



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

KONSTRUKČNÍ OPTIMALIZACE DÍLU PRO TEPELNÝ SPÍNAČ

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE HEAT SWITCH PART

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Albert Zemek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Löffelmann

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Albert Zemek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	Ing. František Löffelmann
Akademický rok:	2019/20

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:

Konstrukční optimalizace dílu pro tepelný spínač

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Klíčovou funkcí kosmického tepelného spínače je sepnutí kontaktů a propojení dráhy přenosu tepla. Pohyb je vyvozen aktuátorem poháněným skupenskou přeměnou parafínu za současné objemové expanze. Současné řešení spínače však nesplňuje požadavek na dostatečný tepelný tok přes teplo vodivou strukturu. Velmi výhodné může být použití optimalizačních metod pro dosažení specifických vlastností vhodným rozložením materiálu s případnou výrobou dílu kovovým 3D tiskem.

Cíle diplomové práce:

- 1) Seznámení s problematikou, vymezení konstrukčních požadavků na teplo vodivou strukturu.
- 2) Sestavení postupu pro konstrukční návrh se zahrnutím vhodné optimalizace (topologická nebo rozměrová).
- 3) Zpracování koncepčních návrhů a detailního návrhu nejvhodnější varianty včetně varianty pro 3D tisk.
- 4) Kritické zhodnocení dílčích a celkových výsledků z hlediska přínosů a potenciálních nedostatků.

Seznam doporučené literatury:

LÖFFELMANN, František a Jan ŠPLÍCHAL. Design study of the heat switch base plate with single and multi-material topology optimization. In: 13th Research and Education in Aircraft Design: Conference proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019, s. 85-97. DOI: 10.13164/conf.read.2018.9. ISBN 978-80-214-5696-9.

MAŠEK, Jakub, Daniel KOUTNÝ a Robert POPELA. Thermal conductivity of Cu_{7.2}Ni_{1.8}Si₁Cr copper alloy produced via SLM and ability of thin-wall structure fabrication. In: 13th Research and Education in Aircraft Design: Conference proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019, s. 119-129. DOI: 10.13164/conf.read.2018.12. ISBN 978-80-214-5696-9.

MSC Nastran 2018.2: Design Sensitivity and Optimization, User's Guide [online]. Newport Beach, USA: MSC Software Corporation, 2018.

YANG, Li, Keng HSU, Brian BAUGHMAN, Donald GODFREY, Francisco MEDINA, Mamballykalathil MENON a Soeren WIENER. Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production. Cham: Springer International Publishing, 2017, vii, 168 stran. ISBN 978-3-319-55127-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem teplovodivé struktury miniaturního tepelného spínače se zaměřením na výrobu pomocí aditivní technologie SLM. Cílem je posoudit možnosti použití kovového 3D tisku na součást určenou primárně k přenosu tepla. V práci je představeno několik koncepcí uspořádání struktur, které jsou dále analyzovány a vyhodnoceny. Výsledky ukazují potenciál aditivních technologií v této oblasti a navržené struktury splňují dle použitých výpočtů požadavek na přenos tepla.

KLÍČOVÁ SLOVA

miniaturní tepelný spínač, selective laser melting, aditivní výroba, tepelná vodivost

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of a structure for heat transfer path of miniaturized heat switch. The focus is on production using SLM additive technology. The aim is to assess the possibilities of using metal 3D printing on a part intended primarily for heat transfer. This work presents several concepts of structure arrangement, which are further analysed and evaluated. The results show the potential of additive technologies in this area and the proposed structures meet the heat transfer requirement according to the calculations used.

KEYWORDS

miniaturised heat switch, selective laser melting, additive manufacturing, thermal conductivity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEMEK, Albert. *Konstrukční optimalizace dílu pro tepelný spínač*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125357>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce František Löffelmann.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Löffelmannovi, stejně jako vedoucímu projektu tepelného spínače Ing. Jakubu Maškovi za cenné rady, připomínky a ochotu v průběhu zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat celé svojí rodině a především své matce za podporu a trpělivost během celé doby studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Františka Löffelmanna. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Miniaturní tepelný spínač	14
2.1.1	Požadavky na tepelný spínač	14
2.1.2	Původní design spínače	14
2.2	Selective Laser Melting	16
2.2.1	Princip metody SLM	16
2.2.2	Přednosti a použití SLM	17
2.2.3	Omezení a limitace SLM	19
2.2.4	Materiály vhodné pro 3D tisk a přenos tepla	23
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	25
4	MATERIÁL A METODY	26
4.1	Požadavky na teplovodivou strukturu	26
4.2	Návrhový prostor	26
4.3	Analytický model přenosu tepla	27
4.3.1	Tepelná vodivost plného materiálu	27
4.3.2	Kontaktní tepelná vodivost	28
4.4	Hlavní návrhové parametry	29
4.5	Vstupní parametry a výchozí předpoklady	29
4.5.1	Rozměrové předpoklady a kontaktní tlak	29
4.5.2	Drsnost kontaktních ploch	30
4.5.3	Materiál	30
4.5.4	Součinitel přestupu tepla	30
4.5.5	Přehled vstupních parametrů	31
4.6	Popis možných přístupů a řešení	31
5	KONCEPČNÍ NÁVRHY	32
5.1	Odhad potřebného průřezu materiálu a kontaktní plochy	32
5.2	Sloupkový koncept	33
5.2.1	Počáteční návrh (SK01)	33

5.2.2	Termální výpočet	34
5.2.3	Vliv počtu geometrických prvků na tepelnou vodivost a hmotnost	37
5.2.4	Pevnostní výpočet	40
5.2.5	Posouzení vyrobiteľnosti SK01	43
5.3	Upravený model potřebného průřezu materiálu a kontaktní plochy	45
5.4	Koncept mezikruží	45
5.4.1	Počáteční návrh (KM01)	46
5.4.2	Termální výpočet	47
5.4.3	Posouzení vyrobiteľnosti KM01	49
5.4.4	Upravený návrh (KM02)	50
5.4.5	Termální výpočet	50
5.4.6	Posouzení vyrobiteľnosti KM02	51
5.5	Rovnoběžné stěny	52
5.5.1	Počáteční návrh (RSV01)	52
5.5.2	Termální výpočet	53
5.5.3	Posouzení vyrobiteľnosti RSV01	54
5.5.4	Upravený návrh (RSV02)	55
5.5.5	Posouzení vyrobiteľnosti	57
5.5.6	Vliv změny tloušťky po výšce stěny	57
5.6	Celkové zhodnocení návrhů	58
6	ZÁVĚR	61
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	67
9	SEZNAM TABULEK	69

1 ÚVOD

V dnešní době je velká pozornost zaměřena na detailnější poznávání vesmíru. Ke zlepšování poznání přispívají také moderní technologie, které nacházejí uplatnění v kosmickém výzkumu i v dalších oblastech. Jednou z takových technologií je aditivní výroba neboli 3D tisk. V posledních letech doznala značného pokroku kovová aditivní výroba umožňující tisk velmi komplexních tvarů z práškového materiálu. Vlastnosti vytištěných součástí dosahují srovnatelných vlastností jako součásti vyráběné standardně, v některých případech je dokonce předčí. Jednou z nejperspektivnějších metod kovového 3D tisku je Selective laser melting. Výzkum této metody a její detailnější popis je velmi intenzivní a zabývá se jím velké množství výzkumných týmů.

Miniaturní tepelný spínač je jedním z projektů, u kterého se zkoumá přínos použití aditivních technologií. Projekt tepelného spínače je realizován na FSI VUT v Brně pro Evropskou kosmickou agenturu. Zamýšlené použití tohoto spínače je v kosmických lodích, sondách a v dalších kosmických zařízeních. Jednou ze součástí zvažovaných pro aditivní výrobu je tzv. CTB struktura, která je flexibilní a zajišťuje hlavní přenos tepla po sepnutí spínače. V předchozí variantě byla tato struktura tvořena měděnými drátky, avšak nebylo dosaženo požadovaných přenosů tepla.

Tato práce má za cíl napomoci poznání možností výroby tohoto komponentu pomocí kovové aditivní technologie. Pro detailní porozumění kovovému 3D tisku jsou v první části popsány současné možnosti a přednosti, stejně jako limitace této metody. Zhodnocena je dosažitelná kvalita, která je důležitá především pro přenos tepla kontakty. V další části jsou navrženy koncepční řešení a popsány jejich přednosti a nedostatky, včetně zanalyzování dosažitelných přenosů tepla a navržení úprav pro dosažení vyšších hodnot vodivosti, případně snížení hmotnosti. V závěru jsou návrhy porovnány a je zhodnocena jejich vhodnost pro výrobu aditivními technologiemi.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Miniaturní tepelný spínač

Miniaturní tepelný spínač (MHS – z anglického Miniaturized Heat Switch) je zařízení určené pro umělá kosmická tělesa, např. kosmické sondy nebo satelity. Jeho cílem je regulovat teplotu výzkumných zařízení a elektronického vybavení, které je umístěno na palubě. Při zvýšení teploty nad určitý limit dojde automaticky k propojení tepelné dráhy spínače a přebytečné teplo je odvedeno směrem k spínači. Po ochlazení opět dojde k rozpojení kontaktu. Pohyb spínače je vyvozen změnou objemu parafinu při změně teploty. Z tohoto důvodu není třeba externí zdroj energie a spínač je schopen pracovat zcela nezávisle.[1]

2.1.1 Požadavky na tepelný spínač

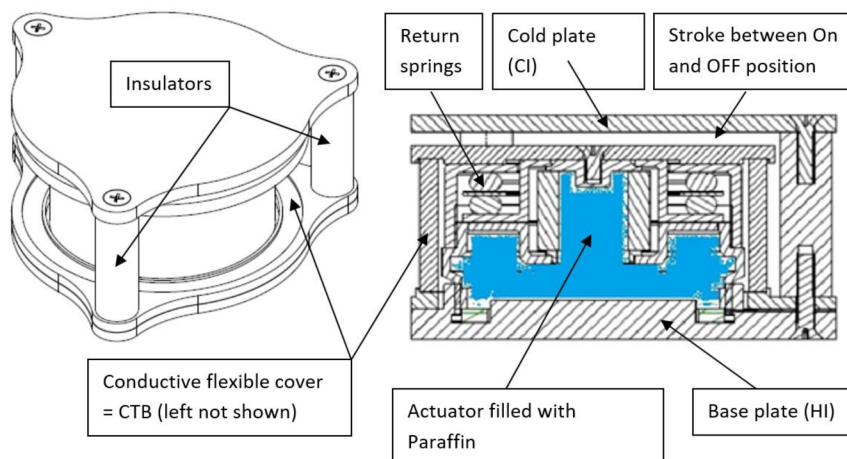
Základní požadavky na tepelný spínač definuje Evropská kosmická agentura (ESA). Měl by se skládat ze dvou montážních rozhraní: teplého (HI – hot interface) a chladného (CI – cold interface) a přepínacího zařízení. Dalším požadavkem je, aby byl spínač samostatná součást, připravena k montáži.[2]

Dalšími požadavky jsou [2]:

Tepelná vodivost v sepnutém stavu:	min. 1 W/K
Hmotnost:	max. 100 g
Provozní teplota:	-100 °C ÷ +60 °C
Tepelný tok aplikovaný na HI:	0 W ÷ 10 W
Minimální životnost:	100 000 cyklů
Přibližná velikost montážní plochy:	16 cm ²

2.1.2 Původní design spínače

Prvotní vývoj mikrospínače zajišťovala italská společnost Arescosmo, která vytvořila první prototypy. Spínač se skládá z teplého rozhraní (HI) a chladného rozhraní (CI), aktuátoru s parafínovou kapslí, nevodivých izolátorů a vodivého měděného pletence (CTB – Copper Textile Braid) viz Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Schéma tepelného spínače [3]

HI je připevněno k vybavení, u kterého je třeba regulovat teplotu. Na opačné straně je CI v kontaktu s chladičem, který odvádí teplo do okolí záření. Mezi nimi je aktuátor složený z parafínové kapsle, vratných pružin, flexibilního členu (vlnovec) a dalších elementů. Vlnovec svojí deformací umožňuje sepnutí kontaktu. Na vnější straně po obvodu je umístěna teplovodivá struktura (CTB, viz Obr. 2-2) ve formě měděného plochého spleteného vodiče – pletence a dvou měděných desek. Ten je flexibilní a zajišťuje přenos tepla po sepnutí spínače mezi HI a CI. Spínač drží pohromadě izolační sloupky z nevodivého materiálu Torlon. Ty jsou pevně spojeny s HI a CI, avšak nedochází mezi nimi téměř k žádnému přestupu tepla.

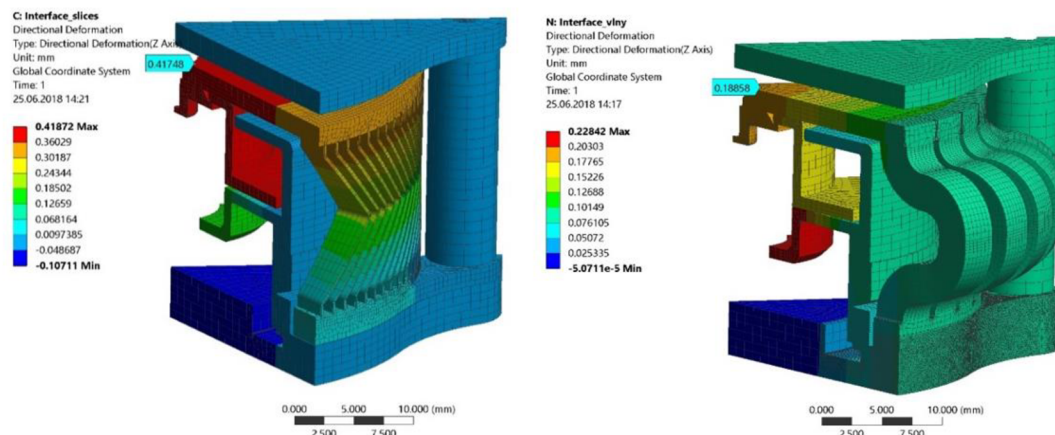


Obr. 2-2 Teplovodivá struktura CTB [3]

Při měření prototypů bylo zjištěno, že skutečná tepelná vodivost spínače je téměř pětkrát nižší, než bylo požadováno. Zároveň byla překročena požadovaná celková hmotnost spínače o 70 %. Nízká tepelná vodivost je připisována špatně provedeným svarům mezi CTB a měděnými deskami. Dalším zjištěným problémem byla velká deformace kontaktních ploch silou od parafínu, způsobující nedostatečnou kontaktní plochu mezi jednotlivými členy spínače [4]. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k celkovému redesignu tepelného spínače.

Na FSI VUT byla provedena předběžná analýza flexibilních struktur s předpokládanou výrobou aditivními technologiemi. Struktury byly navrženy tak, aby dosáhly prodloužení ve

směru pohybu aktuátoru o vzdálenost 1,7 mm. Zároveň bylo požadováno, aby napětí zůstalo pod mezí kluzu, a nedocházelo k plastickým deformacím. Příklady struktur jsou zobrazeny na Obr. 2-3. Z výsledků plyne, že struktury založené na elastické deformaci jsou buď příliš tuhé a nedosáhnou dostatečné deformace, a nebo jsou dostatečně poddajné, ale vykazují velmi malou tepelnou vodivost (z důvodu velkého zúžení efektivního průřezu materiálu). [3]



Obr. 2-3 Příklady vybraných flexibilních struktur [3]

2.2 Selective Laser Melting

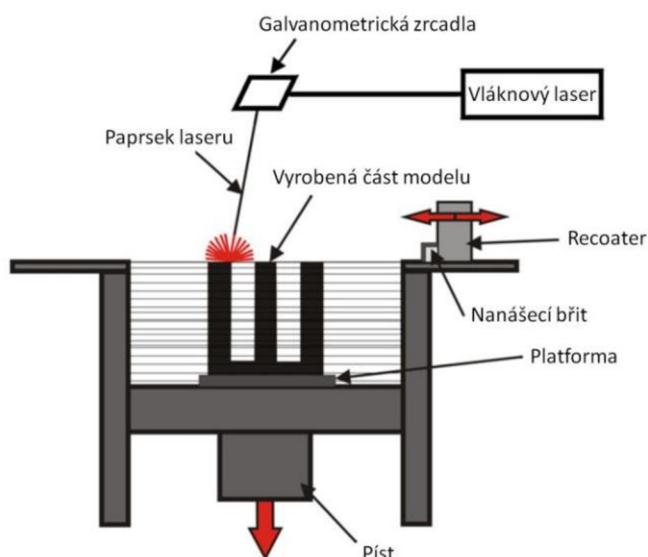
2.2.1 Princip metody SLM

Selective Laser Melting (SLM) je jednou z nejvíce perspektivních aditivních technologií výroby v oblasti kovových materiálů. Nachází uplatnění v leteckém, vesmírném a automobilovém průmyslu, biomedicině a dalších oblastech. Spadá do kategorie tzv. powder bed fusion, což je proces, při kterém je nanášena tenká vrstva kovového prášku, do které je pomocí laseru vykreslena daná vrstva součásti. Tento postup se opakuje až do vytištění celé součásti, která je po vyrobení obklopena neroztaveným práškem [5]. Postup ilustruje Obr. 2-4.

Celý proces výroby se skládá ze tří fází:

Preprocessing

Fáze předcházející samotné výrobě. Jako vstup slouží 3D model součásti (obvykle ve formátu STL), která má být vytištěna. V dalším kroku je součást v příslušném softwaru umístěna na základní desku ve zvolené orientaci, jsou vytvořeny podpůrné struktury pro upevnění k základní desce a pod převislé části. Zároveň je součást rozložena na vrstvy a jsou definovány výrobní parametry tisku. Dále je součást převedena do tiskárny a připravena k tisku



Obr. 2-4 Princip metody SLM [6]; [7]

Proces tisku

Průběh tisku je tvořen několika základními operacemi opakovanými do vytištění celkového tvaru součásti. Nanášecí zařízení (recoater) nanese tenkou vrstvu prášku rovnoměrně na celou plochu stavební komory. V této vrstvě dojde k roztavení prášku v místech tisknuté součásti pomocí laserového paprsku. Po naskenování celkového průřezu v dané vrstvě dojde k poklesu stavební platformy o velikost jedné vrstvy prášku a celý proces se opakuje. Stavba probíhá v inertní atmosféře pro zabránění chemických reakcí roztaveného kovu s kyslíkem.

Postprocessing

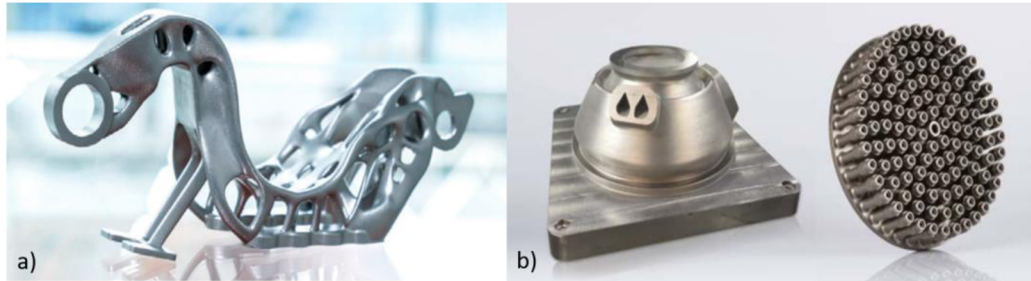
Po dokončení tisku je z tiskárny odstraněn neroztavený prášek, který je po vyčištění určen k opětovnému použití. Součást, která je stále připevněna k základní desce se všemi podporami může být podrobena tepelnému zpracování, např. žíhání ke snížení vnitřního napětí. Dále je součást odříznuta od základní desky a jsou odstraněny podpurné struktury. Podle potřeby následují povrchové úpravy, obrábění funkčních ploch atd.

