) probíhá v tuhých látkách nebo v tekutinách, které mohou a nemusí být v pohybu. Matematicky lze zapsat existující rozdíl teplot jako [22]:

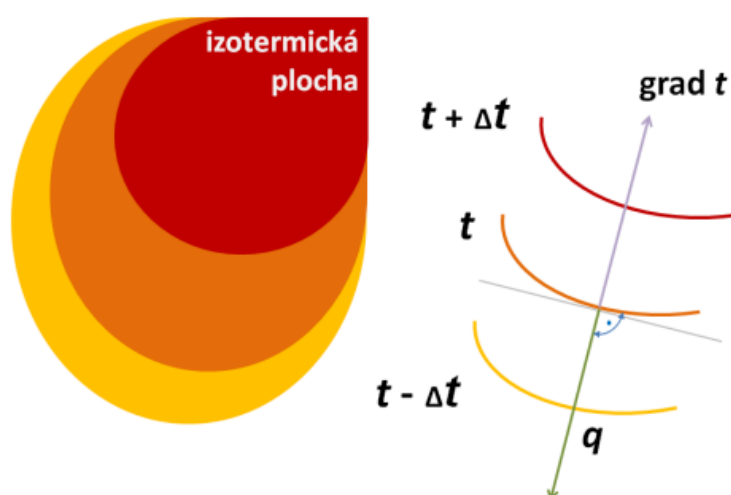
$$\vartheta = f(x, y, z, \tau) \quad (1.4)$$

Kde: ϑ [K] - teplota kondukce,

x, y, z - souřadnice,

τ [s] - čas přenosu tepla.

Děj může záviset na čase, pak se jedná o nestacionární vedení tepla. Děj nezávislý na čase se nazývá stacionární vedení tepla. Teplotní pole si lze představit jako izotermické pole, tzn. místo se stejnou teplotou. Nárůst teploty materiálu je dán gradientem teploty a vypočítá se podle vztahu 1.4. Jedná se o vektor kolmý k izotermě směřující ve směru nárůstu teploty podle obr. 11 [22].



Obr. 11 Teplotní pole a izotermy [22].

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} = \nabla t \quad (1.5)$$

kde: $\text{grad } t$ [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$] - gradient teploty,
 ∇ [m^{-1}] - Hamiltonův operátor.

Množství tepla Q přenesené přes izotermický povrch S za čas t je tepelný tok $\emptyset$. Tepelný tok vztažený na jednotku izotermické plochy (na 1 m^2) se nazývá hustota tepelného toku, značí se q . Tepelný tok se určí podle vztahu 1.6.

$$\emptyset = q \cdot S \quad (1.6)$$

kde: $\emptyset$ [W] - tepelný tok,
 q [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] - hustota tepelného toku.

Využitím tepelného toku se množství tepla procházející izotermickou plochou vypočítá jednoduchým součinem dle vztahu 1.7.

$$Q = \emptyset \cdot \tau = q \cdot S \cdot \tau \quad (1.7)$$

První Fourierův zákon, který souvisí se znalostí teplotního pole, říká, že hustota tepelného toku je úměrná záporného gradientu teploty podle vztahu 1.8.

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (1.8)$$

kde: λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] - součinitel tepelné vodivosti.

Součinitel tepelné vodivosti λ je fyzikálně tepelný parametr látky závisející na její teplotě, chemickém složení a tlaku. Závisí také na množství tepla Q procházejícím za jednotku času t jednotkovou plochou izotermickou povrchu S , přičemž v tělese je jednotkový gradient t podle vztahu 1.9

$$\lambda = - \frac{Q}{\text{grad } t \cdot S \cdot \tau} \quad (1.9)$$

Druhý Fourierův zákon popisuje Fourierova rovnice tepla, která bude řešením vztahu 1.4. V tomto případě se uvažuje nestacionární vedení tepla.

V matematickém popisu se vychází ze zjednodušujících předpokladů:

- jedná se o izobarický děj,
- tuhé těleso vedoucí teplo je homogenní a izotropní,
- fyzikální vlastnosti tělesa jsou konstantní,
- vnitřní objemové tepelné zdroje jsou rozmístěny rovnoměrně.

Jelikož se uvažuje izobarický děj, kdy změna entalpie dI je rovna součtu tepla, které je dodáváno za čas $d\tau$ do objemu tělesa v důsledku tepelné vodivosti dQ_λ a tepla dQ_v , které se uvolní z tělesa za stejný čas, tedy [22]:

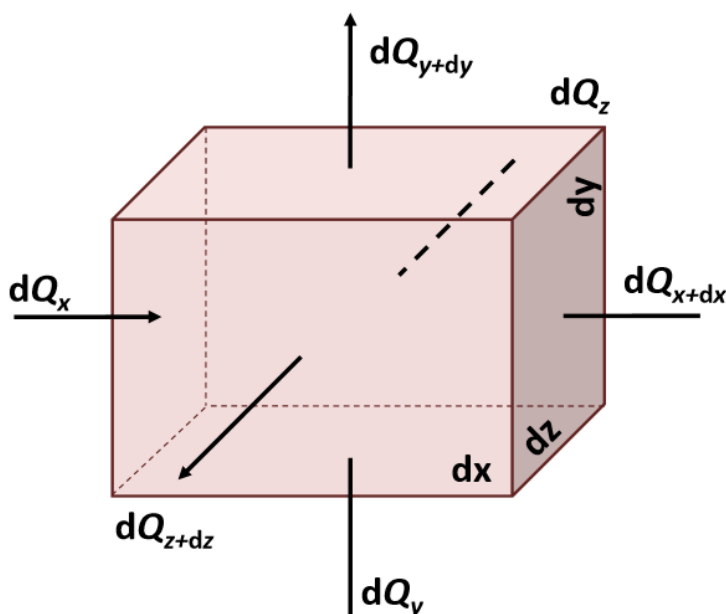
$$dI = dQ_{\lambda} + dQ_v \quad (2.0)$$

kde: dI [J] - změna entalpie,

Q_{λ} [J] - teplo dodané,

Q_v [J] - teplo uvolněné.

K odvození druhého Fourierova zákona se zobrazuje Elementární těleso, viz obr. 12.



Obr. 12 Elementární těleso k odvození Fourierovy rovnice vedení tepla [18].

Na obrázku 11 je elementární těleso o stranách x , y , z , jehož objem je dV . Vidíme přivedené a odvedené teplo. Množství tepla přivedené jednotlivými stranami do elementárního objemu značíme dQ_x , dQ_y , dQ_z . Množství tepla odvedené z elementárního objemu tělesa je tedy dQ_{x+dx} , dQ_{y+dy} , dQ_{z+dz} . Stěnu kolmou k ose x považujeme za izotermickou plochu (plocha $dy \times dz$). Množství tepla procházející izotermickou plochou je dáno rovnicemi [22].:

$$dQ = q \cdot dS \cdot d\tau \quad (2.1)$$

$$dQ_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \quad (2.2)$$

$$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \quad (2.3)$$

kde q_i a q_{i+di} jsou tepelné toky příslušné stěny elementárního tělesa.

Množství předaného tepla elementárnímu objemu ve směru osy x – $dQ_{\lambda, x}$ vychází ze spojitosti funkce q_{x+dx} , kterou lze vyjádřit Taylorovým rozvojem, tedy:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \cdot \frac{dx^2}{2!} \quad (2.4)$$

jestliže zanedbáme členy druhého a vyššího řádu rozvoje, získáme množství tepla $dQ_{\lambda, x}$.

$$dQ_{\lambda,x} = dQ_x - dQ_{x+dx} = q_x - q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \quad (2.5)$$

Analogicky pro další směry - y, z.

Celkový přírůstek tepla v důsledku tepelné vodivosti dQ_λ se vyjádří z následujícího vztahu.

$$dQ_\lambda = dQ_{\lambda,x} + dQ_{\lambda,y} + dQ_{\lambda,z} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dV \cdot d\tau \quad (2.6)$$

kde $Q_{\lambda,i}$ jsou tepelné přírůstky v jednotlivých osách.

Teplo uvolněné vnitřními objemovými zdroji dQ_V za čas $d\tau$ je dáno rovnicí 2.7.

$$dQ_\lambda = q_v \cdot dV \cdot d\tau \quad (2.7)$$

Přírůstek entalpie je dán následujícím vztahem.

$$dI = m \cdot c_p \cdot d\vartheta = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot d\vartheta = \rho \cdot dV \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} d\tau \quad (2.8)$$

Dosazením do rovnice $dI = dQ_\lambda + dQ_V$ za výrazy dQ_λ , dI a dQ_V získáváme

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q_v \quad (2.9)$$

$$\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = -\text{div } q + q_v \quad (3.0)$$

Tato rovnice je obecná diferenciální rovnice energie. Využívá se k odvození Fourierovy – Kirchhoffovy rovnice. Dosadíme-li do prvního Fourierova zákona za jednotlivé složky hustoty tepelného toku q_x, q_y, q_z , tedy $q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$, $q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y}$, $q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z}$, můžeme dále napsat:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + q_v \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_p \cdot \rho} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot \vartheta + \frac{q_v}{c_p \cdot \rho} \quad (3.3)$$

kde: ∇^2 Laplaceův operátor,

α je součinitel teplotní vodivosti.

Výraz 2.6 je nejčastěji používaný tvar Fourierovy rovnice vedení tepla.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (3.4)$$

Šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním (neboli konvekci) se uskutečňuje v proudícím (pohybujícím se) prostředí. Proudění představuje zároveň vedení tepla a proudění tekutiny, dá se tedy nazvat kondukčně – konvekční přestup tepla. Poměr konvekce s kondukcí závisí na celkovém přestupu tepla. Záleží také na druhu proudění a fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny, podíl sdílení tepla je tím menší, čím intenzivnější je pohyb molekul. Šíření tepla prouděním není možné u pevných látek.

Rozdělení konvekce:

- přirozená konvekce – může být vyvolaná působením gravitačního pole na nerovnoměrně prohřátou tekutinu,
- nucená konvekce – vyvolaná externím zásahem do tekutiny.

Od rychlosti tekutiny se odvíjí podíl přirozené konvekce k nucené konvekci. Podíl přirozené konvekce je tím větší, čím menší je rychlost nuceného proudění a také čím větší jsou teplotní gradienty v tekutině.

Přestup tepla je dán součinitelem přestupu tepla α_{kon} , který stanovuje intenzitu výměny tepla na rozhraní povrchu tělesa a tekutiny. Tento součinitel je vyšší, čím intenzivněji k výměně tepla dochází. Za předpokladu proudění tekutiny v homogenním poli s konstantními fyzikálními vlastnostmi a s rovnoměrně rozprostřenými vnitřními objemovými zdroji popisuje Fourierova Kirchhofova rovnice teplotní pole. Při odvození se vychází z prvního Fourierova zákona a Newtonova zákony.

$$q_{\text{konvekce}} = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_{\text{kon}} \cdot (t_{\text{povrchu}} - t_{\text{tekutiny}}) \quad (3.5)$$

kde: $q_{\text{konvekce}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$ - měrný tepelný tok konvekce,
 $\alpha_{\text{kon}} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ - součinitel přestupu tepla konvekcí,
 $t_{\text{povrchu}} [^{\circ}\text{C}]$ - teplota povrchu,
 $t_{\text{tekutiny}} [^{\circ}\text{C}]$ - teplota tekutiny.

Vyjádříme-li α_{kon} získáme vztah 3.6.

$$\alpha_{\text{kon}} = - \frac{\lambda}{(t_{\text{povrchu}} - t_{\text{tekutiny}})} \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) \quad (3.6)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_{kon} je množství tepla předané za jednotkový čas mezi jednotkovou plochou povrchu stěny a tekutinou, rovná-li se rozdíl teplot mezi těmito prostředími 1 K. Čím vyšší je tento součinitel, tím dochází k intenzivnější výměně tepla na rozhraní tekutiny a povrchu stěny. Součinitel přestupu tepla pro některá prostředí jsou uvedena v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Součinitele přestupu tepla konvekcí pro některá prostředí [22].

Děj	$\alpha_{\text{kon}} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
Plyny při přirozené konvekci	$5 \div 100$
Plyny při proudění v trubkách a mezi nimi	$10 \div 5\,000$
Voda při přirozené konvekci	$100 \div 1\,000$
Voda při proudění v trubkách	$50 \div 100\,000$
Voda při bublinovém varu	$2\,000 \div 40\,000$
Pára při blánové kondenzaci	$4\,000 \div 15\,000$
Pára při kapkové kondenzaci	$30\,000 \div 140\,000$

Pod pojmem Fourierova - Kirchhoffova rovnice rozumíme rovnici popisující teplotní pole proudící tekutiny. Předpokladem pro použití této rovnice je izotropní a konstantní fyzikálními vlastnostmi nebo homogenní proudění kapaliny. Děj probíhá izobaricky. Ztrátová tepelná energie se zanedbává.

Jelikož se jedná o pohybující se prostředí je nutné k Fourierově rovnici implementovat teplo, které tekutina o hustotě ρ přenesla přes jednotku plochy za jednotku času, což popisuje následující rovnice [23, 24].

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta + \rho \cdot v \cdot i \quad (3.7)$$

Pro jednotlivé směry můžeme tedy vyjádřit následující vztahy.

$$q_x = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \rho \cdot v_x \cdot i \quad (3.8)$$

$$q_y = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) + \rho \cdot v_y \cdot i \quad (3.9)$$

$$q_z = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) + \rho \cdot v_z \cdot i \quad (4.0)$$

Šíření tepla zářením

Podstatou šíření tepla zářením neboli sáláním je tzv. tepelné záření. Hmotný objekt např. tuhé těleso nebo ohraničený objem tekutiny či disperzního prostředí, zahřátý na teplotu T , přeměňuje část své vnitřní energie v elektromagnetické vlny. Tyto vlny mají schopnost procházet diatermním prostředím (čistý vzduch, vakuum). Při dopadu na jiný hmotný objekt, pohlcující tyto vlny, se dopadající energie elektromagnetických vln částečně změní ve vnitřní energii zasaženého objektu. Platí, že každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula ($T = 0 \text{ K}$), sdílí teplo sáláním. Výkon vyzařujícího předmětu je dán Stefanovým – Boltzmanovým zákonem [23, 24, 25].

$$M_{oe} = \sigma \cdot T^4 \quad (4.1)$$

- kde: $M_{oe} [W \cdot m^{-2}]$ - intenzita vyzařování dokonale černého tělesa,
 $\sigma [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ - Stefan – Boltzmanova konstanta.
 $T [K]$ - teplota vyzařujícího tělesa.

Výpočet Stefan – Boltzmanova zákona pro praxi znázorňuje vztah 4.2.

$$M_{oe} = C_o \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (4.2)$$

kde: $C_o [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ - součinitel sálání černého tělesa.

Součinitel sálání černého tělesa je dán vztahem 3.6

$$C_o = 10^8 \cdot \sigma \quad (4.3)$$

Důležitým pojmem pro šíření tepla zářením je emisivita materiálu. Při jejím výpočtu se vychází z podílu intenzity vyzařování šedého tělesa a intenzity vyzařování absolutně černého tělesa:

$$\varepsilon = \frac{M_{\xi}}{M_{oe}} \quad (4.4)$$

kde: $M_{\xi} [W \cdot m^{-2}]$ - intenzita vyzařování šedého tělesa,

$\varepsilon [-]$ - emisivita materiálu.

Po dosažení vztahu 1.9 a vyjádření intenzity vyzařování šedého tělesa získáváme vztah 4.5.

$$M_{\xi} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.5)$$

Hodnoty emisivit pro některé materiály jsou uvedeny v tab. 2.2

Tab. 2.2 Hodnoty emisivit pro některé materiály [25].

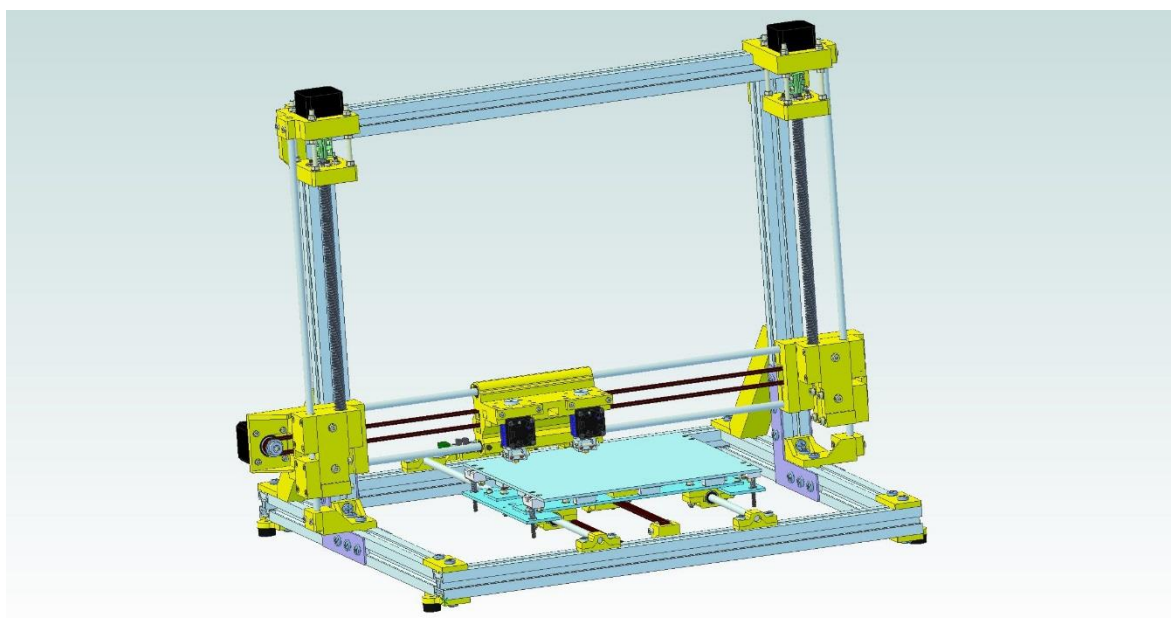
Materiál	Emisivita
Absolutně černé těleso	1
Zoxidovaná ocel	0,85 ÷ 0,95
Zoxidovaná měď	0,7
Cihla pálená	0,9
Hliník	0,1
Leštěné stříbro	0,02

3 NÁVRH ATYPICKÉHO VYHŘÍVANÉHO STOLU

V předchozích kapitolách byly vysvětleny základní pojmy teorie 3D tisku, byl popsán princip tisku včetně základních typů tiskáren a používaných materiálů. Problematika vyhřívání stolů a teorie šíření tepla. V návaznosti na tyto informace můžeme přejít k výběru typu vyhřívání stolu podle požadavků na něj. Nejprve se zaměříme na 3D tiskárnu, do které bude tento stůl implementován.

Sinuhed Mendel

Jedná se o tiskárnu, která je přestavbou FDM 3D tiskárny Mendel. Tato tiskárna bude upravena, aby se na ní daly tisknout i větší a přesnější modely. Došlo k vyměnění některých součástí za přesnější. V základu se daly vyrábět modely o maximální velikosti 250 x 250 x 210 mm. Majitel si však přeje tisknout modely o velikosti maximálně 500 mm x 250 mm x 250 mm a tak bude tiskárna k tomuto účelu přizpůsobena zvětšením její konstrukce. Model upravené tiskárny Sinuhed Mendel je zobrazena na obr. 13.



Obr. 13 Model upravené tiskárny Sinuhed Mendel.

Materiál tisku

Jelikož se jedná o FDM tisk, používají se materiály uvedené v podkapitole 1.1.3. Výhodou RepRap tiskárny je možnost volby komponentů jednotlivě. V případě této konkrétní 3D tiskárny si majitel přeje tisknout všechny materiály uvedené v tab. 1.5.

Teplota stolu

Z předchozího odstavce je patrné, že by se měla teplota stolu pohybovat v rozmezí 0 °C až 110 °C. Majitel si však přeje dosažení maximální teploty až 120 °C za dobu 792 s a kratší od zahájení zahřívání. Dalším požadavkem je dobrá tepelná stabilita stolu (nízké teplotní rozdíly v jednotlivých částech stolu), regulovatelnost teplot a rovnoměrné ohřívání i ochlazování celého objemu stolu. Důležitým požadavkem je také spolehlivost.

3.1 Konstrukční návrh

Konstrukční návrh bude vycházet z požadavků uvedených v předchozí kapitole. Jedná se především o velikost tiskové plochy 500 mm x 250 mm x 250 mm, dosažení provozní teploty stolu, doba dosažení této teploty, její regulovatelnost, dobrá tepelná stabilita stolu, spolehlivost a maximální váha základní desky stolu. V kapitole 1.3 jsou uvedeny nejpoužívanější typy vyhřívaných stolů, z nichž bude vybrána nejideálnější varianta, která bude vyrobena a porovnána s podložkou MK2a. Maximální hmotnost základní desky se limituje, protože se jedná o nejtěžší součást stolu. Neměla by překročit 1,7 kg. Dalším kritériem vyhodnocení je cena – ta by měla být v závislosti na velikosti stolu porovnatelná s cenou nabízených stolů na trhu a neměla by být výrazně vyšší.

Rozměry 500 mm x 250 mm jsou nestandardní a žádná firma se sériovou výrobou tak velkého vyhřívaného stolu nezabývá. Nejprve je potřeba navrhnout způsob vyhřívání, materiál základní desky a její tloušťku. Dalším krokem je navrhnutí součástí nezbytných ke správné funkčnosti sestavy. Pro dosažení požadované teploty je důležitá správná volba vstupních elektrických veličin, jako je el. odpor, el. proud a el. napětí. Stůl musí být nějakým způsobem upevněn do konstrukce tiskárny, aby byly ztráty způsobené vedením tepla co nejmenší a aby byla zaručena dostatečná tuhost upevnění stolu.

Výběr optimální varianty druhu vyhřívání

S ohledem na výhody a nevýhody jednotlivých variant uvedených v kapitole 1.3 se jeví jako optimální varianta stůl vyhříváný rezistory (díky rozsahu provozních teplot, možnosti regulovatelnosti, předpokládané nižší ceně, možnosti volby komponentů, aby se ovlivnila tepelná stabilita stolu). Musíme vyloučit varianty PCB desky a silikonovou podložku především kvůli nedosažení požadované max. teploty. Tyto typy stolů se nevyrábějí v požadovaných rozměrech, to by se ale dalo vyřešit např. koupí dvou silikonových podložek o rozměru 250 mm x 250 mm a nalepením na základní desku o požadované velikosti, ale výrazně by se zvedla váha i cena stolu. Variantu stolu vyhříváného měděnými dráty vyloučíme kvůli nedosažení, přesněji řečeno obtížné dosažitelnosti, teploty 110 °C a jeho nespolehlivosti.

Hlavní části stolu

Sestava stolu (viz obr. 14, 15) se skládá ze základní desky, rezistorů, montážních prvků a zdroje el. proudu.



Obr. 14 Sestava vyhříváného stolu.



Obr. 15 Sestava vyhříváného stolu, znázornění zapojení.

3.1.1 Základní deska

Základní deska je součástí, na jejímž povrchu dochází k interakci tisknutého materiálu s povrchem stolu. Měla by být vyrobena z materiálu, který má vysokou měrnou tepelnou kapacitu a s tím související vysokou tepelnou stabilitu. Hodnoty měrné tepelné kapacity některých materiálů jsou uvedeny v tab. 1.6. V praxi se nejčastěji používá hliník a sklo nebo jejich kombinace. Povrch kovu může být ošetřen či upraven (např. broušení, leštění) popř. zastíněn podle hodnoty emisivity konkrétního materiálu, viz tab. 2.2. Vzhledem k velikosti bude deska vyrobena z hliníkové slitiny, protože sklo je příliš křehké a při

manipulaci by se mohlo poškodit. Jiné kovy by musely být příliš tenké, aby splnily požadavek maximální hmotnosti základní desky. Konkrétně bude použita slitina EN AW 6060, značení dle evropské normy, viz tab. 3.1, díky mechanickým a fyzikálním vlastnostem plechu uvedeným v tab. 3.2 a 3.3. Tloušťka desky bude zvolena podle maximální možné hmotnosti plechu. Je totiž zřejmé, že nejvyšší tepelnou stabilitu si zachová plech s co největším objemem. Výpočet tloušťky desky bude tedy vycházet ze vztahu pro hmotnost [24, 25]:

$$m = \rho \cdot V \quad (4.6)$$

kde: $V [m^3]$ - objem.

Výpočet objemu:

$$V = a \cdot b \cdot t \quad (4.7)$$

kde: $a, b [m]$ - délky stran,

$t [m]$ - tloušťka.

Vyjádření max. tloušťky:

$$t = \frac{m}{\rho \cdot a \cdot b} \quad (4.8)$$

Dosazení:

$$t = \frac{1,7}{2700 \cdot 0,5 \cdot 0,25}$$

$$t = 0,005 \text{ m}$$

V tab. 3.2 jsou uvedeny hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností pro plech tloušťky 5 mm, který byl zvolen. Hodnoty pro další tloušťky jsou uvedeny v příloze 2.

Tab. 3.1 Značení slitiny hliníku EN AW 6060 dle některých norem [26].

EN	Hutní označení	ČSN	DIN
EN AW 6060	AlMgSi	42 4401	3.3206

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti EN AW 606 [27].

Tloušťka [mm]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa]	Mez pevnosti v tahu R_m [Mpa]	Prodloužení		Tvrдость HB
			A [%]	A50mm [%]	
$e \leq 5$	120	160	8	6	55
$5 \leq e \leq 25$	100	140	8	6	50

Tab. 3.3 Fyzikální vlastnosti EN AW 6060 [27].

Hustota [kg/m ³]	Rozmezí tavicí teploty [°C]	Elektrická vodivost [MS/m]	Tepelná vodivost [W/m·K]	Koeficient tepelné expanze 10 ⁻⁶ /K	Modul pružnosti [GPa]
2700	585 – 650	28 – 34	200 -220	23,4	-70

3.1.2 Upevnění desky

Odebráním všech stupňů volnosti desky dojde k jejímu upevnění. Realizace se provádí nepřímou - pomocí spojovacích montážních součástí. Tyto součásti spojují konstrukci tiskárny s deskou a bývají vyrobeny z materiálů s dobrými izolačními vlastnostmi a vhodnou tepelnou použitelností (hodnoty dlouhodobé tepelné použitelnosti některých plastových materiálů jsou uvedeny v tab. 3.4). Jelikož může být deska vyhřátá i na vyšší teplotu než na 120 °C, zvolíme teflon, z něhož vyrobíme úchyty stolu.

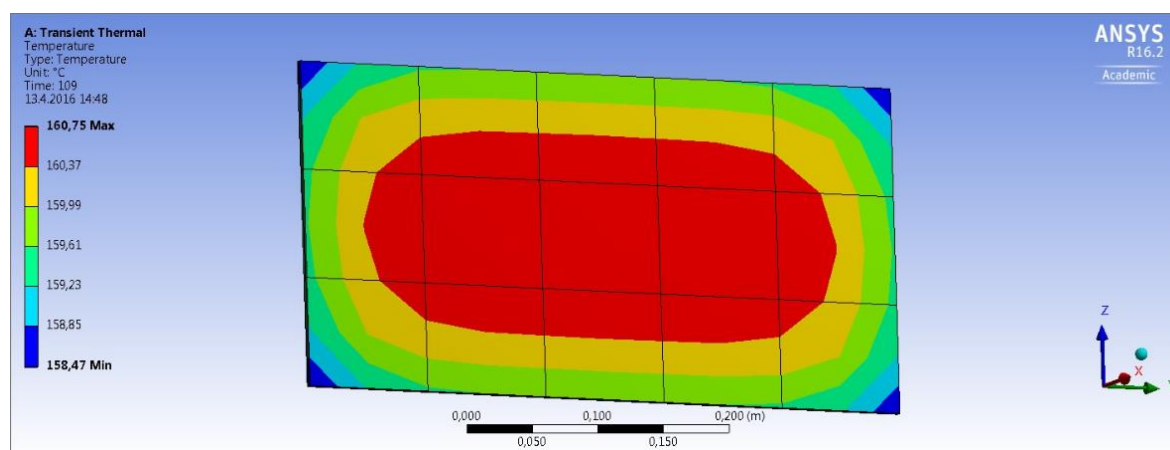
Dostatečná tuhost spojení se realizuje konstrukčními prvky, jako jsou šroubové spoje. Montážní součásti mohou být ke konstrukci připevněny šroubovým spojem také. U některých konstrukcí se stůl realizuje jako odpružený. Pružiny, které se k tomuto účelu používají, umožňují jemný pohyb desky v ose z. A pomáhají zabránit deformacím trysky či stolu při vzájemné kolizi. Šrouby budou v desce zapuštěny, aby se dalo využít i místo jejich umístění pro tisk.

Tab. 3.4 Hodnoty dlouhodobé tepelné použitelnosti vybraných plastových materiálů [28].