2.2.2 Přednosti a použití SLM

Selective Laser Melting je jednou z nejslibnějších variant kovové aditivní výroby. Spolu s dalšími metodami 3D tisku nachází společné uplatnění v oblasti rapid prototypingu, která umožňuje rychlou výrobu prototypů bez nákladné a časově náročné přípravy jednoúčelových nástrojů a přípravků, jako u konvenčních výrobních postupů.

K velkým výhodám SLM patří také schopnost vyrobit velmi komplexní geometrické tvary, složité součásti např. s vnitřními chladicími kanálky apod. S větší svobodou designu lze dále dosáhnout snížení celkového počtu dílů v sestavě, a s pomocí optimalizačních nástrojů docílit značné redukce hmotnosti při zachování stejných pevnostních charakteristik [8].

Příkladem může být modifikace závěsu Krügerovy klapky (Obr. 2-5a) firmou ASCO Industries. S využitím topologické optimalizace byla dosažena úspora hmotnosti 31 % a byly integrovány tři součásti do jedné [13]. Společnost ArianeGroup použila SLM pro výrobu vstřikovacích trysek raketového motoru. Výsledkem byla redukce počtu součástí z 248 na jednu, nižší výrobní náklady o 50 % a výrazná úspora výrobního času.[14]



Obr. 2-5 Příklady využití SLM: a) Závěs Krügerovy klapky [13], b) Vstřikovací hlava raketového motoru [14]

Další zajímavé možnosti představují tzv. lattice structures, tedy struktury tvořené drobnými nosníky, nebo buněčnými strukturami různého uspořádání a tvarů. Změnou jejich velikosti lze snadno dimenzovat součást na různé velikosti zatížení. Struktury nachází využití v lékařství, letectví, nebo jako součásti pro absorpci energie [9]. Technologie SLM nabízí snadné přizpůsobení designu konkrétním požadavkům s takřka nulovými náklady. Je proto vhodná pro malosériovou výrobu úzce specializovaných produktů. V takových případech dochází ke snížení výrobních nákladů i času oproti konvenčním technologiím, a může vést ke zvýšení ekonomické výnosnosti [10]. Dále se ukazuje, že aditivní výroba, včetně té kovové, může být udržitelnější a ekologičtější oproti výrobním postupům, založených na odebrání materiálu, a to především z důvodu lepšího využití materiálu.[12]

Předností je také široká škála použitelných materiálů. Nejpoužívanější jsou kovové materiály, především ocelové slitiny, titan a jeho slitiny, niklové, hliníkové slitiny a další. Lze však použít i keramické materiály a v posledních letech probíhá intenzivní výzkum v oblasti kovových kompozitních materiálů.[8]

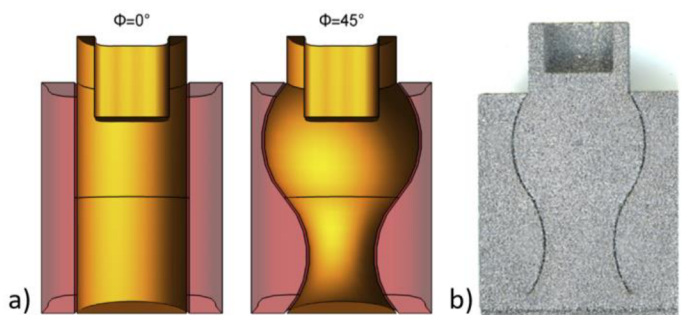
V souvislosti s objevováním vesmíru skýtá SLM potenciál výroby ve vesmíru (space manufacturing). Cílem je snížit hmotnost vypouštěných kosmických lodí (např. nižší množství náhradních dílů) a schopnost vyrábět produkty ze surových materiálů běžně dostupných na jiných planetách.[11]

Výroba nerozebíratelných sestav

Důležitou kapitolou pro tuto práci jsou možnosti výroby nerozebíratelných sestav pomocí SLM. Výhodou je eliminace spojovacích prvků a celistvost jednotlivých součástí, která je příznivá i pro přenos tepla. Mezi další výhody patří zkrácení výrobního času a zefektivnění funkčnosti výsledné sestavy.[15]

Většina literatury se zaměřuje na výrobu součástí typu čep-náboj. Xubin [16] ve své práci popisuje experiment výroby kardanového závěsu z nerezové oceli 316L. Po úspěšné výrobě

sestavy s vůlí 0,5 mm (jednostranná vůle, představující rozdíl poloměrů) byla vůle postupně snižována. Při hodnotě vůle 0,1 mm byl pohyb možný, avšak nebyl již hladký. Obdobnou studii vypracoval Boschetto [17]. Vytisknuté vzorky byly z hliníkové slitiny AlSi10Mg a lišily se mírou zakřivení spoje (viz Obr. 2-1a) a vůle mezi součástmi, která byla zvolena na 0,05; 0,1 a 0,15 mm. Měřením byl zjišťován krouticí moment potřebný k otáčení pinu. Z výsledků mimo jiné plyne, že pro nezakřivené svíslé plochy jsou výrobitelné součásti s vůlí 0,05 mm, přičemž dochází k plynulé rotaci bez výrazně zvýšeného třecího odporu.



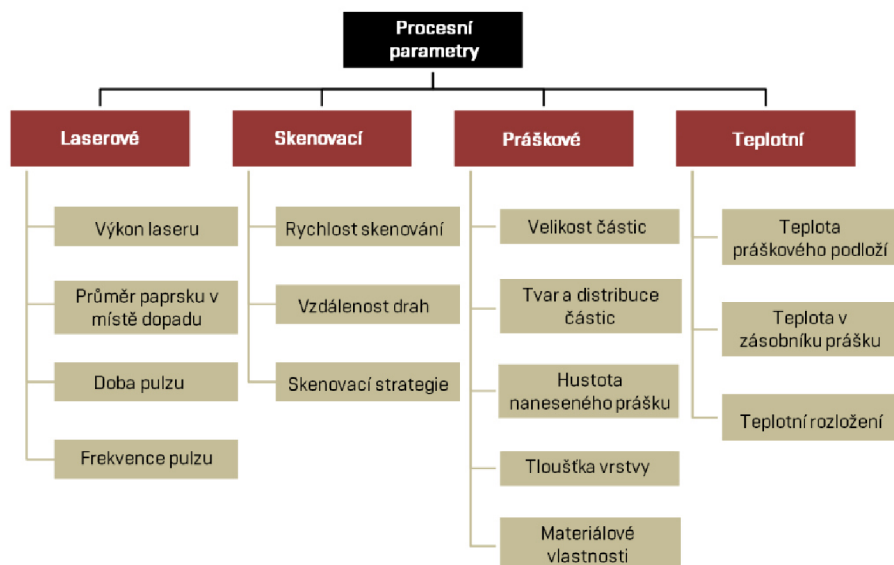
Obr. 2-6 a) Různé zakřivení spoje; b) Řez jedním z vytisknutých vzorků [17]

2.2.3 Omezení a limitace SLM

Přestože SLM nabízí řadu výhod, stále zde existují limitující faktory, které je třeba brát v potaz při návrhu geometrie pro 3D tisk. Mezi hlavní překážky patří v současnosti kvalita povrchu, deformace dílu při stavbě, vznik pórovitosti a další.

Výrobní parametry

Výslednou kvalitu výrobku vytisknutého technologií SLM lze výrazně ovlivnit volbou vhodných parametrů tisku. Yadroitsev [23] definoval více než 130 parametrů, které mají na výsledek tisku vliv. Výběr nejdůležitějších parametrů je zobrazen na Obr. 2-7.



Obr. 2-7 Vybrané procesní parametry SLM [6] [24]

Výkon laseru, rychlost skenování, tloušťka vrstvy prášku a vzdálenost jednotlivých drah laseru určují tzv. objemovou hustotu energie ω . Je dána vztahem (2.1) a určuje množství energie, která dopadá na místo tavení.[26]

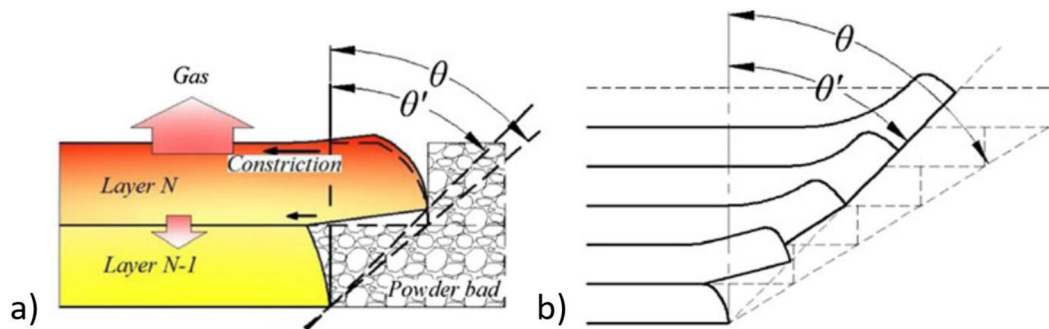
$$\omega = \frac{P}{v \cdot s \cdot h} \quad (2.1)$$

Kde:

- ω [J/mm³] objemová hustota energie
- P [W] výkon laseru
- v [mm/s] rychlost skenování
- s [mm] vzdálenost drah (hatch distance)
- h [mm] tloušťka vrstvy

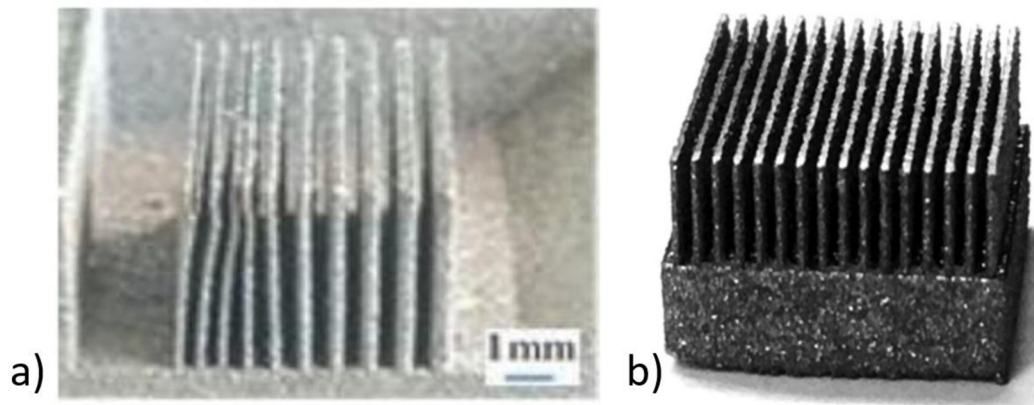
Deformace

Příčin vzniku deformace v průběhu tisku je několik. První je tzv. warping efekt, který vzniká při tisku převyšujících stěn na práškovém podkladu. Dochází ke smršťování poslední vytištěné vrstvy vlivem termálního napětí, které překročí pevnost materiálu a dojde k plastické deformaci. U delších převyšujících tvarů může docházet k akumulaci tohoto efektu. Tyto procesy jsou znázorněny na Obr. 2-8.[18]



Obr. 2-8 a) Princip vzniku warping efektu; b) Znáornění akumulované deformace [18]

Další nepřesnosti mohou vzniknout při tvorbě velmi tenkých a dlouhých struktur (např. stěny, pruty apod.). Wang [19] ve své práci zkoumá schopnost tisku tenkých stěn a dalších základních geometrických tvarů z nerezové oceli 316L. Stěny tloušťky 0,25 mm a tenčí byly výrazně deformovány (viz Obr. 2-9a). F. Calignano [20] zkoumala výrobu tenkých stěn na hliníkové slitině AlSi10Mg. Z výsledků vyplývá, že pro dané parametry a materiál je dosažitelná tloušťka stěny 0,14 mm. U tloušťky 0,2 mm dosahuje vzorek téměř nulové odchylky.

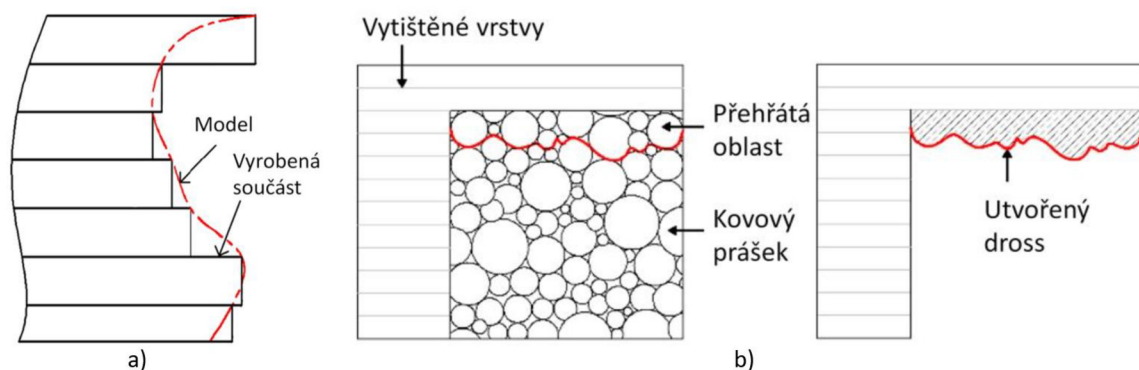


Obr. 2-9 Tenké stěny vyrobené technologií SLM: a) [19] b) [20]

Drsnost povrchu

Kvalita povrchu při použití technologie SLM je jedním z klíčových problémů, kterému tato technologie čelí, a kterému se věnuje velké množství výzkumů. Drsnost povrchu výrazně ovlivňuje vznik trhlin v materiálu a má podstatný vliv na spolehlivost a životnost vyráběných součástí. [21]

U většiny aditivních technologií vzniká při tisku zakřivených nebo skloněných tvarů tzv. schodovitý efekt (viz Obr. 2-10a). Ten je způsoben přidáváním materiálu konstantní tloušťkou vrstvy, na jejíž úrovni nelze docílit změny tvaru na vnějších okrajích.[19]



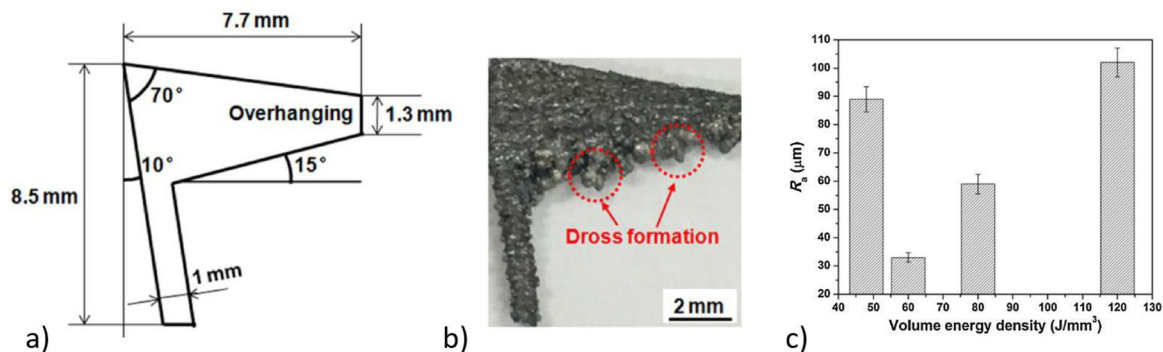
Obr. 2-10 a) Znárodnění schodovitého efektu [6] [19], b) Princip tvorby drossu [6] [29]

Dalším efektem ovlivňující drsnost povrchu je tvorba tzv. drossu (natavení prášku na součást, Obr. 2-10b). Ten se nejvíce projevuje na převislých strukturách, kde není zajištěn dostatečný odvod tepla a dochází k přílišnému natavení kovového prášku laserem.[22]

Běžně dosažitelná drsnost povrchu se uvádí v rozmezí 10-30 μm [19]. Společnost EOS [25] uvádí dosažitelnou drsnost povrchu po vytištění 6-10 μm pro hliníkovou slitinu AlSi10Mg. Tato drsnost se týká horizontální vrchní stěny a stěn tištěných ve vertikálním směru.

Z informací uvedených výše je patrné, že hlavní překážkou je obvykle nedostatečná kvalita převislých tvarů, pod které nelze umístit podpůrné struktury, např. z důvodu nemožnosti

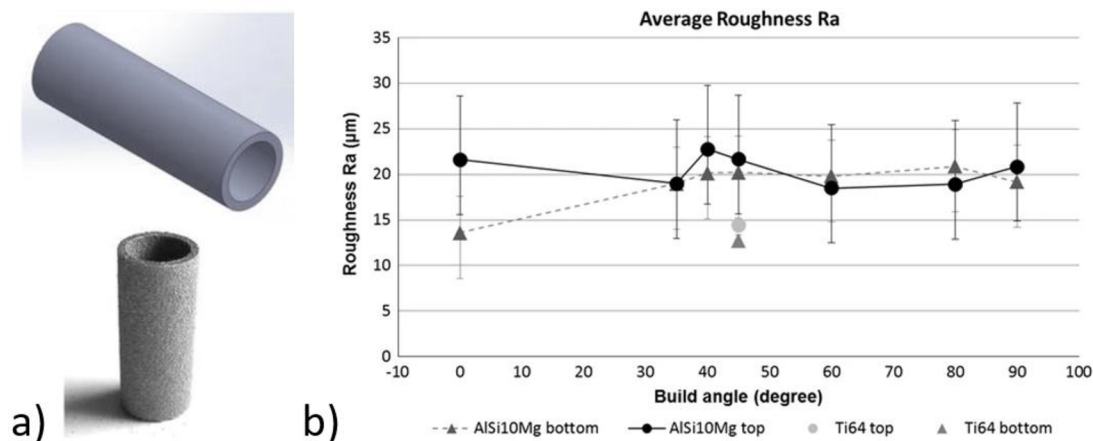
jejich následného odstranění. V takovém případě je do určité míry možné eliminovat nežádoucí efekty snížením hustoty energie, která vstupuje do místa tavení. Toho lze docílit např. zvýšením skenovací rychlosti v kritických místech. Podobnými úpravami výrobních parametrů lze docílit výrazného zlepšení celkové kvality. Zároveň je třeba brát v potaz ovlivnění dalších vlastností těmito úpravami. U zvýšení rychlosti skenování může nastat např. zvýšená pórovitost.[18]



Obr. 2-11 a) Návrh převislého tvaru, b) Tvorba drossu na jednom ze vzorků, c) Vliv hustoty energie na drsnost spodní strany převislé struktury [26]

Chen Hongyu a kol. [26] ve své práci zkoumali vliv hustoty energie na drsnost povrchu převislé stěny vyráběné z materiálu AlSi10Mg. V experimentální části vytvořili vzorky s převislou stěnou se sklonem 15° vůči základové desce (viz Obr. 2-11a). Z výsledků vyplývá, že nejnižší drsnosti převislé plochy bylo dosaženo při velikosti objemové hustoty energie $\omega = 60 \text{ J/mm}^3$. Drsnost Ra byla snížena na cca 33 μm . Při takto nízkém úhlu převisu se jedná o poměrně nízkou hodnotu.

J. Pakkanen [27] se ve své práci zabýval tiskem trubkových součástí různých tvarů s měnící se orientací při tisku (viz Obr. 2-12a). Použitý materiál byla opět hliníková slitina AlSi10Mg. Obr. 2-12b) zobrazuje dosažené drsnosti při různých úhlech náklonu, kde úhel 0° představuje vodorovnou pozici podélné osy. Drsnost byla měřena vždy na horní a spodní straně otvoru dle orientace při tisku. Vnější povrch nebyl zkoumán. Dosažené drsnosti se pohybují do 30 μm .