	PTFE	PVC	PP	PA
Tepelná použitelnost	250 °C	60 °C	100 °C	120 °C

3.1.3 Topná tělíska a jejich rozmístění

Volbu rezistorů ovlivňuje celá řada faktorů. Mezi ty základní patří: proud, napětí, výkon, jejich uspořádání, počet, dosažitelná teplota a jiné. Jako první je potřeba si uvědomit, jak se teplo v desce šíří, podle čehož se stanoví rozmístění rezistorů. Proto bylo nasimulováno ochlazování desky v programu ANSYS. Počáteční teplota byla pro názornější zobrazení odchodu tepla nastavena na 160 °C a deska se nechala volně ochlazovat na vzduchu o teplotě 25 °C. Rozložení teplot při ochlazování okolní teplotou 25 °C je znázorněno na obr. 16.



Obr. 16 Rozložení teplot v desce při ochlazování ze 160 °C okolní teplotou 25 °C.

Z obr. 15 je zřejmé, že deska chladne nejrychleji v rozích a nejpomaleji uprostřed. Proto je důležité soustředit umístění rezistorů s ohledem na vytvořenou simulaci. To znamená, že do krajů desky je potřeba dodávat vyšší tepelný výkon než do středu desky.

Nejprve je nutné určit skutečnou hodnotu provozního tepelného výkonu. Vycházíme ze vztahu pro tepelnou energii:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (5.0)$$

kde: c [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] - měrná tepelná kapacita,
 ΔT [K] - rozdíl teplot.

Dosazením hodnot získáme tepelnou energii, kterou je potřeba desce dodat. Počáteční teplota je tedy 298,15 K a konečná 393,15 K:

$$Q = 1,69 \cdot 885 \cdot (393,15 - 298,15)$$

$$Q = 142086,75 \text{ J}$$

Hodnota výsledné tepelné energie je dosazena do vztahu pro tepelný výkon. Doba t je čas v sekundách, za který musí být deska vyhřáta na požadovanou teplotu, pro náš případ se jedná o dobu 792 s:

$$P_p = \frac{Q}{t} \quad (5.1)$$

$$P_p = \frac{142086,75}{792} = 179,4 \text{ W}$$

Vypočítaný provozní výkon je beze ztrát, minimální možný pro získání tepelné energie, kterou potřebujeme za danou dobu. Při výběru zdroje el. proudu je dobré zvolit zdroj s větším výstupním výkonem s ohledem na případné ztráty. Zvolíme pracovní výkon o hodnotě nejméně 300 W. K experimentům tedy zvolíme regulovatelný zdroj.

Pokud dosadíme hodnotu pracovního výkonu za P a provedeme výpočet výkonu z proudu a napětí a dosadíme z Ohmova zákona za proud: $I = U/R$, vyjádříme pak celkový el. odpor:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R_s} \quad (5.2)$$

$$R_s = \frac{U^2}{P}$$

Po dosazení získáme hodnotu celkového odporu:

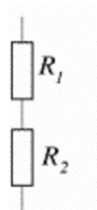
$$R_s = \frac{24^2}{300} = 1,92 \, \Omega$$

Nyní můžeme pokračovat výběrem typu a zapojení rezistorů.

Výběr rezistorů a jejich zapojení

Existují dva druhy zapojení rezistorů:

- sériové (obr. 17)



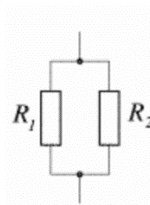
Obr. 17 Sériové zapojení rezistorů [29].

Výsledný odpor se získá ze vztahu 3.8.

$$R_s = R_1 + R_2$$

kde: R_1, R_2 [Ω] - odpor rezistoru 1, 2.

- **paralelní** (obr. 18)



Obr. 18 Paralelní zapojení rezistorů [29].

Výsledný odpor se získá ze vztahu 3.9.

$$R_s = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Ze vztahu 1.2 jsme získali celkový odpor. Pro dosažení tohoto odporu je nutné vybrat rezistory s optimálními parametry a zapojit je do optimálního zapojení.

Druhy rezistorů

Rezistory jsou elektronické součástky. Jejich základní vlastností je el. odpor. Podle konstrukčního provedení dělíme rezistory na dvě skupiny:

- rezistory se dvěma vývody,
- rezistory s více vývody.

Z katalogu firmy GES-ELECTRONICS, a.s., která se zabývá prodejem elektro součástek od roku 1991 můžeme vyčíst nejčastěji používané druhy rezistorů:

- SMD rezistory (obr. 19),



Obr. 19 SMD rezistor [30].

- uhlíkové rezistory (obr. 20),



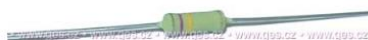
Obr. 20 SMD rezistor [31].

- metalizované rezistory (obr. 21),



Obr. 21 Metalizovaný rezistor [31].

- metaloxidované rezistory (obr. 22),



Obr. 22 Metaloxidovaný rezistor [31].

- drátové rezistory (obr. 23).



Obr. 23 Drátové rezistory [31, 32].

Výběr druhu rezistoru závisí také na způsobu jeho upevnění k desce. Je třeba zajistit nejúčinnější způsob přenosu tepla z rezistoru na desku. Nejúčinnější způsob je takový, při kterém se rezistor dotýká desky svou největší plochou. Uhlíkové, metalizované a metaloxidované rezistory mají nízkou životnost a po čase se začnou měnit jejich parametry. Jsou vyráběny jako válcové, takže by pro jejich upevnění bylo potřeba vyrobení speciálního pouzdra. To by však mohlo zbytečně odvádět teplo, takže můžeme tyto rezistory vyloučit. Drátové - keramické rezistory se jeví jako optimální volba.

Čím více rezistorů použijeme a hustěji je rozmístíme, tím rovnoměrněji se bude teplo v desce šířit. Proto vybere rezistory s odporem $0,1 \Omega$ s výkonem 5 W a vypočítáme, kolik jich bude potřeba při sériovém zapojení, podle vztahu 1.3.

$$n = \frac{R_s}{R_1} = \frac{1,92}{0,1} = 19,2 \quad (1.3)$$

Jelikož výsledek nevyšel celé číslo, zaokrouhlíme jej nahoru a použijeme tedy 20 rezistorů o odporu $0,1 \Omega$ zapojených sériově. Jelikož se jedná o keramický rezistor, bude přilepen na ohnutý plech, který se přilepí k desce.

Rozmístění rezistorů na desce

Rozmístění rezistorů je důležitá část diplomové práce, proto se jím bude zabývat kapitola 4.

3.1.4 Zdroj el. proudu

K laboratorním experimentům byl poskytnut průmyslový zdroj POWER SUPPLY EA-PS 2042-208 (zobrazen na obr. 24). S regulováním napětí od $0 \div 42$ V a proudu od $0 \div 20$ A s omezením výkonu do 320 W.



Obr. 24 POWER SUPPLY EA-PS 2042-208.

Termistor

Pro měření teploty se používají termistory. Do desky se vybrousí otvor, do kterého se termistor umístí. Připojí se ke zdroji, který teplotu přes počítač řídí. Vybírá se podle pracovní teploty. Pro naše potřeby bude použit termistor 100k NTC, beta 3950, viz obr. 25 [31].



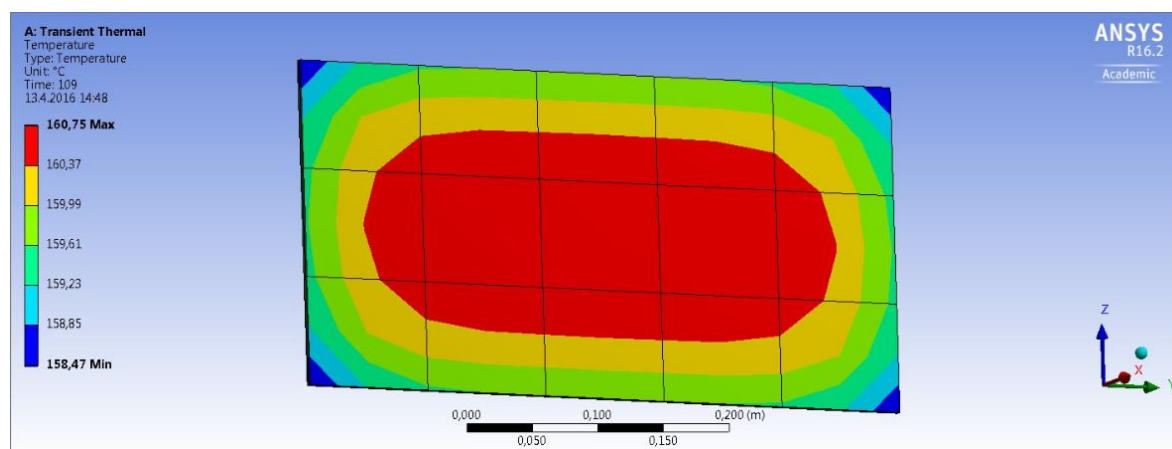
Obr. 25 Termistor 100k NTC, beta 3950 [33].

4 ROZMÍSTĚNÍ REZISTORŮ NA DESCE A KONTROLNÍ VÝPOČET MKP

V předchozí kapitole bylo odůvodněno a rozhodnuto, ze kterých součástí se bude sestava stolu skládat. Konkrétně se jedná o 1 ks hliníkové desky, 1 ks průmyslového zdroje, 4 ks teflonových úchytek, 20 ks rezistorů, 20 ks plechů pro překrytí rezistorů a prvky nutné k zapojení el. obvodu. Rozmístění rezistorů je důležitá část návrhu vyhřívaného stolu, proto bude navrženo několik typů rozmístění, ze kterých bude vybráno to nejideálnější.

4.1 Rozmístění rezistorů

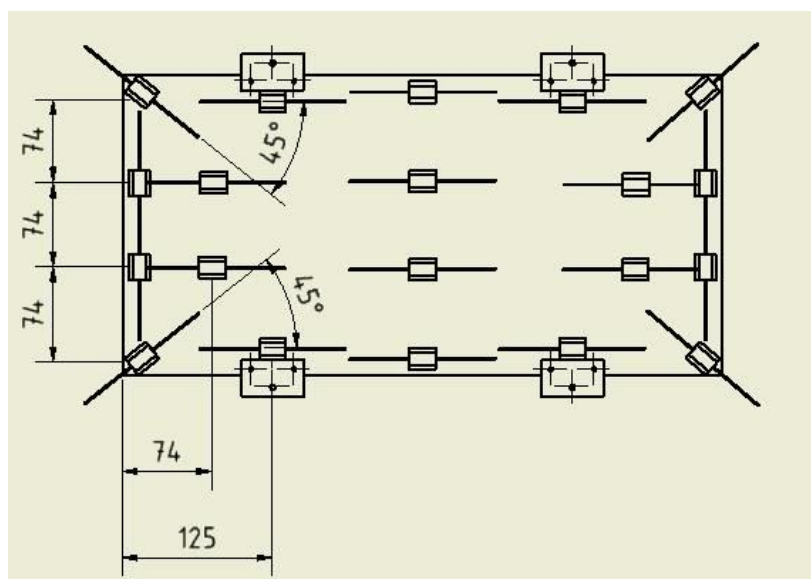
V kapitole 3. 1. 3 byl zobrazen postup chladnutí desky nasimulovaný v programu ANSYS (obr. 15). Rozmístění rezistorů se bude odvíjet od této simulace. Pro názornost bude obrázek zobrazen i v této kapitole.



Obr. 16 Rozložení teplot v desce při ochlazování ze 160 °C okolní teplotou 25 °C.

Varianta 1

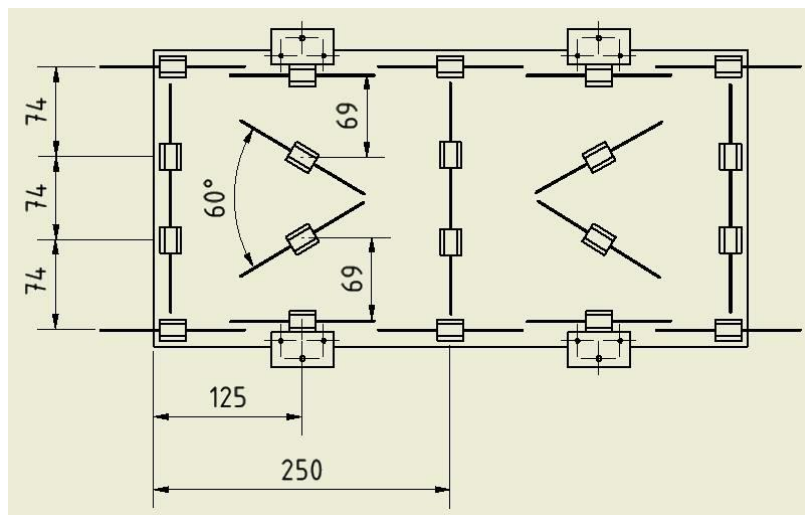
Rohové rezistory jsou natočeny pod úhlem 45° a směrem k okrajům jsou rezistory hustěji umístěny než ve čtvrtinách základní desky, viz obr. 26.



Obr. 26 Rozmístění rezistorů - varianta 1.

Varianta 2

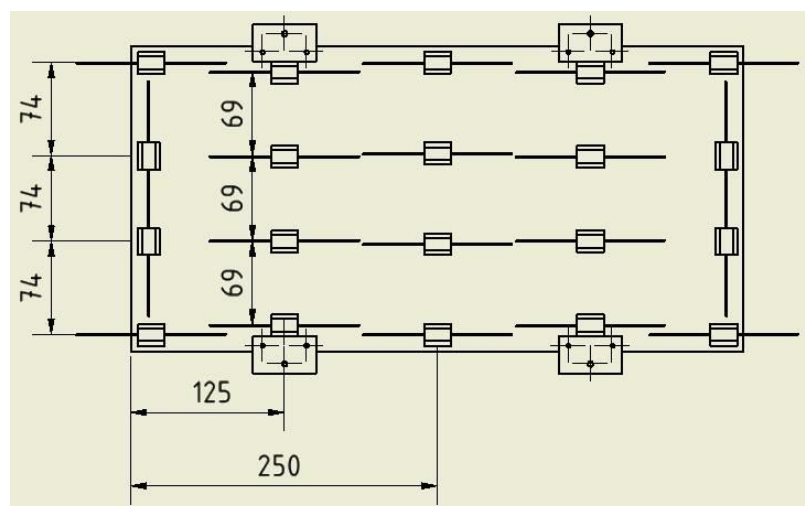
U této varianty jsou natočeny rezistory umístěné v první a třetí čtvrtině. Dva rezistory uprostřed jsou umístěny delší stranou kolmo na délku základní desky, viz obr. 27.



Obr. 27 Rozmístění rezistorů - varianta 2.

Varianta 3

Varianta 3 nezahrnuje natočené rezistory. Všechny umístěné na desce jsou delší stranou rovnoběžné nebo kolmé k délce základní desky, viz obr. 28.

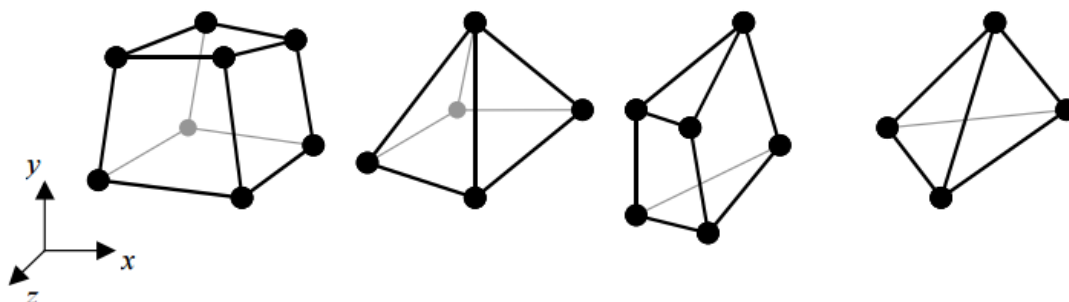


Obr. 28 Rozmístění rezistorů - varianta 3.

4.2 Výpočty MKP

Metoda konečných prvků je numerická metoda. Zaujímá dominantní postavení v rozsáhlé oblasti inženýrských výpočtů. Vznikla v polovině 50. let pro potřeby v leteckém, kosmickém, jaderném a vojenském průmyslu. S výhodou se využívá v akademickém prostředí a v průmyslové praxi tam, kde analytické metody selhávají. Používá se v oblastech pružnosti a dynamiky, proudění kapalin a plynů, vedení tepla záření, elektromagnetismu, akustice a dalších [34, 35, 36].

MKP vyžaduje rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí, které se nazývají prvky. Toho se docílí vytvořením sítě konečných prvků na modelu tělesa. Kromě dimenze a tvaru je pro každý typ prvku charakteristický i počet a poloha uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení, např. posuvy a natočení, které dále můžou sloužit např. pro výpočet napětí. Topologie a hustota prvků sítě zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu výsledků. Ukázky objemových prvků jsou znázorněny na obr. 29 [36].



Obr. 29 Ukázky objemových prvků [34].

4.2.1 Software pro výpočet MKP

Z hlediska softwarové sofistikovanosti a určení můžeme nabízené MKP systémy rozdělit do tří kategorií [34, 35, 36]:

System pro výpočtáře specialistu

Uživatel je výpočtář s příslušným vzděláním, schopný zvládat komplexní modely náročnějších inženýrských problémů, jak po inženýrské tak i fyzikální stránce. Předpokladem u tohoto odborníka je znalost programování. Doporučené MKP systémy pro tohoto uživatele jsou programátorsky přístupné multifyzikální nelineární programy s vazbou na CAD systémy: ABAQUS, ANSYS, NATRAN, CFX, FLUENT.

Systemy pro vývojáře, zabývajícího se výpočty

Uživatel – výpočtář inženýrského pojetí se zabývá výpočty střední kategorie složitosti zahrnující nestacionární nelineární problematiku. Doporučený MKP systém jsou nelineární programy užšího fyzikálního zaměření s úzkou integrací na CAD systémy, rozdělují se na dva druhy:

- Samostatně stojící MKP software, schopný úzce komunikovat s CAD systémem
- MKP software integrovaný přímo do prostředí CAD systému

Systémy pro přímou výpočetní podporu konstruktéra

Tyto systémy jsou určeny pro konstruktéry pracující s CAD systémy, aby mohli podle své potřeby využívat MKP výpočty bez hlubších znalostí MKP problematiky. Charakteristika těchto systémů pro uživatele: snadné a jednoduché použití, automatické a algoritmizované postupy s úzkou vazbou na CAD systémy, či jejich integrace do CAD systémů. Typické softwary pro tuto kategorii: ANSYS/DesignSpace, COSMOS/Works, Autodesk Fusion 360 [36]:

4.2.2 Autodesk Fusin 360

Dle přechozí charakteristiky byl zvolen program Autodesk Fusion 360. Jedná se o 3D CAD/CAM/CAE aplikaci pro digitální prototypování. Kombinuje organické volnoplošné modelování, povrchové a objemové modely do jednoho integrovaného řešení. Umí otevírat, editovat i ukládat 3D modely ve všech běžných souborových formátech. Autodesk Fusion 360 disponuje funkcemi např. [36]:

- nástroje pro zpětné inženýrství a 3D malování,
- nástroje pro pokročilé povrchové modelování,
- vstřikování plastů (FDM),
- **vícetělesové MKP/FEM analýzy,**
- modelování plechových dílců,
- mechatronika a integrace ECAD.

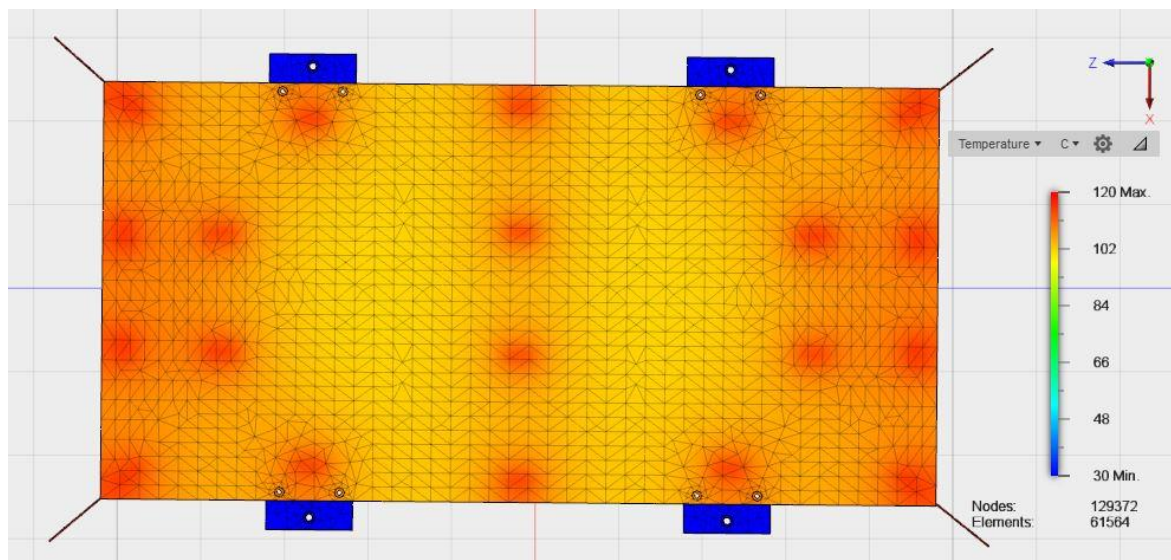
Kontrolní výpočty MKP

V kapitole 4.1 byly představeny 3 varianty rozmístění rezistorů na desce stolu. Ty byly vymodelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2016 a exportovány do programu Autodesk Fusion 360. V tomto programu byly provedeny výpočty MKP, které slouží jako hodnoty k vytvoření tepelných simulací ohřívání navrhnutých variant stolu. Podle těchto simulací dojde k výběru nejideálnější varianty rozmístění rezistorů na desce stolu.

V místě, kde je základní deska volná a přístupná, byla zvolena konvekce a radiace, dle kapitoly 2. Tepelný tok byl nastaven v místě rezistorů. Je nastaveno, že se rezistory zahřejí na 120 °C a desku ohřívají.

Varianta 1

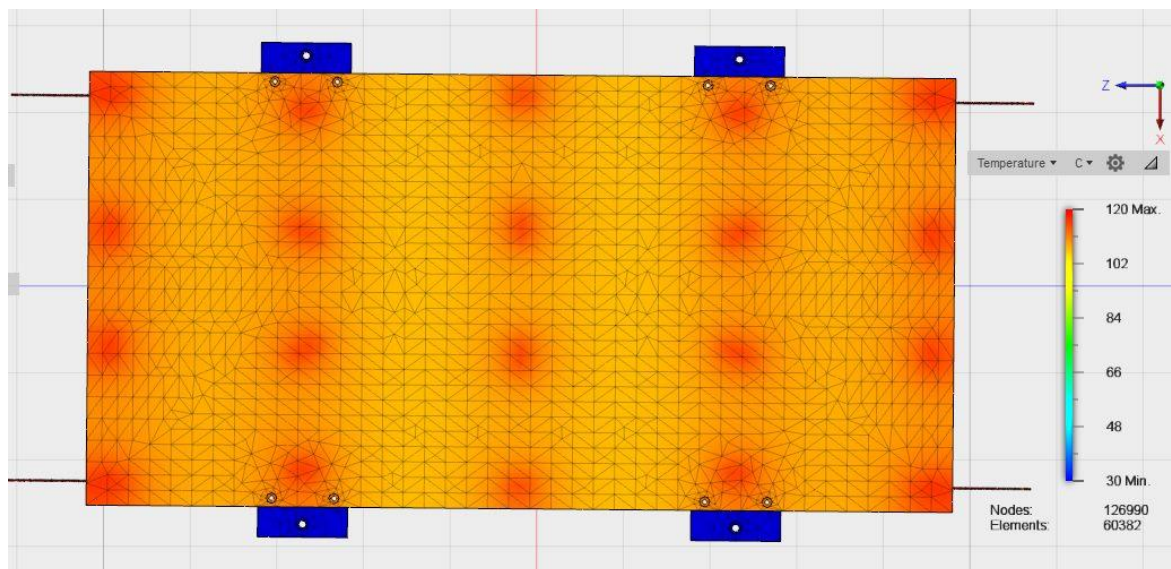
Teplo je, dle obr. 30, poměrně rovnoměrně rozloženo, kromě místa mezi druhou a třetí řadou rezistorů. Natočené rezistory se nejeví jako o mnoho lepší varianta vzhledem k poměru délky a šířky rezistoru.



Obr. 30 Rozložení tepla u varianty 1.

Varianta 2

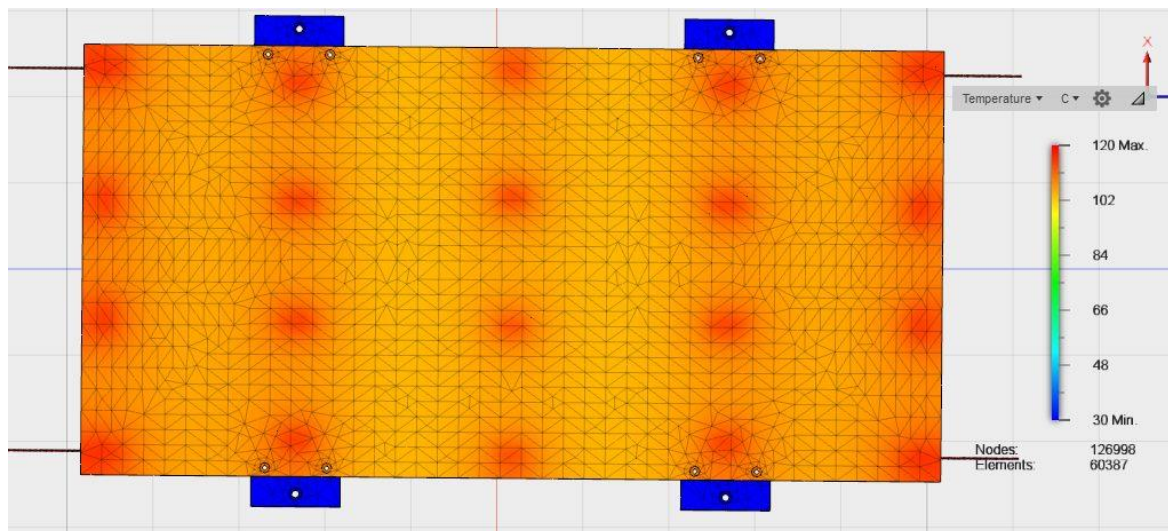
Posunutí druhé řady rezistorů ke středu zrovnoměnilo rozložení tepla (viz obr. 31). Natočení rezistorů je, z hlediska rozložení teplot, v tomto případě nevýhodné.



Obr. 31 Rozložení tepla u varianty 2.

Varianta 3

Rozložení tepla varianty 3 je zobrazeno na obr. 32. Teplo je relativně rovnoměrně rozloženo. Na krajích základní desky stolu je vyšší teplota, podle očekávání.



Obr. 32 Rozložení tepla u varianty 3.

Vyhodnocení a volba nejideálnější varianty

Všechny tepelné představené simulace se zdají být reálné. Teplota teflonových úchytek se však může zdát nižší než očekávaná. Z vyobrazených teplotních simulací je zřejmé, že nejrovnoměrnějším rozložením tepla disponuje varianta 3. Tato varianta rozmístění rezistorů bude zrealizována, změřena termografickou kamerou a porovnána s vypočtenou.

5 VÝROBA VÝHŘÍVANÉHO STOLU A MĚŘENÍ

Před měřením samotným dojde k výrobě atypického vyhřívaného stolu, který se následně otestuje v laboratoři.

5.1 Výroba atypického vyhřívaného stolu

Výroba sestavy vyhřívaného stolu se bude skládat z výroby součástí, podsestav a jejich montáže. Bude končit zapojením elektrického obvodu.

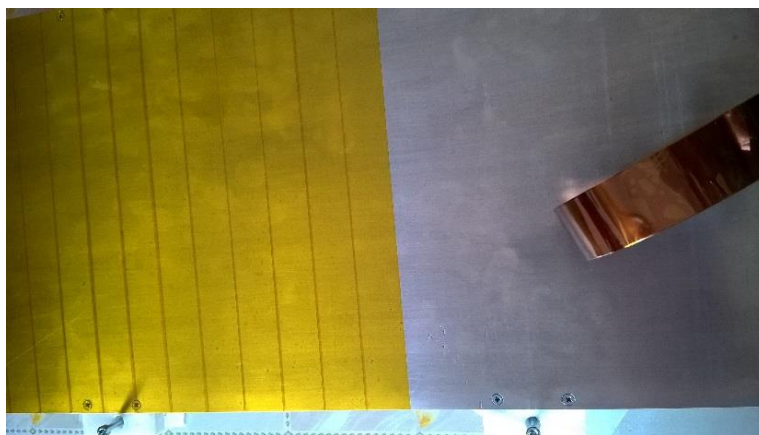
Výroba základní desky

Deska o rozměrech 500 mm x 250 mm x 5mm byla zakoupena od firmy ALFUN. Po zakoupení byla zkontrolována její rovinnost, ta byla nevyhovující, deska se musela nechat vyrovnat na lisu. Po vyrovnání následuje vrtání otvorů, k této operaci byl použit vrták HSS DIN 338 o průměru Ø 3,5 mm. A záhlubník RUKO 102121E DIN 335 pro průměry Ø3,5 mm až 20,5 mm. Po vrtání následovalo odstranění otřepů ručně – pilníkem ČSN 2291. Jako poslední operace bylo leštění obou hlavních ploch pásovou plstí DIN 61200. Rozdíl v leštěné a neleštěné části stolu je zobrazen na obr. 33.