Obr. 2-12 a) Tvar jednoho z tištěných vzorků, b) Závislost drsnosti povrchu na orientaci součásti [27]

Vzhledem k širokému množství různých nastavení výrobních parametrů a různých typů výrobních zařízení je obtížné stanovit detailní pravidla pro tisk, která by zaručovala spolehlivou výrobu. S možností výroby téměř libovolných tvarů je definování univerzálních pravidel o to složitější. V tomto ohledu je SLM stále novou technologií, u které chybí dlouhodobá zkušenost a osvědčené postupy.

2.2.4 Materiály vhodné pro 3D tisk a přenos tepla

Mezi kovové materiály zpracovatelné pomocí SLM patří oceli, slitiny titanu, hliníku, niklu, hořčíku a v poslední době také slitiny mědi. Právě měď a hliník vynikají vysokou tepelnou vodivostí.

Čistá měď

Vyznačuje se velmi vysokou tepelnou vodivostí (téměř 400 W/mK). Při výrobě 3D tiskem se však vyskytují určité komplikace. Vzhledem k vysoké odrazivosti materiálu je zapotřebí vyššího výkonu laseru a vyšší rychlosti skenování. Jinak dochází pouze k částečnému tavení a vzniku vnitřních vad. Měď je také náchylná na reakci se vzdušným kyslíkem, byť v minimálních koncentracích. Vzniklá pórovitost výrazně snižuje výslednou tepelnou vodivost [8][28]. L. Constantin a kol. [30] provedli novou studii, ve které dosáhli optimalizací výrobních parametrů tisku téměř stejné tepelné vodivosti jakou má čistá měď. Výrobní zkušenosti s tímto materiálem jsou však zatím velmi omezené.

Slitina mědi Cu_{7,2}Ni_{1,8}SiCr

Ve výchozím materiálu má zhruba poloviční tepelnou vodivost oproti čisté mědi díky vyššímu obsahu niklu. Použití pro výrobu SLM je širě popsáno, avšak zmíněné problémy do značné míry přetrvávají. Po vytištění tepelná vodivost několikanásobně klesá vlivem porozity materiálu. [28]

Slitina hliníku AlSi10Mg

Jedna z nejčastěji používaných hliníkových slitin pro SLM, která je dobře popsána v literatuře. Jedná se o slévarenskou slitinu s dobrou pevností a tvrdostí. Její předností je nízká hustota a relativně vysoká tepelná vodivost. Po vytištění odpovídají mechanické vlastnosti tepelnému zpracování T6. Vzhledem k výrobě po vrstvách se výrobek vyznačuje mírnou anizotropií svých vlastností. Ta může být redukována dalším tepelným zpracováním. Tepelná vodivost po vytištění se pohybuje v rozmezí 103-130 W/mK, po tepelném zpracování (nejčastěji rekrystalizační žihání) 145-173 W/mK. [25][31]

Slitina hliníku AlSi9Cu3

Slévárenská slitina s dobrými mechanickými vlastnostmi, která si zachovává vysokou pevnost i při zvýšených teplotách. Rozšířený materiál pro SLM s dobrou vyrobiteľnosťou, avšak obtížně tepelně zpracovatelný [32]. Tepelná vodivost po vytištění je uváděna v rozmezí 110-120 W/mK. [33]

Slitina hliníku AlSi7Mg0,6

Slévárenská slitina s omezenějším popisem v literatuře pro použití SLM. Vyznačuje se vysokou odolností proti korozi a vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí. Tu výrobce udává v rozmezí 150-170 W/mK. [34]

Scalmalloy®

Materiál speciálně navržen pro zpracování kovovým 3D tiskem německou společností APWorks, spadající do skupiny Airbus. Slitina je tvořena hliníkem, hořčíkem a obsahuje přídavek skandia. To výrazně zvyšuje mechanické vlastnosti. Termální vodivost při pokojových teplotách uvádí výrobce cca 97 W/mK. [35]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Analýza problému

Hlavní funkcí zde popisovaného tepelného spínače je sepnutí kontaktu při dosažení určité teploty, následné ochlazení odvodem tepla a opětovné rozepnutí kontaktu. Tato práce se zaměřuje na komponent sloužící pro přenos tepla po sepnutí spínače, tzv. CTB (zkratka vychází z názvu součásti v původním designu: Copper Textile Braid). Ten vykazoval v původním návrhu velmi nízkou tepelnou vodivost způsobenou zejména nekvalitním spojením měděného pletence s vrchní a spodní částí. Z rešerše vyplývá, že použití celistvého materiálu je pro potřeby CTB nevyhovující, a to z důvodu příliš vysoké tuhosti uvažovaných materiálů, případně nevyhovující tepelné vodivosti. Proto je potřeba zaměřit se na koncepty s rozdělenou dráhou přenosu tepla. U těch dojde k přenosu tepla až po dotyku kontaktních ploch, které se spojí po sepnutí spínače.

Zároveň je tato práce zaměřena na možnosti výroby této součásti pomocí aditivních technologií, konkrétně technologií Selective laser melting. Ta nabízí výhody v možnosti tisku velmi složitých tvarů a struktur z kovových materiálů. Výsledkem může být velmi lehká součást s vysokou pevností. Je však třeba brát v úvahu určitá omezení, především vyšší drsnost povrchu, nižší rozměrovou přesnost a celkovou vyrobiteľnost.

Vhodná volba materiálu je důležitá pro výsledné vlastnosti a z hlediska vyrobiteľnosti. Jako vhodné materiály připadají v úvahu slitiny mědi a hliníku. Vzhledem k nízkému počtu dostupné literatury k měděným materiálům, složitě zpracovatelnosti a vysoké hustotě se jeví jako vhodnější varianta některá ze slitin hliníku.

Cíl práce

Hlavním cílem práce je navrhnouti možné náhrady nevyhovující součásti CTB tepelného spínače pomocí výrobní technologie Selective laser melting. Zaměření je především na dosažení dostatečné tepelné vodivosti a minimální hmotnosti.

Dílčími cíli je seznámení se s problematikou, sestavení vhodného postupu pro konstrukční návrh, zpracování koncepčních návrhů a zhodnocení dosažených výsledků z hlediska přínosů a nedostatků.

4 MATERIÁL A METODY

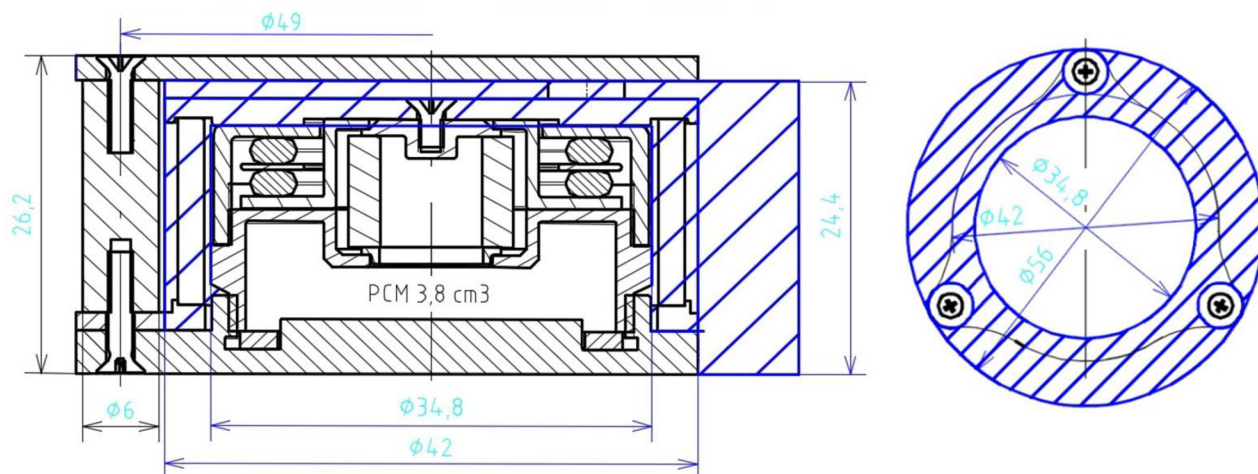
4.1 Požadavky na teplovodivou strukturu

Níže jsou vypsány základní požadavky na CTB. Nejdůležitějším z nich je dosažení požadované tepelné vodivosti. Ta vyžaduje dostatečnou průřezovou plochu, což negativně ovlivňuje výslednou hmotnost.

- | | |
|--|---------|
| – Minimální tepelná vodivost | 1,5 W/K |
| – Zdvih struktury | 1,7 mm |
| – Maximální hmotnost | 55 g |
| – Přenos tepla až | 10 W |
| – Minimální počet On/Off cyklů | 100 000 |
| – Přípustné napětí pouze v oblasti elastické deformace | |

4.2 Návrhový prostor

Prostor pro teplovodivou strukturu byl oproti původnímu řešení zvětšen až na vnější okraj spínače, na úroveň výstupků pro izolační pylony. Prostor je zobrazen na Obr. 4-1. Z celkové výšky 24,4 mm je daná velikost horní desky CTB, která měří 1,7 mm. Tloušťka spodní desky byla zvolena 1,5 mm. Výsledný prostor mezi deskami v sepnutém stavu je 21,2 mm. Šířka mezikruží je 10,6 mm. Po odečtení plochy pylonů je výsledná půdorysná plocha k dispozici 1399,6 mm².



Obr. 4-1 Schéma spínače a modře vyznačený návrhový prostor [3]

Plocha půdorysu mezikruží	1399,6 mm ²
Výška návrhového prostoru	24,4 mm
Tloušťka spodní desky	1,5 mm
Tloušťka horní desky	1,7 mm
Vzdálenost mezi deskami (stav ON)	21,2 mm

4.3 Analytický model přenosu tepla

Analytický model je založen na výpočtu vedení tepla. Vliv přenosu tepla prouděním i zářením je zanedbatelný, a proto není v této práci zohledněn. Přenos tepla vedením je realizován vedením samotného materiálu a případným přestupem tepla v kontaktních místech. Tepelné ztráty v kontaktech, způsobující teplotní skoky, jsou obecně větší než ztráty v plném materiálu.

4.3.1 Tepelná vodivost plného materiálu

Množství tepla přeneseného materiálem s konstantním průřezem je dán vztahem:

$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{t} [W] \quad (4.1)$$

kde:

λ	Wm ⁻¹ K ⁻¹	součinitel tepelné vodivosti
A	m ²	plocha průřezu
ΔT	K	rozdíl teplot
t	m	vzdálenost

Součinitel tepelné vodivosti λ je materiálová charakteristika, která je mírně závislá na teplotě. V užším rozsahu teplot jej lze považovat za konstantu.

Vydělením vztahu (4.1) rozdílem teplot ΔT lze zjistit tepelnou vodivost součásti na jeden kelvin, která je dále značena symbolem K .

$$K = \frac{\lambda \cdot A}{t} \left[\frac{W}{K} \right] \quad (4.2)$$

Tepelný odpor plného materiálu

Jedná se o převrácenou hodnotu tepelné vodivosti K . U tepelného odporu lze pozorovat analogii s odporem elektrickým, včetně sčítání sériově řazených odporů a sčítání převrácených hodnot u paralelních.

$$R = \frac{1}{K} = \frac{t}{\lambda \cdot A} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (4.3)$$

4.3.2 Kontaktní tepelná vodivost

Přestup tepla je zvláštním případem vedení tepla, které je realizováno na rozhraní dvou látek s různou teplotou. Kontakt dvou pevných látek je vždy složen z dotýkajících se vrcholů povrchu, jejichž skutečná velikost je mnohem menší než zdánlivá kontaktní plocha, a mezery mezi nedotýkajícími se částmi kontaktu. Výsledný přenos tepla kontaktem je tvořen vedením styčnými plochami, prouděním v mezerách a radiací. Je závislý na součiniteli přestupu tepla α , který charakterizuje daný kontakt.

$$K_c = \alpha \cdot A_c \left[\frac{K}{W} \right] \quad (4.4)$$

kde:

α	$Wm^{-2}K^{-1}$	součinitel přestupu tepla
A_c	m^2	kontaktní plocha

Analogicky s vodivostí plného materiálu je kontaktní odpor převrácenou hodnotou kontaktní vodivosti:

$$R_c = \frac{1}{K_c} = \frac{1}{\alpha \cdot A_c} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (4.5)$$

Modely pro určení součinitele přestupu tepla

Existuje několik modelů pro výpočet součinitele přestupu tepla mezi pevnými tělesy. V této práci je použit model od M. Yovanoviche, popsáný např. v [36]:

$$\alpha = 1,25\lambda_s \frac{m_s}{\sigma_s} \left(\frac{p}{H} \right)^{0,95} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (4.6)$$

kde λ_s je harmonický průměr součinitelů tepelné vodivosti materiálů, mezi kterými dochází ke kontaktu:

$$\lambda_s = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (4.7)$$

Symbol m je charakteristika drsnosti povrchu (angl. absolute surface slope) definující průměrný sklon nerovností. Efektivní hodnota obou povrchů kontaktu m_s je:

$$m_s = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} [-] \quad (4.8)$$

Dalším členem, který charakterizuje drsnost povrchu je σ_s vyjadřující efektivní drsnost povrchu RMS:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4.9)$$

Drsnost povrchu RMS lze přibližně odhadnout pomocí hodnoty Ra:

$$\sigma \cong 1,25 \cdot Ra \text{ } [\mu\text{m}] \quad (4.10)$$

Empirická vazba mezi m a σ je:

$$m = 1,25 \cdot (\sigma \cdot 10^6)^{0,402} \text{ } [-] \quad (4.11)$$

Zbývajícím členy rovnice (4.6) je kontaktní tlak p [MPa] a mikrotvrdość měkkého materiálu H [MPa].

4.4 Hlavní návrhové parametry

Mezi hlavní faktory ovlivňující tepelnou vodivost součásti patří součinitel tepelné vodivosti λ ; průřezová plocha materiálu; délka dráhy, kterou musí teplo urazit a součinitel přestupu tepla v kontaktu. Ten je závislý na celé řadě dalších vlastností kontaktu jako je drsnost povrchu, kontaktní tlak, mikrotvrdość a další. Z geometrických parametrů výslednou vodivost ovlivňují rozměry a uspořádání jednotlivých prvků v dané struktuře a velikost kontaktních ploch. Výstupními hodnotami je celková hmotnost struktury a tepelná vodivost.

4.5 Vstupní parametry a výchozí předpoklady

4.5.1 Rozměrové předpoklady a kontaktní tlak

Pro zamezení nežádoucího tření mezi vzájemně pohyblivými částmi je mezi nimi třeba zajistit dostatečnou mezeru. Na základě studia dosažitelných drsností povrchu při SLM byla zvolena minimální vůle mezi dvěma pohyblivými elementy $c = 0,1$ mm. Ostatní rozměrová omezení jsou uvedena v kap. 4.2.

Kontaktní tlak je důležitým vstupním parametrem pro výpočet kontaktního odporu, potažmo kontaktní vodivosti. Pokud by byla jako vstup použita konstantní velikost síly, docházelo by ke změně kontaktního tlaku se změnou velikosti kontaktní plochy. To by mělo negativní vliv při porovnávání jednotlivých konceptů, jelikož by každá varianta dosahovala jiné kontaktní vodivosti. Proto byl stanoven konstantní tlak v kontaktech na $p = 0,4$ MPa. Výstupem je tedy

síla, kterou musí vyvodit parafinová kapsle, a která je spotřebována tlakem v kontaktech CTB.

4.5.2 Drsnost kontaktních ploch

Vysoká drsnost povrchu významně snižuje součinitel přestupu tepla. Vzhledem k obecně vyšším dosahovaným drsnostem výrobou pomocí SLM je předpokládáno opracování kontaktních ploch pro zvýšení kontaktní vodivosti. Společným předpokladem pro všechny koncepční řešení je drsnost kontaktních ploch Ra 1,6. Ve zhodnocení jednotlivých variant bude posouzena dosažitelnost této hodnoty.

4.5.3 Materiál

Výběr vhodného materiálu má velký vliv na výsledné vlastnosti. Materiálové charakteristiky, jako součinitel tepelné vodivosti a hustota jsou důležitými vstupními parametry, které mají zásadní vliv na výslednou tepelnou vodivost a hmotnost celku.

Na základě rešeršní části byla zvolena hliníková slitina AlSi10Mg jako nejvhodnější materiál pro tuto práci. Jedná se o nejpoužívanější slitinu ze všech zvažovaných možností pro použití 3D tisku. Má vysoký součinitel tepelné vodivosti a oproti mědi nižší hustotu. Literatura uvádí hustotu $\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$ [25] a součinitel tepelné vodivosti λ v rozmezí 145-173 W/mK po žhání [25][31]. Pro účely práce byla zvolena hodnota $\lambda = 150 \text{ W/mK}$.

4.5.4 Součinitel přestupu tepla

Vzhledem k výše uvedeným předpokladům lze na základě rovnic v kap. 4.3.2 stanovit součinitel přestupu tepla α . Na Leteckém ústavu VUT v Brně byla provedena studie [37] týkající se kontaktní vodivosti měděných vzorků. Z výsledků vyplynulo, že tepelný odpor predikovaný různými modely (včetně zde použitého) byl několikanásobně nižší než experimentálně změřený. Proto byla výsledná hodnota součinitele šestinásobně snížena. Tímto způsobem upravená rovnice (4.6) má tvar:

$$\alpha = \frac{1,25}{6} \lambda_s \frac{m_s}{\sigma_s} \left(\frac{p}{H} \right)^{0,95} = 2127,9 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.12)$$

λ_s	150	Wm ⁻¹ K ⁻¹
m_s	0,2336·10 ⁶	-
σ_s	2,8284	μm
p	0,4	MPa
H	705	MPa

4.5.5 Přehled vstupních parametrů

Výše definované hodnoty, které jsou v práci použity jako výchozí hodnoty shrnuje tab. 4-1.

tab. 4-1 Přehled vstupních parametrů

Minimální vzdálenost mezi pohyblivými částmi	c	0,1 mm
Kontaktní tlak	p	0,4 MPa
Hustota materiálu	ρ	2,67 g/cm ³
Součinitel tepelné vodivosti	λ	150 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Součinitel přestupu tepla	α	2127,9 Wm ⁻² K ⁻¹

4.6 Popis možných přístupů a řešení

Vzhledem k zaměření této práce na výrobu součástí CTB aditivními technologiemi se nabízí různé varianty a přístupy k návrhu. Při zvažování výhod, které nabízí SLM, se nabízí několik koncepcí typických pro tuto technologii.

Jednou z nich je použití tzv. lattice struktur, což je struktura tvořená krátkými pruty složenými v různě složité mřížové vzory. Vytisknutím vzájemně provázaných struktur s dostatečnými vůlemi by bylo možné dosáhnout požadované flexibility a rovnoměrného rozložení přenosových cest v dostupném prostoru. Nevýhodou je zvýšená drsnost povrchu a nízká kontaktní plocha, tvořena pouze křížením jednotlivých prvků. Také jejich malý průřez vzhledem k obvodové ploše nepřispívá k dobré tepelné vodivosti.