Obr. 33 Rozdíl v leštěné a neleštěné části stolu

Leštěná hliníková deska má nízkou emisivitu, proto se na stranu určenou pro tisk lepí páska KAPTON, jejíž emisivita je mnohonásobně vyšší. Emisivita této pásky je 0,93 a její nalepení je zobrazeno na obr. 34. Výkres základní desky stolu je zobrazen v příloze 4.



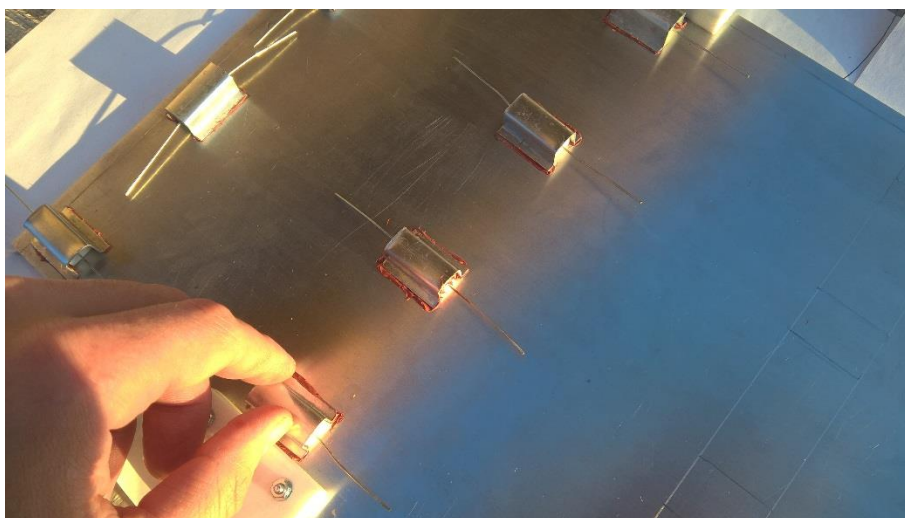
Obr. 34 Nalepení pásky KAPTON.

Výroba teflonových úchytů

Pro výrobu teflonových úchytů se koupily teflonové pásy, které se nařezaly na požadovaný rozměr. Vyvrátili se do nich otvory podle výkresu v příloze 5 vrtákem Ø 3,2 a záhlubníkem se zahloubila díra pro válcovou hlavu šroubu M4. Úchyty se k základní desce přišroubují za použití podložek.

Podsestava - rezistor umístěný v plechu

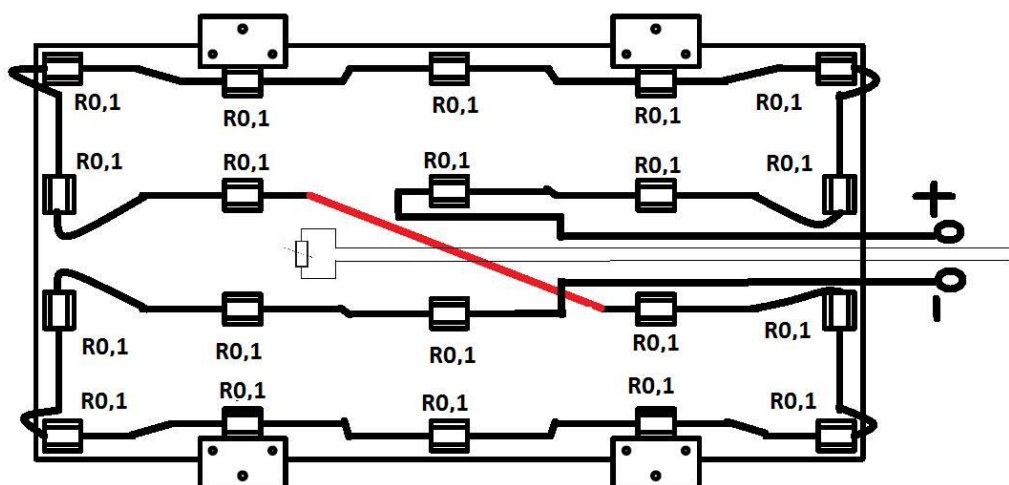
Plech byl ustříhnut a ohnut podle výkresu v příloze 5. Rezistory byly přilepeny silikonovým tmelem Lukopren S 9780 a následně nalepeny na základní desku dle obr. 35.



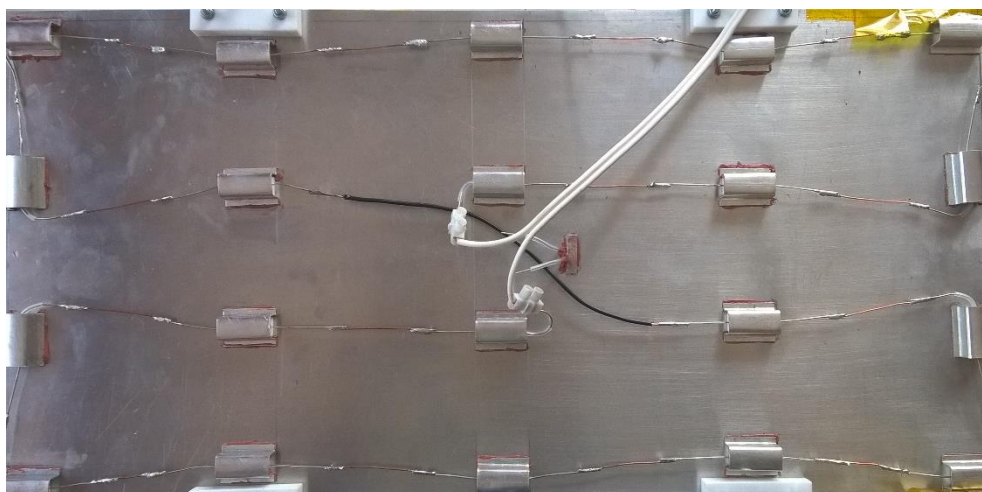
Obr. 35 Přilepení rezistorů na základní desku.

Zapojení obvodu

Zapojení rezistorů se realizuje pájením cínovou pájkou. Obvod byl zapojen do sériového zapojení podle schématu na obr. 36, výsledek zapojení je zobrazen na obr. 37. Vývody jsou zapojeny do zdroje el. proudu podle obr. 38.



Obr. 36 Schéma zapojení rezistorů a termistorů do obvodu.



Obr. 37 Sériové zapojení obvodu.

Zapojení obvodu vyhřívaného stolu do zdroje el. proudu je zobrazeno na obr. 38.



Obr. 38 Zapojení obvodu vyhřívaného stolu do zdroje el. proudu.

5.2 Měření termografickou kamerou FLIR ThermaCAM SC2000

Měření se uskutečnilo v laboratoři B1/410, Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. K měření byla propůjčena termografická kamera FLIR ThermaCAM SC2000 viz obr. 39. Technické parametry jsou uvedeny v příloze 3.



Obr. 39 Termografická kamera FLIR ThermaCAM SC2000 [37].

5.2.1 Postup měření

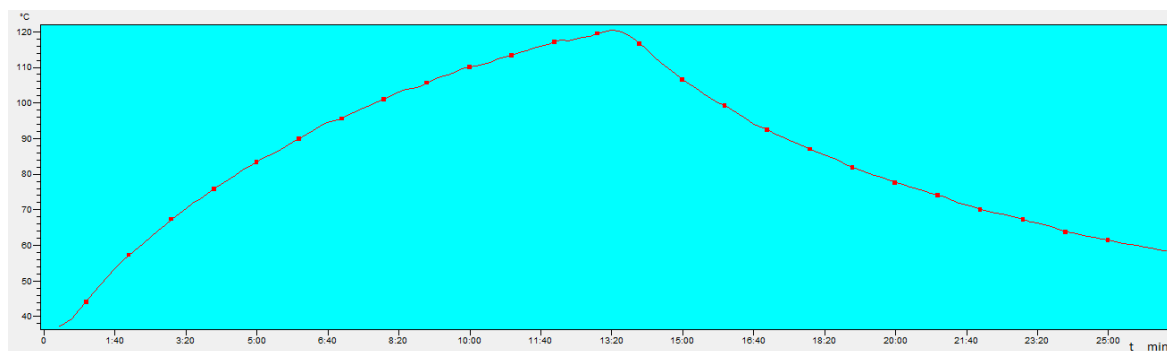
Termografická kamera byla umístěna na stativ, který byl nastaven v potřebné vzdálenosti od vyhřívaného stolu. Následovalo připojení kamery k počítači, disponujícím softwarem ThermaCAM Researcher 2001, přes který je ovládána. Také byl nastaven požadovaný rozsah pro měření $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a byla změřena emisivita povrchu stolu. Vyhřívaný stůl byl ustaven na podlahu, tak aby kamera snímala celou jeho plochu. Zdroj el. proudu byl umístěn ve vzdálenosti od stolu, tak aby neovlivnil výsledný obraz. Po nastavení všech parametrů bylo zahájeno měření. Podle plánu se deska zahřála na teplotu $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nechala se zchladnout na $54\text{ }^{\circ}\text{C}$, po té se měření ukončilo. Během měření termografická kamera snímala vyhřívaný stůl a snímky ukládala na hardware počítače. Vstupní hodnoty měření jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Vstupní hodnoty měření.

Teplota v místnosti	$25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Vlhkost	24%
Vstupní el. napětí	$U = 26,6\text{ V}$
Vstupní el. proud	$I = 11,52\text{ A}$
Emisivita	$\varepsilon = 0,93$

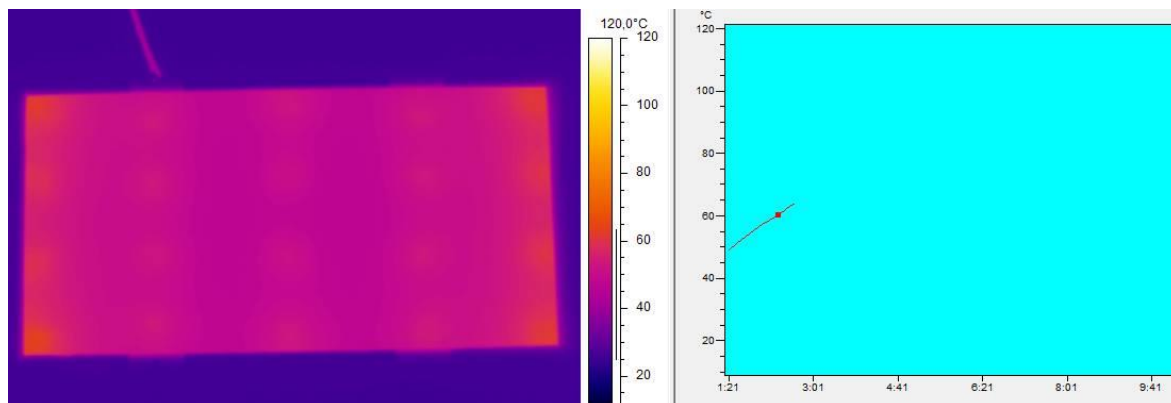
5.2.2 Výsledky měření

Kamera snímala stůl během ohřevu z $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ na teplotu $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následného ochlazování na teplotu $54\text{ }^{\circ}\text{C}$. Během experimentu byl vygenerován graf závislosti doby ohřevu na teplotě, viz obr. 40.

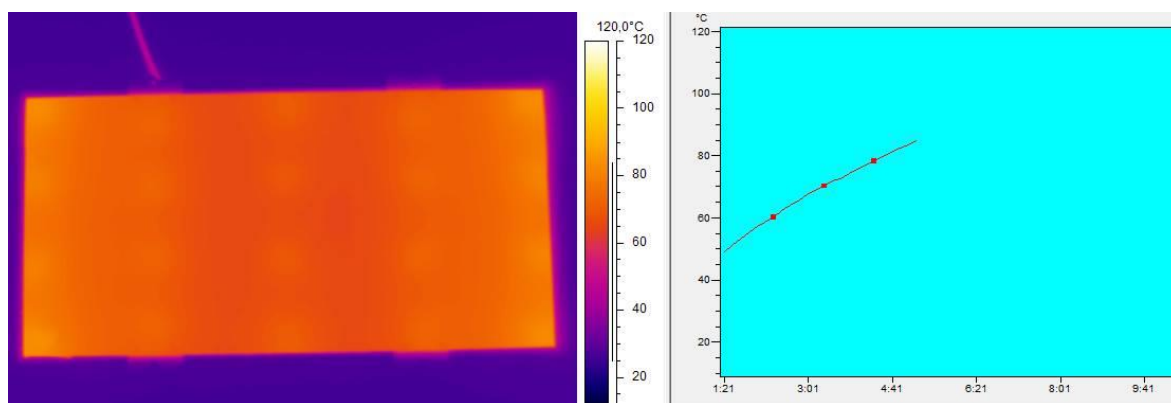


Obr. 40 Graf závislosti doby ohřevu a ochlazování stolu na teplotě.

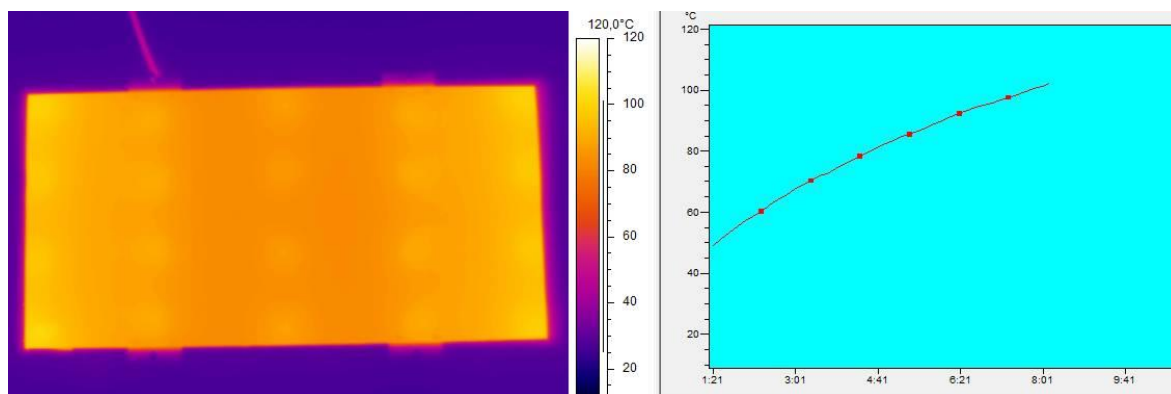
Během měření zaznamenala termografická kamera přes 165 snímků. Některé z těchto snímků sloužily jen ke kalibraci. Ty musely být odstraněny, protože by jejich hodnoty nežádoucím způsobem ovlivňovaly graf a nejsou pro naše měření podstatné. Na obr. 41, 42, 43, 44 jsou zobrazeny snímky měření a graf závislosti teplot na čase ohřívání stolu.