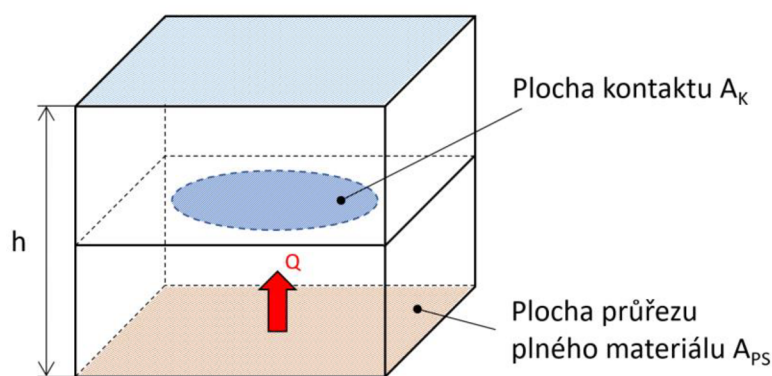
Další zvažovanou variantou je použití některé formy kloubového spojení. Byla by dosažena flexibilita, ovšem za cenu velkého množství kontaktů v dráze tepla, což by negativně ovlivňovalo tepelnou vodivost. Zároveň by nebylo možné kontaktní plochy opracovat pro dosažení požadované drsnosti.

Zřejmě nejjednodušší přístup je v tvorbě rozdělených součástí (spodní a horní) s výraznými kontaktními plochami, které jsou obrobitelné pro snížení drsnosti povrchu. Sepnutím spínače se kontakty spojí a vytvoří dráhu pro odvod tepla. Tento přístup je použit ve zde předkládané práci.

5 KONCEPČNÍ NÁVRHY

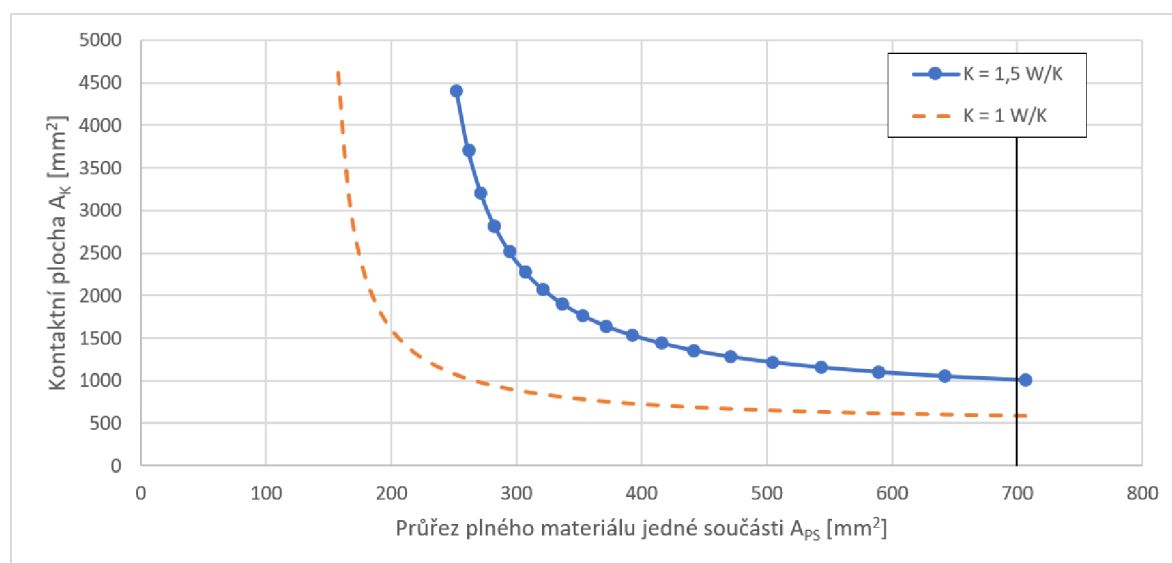
5.1 Odhad potřebného průřezu materiálu a kontaktní plochy

Pro orientační stanovení potřebných průřezů byl sestaven jednoduchý model sestávající ze dvou částí: plného materiálu o výšce $h = 21,2$ mm a jednoho kontaktu (viz Obr. 5-1). Výpočet vychází ze vztahů uvedených v kap. 4.3, přičemž tepelná vodivost (a tím i tepelný odpor) je dána $K = 1,5$ W/K, a jsou zjišťovány potřebné kontaktní plochy při změně průřezové plochy součásti. Součinitele přestupu tepla a tepelné vodivosti jsou uvedeny v tab. 4-1. Tento model slouží k prvotnímu odhadu dimenzování jednotlivých struktur a rozlišení rozměrových limitací.



Obr. 5-1 Modelový případ přenosu tepla

Na Obr. 5-2 je vykreslena závislost minimální kontaktní plochy na průřezu plného materiálu pro dosažení požadované tepelné vodivosti K . Pro porovnání byla přidána křivka s nižší vodivostí. Svislá čára představuje limit půdorysné plochy pro jednu součást na základě omezení návrhového prostoru (při jejím dosažení nezůstane žádná plocha pro kontakt).



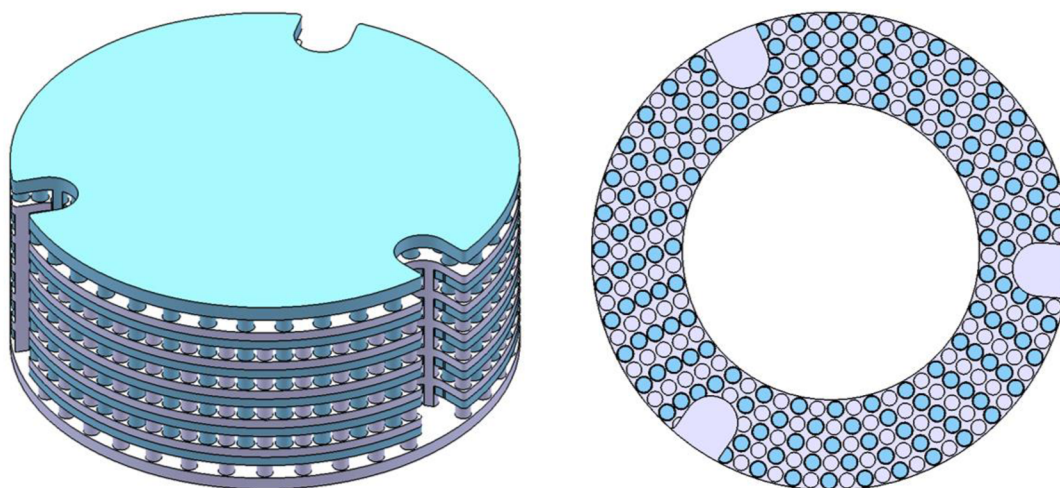
Obr. 5-2 Závislost minimálních ploch

5.2 Sloupkový koncept

Koncept je založen na vertikálních sloupcích, přičemž jedna polovina sloupků náleží spodní části CTB a druhá polovina vrchní části. Přenos tepla mezi sloupky jednotlivých částí je realizován dotykem kontaktních pater. Cílem je zajistit přenos tepla větším množstvím prvků, které jsou rovnoměrně rozprostřeny v daném prostoru, a zároveň dosáhnout nízké hmotnosti.

5.2.1 Počáteční návrh (SK01)

Jednotlivé prvky byly navrženy v pěti soustředných kružnicích, ve kterých se vedle sebe vždy střídají spodní a vrchní sloupky. Průměr sloupku byl navržen na 1,8 mm, aby bylo dosaženo efektivního využití šířky mezikruží. Průměr děr, ve kterých se sloupky pohybují, vychází na 2 mm. S ohledem na vyrobiteľnost byla zvolena tloušťka desek 1,1 mm. Maximální počet kontaktních pater potom vychází na 5. Shrnutí geometrických rozměrů je uvedeno v tab. 5-1.



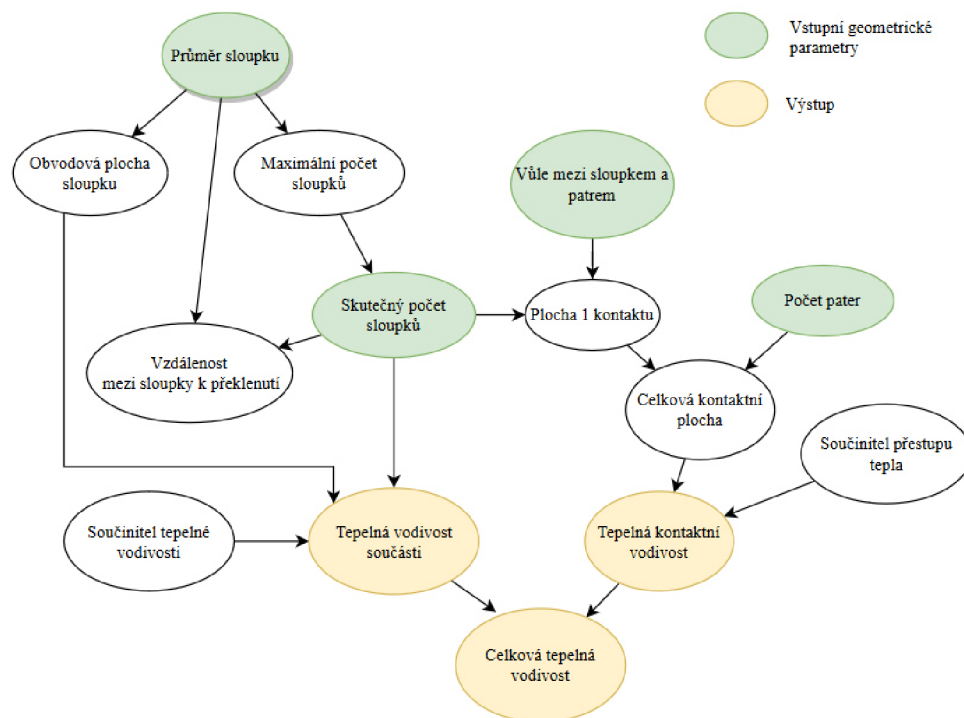
Obr. 5-3 Rozložení prvků v modelu SK01

tab. 5-1 Parametry konceptu SK01

Průměr sloupků	d_s	1,8 mm
Průměr děr pro sloupky		2 mm
Počet sloupků v 1 součásti		154
Celkový průřez sloupků v 1 součásti	A_{PS}	391,9 mm ²
Plocha 1 kontaktu	A_{KI}	432,5 mm ²
Počet kontaktních ploch (pater)		5
Tloušťka kontaktního disku		1,1 mm
Celková kontaktní plocha	A_K	2162,3 mm ²
Celková hmotnost struktury	m	72,5 g

Přehled parametrů a jejich vazby

Obr. 5-4 shrnuje základní geometrické parametry a jejich vliv na výslednou tepelnou vodivost. Zároveň také mají vliv na výslednou hmotnost. Ze schématu vyplývá, že nejzásadnější je velikost sloupku, která určuje jejich maximální počet. Ten může být snížen, čímž se zvýší prostor pro kontaktní plochu.

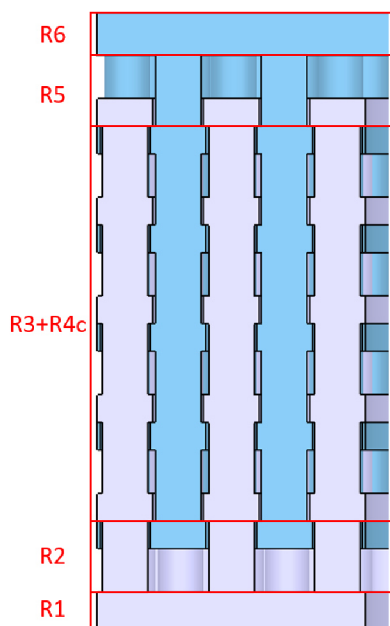


Obr. 5-4 Jednotlivé návrhové parametry a jejich vazby

5.2.2 Termální výpočet

Analytické řešení

Na základě vytvořené geometrie byl proveden analytický výpočet s použitím vztahů, které jsou uvedeny v kap. 4.3. Model byl rozdělen na několik částí, které mají konstantní průřez po výšce. Na tyto části lze aplikovat dané vztahy. Rozdělení je naznačeno na Obr. 5-5. Model je po výšce rozdělen na celkem 5 úseku: spodní desku, sloupky spodní části do prvního kontaktu, sloupky obou částí mezi prvním a posledním kontaktem, sloupky vrchní části od posledního kontaktu po vrchní část, a nakonec vrchní deska. Kontaktní odpor je počítán pomocí jedné kontaktní plochy, která vznikla sloučením jednotlivých kontaktních ploch. Celkový odpor vznikne sečtením všech dílčích odporů.



Obr. 5-5 Rozdělení struktury SK01 na jednotlivé odpory

Odpor a tepelná vodivost součástí

Rozměry jednotlivých částí včetně vypočítaných odporů jsou uvedeny v tab. 5-2. Průřezová plocha v části č. 3 je složena z obou součástí. Je tedy dvojnásobná oproti částem č. 2 a 5.

tab. 5-2 Jednotlivé tepelné odpory SK01

Odpor R_i	Plocha průřezu/kontaktu [mm ²]	Výška t [mm]	Tepelný odpor [K/W]
R_1	1511,9	1,5	0,0066
R_2	391,9	2,8	0,0476
R_3	783,8	15,6	0,1327
R_{4c}	2162,3	-	0,2173
R_5	391,9	2,8	0,0476
R_6	2351,2	1,7	0,0048

Celkový odpor struktury: $R = 0,4567$ K/W

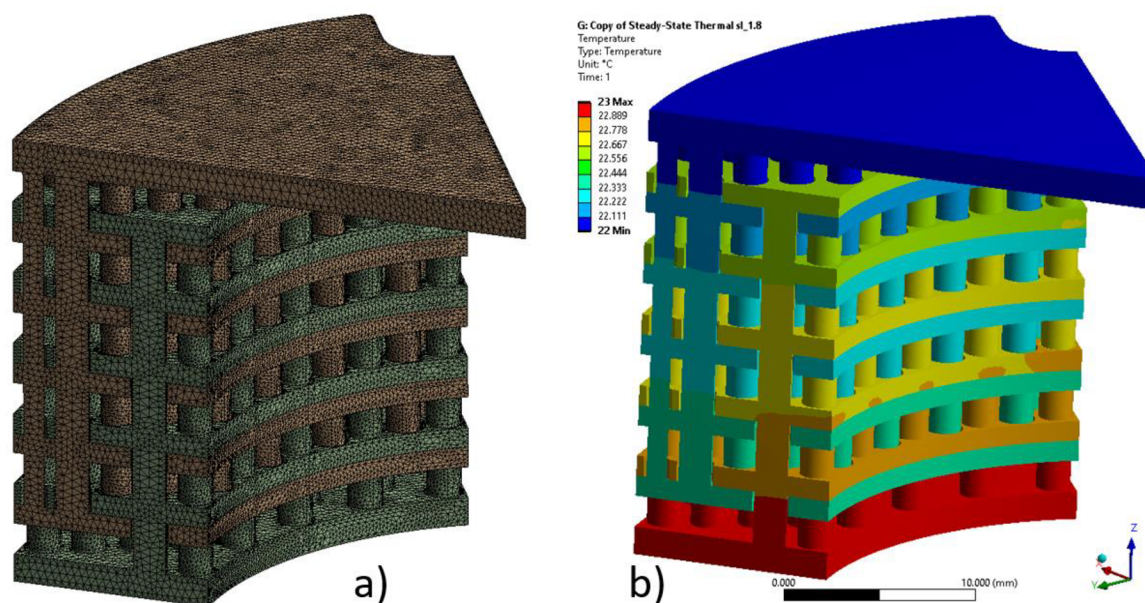
Celková vodivost struktury: $K = 2,1895$ W/K

Výsledky ukazují dosažitelnou vodivost vyšší než požadovaných 1,5 W/K. Tento model však má určité limitace, např. předpokládá pouze tepelný tok v jednom směru. Ve skutečnosti však není dráha tepla přímá. Pro ověření výsledků byla použita numerická simulace.

Numerická simulace

Pro numerickou simulaci byl využit výpočetní software Ansys 2019 R3. S využitím symetrie byla použita jedna šestina modelu pro snížení náročnosti výpočtu. Všechny kontakty byly

nastaveny jako *bonded* se součinitelem přestupu tepla $\alpha = 2127,9 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}$. Počáteční teplota modelu je $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Vyšší teplota $23 \text{ }^\circ\text{C}$ byla nastavena na spodní plochu součásti. Na vrchní ploše byla nastavena teplota $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Přenos tepla zářením a prouděním nebyl uvažován. Na vrchní ploše byl měřen tepelný výkon ve watttech, který při rozdílu teplot $1 \text{ }^\circ\text{C}$ odpovídá tepelné vodivosti analyzovaného modelu. Celková tepelná vodivost součásti CTB odpovídá šestinásobku této hodnoty.



Obr. 5-6 (a) Síť modelu a (b) rozložení teploty sloupkového konceptu

Tepelná vodivost modelu: $K_{1/6} = 0,3342 \text{ W/K}$

Celková vodivost CTB: $K = 2,005 \text{ W/K}$

Porovnání analytického a numerického řešení

	Analytické řešení	Numerické řešení
Tepelná vodivost K [W/K]	2,1895	2,005

Výsledek numerického řešení je zhruba o 10 % nižší než u řešení analytického. To je zapříčiněno zejména zjednodušením dráhy tepla u analytického řešení, která ve skutečnosti není přímá. Při prostupu patry musí tepelný tok dvakrát změnit směr, což způsobí nárůst tepelného odporu. Výsledná chyba je však přijatelná a lze předpokládat podobnou odchylku i u jiných variant.

Výsledná síla, která je spotřebována kontaktním tlakem se získá vynásobením kontaktního tlaku s celkovou kontaktní plochou. Pro strukturu SK01 je tato síla $F = 864,9 \text{ N}$.

5.2.3 Vliv počtu geometrických prvků na tepelnou vodivost a hmotnost

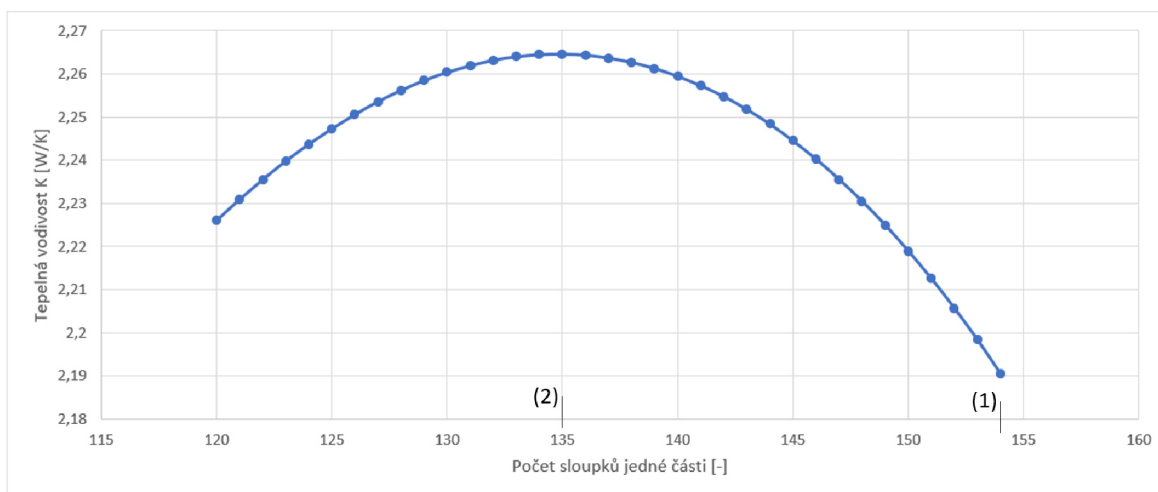
Počáteční návrh splňuje požadovanou vodivost, avšak pro zjištění maximální dosažitelné tepelné vodivosti byla provedena analýza rozložení prvků a jejich vliv na výsledné hodnoty, včetně zahrnutí hmotnosti.