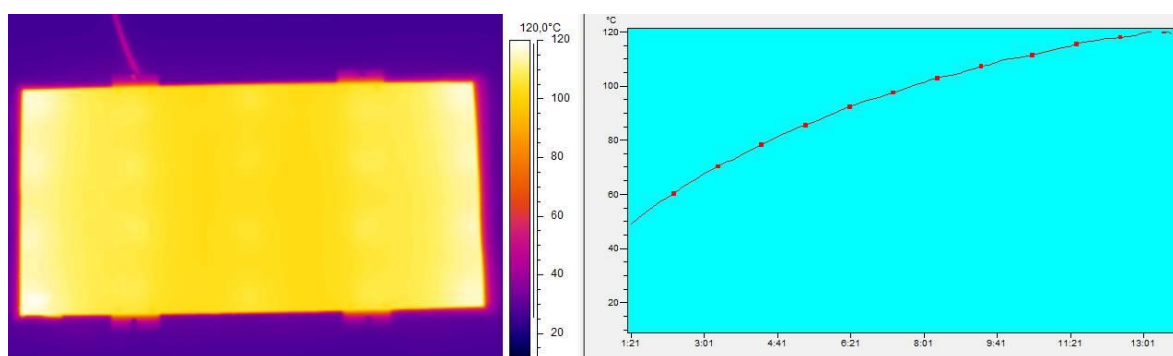
Obr. 41 Rozložení teplot při teplotě 64 °C v čase 3 min.



Obr. 42 Rozložení teplot při teplotě 85 °C v čase 5 min.

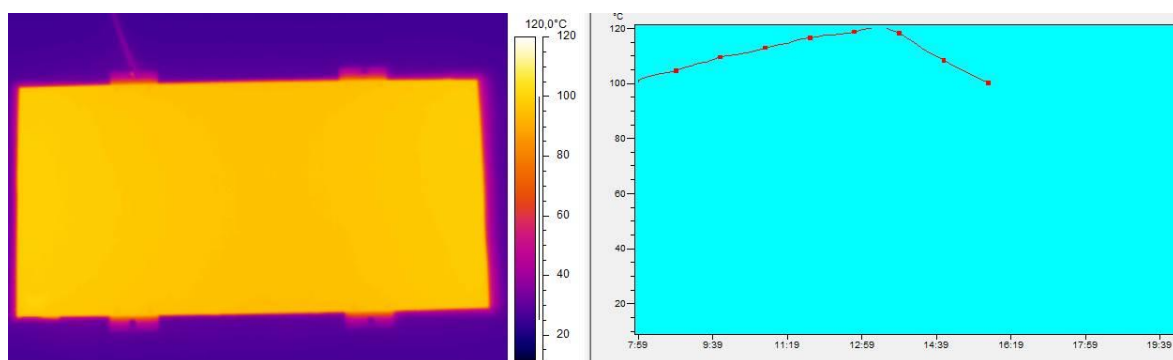


Obr. 43 Rozložení teplot při teplotě 102 °C v čase 8:01 min.

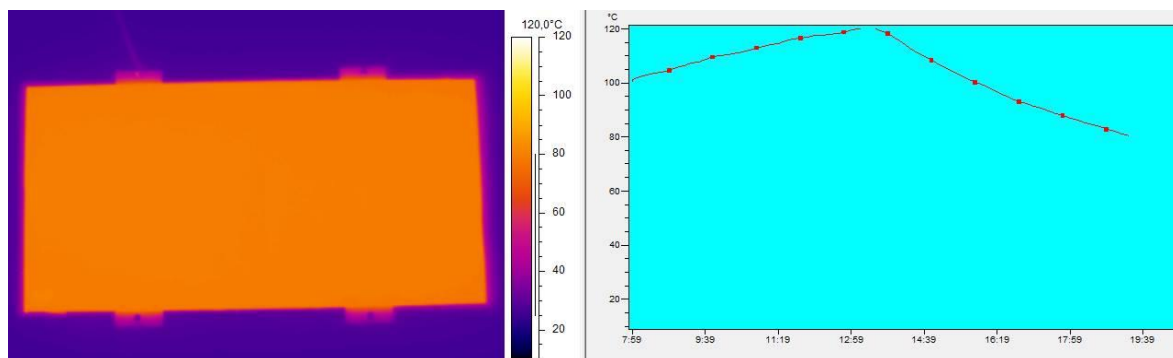


Obr. 44 Rozložení teplot při maximální teplotě 120 °C v čase 13:20 min.

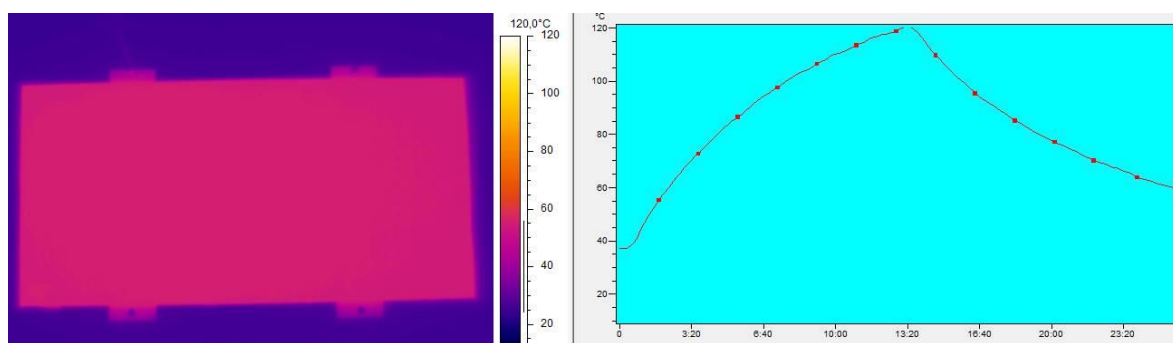
V následujících obrázcích (obr. 45, 46 a 47) jsou zobrazeny snímky ochlazování stolu v závislosti na čase.



Obr. 45 Rozložení teplot při ochlazování na teplotu 100 °C.



Obr. 46 Rozložení teplot při ochlazování na teplotu 80 °C.



Obr. 47 Rozložení teplot při ochlazování na teplotu 55 °C.

V této fázi jsme schopni vypočítat ztrátový výkon, který bude sloužit pro definování pracovního výkonu zdroje el. proudu. Použijeme maximální teplotu, od které odečteme teplotu na konci experimentu podle vztahu 5.0, tak zjistíme ztrátové teplo. Když jej vydělíme dobou ochlazování (780 s), zjistíme ztrátový výkon, k němuž přičteme pracovní výkon a získáme celkový výkon P_s :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (5.0)$$

$$Q_z = 1,69 \cdot 885 \cdot (393,15 - 328,15) = 97217,25 \text{ J}$$

$$P_z = \frac{97217,25}{780} = 122,75 \text{ W}$$

$$P_s = P + P_z = 179,4 + 122,75 = 302,15 \text{ W}$$

Výsledek můžeme porovnat s hodnotou výkonu použitého zdroje, podle vztahu 5.2:

$$P = 26,6 \cdot 11,52 = 306,4 \text{ W}$$

Výsledek se liší v 4,25 W výkonu. To znamená, že byly vstupní hodnoty zvoleny relativně přesně.

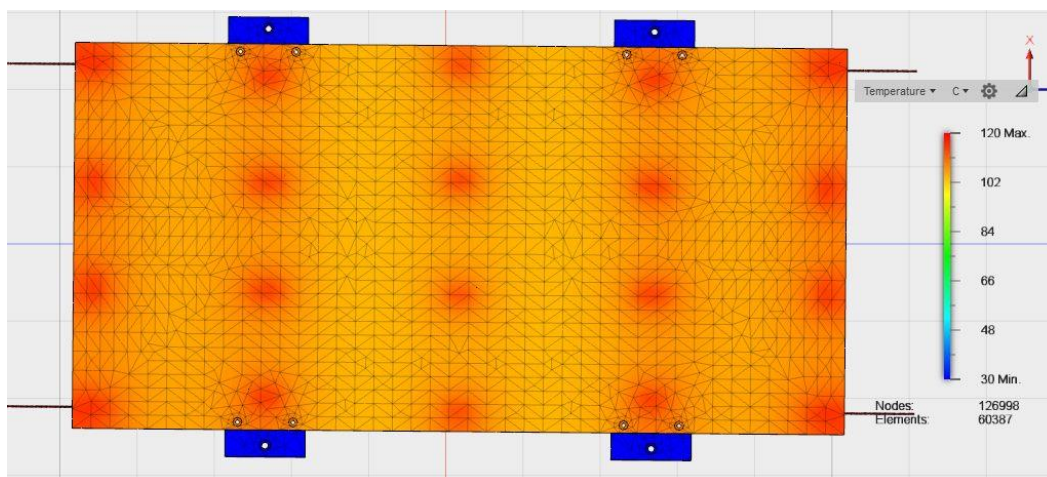
6 VYHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ DO BUDOUCNA

Z výsledků měření termografickou kamerou FLIR ThermaCAM SC2000 vyplývá, že se stůl zahřívá poměrně rovnoměrně. Při zahřívání je v místech rezistorů vyšší teplota i o 10 °C. Při použití vstupních veličin uvedených v tab. 5.1 se dosáhne teploty 120 °C za dobu 13 min a 20 s. Na okrajích se teplota zvyšuje rychleji, což je dáno hustějším rozmístěním rezistorů. Teplota teflonových úchytek se pohybuje v rozmezí 20 °C až 45 °C v závislosti na vzdálenosti od základní desky.

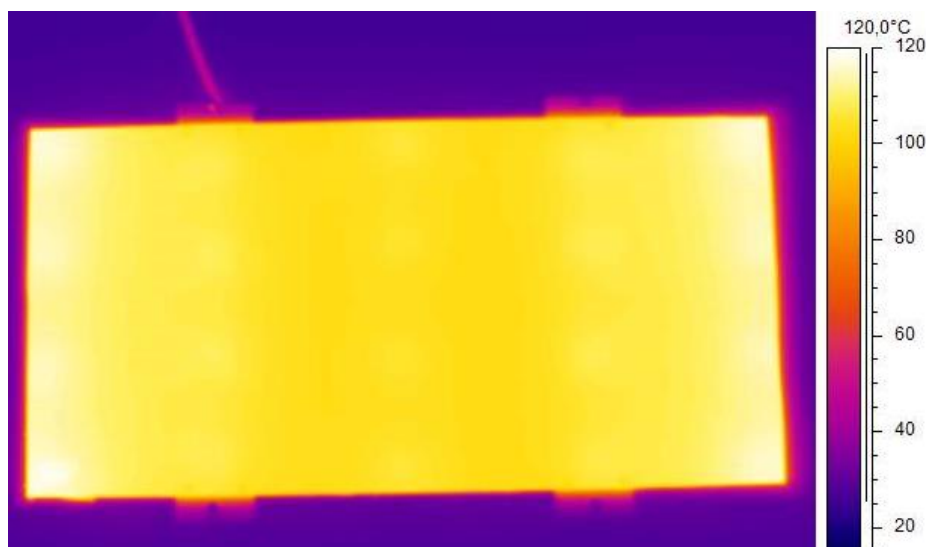
Při chladnutí stolu se teplota mění rovnoměrněji než při ohřevu. Je to dáno tím, že rezistory při této fázi neprodukují teplo. Maximální rozdíly teplot při chladnutí v různých částech stolu dosahují nanejvýš 0,5 °C, což dokazuje, že volba rozmístění rezistorů (varianta 3) byla zvolena správně a jedná se tedy o optimální variantu.

6.1 Porovnání naměřených hodnot s vypočtenými

Pro porovnání naměřených hodnot s vypočtenými je potřeba zobrazit obr. 32 - Rozložení tepla u varianty 3 a obr. 48 Rozložení tepla při maximální teplotě 120 °C (velikostně upravený obrázek 44).



Obr. 32 - Rozložení tepla u varianty 3



Obr. 48 - Rozložení tepla při maximální teplotě 120 °C.

Charakteristika těchto obrázků je stejná. Na první pohled můžeme zaznamenat mírné rozdíly v teplotách teflonových úchytů. Ty mohou být způsobeny zvolením jiného součinitele přestupu tepla, než je tomu u skutečného materiálu nebo chybnou materiálovou knihovnou v použitém programu. Tyto rozdíly však pro nás nejsou důležité a můžeme je považovat za vyhovující.

Teploty v elementárních místech obou stolů se, když vezmeme v úvahu přesnost měření použité termografické kamery ($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), neliší. Další vliv na přesnost má hustota použité sítě. Čím jsou elementy sítě menší, tím přesnější výsledek můžeme očekávat. Sít' vygenerovaná speciálně pro atypický vyhřívaný stůl má 60387 elementů a 126998 uzlů. Vygenerováním sítě disponující menšími elementy by se však mohl výrazně prodloužit – výpočty modelů s jemnější sítí mohou trvat i několik dní.

Požadavky na velikost tiskové plochy 500 mm x 250 mm x 250 mm i rovinnost plochy byly splněny. Dosažení provozní teploty stolu $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ při rovnoměrném průběhu teplot bylo taktéž splněno včetně doby dosažení této teploty i její regulovatelnosti. Váha základní desky stolu nepřekročila požadovanou maximální. Tepelná stabilita stolu kolísá (teploty se liší v rozmezí $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). V důsledku toho byl změřen odpor celkového stolu, který činil $2,4\text{ }\Omega$. S tak velkým odporem se při návrhu nepočítalo. Mohl vzniknout při pájení či zapojování obvodu. Proto by bylo vhodné použití výkonnějšího zdroje.

V této fázi můžeme konstrukční návrh, výrobu atypického vyhřívaného a jeho měření označit za úspěšné. Měření potvrzuje správnost simulace MKP.

6.2 Doporučení do budoucna

S ohledem na získané výsledky můžeme diskutovat o možnostech vylepšení do budoucna. Doba ohřevu stolu může být výrazně zrychlena použitím výkonnějšího zdroje el. proudu. Doporučuji použití zdroje s větším výkonem. Například průmyslový zdroj o parametrech 27 V a 400 W by stůl zahřál rychleji. Při použití zdroje s vyšším napětím než 24 V je také důležité dodržovat zvýšenou bezpečnost při práci s elektrickými zařízeními.