Vliv počtu sloupků

Tepelný odpor struktury se skládá z odporu plného materiálu a kontaktního odporu. Jejich vzájemný poměr může být u počátečního návrhu vychýlený a cílem této analýzy je nalezení vhodné kombinace prvků pro dosažení optimálních výsledků.

Počáteční návrh je navržen pro maximální počet sloupků při zachování dostatečných šířek materiálu mezi nimi. Množství sloupků lze tedy ovlivnit pouze snížením jejich počtu nebo zmenšením jejich průměru. Snížení počtu sloupků má oproti druhé variantě výhodu v podobě snížení množství nevyužitého prostoru, který tvoří mezery mezi pohyblivými částmi (vůle mezi sloupky a patry spodní a vrchní části).

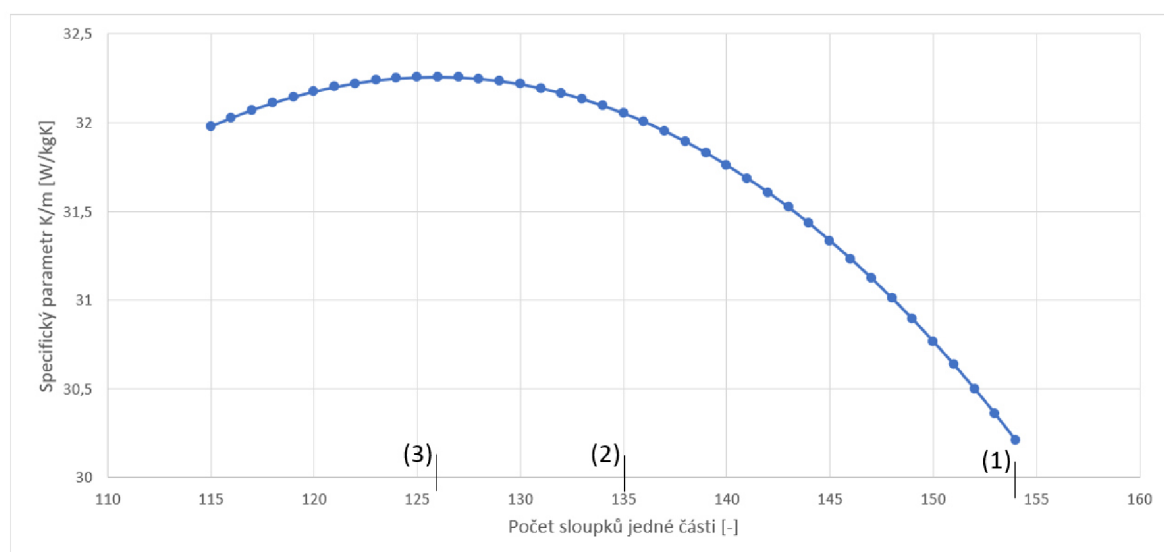
Na základě analytického modelu byl v programu Excel vytvořen postup pro výpočet průřezové a kontaktní plochy, hmotnosti a tepelné vodivosti s možností modifikovat počet, případně průměr sloupků. Obr. 5-7 ukazuje závislost tepelné vodivosti na počtu sloupků. Nejvyšší vodivosti $K = 2,2646 \text{ W/K}$ je dosaženo při 135 sloupcích (2). Při dalším snižování počtu sloupků vodivost opět klesá. Nárůst vodivosti oproti maximálnímu počtu sloupků (1) činí 3,4 %.



Obr. 5-7 Závislost tepelné vodivosti na počtu sloupků

S ohledem na snížení hmotnosti je porovnán vliv snížení počtu sloupků na specifický parametr K/m , tedy tepelná vodivost podělená hmotností struktury. Na Obr. 5-8 je vykreslena závislost parametru K/m na počtu sloupků. Nejvyšších hodnot je dosaženo při 126 sloupcích

(3). Nárůst K/m je oproti původnímu návrhu 6,8 %. V tab. 5-3 jsou shrnuty výše zmíněné výsledky. V závorkách je uveden nárůst či pokles dané hodnoty oproti původnímu návrhu.



Obr. 5-8 Závislost parametru K/m na počtu sloupků

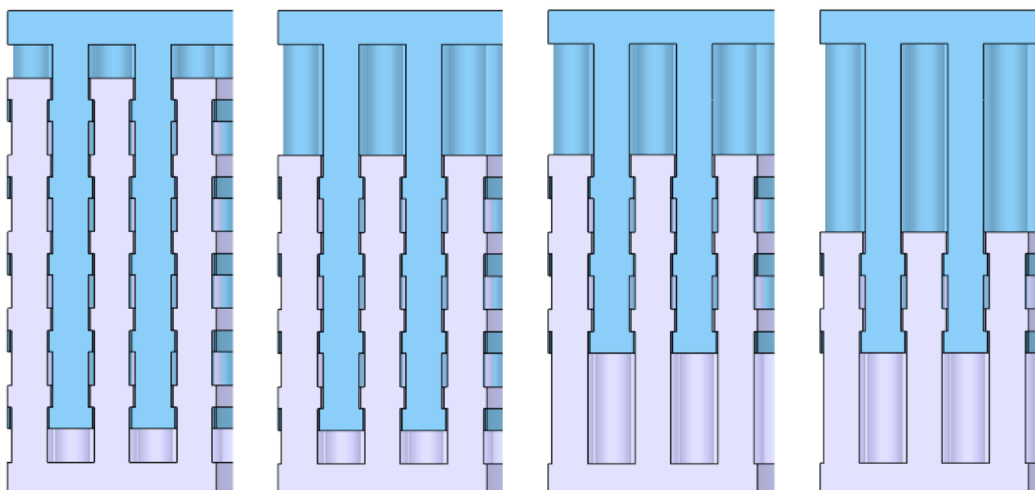
tab. 5-3 Porovnání konfigurací s různým počtem sloupků

	Počet sloupků v jedné části	Průřezová plocha jedné části	Celková kontaktní plocha	Celková hmotnost m	Celková vodivost K	Parametr K/m
	-	mm ²	mm ²	g	WK ⁻¹	Wkg ⁻¹ K ⁻¹
(1) Původní návrh	154	391,9	2162,3	72,51	2,1905	30,21
(2) Max. vodivost K	135	343,5	2759,3	70,65 (-2,57 %)	2,2646 (3,38 %)	32,05 (6,11 %)
(3) Max. K/m	126	320,6	3042,0	69,77 (-3,78 %)	2,2506 (2,74 %)	32,26 (6,78 %)

Z výsledků vyplývá, že lze dosáhnout vyšší efektivity redukcí počtu sloupků. Jako nejefektivnější se jeví, s uvažováním vodivosti i hmotnosti, varianta (3) se 126 sloupků, u které dojde ke zvýšení specifického parametru téměř o 7 %. Ačkoli uvedené hodnoty nemusí přesně odpovídat skutečnosti z důvodu některých limitací modelu, nastiňují alespoň přibližné velikosti ploch, okolo kterých se lze pohybovat.

Vliv počtu kontaktních pater

Obdobným způsobem byla provedena analýza počtu kontaktních pater, především jejich vliv na specifický parametr K/m . Hlavní myšlenkou byla možnost odebrat kontaktní disky, a tím docílit snížení hmotnosti. S každým odebráním disku lze u jedné ze dvou částí odebrat i přečnívající části sloupků. Obr. 5-9 ilustruje odebrání různých počtů disků, včetně původní varianty s pěti disky na každé části.



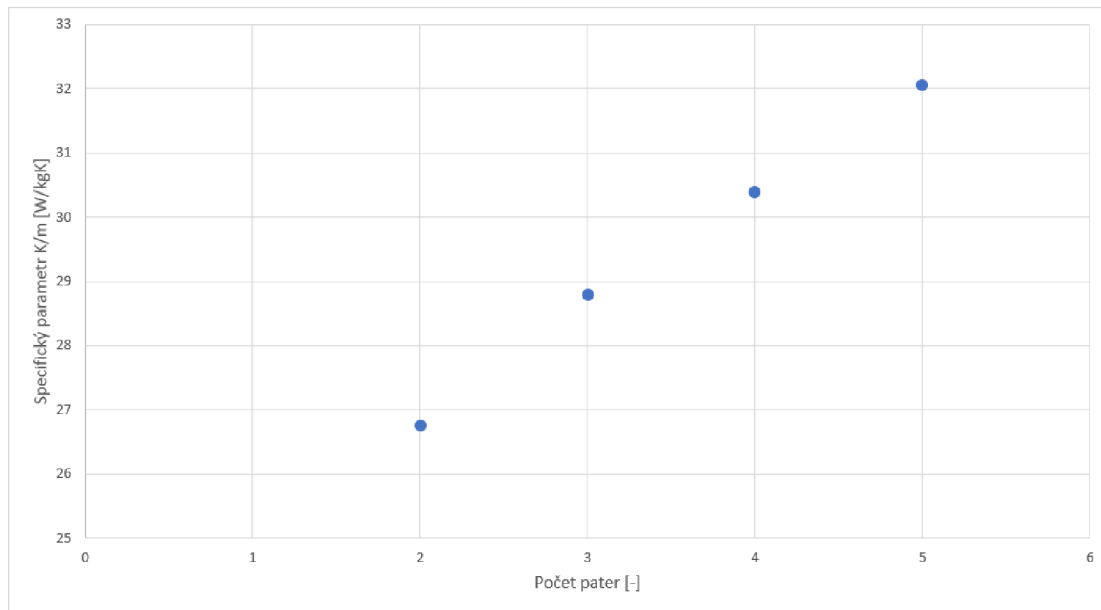
Obr. 5-9 Různá konfigurace počtu kontaktů

Pro výpočet byl použit stejný analytický model jako v předchozí části. Vzhledem k měnícímu se rozložení odporů bylo u každé konfigurace nalezeno maximum tepelné vodivosti. Toho bylo dosaženo snižováním počtu sloupků, jejich průměr byl ponechán konstantní. V tab. 5-4 jsou uvedeny výsledné hodnoty.

tab. 5-4 Vlastnosti modelu při změně počtu kontaktů

Počet kontaktních pater v 1 části	Počet sloupků v 1 části	Celková hmotnost m	Max. vodivost K	K/m
-	-	g	WK^{-1}	$\text{Wkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
5	135	70,65	2,2646	32,05
4	132	63,05	1,9166	30,40
3	128	55,29	1,5918	28,79
2	120	47,00	1,2576	26,76

Na Obr. 5-10 je vykreslena závislost specifického parametru K/m na počtu kontaktních pater. Z grafu je patrná lineární závislost. Lze tedy konstatovat, že snížení počtu kontaktních disků přispívá ke snížení hmotnosti na úkor tepelné vodivosti. Zároveň je třeba podotknout, že větší množství pater by pravděpodobně vedlo k dalšímu zvýšení parametru K/m , avšak z hlediska vyrobitelnosti nelze více snižovat tloušťku kontaktních disků. Pět kontaktů tak představuje maximum, které lze umístit do vymezeného prostoru.

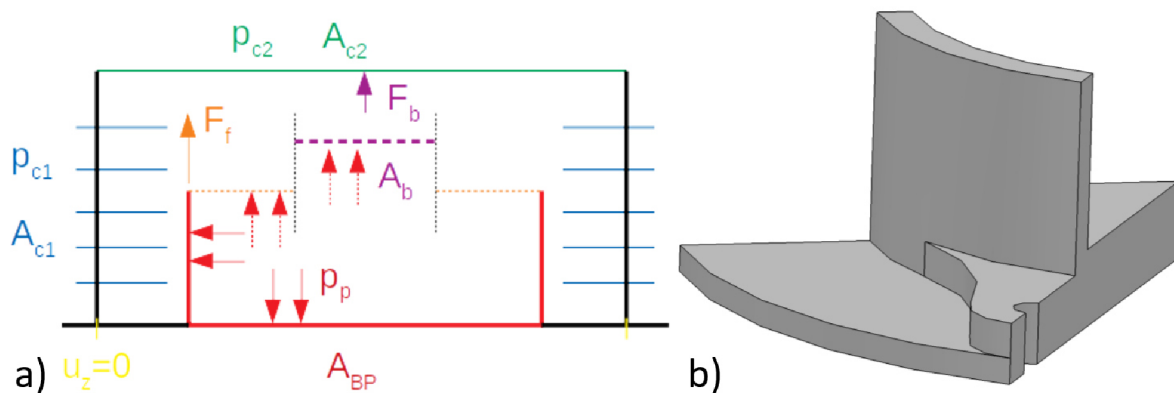


Obr. 5-10 Závislost parametru K/m na počtu kontaktů

5.2.4 Pevnostní výpočet

Pro pevnostní kontrolu byl sestaven model spínače, který zahrnuje kromě struktury CTB i základní desku (BP), která se deformuje tlakem parafínu. Předpokladem je pevné spojení BP se strukturou CTB. Dále model obsahuje vrchní desku CI, která vyztužuje vrchní desku CTB. Obr. 5-11a) schematicky ilustruje relevantní rozložení zatížení ve spínači. Vstupními hodnotami je tlak a plocha v kontaktech, výstupem je tlak parafínu. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tab. 5-5. Výpočet byl realizován s pomocí programu Ansys 2019.

Pro pevnostní analýzu byl použit původní návrh se 154 sloupky. Byla však částečně modifikována spodní deska struktury, která je v této analýze pevnou součástí základní desky. Byly přidány vyztuhy v oblasti uchycení pylonů, které navyšují výšku spodní desky z původních 1,5 mm na 3,5 mm. Vyztužení je zobrazeno na Obr. 5-11b). Dále byly použity zjednodušené modely šroubů propojující HI a CI s pylony.



Obr. 5-11 a) Schéma zatížení spínače [autor: Ing. František Löffelmann], b) Vyztužení BP v místě pylonu

Síla od vlnovce

$$F_b = F_{c1} + F_{c2} = p_{c1}A_{c1} + p_{c2}A_{c2} [N] \quad (5.1)$$

Tlak parafínu

$$p_p = \frac{F_b}{A_b} [MPa] \quad (5.2)$$

Síla na obrubě BP

$$F_f = p_p(A_{BP} - A_b) [N] \quad (5.3)$$

tab. 5-5 Přehled zatížení a ploch, na které působí

		Šestina modelu	Celý model
Kontaktní plocha 1	$A_{c1} [mm^2]$	360,39	2162,35
Tlak v kontaktech 1	$p_{c1} [MPa]$	0,4	
Plocha kontaktu 2	$A_{c2} [mm^2]$	388,58	2331,48
Tlak v kontaktu 2	$p_{c2} [MPa]$	0,4	
Síla od vlnovce	$F_b [N]$	299,59	1797,53
Plocha tlaku od vlnovce	$A_b [mm^2]$	14,708	88,25
Tlak parafínu	$p_p [MPa]$	20,37	
Plocha Base Plate	$A_{bp} [mm^2]$	122,569	735,41
Síla na obrubě	$F_f [N]$	2197,05	13182,29

Použité materiály

V tab. 5-6 jsou shrnuty použité materiály se základními pevnostními charakteristikami. Kromě spojovacích šroubů z oceli a Torlonových pylonů je u všech částí uvažovaná hliníková slitina.

tab. 5-6 Materiály použité v modelu

AlSi10Mg [25]	$R_m = 345 \text{ MPa}$ $R_e = 230 \text{ MPa}$
Konstrukční ocel	$R_m = 460 \text{ MPa}$ $R_e = 250 \text{ MPa}$
Torlon® 42031 [38]	$R_m = 152 \text{ MPa}$

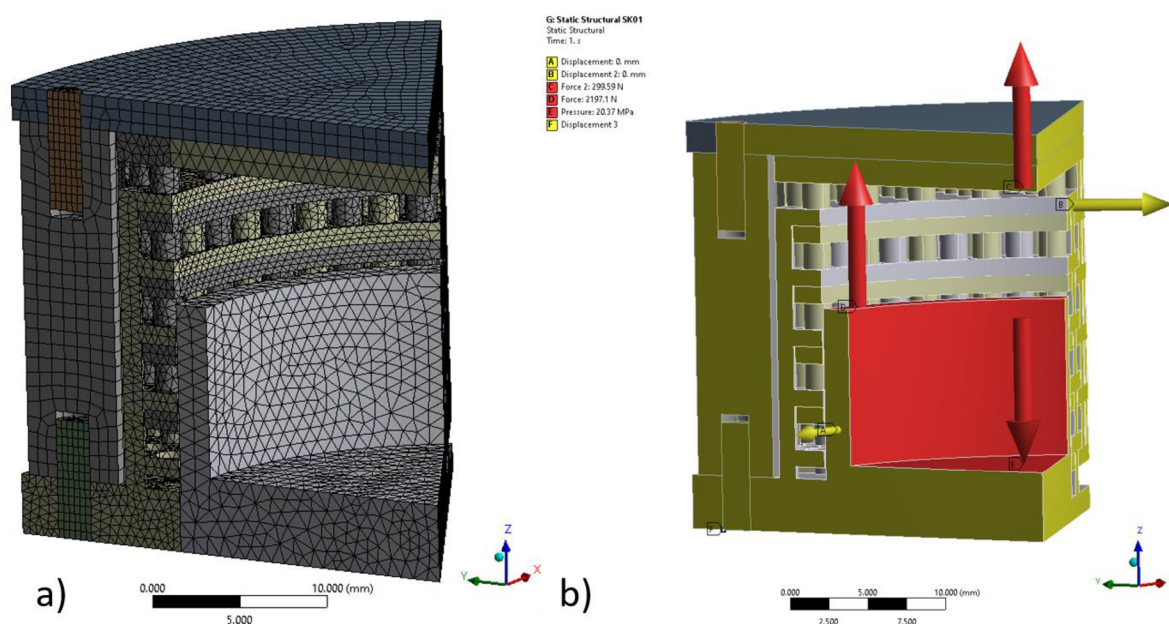
Okrajové podmínky, nastavení kontaktů a síť

Pro výpočet byla využita symetrie a analyzována byla šestina modelu. Na Obr. 5-12b) jsou zobrazeny použité vazby a zatížení. Prvky, které se nacházejí v rovinách symetrie mají předepsaný nulový posuv v normálovém směru (A a B). Na prostředek vrchní desky CTB

působí odspodu síla (C) a na vrchní stranu obruby BP působí síla (D). Na vnitřní prostor základní desky, který je vyplněn parafinem působí tlak parafínu (E). Model je pevně uchycen v místě otvoru pro šroub ve směru osy z (F).

Všechny kontakty byly nastaveny jako *bonded*, tedy bez možnosti vzájemného pohybu. Jedinou výjimku tvoří kontakt mezi vrchní deskou CTB a deskou CI. Ten je nastaven na *frictional*, tzn. že může dojít k posuvu i separaci kontaktů, a to z důvodu nižší pevnosti pylonů, která umožňuje vyšší deformaci desky CI oproti desce CTB. Součinitel tření byl zvolen 1,2.