Do budoucna by bylo také dobré zaměřit se na efektivnější izolování spodní části sestavy stolu. To by se dalo zrealizovat montážní pěnou s vysokou teplotní použitelností. Nevýhodou by však bylo obtížné odizolování v případě potřeby výměny některého z rezistorů či termistoru.

7 TECHNICKO – EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

V návaznosti na výsledky experimentu měření vyrobeného atypického vyhřívaného stolu bude provedeno vyhodnocení z hlediska technických parametrů a technickoekonomických ukazatelů. Vyrobený stůl bude porovnán se sériově vyráběnou MK2a podložkou, zobrazenou v příloze 1.

7.1 MK2a podložka výrobce Prusa Research s.r.o.

Hodnoty jsou čerpány z tab. 1.7

Technické parametry:

- rozměry podložky: 200 mm x 200 mm,
- hmotnost: 0,5 kg,
- rovinnost: 0,1 mm na plochu desky,
- maximální teplota: 110 °C,
- doba vyhřátí na tuto teplotu: 8 ÷ 30 min,
- maximální odpor: 1 ÷ 1,5 Ω,
- napájecí proud: 8 ÷ 22,5 A,
- napájecí napětí: 12 V,
- tloušťka: 2 mm.

Technicko-ekonomické ukazatele:

- pořizovací cena stolu: 539 Kč,
- cena skleněné desky: 100 Kč.

V případě MK2a podložky si zákazník zakoupí hotový výrobek, který připojí ke zdroji. V případě této desky se však doporučuje kombinace se skleněnou deskou, takže celková cena bude 639 Kč, bez jejího použití 539 Kč.

7.2 Atypický vyhřívaný stůl s hliníkovou základní deskou, realizovaný rezistory

Technické parametry:

- rozměry podložky: 500 mm x 250 mm,
- hmotnost: 1,686 kg,
- rovinnost: 0,1 mm na plochu desky,
- maximální teplota: $120 \div 200$ °C,
- doba vyhřátí na 120 °C: 13 min,
- maximální odpor: $2 \div 2,4$ Ω,
- napájecí proud: $11,52 \div 20$ A,
- napájecí napětí: $26,6 \div 40$ V,
- tloušťka: 5 mm.

Technicko-ekonomické ukazatele:

- pořizovací cena dílů: 535 Kč,
- náklady na sestavení: 240 Kč.

Cena dílů se skládá z ceny základní desky (304 Kč), rezistorů (90 Kč), plechů (52 Kč), teflonových úchytů (25 Kč), tmelu (5 Kč), páska KAPTON (24 Kč) dráty a ostatní komponenty (35 Kč). Ceny jsou určeny pro výrobu 1 ks vyhřívaného stolu. Nejvyšší cenu představuje pochopitelně hliníková deska. Při nákupu 100 ks těchto desek by se tato cena snížila na 230 Kč. Celkovou cenu ještě zvýší náklady na sestavení desky. Jedná se lehkou jednoduchou manuální práci, proto bude mzda zaměstnance 120 Kč za hodinu odvedené práce. Celková cena tedy činí 775 Kč.

Shrnutí

Abychom mohli porovnávat cenu MK2a podložky a cenu atypického vyhřívaného stolu navrhnutého v diplomové práci musíme brát v úvahu rozdílné velikosti základních desek. MK2a podložka je objemově 7,8krát menší. Pokud bychom koupili 2 tyto podložky a nelepili je na skleněnou desku o velikosti 500 mm x 250 mm, byla by cena této sestavy minimálně 1178 Kč. Z čehož vyplývá, že atypický vyhřívaný stůl je z hlediska objemu cenově přibližně 1,5 krát výhodnější. Cena na údržbu není brána v úvahu, protože v této fázi nejsme schopni říci, jak často a jak cenově náročná údržba bude. Můžeme však říct, že údržba u MK2a podložky bude jednodušší a levnější při stejné době používání.

Z hlediska technického vyhodnocení je PCB deska MK2a nevyhovující především kvůli hodnotě maximální pracovní teploty a doby vyhřátí, která se pohybuje ve velkém časovém rozmezí. Protože je tloušťka této podložky 2 mm odhaduje se nízká tepelná stabilita a její prohýbání. Prohýbání lze kompenzovat použitím skleněné desky, ale tím by se výrazně prodloužila doba vyhřátí a hmotnost celého stolu.

Atypický vyhřívaný stůl odpovídá předpokládaným parametrům a splňuje zadání. Jeho nevýhodou může být potřeba použití vysokého el. proudu a napětí. Cena je však překvapivě nízká.

8 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem vyhřívaného atypického stolu pro 3D tiskárnu Sinuhed, která je přestavbou FDM 3D tiskárny Mendel. Předkládá základní znalosti teorie šíření tepla, 3D tisku a nejčastěji používaných technologií. Blíže se zabývá problematikou vyhřívaných stolů a zmiňuje některé výrobce. Jsou diskutovány nejčastěji používané druhy vyhřívaných stolů. Z nichž je, podle požadavků majitele 3D tiskárny, vybrána optimální varianta. Jedná se o vyhřívaný stůl realizovaný topnými tělisky neboli rezistory.

V samotné části návrhu atypického vyhřívaného stolu jsou nejprve vysvětleny požadavky, kterých by měl vyrobený stůl dosahovat. Konkrétně se jedná především o velikost tiskové plochy 500 mm x 250 mm, dosažení provozní teploty stolu 120 °C i vyšší, maximální doba dosažení této teploty 13 minut a 20 sekund, její regulovatelnost, dobrá tepelná stabilita stolu, spolehlivost a maximální váha základní desky stolu 1,7 kg. V návaznosti na tyto požadavky byl navrhnut materiál, tloušťka základní desky a součástky potřebné k jejímu sestavení. Dále byly navrženy 3 varianty rozmístění rezistorů na ploše základní desky stolu. Tyto varianty byly vymodelovány v programu Autodesk Inventor Professional 2016 a exportovány do programu Autodesk Fusion 360, kde byly provedeny kontrolní výpočty MKP. Po vyhodnocení tepelných simulací byla zvolena optimální varianta rozmístění rezistorů.

Navazující část diplomové práce se zabývá výrobou navrhnutého stolu. Jsou popsány kroky výroby jednotlivých součástí a také jejich montáž. Bylo provedeno měření termografickou kamerou FLIR ThermoCAM SC2000 v laboratoři B1/410 Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

Výsledky měření byly porovnány s výsledky dosaženými v programu Autodesk Fusion 360. Zrealizovaný stůl byl zahřátý na teplotu 120 °C za dobu 13 min 20 s. Kromě teploty teflonových úchytek se výsledky výrazným způsobem neliší a výsledky experimentálního měření potvrzují funkčnost a správnou volbu varianty rozmístění rezistorů. Bylo také provedeno kontrolní měření s požadavkem zjištění rozdílů teplot různých částí stolu. Toto měření ukázalo rozdíl v rozmezí teplot 2,5°C na ploše stolu. Což je přijatelné a je způsobeno vzdáleností rezistorů od sebe. Při ochlazování se mění teplota stolu rovnoměrně v celém jeho objemu.

Výsledky potvrzují všechny výhody i nevýhody vyhřívaných stolů realizovaných rezistory. Všechny požadavky majitele byly splněny. Závěrečnou částí diplomové práce je technicko-ekonomické vyhodnocení. V této části byla porovnána MK2a podložka výrobce Prusa Research s.r.o. s vyrobeným stolem. MK2a podložka nedosahuje požadovaných technických parametrů - především rozměrových a teplotních, ale je méně energeticky náročná. Pokud by byla zrealizována v požadovaných rozměrech, byla by její cena minimálně 1178 Kč. Pořizovací cena, včetně nákladů, na výrobu atypického vyhřívaného stolu, realizovaného touto prací, je 775 Kč.

V diplomové práci bylo předneseno několik doporučení do budoucna, které by měli vézt ke zlepšení v oblasti realizace vyhřívaných stolů. Především se jedná o použití výkonnějšího zdroje. Například průmyslový zdroj o parametrech 27 V a 400 W by stůl zahřál rychleji.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. 3DPRINT.COM: The Voice of 3D Printing Technologies [online]. In: . Japanese: 3DR Holding, LLC, 2014 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://3dprint.com/17716/3d-printed-jet-engine/>
2. PÍŠKA, Miroslav aj. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
3. Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping. Technická Univerzita v Liberci Fakulta strojní, 2012. Dostupné také z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf
4. GEBHARDT, A., Rapid prototyping. 1st ed. p. cm., Carl Hanser Verlag, Munich 2003, 379 s., ISBN 3-446-21259-0.
5. SYSEL, K. Návrh a zefektivnění parametrů FDM tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..
6. KADLECOVÁ, H. Metody rychlého prototypování použitelné ve slévárenství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 42 s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Milan Horáček, CSs..
7. DRÁPELA, M. Modul Rapid Prototyping [online]. vyd. 2007 [2016-05-21]. Dostupné z <http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Milosvav%20Dr%C3%A1pela.pdf>
8. Custompart: Fused deposition modeling. [online]. [2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
9. PRŮŠA, Josef. Jak vybrat 3D tiskárnu. In: Josefprusa.cz [online]. Česká republika [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://josefprusa.cz/vyber-3d-tiskarny/>
10. ŽLEBEK, M. Konstrukce 3D tiskárny pro materiály s vyšší pevností. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D..
11. 3D HUBS: RepRap Mendel Prusa [online]. Herengracht 182, 1016BR Amsterdam, 2011 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/mendel-prusa>.
12. Matematické, fyzikální a chemické tabulky: pro střední školy. Praha: Ottovo nakladatelství, 2012. ISBN 978-80-7451-222-3.
13. RepRao/cs - RepRapWIKI [online]. 2014 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RepRap/cs#Materi.C3.A1ly_pro_tisk
14. PCB desk [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: https://thingiverse-production-new.s3.amazonaws.com/render/0f/77/c9/c1/f7/IMG_2371_preview_featured.jpg
15. SODOMKA, P. Simulace vlivů vyhřívání podložky na tisknutý model u 3D tiskárny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a

- komunikačních technologií, 2015. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal.
16. RepRao/cs - RepRapWIKI [online]. 2014 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/File:Heating_wire_fixed_to_platform.jpg
 17. BARTOŠ, Radko. Návrh temperovaného stolu pro FDM 3D tiskárnu s využitím simulace MKP. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 57 s. příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..
 18. RepRao/cs - RepRapWIKI [online]. 2014 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://reprap.org/mediawiki/images/3/3e/DSC_0038_AL_stul_s_telesy2.jpg.
 19. Fyzikální tabulky [online]. Česká republika: ZČU Plzeň Univerzitní 8, Plzeň, 1991 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP1/tabulky.pdf>.
 20. 3D PRINTER WEBSTORE: 12V SILICONE RUBBER HEATER BED 300MM X 300MM (12"X12") [online]. Little Rock, Arkansas 72209: 3D PRINTER WEBSTORE, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://store.quintessentialuniversalbuildingdevice.com/product.php?id_product=29
 21. PRŮŠA, Josef. Vyhřívání podložka MK2a. In: shop.prusa3D.com [online]. Česká republika [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://shop.prusa3d.com/cs/elektronika/48-vyhrevana-podlozka-mk2a.html>
 22. Sdílení tepla a proudění [online]. 2012 [cit. 2016-05-21]. ISBN 978-80-248- 2576-2. Dostupné z: http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf
 23. Procesy v technice budov 12: Sdílení tepla sáláním [online]. Česká republika: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta aplikované informatiky, 2013 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.utb.cz/file/42183>
 24. Šíření tepla. Nanotechnologie [online]. 2014 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzika_I/sireni_tepla_MMF.pdf
 25. JITKA, Hornová. Simulace indukčního ohřevu v prostředí ANSYS ACADEMIC RESEARCH EM. České Vysoké Učení Technické, Fakulta elektrotechnická Katedra elektrických pohonů a trakce, 2015. Diplomová práce.
 26. Značení slitin hliníku [online]. Česká republika: E-Konstrukter, 2013 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/znaceni-slitin-hliniku>
 27. ALLOY DATA SHEET [online]. Utrecht, The Netherlands: nedal ALUMINIUM, 2005 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.nedalextrusion.com/files/4013/0678/5548/Data_6060.pdf
 28. Tepelné vlastnosti polymerů [online]. Česká republika: Publi, 2005 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/13.html>
 29. BRANDŠTETTER A KOL., Pavel. Elektronika - Prvky elektronických obvodů [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2016-05-21]. ISBN 978-80-248-1481-0. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EL/Brandstetter_Elektronika_text.pdf

30. CONRAD: Metalizovaný SMD rezistor Susumu [online]. Sazečská 645/12 108 00 Praha 10 - Malešice, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/metalizovany-smd-rezistor-susumu-0-05-0603-0-1-w-100-.k44565029>.
31. GES-ELECTRONICS, a.s.: Metalizovaný SMD rezistor Susumu [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/elektronicke-soucastky/rezistory/smd-rezistory/SAF4.html>
32. CONRAD: Metalizovaný SMD rezistor Susumu [online]. Sazečská 645/12 108 00 Praha 10 - Malešice, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/vykonovy-rezistor.c0241366>
33. 3D DRÁTY: Termistor 100k NTC, beta 3950 [online]. Masarykova 457 289 22 Lysá nad Labem, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <https://3draty.cz/cs/hotend/45-termistor.html>
34. VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. Metoda konečných prvků, 1. přednáška – Úvod. [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
35. ČEPICA, V. Pevnostní kontrola stroměčkového závěsu turbínového kola leteckého motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Chromek.
36. AUTODESK®INVENTOR PROFESSIONAL10: Metoda konečných prvků [online]. Škrochova 42615 00 Brno: SVS FEM s.r.o, 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/1761629-Autodesk-inventor-professional-10-metoda-konecných-prvku.html>
37. KMENTA, M. Bezdotykové měření povrchových teplot v průběhu frézování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D..

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ABS	[-]	Akrylonitrilbutadienstyren
ANSYS	[-]	Analysis Systems
CAD	[-]	Computer aided design
CAM	[-]	Computer aided manufacturing
CO₂	[-]	Oxid uhličitý
ECAD	[-]	Electronic Computer aided design
EN	[-]	Evropská norma
FDM	[-]	Focus Depositinon Modeling
FEM	[-]	Finite Element Method
HIPS	[-]	High impact polystyrene
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
MKP	[-]	Metoda konečných prvků
PA	[-]	Polyamide
PC	[-]	Polykrabonát
PCB	[-]	Printed Circuit Board
PET	[-]	Polyethylentereftalát
PLA	[-]	Polymléčná kyselina
PP	[-]	PolyPropylene
PTFE	[-]	Polytetrafluoroethylene
PVA	[-]	Polyvinyl acetate/alcohol
PVC	[-]	Polyvinil chloride
RepRap	[-]	Replicating Rapid
RP	[-]	Rapid Prototyping
SL	[-]	SteroLithography
SLA	[-]	SteroLithography Aparatus
SLS	[-]	Selektive Laser Sintering
STL	[-]	Standard Template Library
UV	[-]	Ultraviolet
3D	[-]	Trojdimenzionální
3DP	[-]	Trojdimenzionální tisk

Symbol	Jednotka	Popis
C_0	$[Wm^2K^{-4}]$	Součinitel sálání černého tělesa
dI	[J]	Změna entalpie
dQ_λ	[J]	Dodané teplo
dQ_v	[J]	Teplo uvolněné
E	[J]	Vnitřní energie
I	[A]	Proud
M_{oe}	$[Wm^{-2}]$	Intenzita vyzařování
M_s	$[Wm^{-2}]$	Intenzita vyzařování šedého tělesa
P	[W]	Výkon
Q	[J]	Množství tepla
R	$[\Omega]$	Elektrický odpor
R_s	$[\Omega]$	Celkový elektrický odpor
R_1	$[\Omega]$	Elektrický odpor rezistoru
S	$[m^2]$	Plocha
T	[K]	Termodinamická teplota
U	[V]	Napětí
V	$[m^3]$	Objem
c	$[J.K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
$grad\ t$	$[K.m^{-1}]$	Gradinet teploty
m	[kg]	Hmotnost
n	[-]	Počet rezistorů
q	$[W.m^{-2}]$	Hustota tepelného toku
$q_{konvekce}$	$[W.m^{-2}]$	Měrný tepelný tok konvekce
t	[s]	Čas
$t_{povrchu}$	$[^{\circ}C]$	Teplota povrchu
$t_{tekutiny}$	$[^{\circ}C]$	Teplota tekutiny
x, y, z		Souřadnice
σ	$[Wm^{-2}K^{-4}]$	Stefanova-Boltzmannova konstanta
$\emptyset$	[W]	Tepelný tok

α	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Sočinitel přestupu tepla
α_{konvekce}	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	Součinitel přestupu tepla konvekci
ε	$[-]$	Emisivita
λ	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
ρ	$[\text{kg.m}^{-3}]$	Hustota materiálu
τ	$[\text{s}]$	Čas přenosu tepla
ϑ	$[\text{K}]$	Teplota kondukce

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 MK2a podložka [21].
- Příloha 2 Hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností pro plechy EN AW 6060 [27].
- Příloha 3 Technické parametry termografické kamery FLIR ThermoCAM SC2000 [37].
- Příloha 4 Výrobní výkres základní desky.
- Příloha 5 Výrobní výkres teflonové úchytky.
- Příloha 6 Výrobní výkres plechu.

PŘÍLOHA 1



PŘÍLOHA 2



ALLOY DATA SHEET EN AW-6060 [AlMgSi]

Type:
General
extrusion alloy

The alloy EN AW-6060 is a widely used extrusion alloy, suitable for applications where no special strength properties are required. Parts can be produced with a very good surface quality, suitable for many coating operations. Typical application fields are furniture, finishing materials, windows and doors, carbody finishing, façade construction, lighting columns and flagpoles, architecture, and food industry.

Chemical composition according to EN573-3 (weight%, remainder Al)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	remarks	others	
									each	total
0.30 – 0.6	0.10 - 0.30	max. 0.10	max. 0.10	0.35 – 0.6	max 0.05	max 0.15	max 0.10		max 0.05	max 0.15

Mechanical properties according to EN755-2

Temper*	Wallthickness e***	Yield stress Rp0.2 [MPa]	Tensile strength Rm [MPa]	Elongation		Hardness** HB
				A [%]	A _{50mm} [%]	
T4	e ≤ 25	60	120	16	14	45
T5	e ≤ 5	120	160	8	6	55
	5 < e ≤ 25	100	140	8	6	50
T6	e ≤ 3	150	190	8	6	65
	3 < e ≤ 25	140	170	8	6	60
T66	e ≤ 3	160	215	8	6	70
	3 < e ≤ 25	150	195	8	6	65

*Temper designation according to EN515: T4-Naturally aged to a stable condition, T5-cooled from an elevated temperature forming operation and artificially aged, T6-Solution heat treated, quenched and artificially aged, T66-cooled from an elevated temperature forming operation and artificially aged to a condition with higher mechanical properties through special control of manufacturing processes. T6 and T66 properties can be achieved by press quenching)

** Hardness values are for indication only

***For different wall thicknesses within one profile, the lowest specified properties shall be considered as valid for the whole profile cross section

Physical properties (approximate values, 20 °C)

Density [kg/m ³]	Melting range [°C]	Electrical conductivity [MS/m]	Thermal conductivity [W/m.K]	Co-efficient of thermal expansion 10 ⁻⁶ /K	Modulus of elasticity [GPa]
2700	585-650	28-34	200-220	23.4	~70

Weldability¹

Gas: 3 TIG: 2 MIG: 2

Typical filler materials (EN ISO18273): AlMg5Cr(A) or AlSi5, and AlMg3 when the product has to be anodised. Due to the heat input during welding the mechanical properties will be reduced by approximately 50% (ref. EN1999-1).

Machining characteristics¹:

T4 temper: 3 T5 and T6 temper: 2

Coating properties¹

Hard/protective anodising: 1 Decorative/bright/colour anodising: 1

Corrosion resistance¹

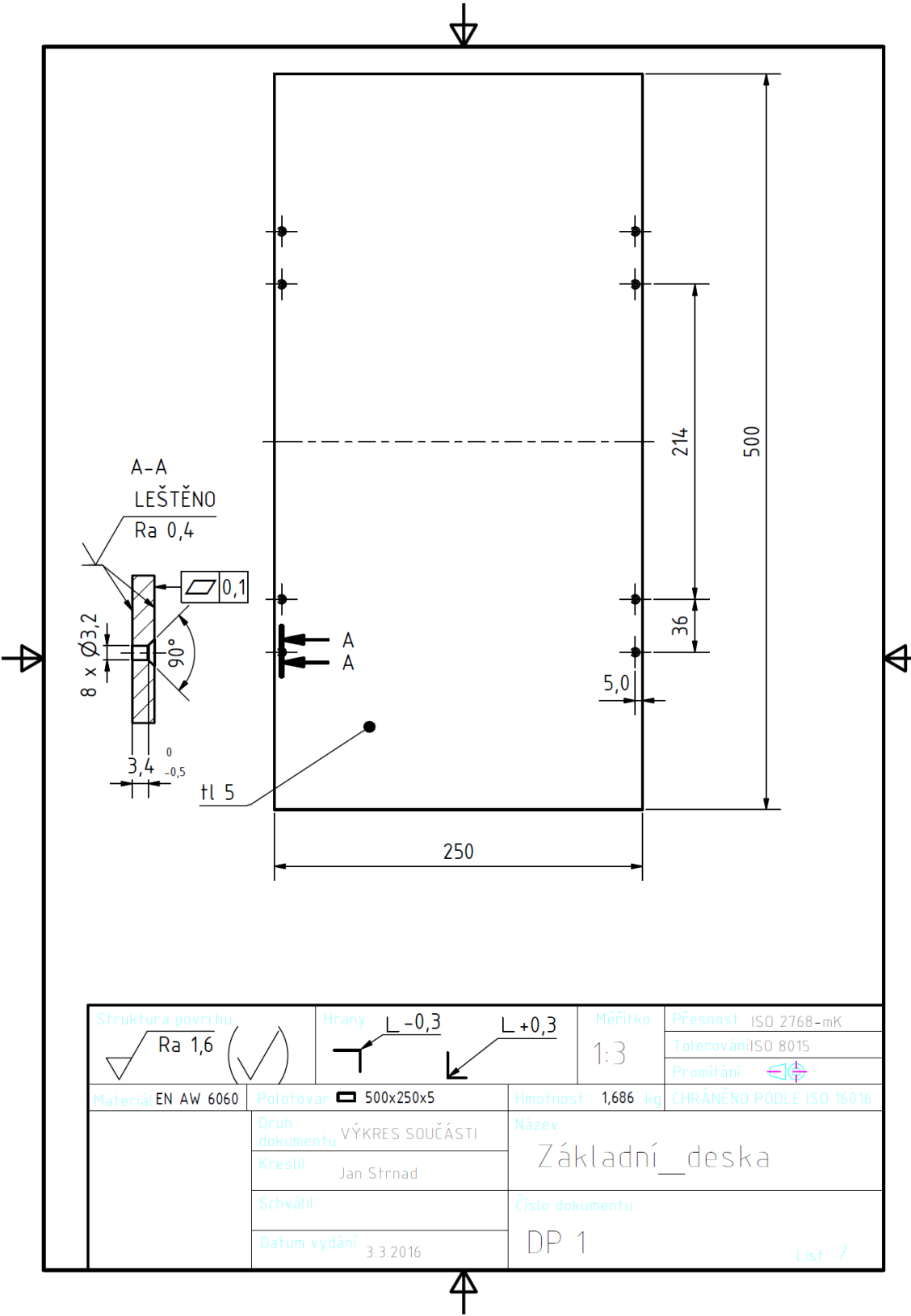
General: 1 Marine: 2

¹ Relative qualification ranging from 1-very good to 6 – unsuitable

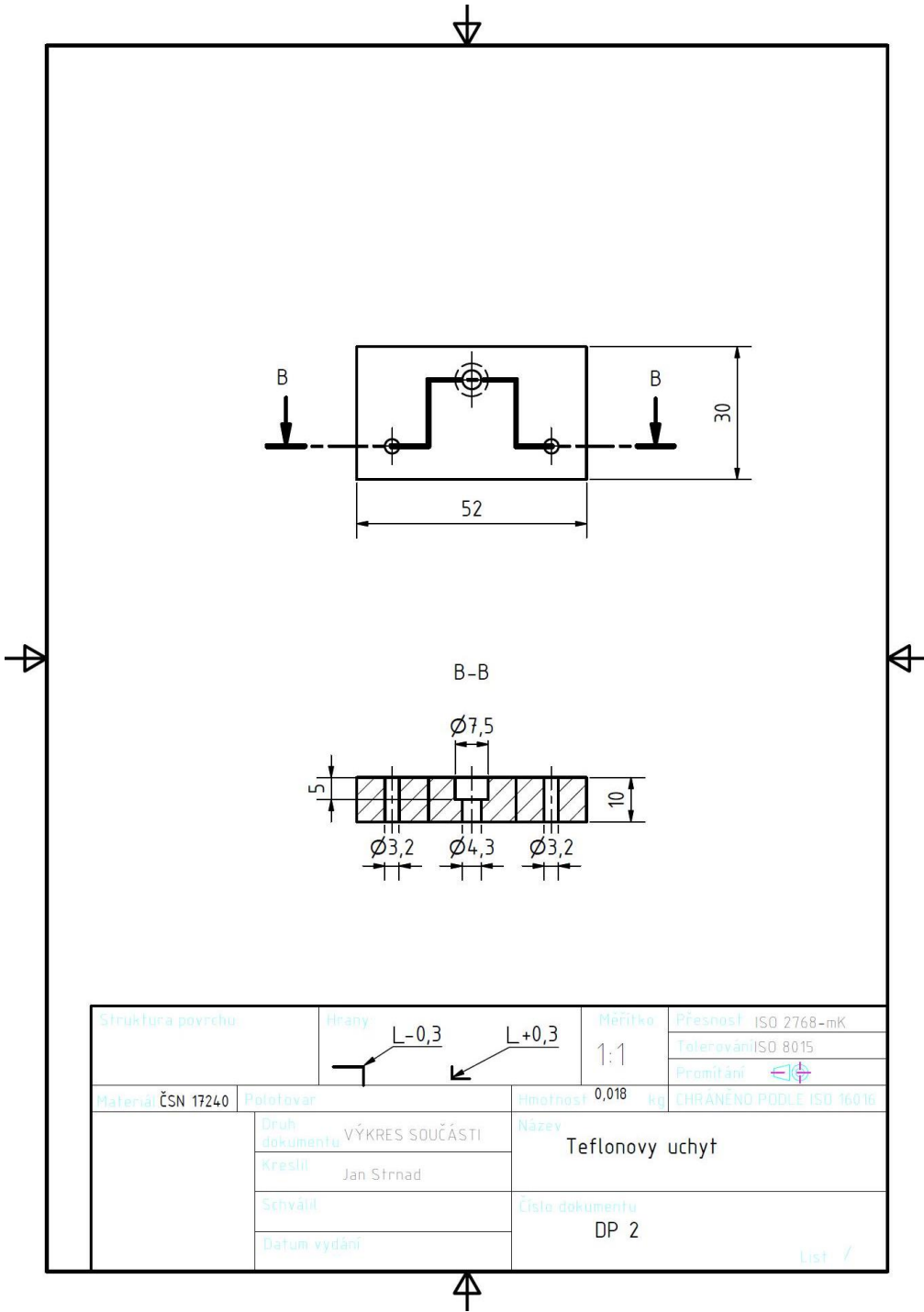
PŘÍLOHA 3

Rozsah měřených teplot objektu	-40 až +120 °C, rozsah 1 0 až +500 °C, rozsah 2 až do +1500 °C, s příslušenstvím až do +2000 °C, s příslušenstvím
Přesnost měření	± 10 °C
Teplotní citlivost	< 0,08 °C při teplotě objektu +30 °C
Typ detektoru	FPA, nechlazený mikrobolometr s rozlišením 320×240 pixelů
Spektrální rozsah	7,5 - 13 μm, vestavěný filtr pro "odříznutí" na 7,5 μm
Video výstup	Standard VHS nebo S-VHS
Hledáček	Barevný LCD (TFT)
Disková jednotka PC karty	Jedna zásuvka pro PC-kartu Typu II nebo III. Může být použita karta FLASH nebo harddisk (kompatibilní s ATA)
Ukládání obrazu	Plně dynamické, 14-ti bitové
Bateriový systém	Jedna vyměnitelná baterie NiMH
Doba provozu	2 hodiny při běžném použití (jedna baterie)
Okolní pracovní teplota	-15 °C až +50 °C
Uchycení na stativ	1/4" – 20
Hmotnost	1,9 kg bez akumulátoru; 2,3 kg včetně akumulátoru
Rozměry	209×122×130 mm
Video kamera	640×480 pixelů

PŘÍLOHA 4



PŘÍLOHA 5



PŘÍLOHA 6