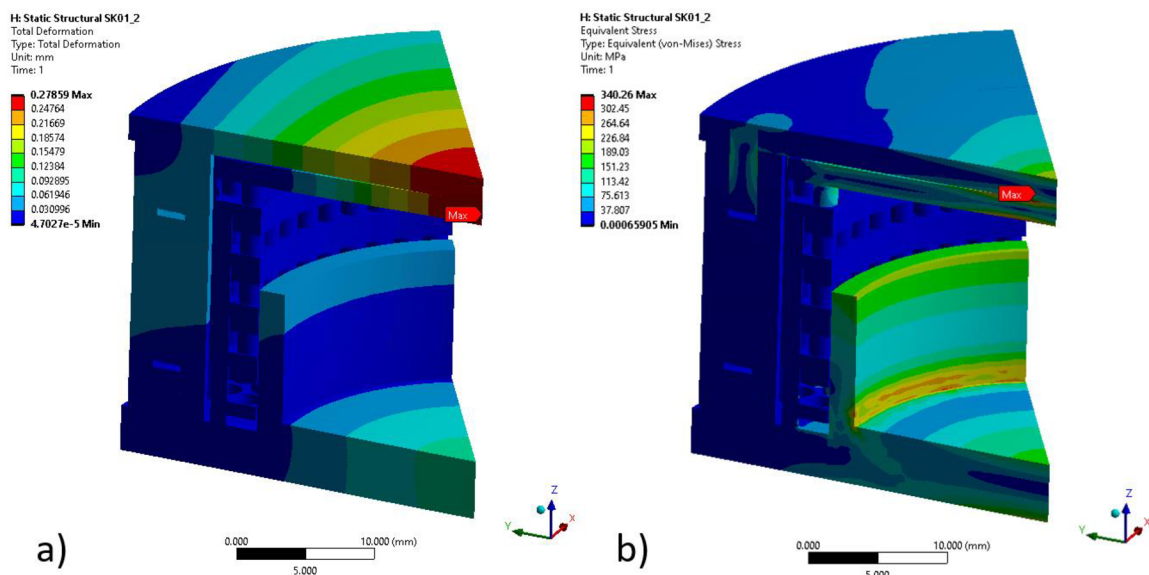
Síť modelu je zobrazena na Obr. 5-12a). Struktura CTB spolu se základní deskou je tvořena tetrahedry, ostatní části jsou tvořeny převážně hexahedry. Všechny elementy jsou kvadratického řádu (TET10 a HEX20). Jejich výchozí velikost je 0,5 mm.



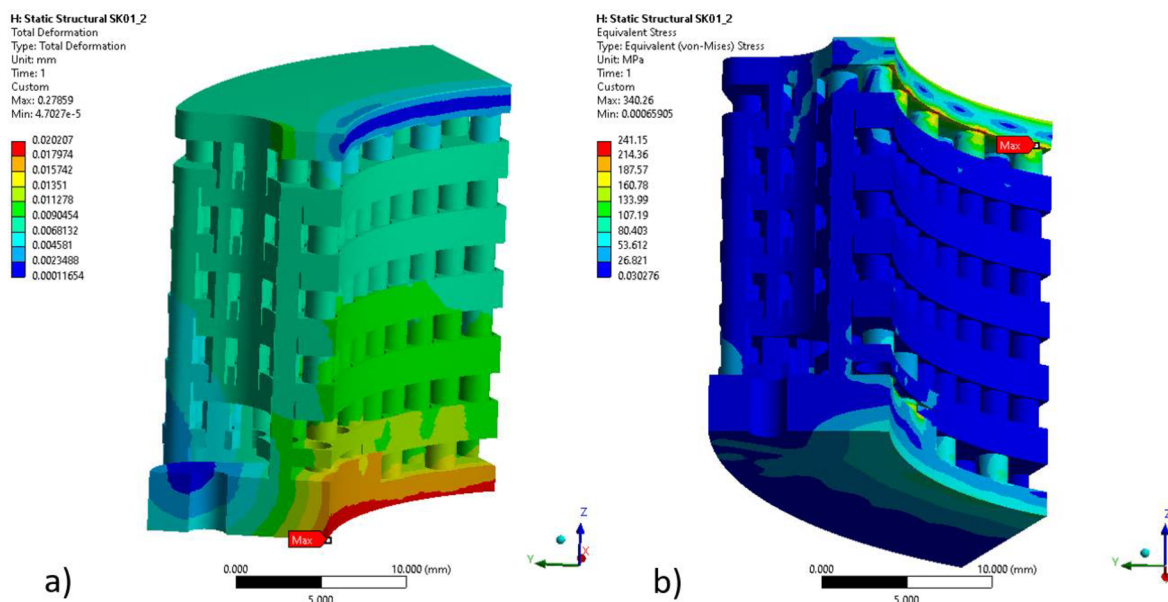
Obr. 5-12 a) Síť modelu, b) Okrajové podmínky

Výsledky

Na Obr. 5-13 je vykreslena celková deformace modelu (a) a celkové rozložení napětí (b). Maximální deformace dosahuje uprostřed horní desky CTB 0,28 mm. Výsledky pro samotnou strukturu CTB jsou zobrazeny na Obr. 5-14. Struktura je poměrně tuhá, nejvyšších napětí dosahuje u přechodů sloupků horní částí v horní desku. Lokální maxima zde dosahují téměř meze kluzu, a proto by zde bylo vhodné upravit tvar součástí, např. zvětšením průměru krajních sloupků, zaoblením přechodů apod. Otázkou zůstává, zda je možné dosáhnout požadovaného tlaku parafínu 20,4 MPa a jakým způsobem ovlivní deformace součástí výsledné kontaktní vlastnosti. Oba problémy by vyžadovali detailnější analýzu. S přihlédnutím k výše zmíněnému lze konstatovat, že struktura CTB pevnostně odpovídá danému zatížení.



Obr. 5-13 Výsledky pevnostní analýzy: a) Celková deformace, b) Ekvivalentní napětí



Obr. 5-14 Výsledky zaměřené na CTB, a) Celková deformace, b) Ekvivalentní napětí

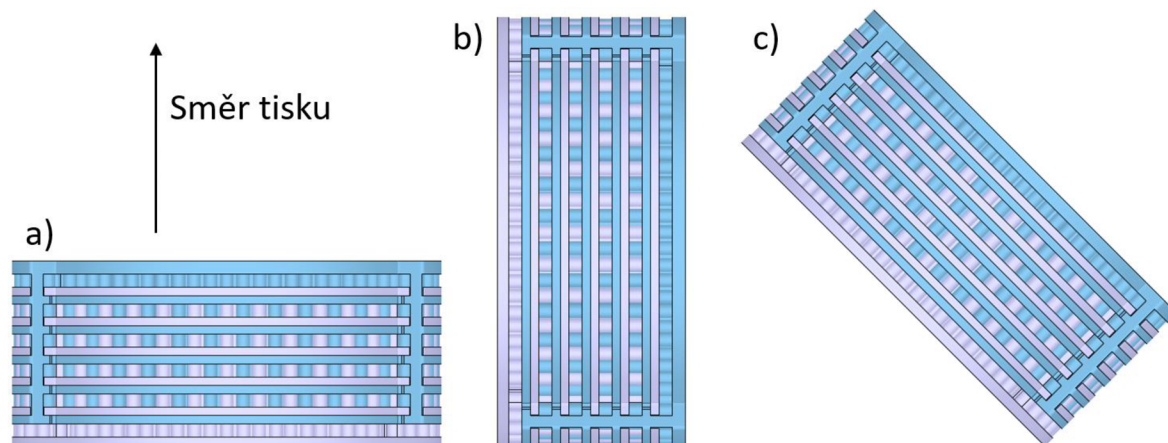
5.2.5 Posouzení vyrobiteľnosti SK01

Největší omezení konceptu představuje dosažitelná kvalita vyrobené součásti. Koncept je založen na provázanosti struktur a výroba tiskem tudíž musí probíhat v jedné operaci. Možnosti použití podpurných struktur uvnitř struktury CTB jsou velmi omezené, a připadají v úvahu pouze na vnějším a vnitřním okraji mezikruží, kde lze dosáhnout jejich odstranění.

Orientace při tisku a drsnost kontaktních ploch

V úvahu připadají tři varianty orientace, které jsou zobrazeny na Obr. 5-15. U varianty (a) hrozí zhoršená kvalita ploch orientovaných dolů, což se týká všech kontaktních ploch spodní

části CTB. Vzdálenost přemostění mezi jednotlivými sloupky se pohybuje do 3,4 mm. Taková vzdálenost je pro technologii SLM velmi obtížně dosažitelná. Varianta (b) nabízí shodnou kvalitu povrchu kontaktních ploch, které jsou tištěny ve svislé poloze. Jednotlivé sloupky jsou naopak tištěny ve vodorovném směru. Jejich převis (mezi patry) činí 2,8 mm a hrozí stejné problémy jako u předchozí varianty: Kompromisem je varianta (c), kde je součást umístěna pod úhlem 45° vůči směru tisku. U této varianty se u každého prvku z velké části nachází již ztuhlý materiál pod právě tištěnou vrstvou. Nikde tak nedochází ke stavbě kompletní vrstvy na práškovém podkladu. Na druhou stranu jsou všechny prvky tištěny jako skloněné části a projevuje se tak schodovitý efekt.



Obr. 5-15 Různá orientace součásti při tisku

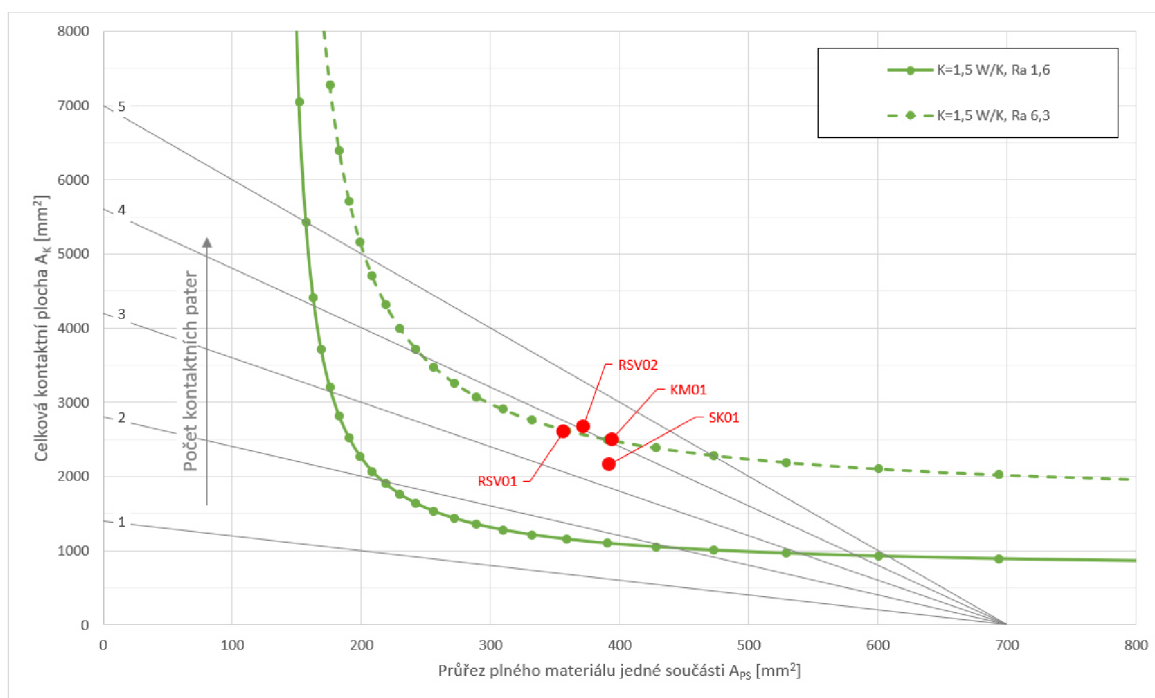
Při jakékoli orientaci je třeba pro dosažení požadované kontaktní vodivosti obrobít kontaktní plochy. Na základě rešeršní části je maximální drsnost povrchu po vytištění předpokládána do Ra 25 μm . V tomto konceptu lze použít konvenční metody obrábění pouze na spodní a horní disk CTB, nikoli však na kontakty jednotlivých částí. U těch přichází v úvahu několik nekonvenčních metod. Nabízí se např. tryskání, které je schopno odstranit hrubé nečistoty a snížit drsnost povrchu, nelze však předpokládat dosažení požadovaného Ra 1,6. Do stejné kategorie lze zařadit tzv. omílání (tumbling), kterým lze dosáhnout zlepšení povrchu v řádech několika desítek procent [39]. Mezi další možné metody spadá např. Abrasive Flow Machining (AFM), u kterého lze dosáhnout až 90% snížení drsnosti povrchu (u hrubých povrchů, vzniklých např. při odlévání) [40]. Funguje na principu proudění polotuhého materiálu s abrazivem okolo opracovávané součásti, čímž dochází k obrušování nerovností povrchu. Poslední navrhovanou variantou je použití elektrojiskrového obrábění (EDM), u kterého je materiál odebrán elektrickými výboji mezi elektrodou a obrobkem, který je umístěn v kapalném dielektriku. Pro použití této technologie by muselo být EDM zařízení upraveno takovým způsobem, aby bylo možno použití jedné části CTB namísto nástroje. Popis obrábění tímto způsobem nebyl v literatuře nalezen a jedná se tedy pouze o teoretickou možnost, vyžadující důkladné ověření funkčnosti.

5.3 Upravený model potřebného průřezu materiálu a kontaktní plochy

Na základě sloupkového konceptu byl upraven model z kap. 5.1.

Model přebírá rozložení a rozměry pater z konceptu SK01, tzn. pět kontaktních ploch rovnoměrně rozmístěných po výšce. Namísto původního předpokladu řazení součástí za sebe byl převzat model, ve kterém je průřez materiálu jedné části dvojnásobný v oblasti, kde se překrývají spodní a vrchní část CTB. Taková úprava má za následek vyšší přenos tepla plným materiálem a způsobí posun křivky směrem k nižším hodnotám na ose x.

Dále byly do grafu přidány čáry maximálního využitelného prostoru pro různý počet kontaktních pater. Jedná se o plné využití dostupné půdorysné plochy buď pro kontakt nebo plný materiál, který ve skutečnosti nelze dosáhnout kvůli nevyužitelným mezerám mezi pohyblivými částmi. Přidána byla také čára vodivosti při vyšší drsnosti povrchu Ra 6,3 a zpětně byly zakresleny hodnoty dalších konceptů. Porovnání konceptů je provedeno dále v kapitole 5.6.



5.4 Koncept mezikruží

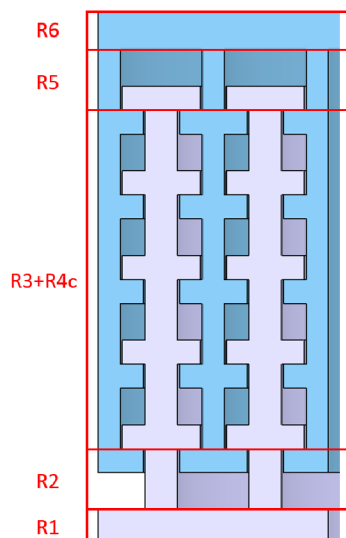
Tento koncept je tvořen kruhovými stěnami, jež jsou doplněny kontaktními výstupky, které zajišťují přenos tepla mezi vrchní a spodní částí. Oproti konceptu SK01 je materiál více pospolitý. To přináší výhodu ve formě nižší povrchové plochy, a tudíž lepšího využití

Celková kontaktní plocha	$A_k [mm^2]$	2503,9
Celková hmotnost struktury	$m [g]$	74,28

5.4.2 Termální výpočet

Analytické řešení

Analytické řešení bylo vypracováno analogicky ke konceptu SK01. Rozdělení na jednotlivé úseky je zobrazeno na Obr. 5-16. Rozměry a tepelné odpory úseků jsou vypsány v tab. 5-8.



Obr. 5-17 Rozdělení struktury KM01 na jednotlivé odpory

tab. 5-8 Jednotlivé tepelné odpory KM01

Odpor R_i	Plocha průřezu/kontaktu [mm ²]	Výška t [mm]	Tepelný odpor [K/W]
R ₁	1511,9	1,5	0,0066
R ₂	399,5	2,8	0,0467
R ₃	793,6	15,6	0,1310
R _{4c}	2503,9	-	0,1877
R ₅	394,1	2,8	0,0474
R ₆	2351,2	1,7	0,0048

Celkový odpor struktury: $R = 0,42425 \text{ K/W}$

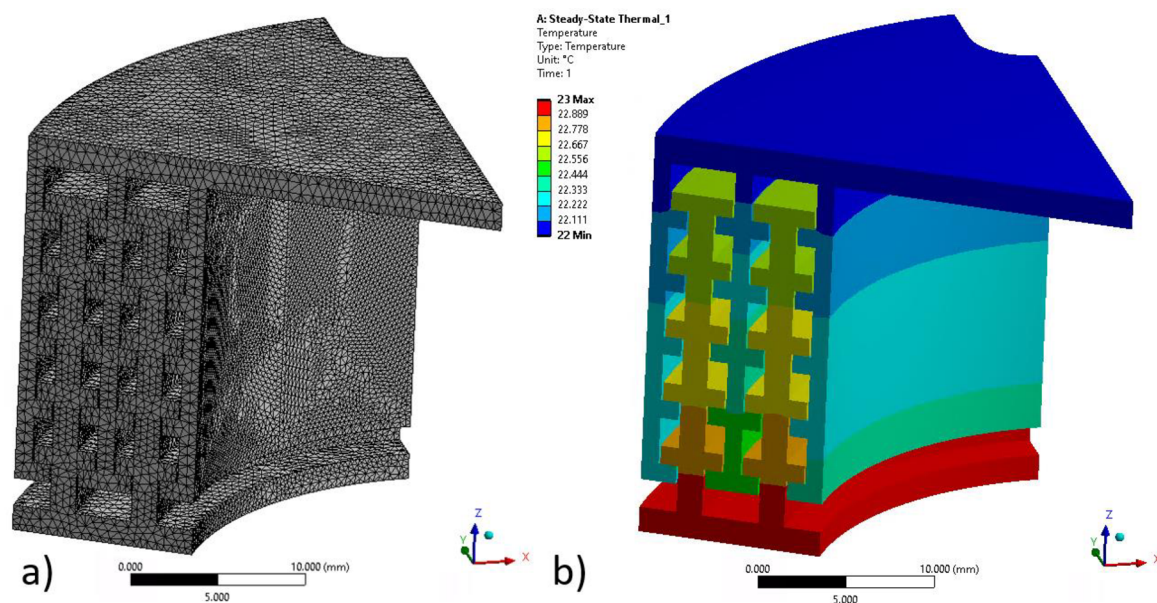
Celková vodivost struktury: $K = 2,3571 \text{ W/K}$

Numerické řešení

Numerická simulace byla opět provedena obdobně jako u konceptu SK01 (viz kap.5.2.2). V tab. 5-9 jsou shrnuty základní vstupní údaje.

tab. 5-9 Vstupní hodnoty pro termální analýzu (KM01)

Součinitel přestupu tepla α	2127,9 W/K ⁻¹ m ⁻²
Teplota spodní plochy	23 °C
Teplota vrchní plochy	22 °C
Typ kontaktů	bonded
Typ elementů	TET10 Thermal Solid, základní vel. 0,3 mm

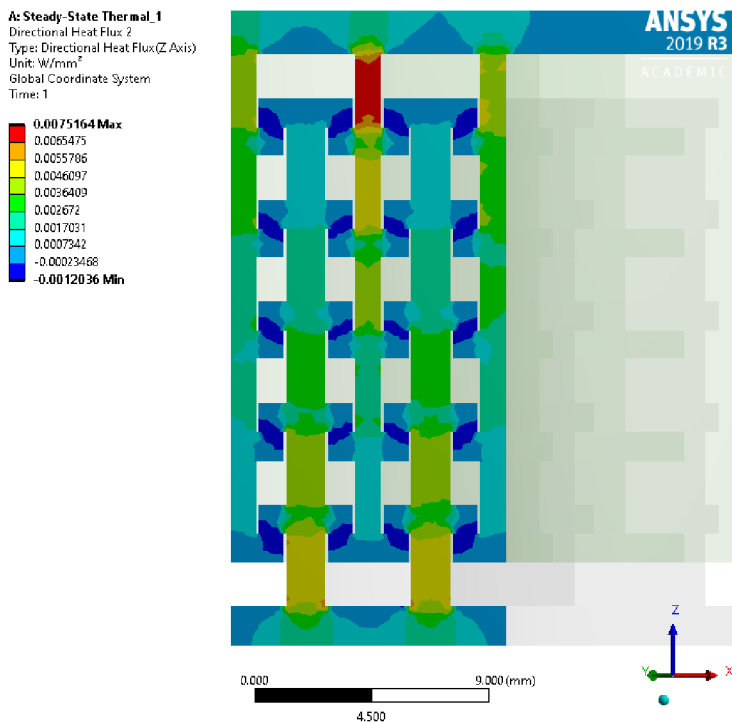


Obr. 5-18 a) Síť modelu, b) Rozložení teploty KM01

Tepelná vodivost modelu: $K_{1/6} = 0,3386$ W/K

Celková vodivost CTB: $K = 2,0318$ W/K

Na Obr. 5-19 je zobrazen tepelný tok součástí ve směru osy z. Z obrázku je patrná nadměrná koncentrace tepelného toku ve vrchní části prostřední kruhové stěny. Nerovnoměrnost tepelného toku v součásti značí nedokonalé rozložení hmoty. V tomto případě je třeba zvětšit šířku prostřední stěny a zmenšit šířku okrajových stěn vrchní části. Spodní část CTB je symetrická s kontaktními výstupky na obě strany, a proto je rozložení tepelného toku u obou stěn srovnatelný.



Obr. 5-19 Tepelný tok v ose z (KM01)

Porovnání analytického a numerického řešení

	Analytické řešení	Numerické řešení
Tepelná vodivost K [W/K]	2,3571	2,0318

Síla působící na CTB: $F = 1002 \text{ N}$

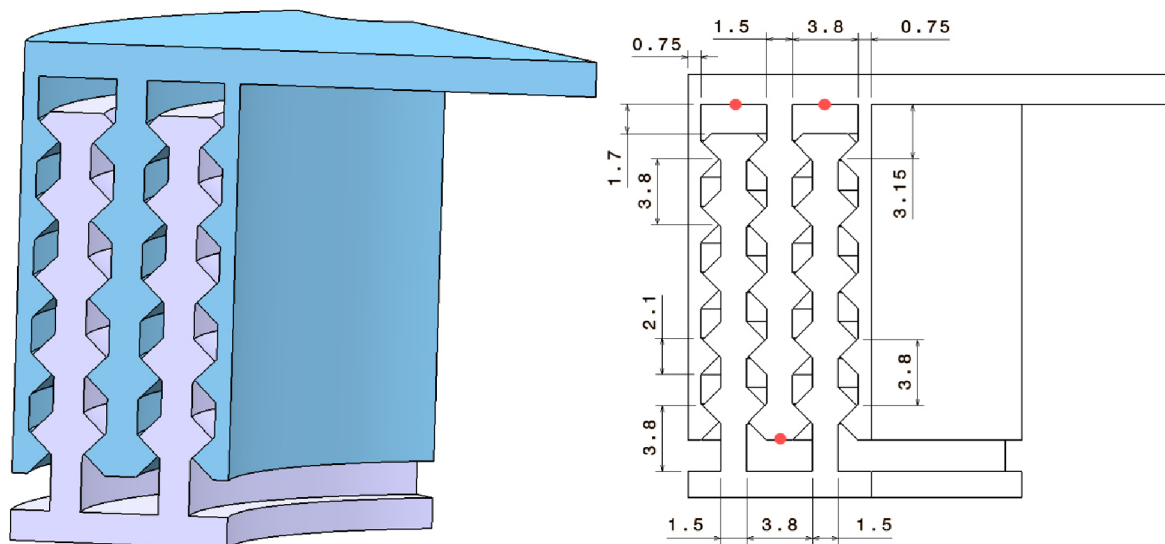
Numerické řešení je o 13,8 % nižší než analytické. Důvody jsou stejné jako u předchozího konceptu. Navíc k nižší vodivosti přispívá nerovnoměrné rozložení tepelného toku popsané výše. Výsledná síla, potřebná k vytvoření požadovaného kontaktního tlaku je vyšší než u konceptu SK01 díky vyšší kontaktní ploše.

5.4.3 Posouzení vyrobiteľnosti KM01

Koncept KM01 je tvořen kruhovými stěnami, které jsou vzájemně propojené pouze na jednom konci každé z obou částí (spodní a vrchní). Kontaktní výstupky vystupují symetricky na obě strany s výjimkou krajních stěn, které strukturu uzavírají. Z toho plyne, že při jakékoli orientaci při tisku bude značná část struktury tištěna bez podpory, pouze na kovovém prášku. Jako nejvhodnější orientace se jeví varianta tisku pod úhlem 45-60°, kde po vytištění spodní části (bez podpůrných struktur u vnitřních částí) bude u všech prvků alespoň částečná podpora z předchozích vrstev. Přesto je však výsledek velmi nejistý a lze předpokládat zhoršenou kvalitu.

5.4.4 Upravený návrh (KM02)

Na základě zjištěných nedostatků byla navržena úprava konceptu KM01. Úprava spočívá v zešíkmení kontaktních výstupků s cílem zlepšit vyrobiteľnosť součásti technologií SLM. Dále byla upravena šířka stěn vrchní části pro zvýšení celkové vodivosti součásti.



Obr. 5-20 Šestina modelu konceptu KM02 se základními rozměry

tab. 5-10 Parametry konceptu KM02

		Spodní část	Vrchní část
Tloušťka stěny mezikruží	$[mm]$	1,5	0,75; 1,5; 0,75
Počet soustředných mezikruží	$[-]$	2	3
Průřez materiálu v jedné součásti	$A_{PS} [mm^2]$	399,46	391,75
Plocha kontaktu v jedné kontaktní rovině	$A_{kl} [mm^2]$	500,8	
Počet kontaktů (pater)	$[-]$	5	
Celková kontaktní plocha	$A_k [mm^2]$	2503,9	
Celková hmotnost struktury	$m [g]$	73,17	

Pozn.: Kontaktní plocha převzata z KM01. Pro stejný součinitel přestupu tepla je třeba porovnávat plochy promítnuté do půdorysné roviny. V opačném případě by docházelo k vysokému nárůstu vodivosti a zároveň i potřebné síly k vyvození tlaku 0,4 MPa

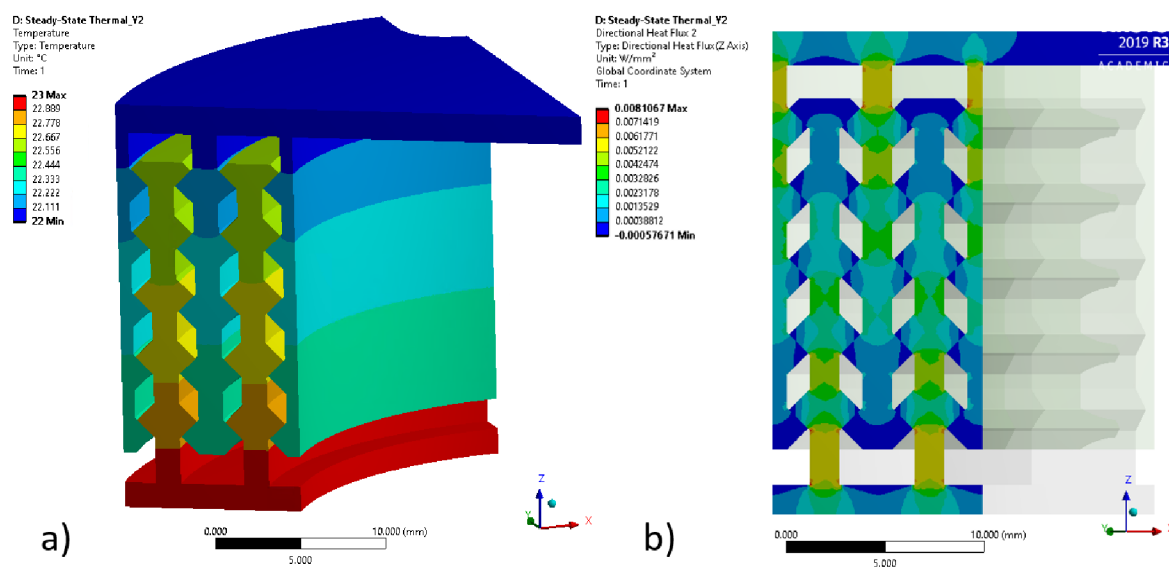
5.4.5 Termální výpočet

Ačkoli úpravou tlouštěk došlo k nepatrné změně ve velikosti průřezové plochy, nelze předpokládat velké změny v analytickém modelu. Ten nedokáže zohlednit např. úpravu šířek stěn, jelikož počítá pouze s celkovou průřezovou plochou.

Numerické řešení

Pro numerickou simulaci byly použity stejné vstupní parametry jako u konceptu KM01 kromě součinitele přestupu tepla. Ten byl v tomto případě vynásoben sinem 45° jelikož zvolený kontaktní tlak (který má značný vliv na součinitele přestupu tepla) je nutno brát do úvahy pouze ve svislém směru a nikoli jako normálový tlak na jakkoli skloněnou kontaktní plochu.

Součinitel přestupu tepla: $\alpha = 1504,6 \text{ W/m}^2\text{K}$



Obr. 5-21 a) Rozložení teploty, b) Tepelný tok v ose z (KM02)

Tepelná vodivost modelu: $K_{1/6} = 0,3744 \text{ W/K}$

Celková vodivost CTB: $K = 2,2463 \text{ W/K}$

Obr. 5-21b) ukazuje rozložení tepelného toku po úpravě geometrie. Lze pozorovat, že nedochází k významným rozdílům mezi jednotlivými stěnami ve stejné výšce. Další úpravou pro snížení rozdílů v tepelném toku je změna šířky stěny se změnou výšky, resp. zvětšení šířky u kořene každé části a snížení ve vzdálenějších místech.

Z výsledků plyne nárůst tepelné vodivosti oproti KM01 o 9,5 %.

5.4.6 Posouzení vyrobiteľnosti KM02

Tento koncept byl vytvořen s cílem dosáhnout dostatečné vyrobiteľnosti pomocí SLM. Předpokládaná orientace je v základním tvaru, tedy se svislými stěnami orientovanými ve směru tisku. Všechny kontaktní výstupky jsou v takové orientaci tisknuty pod úhlem 45°. Přesto se však vyskytují oblasti tisknuté pouze na práškovém podkladu. Jedná se o spodní část prostřední stěny, kam nemohou být umístěny podpůrné struktury (jako u vnějších stěn), a vrchní desku CTB v místech vnitřní struktury. Tyto místa jsou zvýrazněny na Obr. 5-20 červenými body. V těchto oblastech je třeba nastavit vhodné výrobní parametry, aby

nedocházelo k nežádoucí deformaci. Pro ukotvení prostřední stěny vrchní části přichází v úvahu pevné spojení se spodní částí na několika místech, které by bylo možné odebrat odvrtáním odspodu. Ukotvení by zaručilo přesnější výrobu s nižším rizikem vzniku deformace.

Z hlediska obrobitelnosti funkčních ploch jsou možnosti obdobné jako u konceptu SK01 (viz kap. 5.2.5). Vzhledem k uzavřenému boxu, který představuje KM02 i KM01, jsou možnosti tryskání nebo omílání značně omezeny. Použití metody AFM vyžaduje vytvoření technologických otvorů, avšak vhodnost této technologie vyžaduje detailnější analýzu, která jde nad rámec této práce. Další možností je použití EDM, pro které platí stejná omezení uvedená u konceptu SK01. Omezené možnosti obrábění snižují perspektivu konceptu a jsou největší překážkou k úspěšnému dosažení požadovaných vlastností.

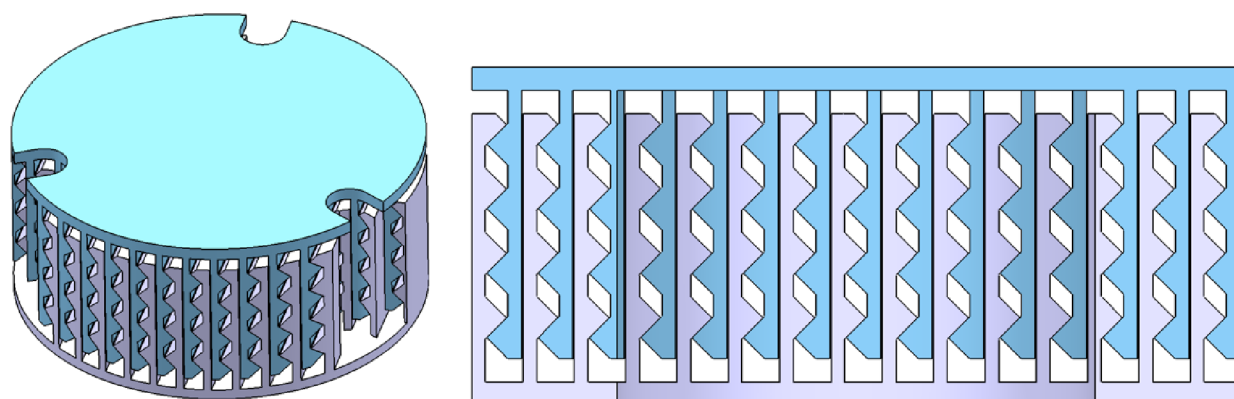
5.5 Rovnoběžné stěny

Koncept částečně vychází z návrhu KM02, avšak stěny jsou orientovány rovnoběžně namísto do kružnic. To umožní přístup ke kontaktním plochám při finálním opracování.

5.5.1 Počáteční návrh (RSV01)

S cílem zajistit co nejlepší vyrobitelnost jsou navrženy jednostranné výstupky na vertikálních stěnách. Při vhodné orientaci lze všechny kontaktní plochy vnitřní struktury tisknout ve svislé poloze, což zajistí nejnižší možnou drsnost povrchu těchto ploch. Nevýhodou nesymetrických prvků je vznik ohybových napětí, které mohou způsobit nadměrnou deformaci svislých stěn.

Na Obr. 5-22 je zobrazen model konceptu RSV01. Základní vlastnosti modelu jsou uvedeny v tab. 5-11.



Obr. 5-22 Koncept RSV01

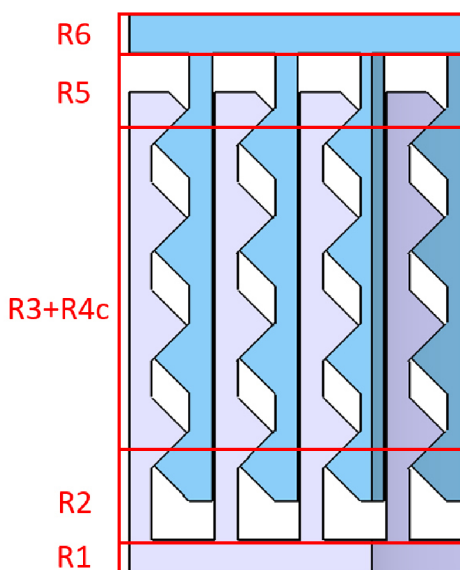
tab. 5-11 Parametry konceptu KM01

Tloušťka svislých stěn		1 mm
Počet stěn v jedné části		15
Celkový průřez materiálu v 1 součásti	A_{PS}	356,5 mm ²
Plocha 1 kontaktu	A_{KI}	521,35 mm ²
Počet kontaktních ploch (pater)		5
Celková kontaktní plocha	A_K	2606,75 mm ²
Celková hmotnost struktury	m	71,93 g

5.5.2 Termální výpočet

Analytické řešení

Analytický výpočet byl proveden obdobným způsobem jako u předchozích konceptů. Výšky jednotlivých částí jsou umístěny do středu kontaktních ploch (viz Obr. 5-23). Tepelné odpory a rozměry jsou uvedeny v tab. 5-12.



Obr. 5-23 Rozdělení RSV01 na jednotlivé odpory

tab. 5-12 Jednotlivé tepelné odpory RSV01

Odpor R_i	Plocha průřezu/kontaktu [mm ²]	Výška t [mm]	Tepelný odpor [K/W]
R_1	1511,9	1,5	0,0066
R_2	356,5	3,91	0,0731
R_3	712,9	14,04	0,1313
R_{4c}	2606,8	-	0,1803
R_5	356,5	3,25	0,0608
R_6	2351,2	1,7	0,0048

Celkový odpor struktury: $R = 0,4569 \text{ K/W}$

Celková vodivost struktury: $K = 2,1885 \text{ W/K}$

Numerické řešení

Numerický výpočet byl proveden na celé struktuře. Součinitel přestupu tepla byl použit stejný jako v kap. 5.4.5. V tab. 5-13 jsou shrnuty vstupní údaje pro výpočet.

tab. 5-13 Vstupní hodnoty pro termální analýzu (RSV01)

Součinitel přestupu tepla α	1504,6 W/K ⁻¹ m ⁻²
Teplota spodní plochy	23 °C
Teplota vrchní plochy	22 °C
Typ kontaktů	bonded
Typ elementů	TET10 Thermal Solid, základní vel. 0,35 mm

Celková vodivost CTB: $K = 1,9091 \text{ W/K}$

Porovnání analytického a numerického řešení

	Analytické řešení	Numerické řešení
Tepelná vodivost K [W/K]	2,1885	1,9091

Síla působící na CTB: $F = 1042,7 \text{ N}$

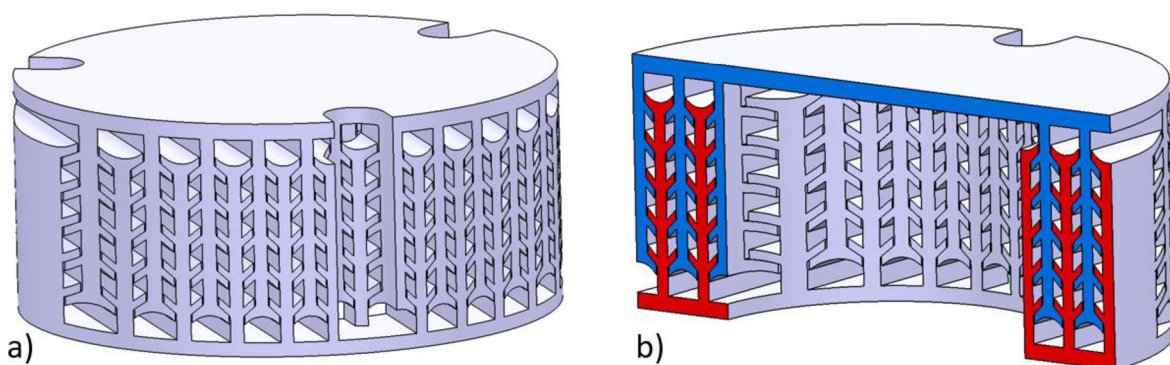
Výsledek numerického řešení je o 12,8 % nižší oproti řešení analytickému. Důvodem mohou být poměrně tenké svislé struktury, které jsou restriktivnější pro přenos tepla.

5.5.3 Posouzení vyrobiteľnosti RSV01

Tento koncept je navržen s cílem dosáhnout co nejsnazší výroby technologií SLM. Vzhledem rovnoběžnosti stěn jsou přístupné spodní části, kde mohou být vytvořeny a následně odebrány podpurné struktury. Při orientaci součásti pod úhlem 45° lze docílit tisku kontaktních ploch ve svislém směru, u kterého je dosažitelná drsnost povrchu až Ra 4. To může velmi usnadnit následné opracování kontaktních ploch, které lze provádět širším množstvím technologických postupů. Kromě netradičních postupů uvedených u předchozích konceptů zde připadají v úvahu i běžné operace jako např. broušení a leštění kartáči pomocí konvenčních strojních zařízení. Nižší tepelná vodivost tak může být částečně kompenzována lepší kvalitou kontaktních povrchů.

5.5.4 Upravený návrh (RSV02)

Koncept RSV02 vychází z předchozího návrhu, zaměřeného na výrobitelnost. Je tvořen rovnoběžnými stěnami s kontaktními výstupky symetricky po obou stranách. Předpokladem je výroba obou součástí v celku, jako jeden kus. Po vytištění proběhne oddělení pomocí drátového řezání. Výroba součástí dohromady přináší několik výhod. Není nutno vytvářet podpůrné struktury pro vrchní část CTB, lze tisknout v základní poloze a lze použít symetrické prvky pro zamezení nežádoucího ohýbání stěn.



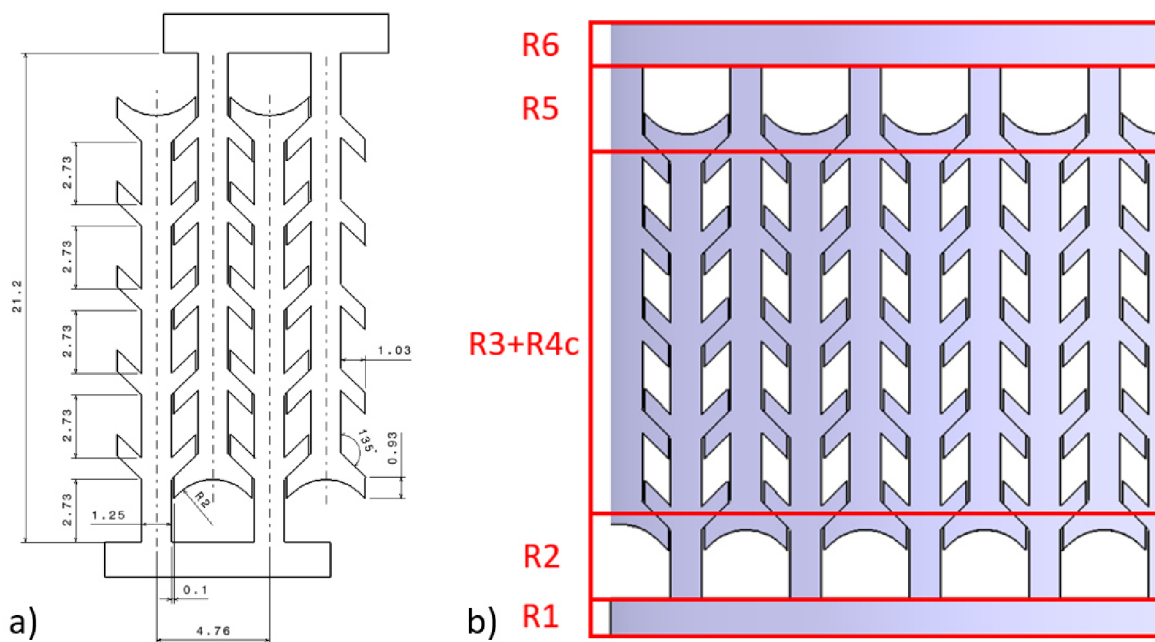
Obr. 5-24 Koncept RSV02

Návrh základních rozměrů a analytické řešení

Navržené rozměry jsou vypsány v tab. 5-14. Ze zkušeností s předchozím konceptem byly počty stěn a jejich tloušťka navrženy takovým způsobem, aby vnitřní plocha válcového otvoru v CTB, v místě tečném vůči orientaci stěn, protínala stěnu jedné ze součástí (při zachování dostatečné tloušťky pro tisk), a nikoli kontaktní prostor (viz Obr. 5-24b). To by mělo za následek nárůst nevyužitelného prostoru. Na Obr. 5-25a) jsou znázorněny základní rozměry navržených součástí.

tab. 5-14 Parametry konceptu RSV02

Tloušťka svislých stěn		1,25 mm
Počet stěn v jedné části		12
Celkový průřez materiálu v 1 součásti	A_{PS}	371,9 mm ²
Plocha 1 kontaktu	A_{KI}	535,72 mm ²
Počet kontaktních ploch (pater)		5
Celková kontaktní plocha	A_K	2678,6 mm ²
Celková hmotnost struktury	m	69,24 g



Obr. 5-25 a) Základní rozměry, b) Rozdělení odporů (RSV02)

tab. 5-15 Jednotlivé tepelné odpory RSV02

Odpor R_i	Plocha průřezu/kontaktu [mm ²]	Výška t [mm]	Tepelný odpor [K/W]
R ₁	1511,9	1,5	0,0066
R ₂	371,9	3,29	0,0590
R ₃	743,8	14,62	0,1310
R _{4C}	2678,6	-	0,1755
R ₅	372	3,29	0,0590
R ₆	2351,2	1,7	0,0048

Celkový odpor struktury: $R = 0,4359$ K/W

Celková vodivost struktury: $K = 2,2942$ W/K

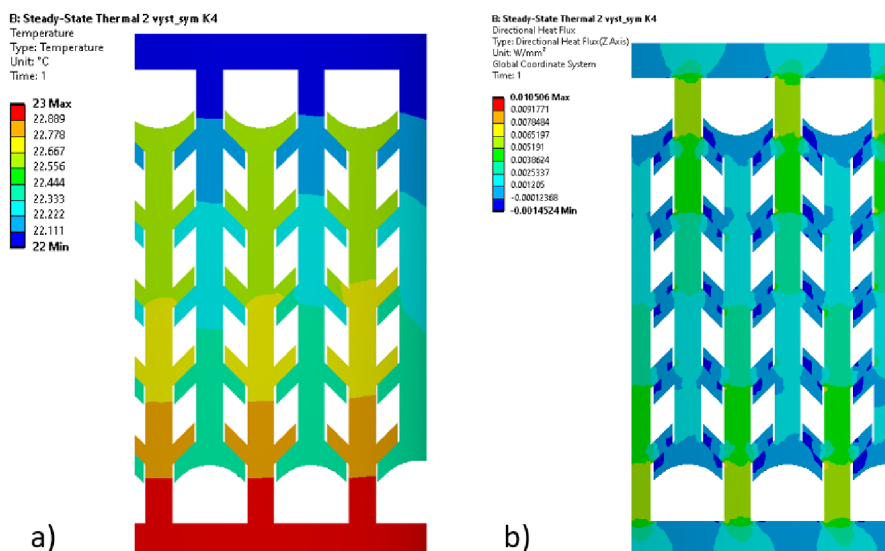
Numerické řešení

Postup výpočtu je shodný s výpočtem v kap. 5.5.2

tab. 5-16 Vstupní hodnoty pro termální analýzu (RSV02)

Součinitel přestupu tepla α	1504,6 W/K ⁻¹ m ⁻²
Teplota spodní plochy	23 °C
Teplota vrchní plochy	22 °C
Typ kontaktů	bonded
Typ elementů	TET10 Thermal Solid, základní vel. 0,35 mm

Celková vodivost CTB: $K = 2,078$ W/K



Obr. 5-26 Výsledky numerické simulace RSV02: a) Rozložení teploty, b) Tepelný tok v ose z

Porovnání analytického a numerického řešení

	Analytické řešení	Numerické řešení
Tepelná vodivost K [W/K]	2,2942	2,078

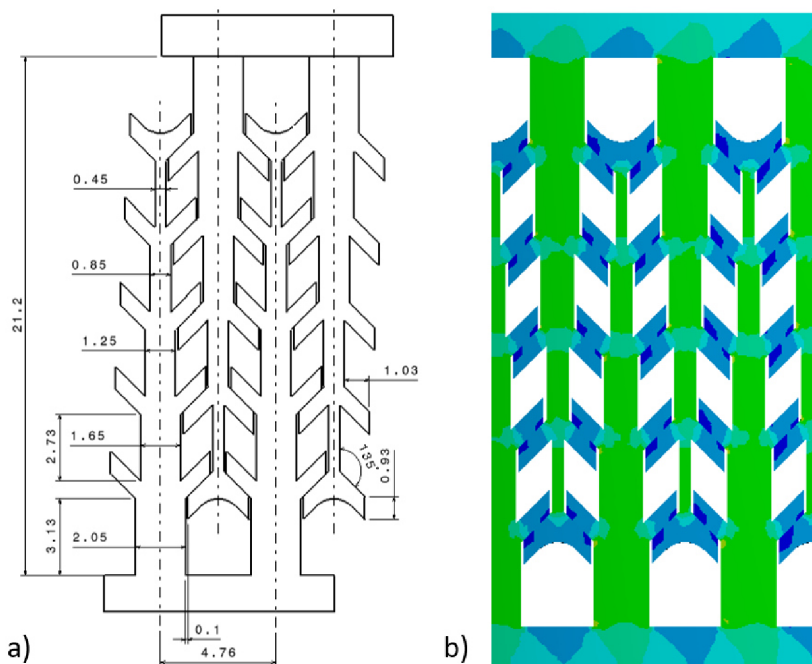
Síla působící na CTB: $F = 1071,4 \text{ N}$

5.5.5 Posouzení vyrobitelnosti

Tento koncept je založen na předpokladu vytištění pevně spojených součástí a jejich následném rozříznutí v místě kontaktních ploch. To lze učinit např. velmi přesnou technologií elektrojiskrového řezání EDM (WEDM). Řezáním touto technologií lze docílit kvalitního povrchu bez nutnosti dalších zásahů. Nevýhodou je nemožnost tisku součástí CTB spolu se základní deskou tepelného spínače.

5.5.6 Vliv změny tloušťky po výšce stěny

Koncept RSV02 byl použit pro posouzení vlivu proměnlivé tloušťky s výškou stěn. Byla provedena úprava geometrie sloupků s cílem dosáhnout lepší tepelné vodivosti. Jak je patrné z Obr. 5-26b), při konstantním průřezu stěny dochází k nerovnoměrnému tepelnému toku po výšce. Proto byla navržena proměnná tloušťka, odstupňovaná podle jednotlivých pater. Velikost kontaktních výstupků zůstala zachována, jelikož odstupňování je symetrické od prostředního mezipatra, které si zachovává původní tloušťku 1,25 mm (viz Obr. 5-27a). V každém mezipatře je rozdíl v tloušťce oproti sousednímu mezipatru 0,4 mm.



Obr. 5-27 a) Upravené rozměry stěn, b) Rozložení tepelného toku v ose z

Analýza byla provedena numerickou simulací se stejnými vstupními hodnotami jako předchozí výpočet.

Celková vodivost CTB po úpravě: $K = 2,3046 \text{ W/K}$

Výsledná tepelná vodivost vzrostla o 10,9 %. Lze předpokládat, že k podobnému nárůstu dojde i u ostatních variant. Z hlediska výroby tiskem může být u některých konceptů problematická tenká struktura horní části CTB, u které hrozí deformace při nedostatečném ukotvení.

5.6 Celkové zhodnocení návrhů

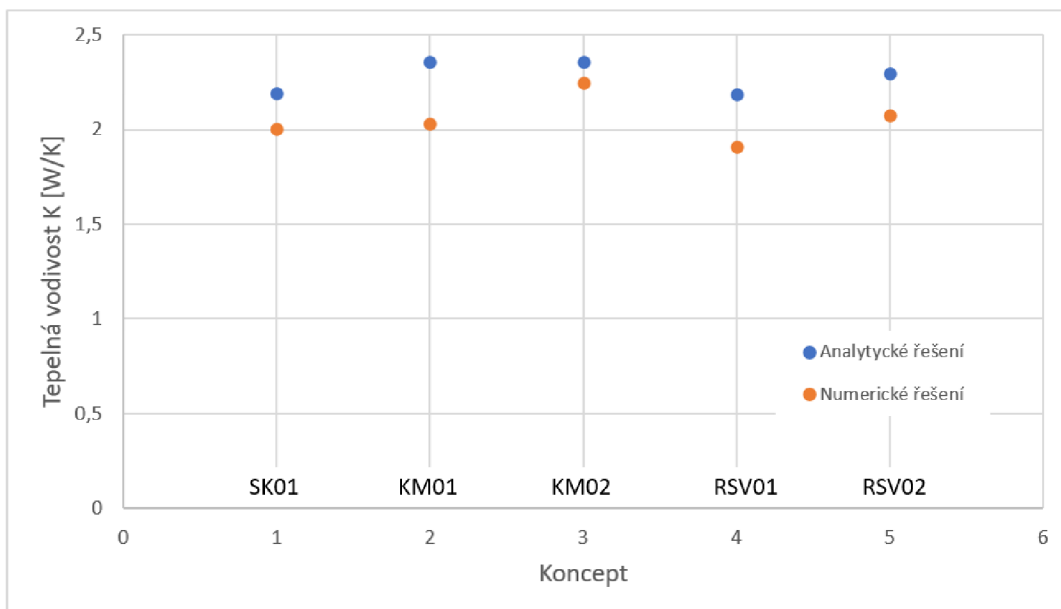
V tab. 5-17 jsou shrnuty nejdůležitější výstupní parametry jednotlivých konceptů, které budou dále porovnány.

tab. 5-17 Výsledné parametry všech konceptů

		1	2	3	4	5
		SK01	KM01	KM02	RSV01	RSV02
Hmotnost	$m [g]$	72,5	74,28	73,17	71,93	69,26
Tepelná vodivost analyticky	$K [W/K]$	2,1895	2,3571	2,3571	2,1885	2,2942
Tepelná vodivost numericky	$K [W/K]$	2,005	2,0318	2,2463	1,9091	2,078
Specifický parametr	$\frac{K}{m} [W/(kgK)]$	27,66	27,35	30,7	26,54	30,01
Síla působící na CTB	$F [N]$	865	1002	1002	1042	1071

Zhodnocení z hlediska tepelné vodivosti

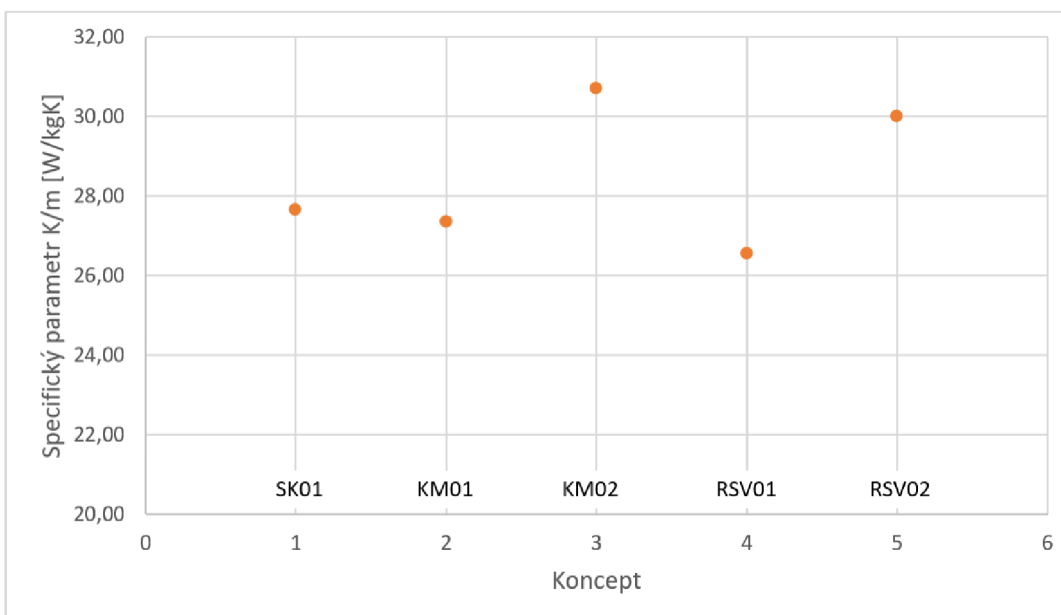
Obr. 5-28 shrnuje dosažené tepelné vodivosti jednotlivých konceptů. Jsou v něm zahrnuty výsledky analytického i numerického řešení. Nejvyšších hodnot tepelné vodivosti dosahuje koncept KM02. Dosažená vodivost je dle numerického výpočtu je 2,357 W/K. Rozdíl mezi konceptem s nejvyšší tepelnou vodivostí (KM02) a nejnižší (RSV01) je 15%.



Obr. 5-28 Tepelná vodivost jednotlivých konceptů

Specifický parametr K/m

Jelikož hmotnost struktury je důležitým kritériem, je zde porovnána tepelná vodivost vůči hmotnosti struktury. Z důvodu vyšší přesnosti výsledků tepelné vodivosti numerickým řešením, je specifický parametr počítán pouze s výsledkem numerického řešení.



Obr. 5-29 Specifický parametr jednotlivých konceptů

Nejvyšších hodnot dosahuje opět koncept KM02 s 30,7 W/kgK. Vysoké hodnoty dosahuje i koncept RSV02 s 30 W/kgK. Jako nejhorší se jeví koncept RSV01s 26,5 W/kgK, což je o 13,7% nižší výsledek oproti KM02.

Nejnižší hmotnost struktury je 69,3 g, což nespĺňuje požadavek na maximální hmotnost, který je 55 g. Vzhledem k vyšší vypočítané tepelné vodivosti přichází v úvahu zmenšení struktury CTB a tím dosažení nižší hmotnosti.

Výsledná síla působící na CTB

Se vzrůstající kontaktní plochou roste také potřebná síla na dosažení kontaktního tlaku 0,4 MPa. Jak je patrné z tab. 5-18, jednotlivé koncepty předpokládají různou hodnotu tlaku v parafínové kapsli. Nutno podotknout, že všechny hodnoty tlaku parafínu jsou značně vysoké, a mohou negativně ovlivňovat jiné součásti tepelného spínače. Vysoké hodnoty mohou také přispět k vyšší deformaci spínače a redukovat tak kontaktní plochy spínače.

tab. 5-18 Odhad tlaku v parafínové kapsli

		SK01	KM01	KM02	RSV01	RSV02
Výsledná síla	$F [N]$	865	1002	1002	1042	1071
Odhad tlaku v parafínové kapsli	$p [MPa]$	20,37	21,92	21,92	22,38	22,71

Zhodnocení vyrobiteľnosti

Vyrobiteľnost konceptů je důležitou součástí návrhu. Jako nejlépe hodnocené jsou z tohoto hlediska koncepty RSV, které jsou relativně snadno přístupné postprocessingovým úkonům. Koncept RSV02, jenž je tisknut jako jedna součást a následně rozříznut v kontaktních místech, je varianta s nejlepšími kontaktními plochami. Stejný postup lze aplikovat i na koncept RSV01. U tohoto konceptu je výhodou možnost tisku současně se základní deskou tepelného spínače.

Koncepty KM01 a KM02 vychází z hlediska vyrobiteľnosti jako nejobtížnější. Především kvůli nepřístupnosti vnitřních prostor kruhového tvaru je obtížně zajistitelné obrobení kontaktních ploch. Také nemožnost umístění dostatečného počtu podpůrných struktur pod převislé plochy snižuje potenciál obou variant.

Koncept SK01 leží někde mezi předchozími koncepty. Struktura není uzavřená, avšak díky značné komplexnosti je použití běžných postupů značně omezené. Jako vhodný způsob dokončovacích operací se jeví použití AFM. Tisk součásti je proveditelný za předpokladu důkladného nastavení SLM zařízení, jelikož všechny části struktury musí být tištěny skloněny pod úhlem 45°, aby nedocházelo k tisku velkých oblastí na práškovém podkladu.

6 ZÁVĚR

V této práci byly představeny koncepční návrhy pro teplovodivou strukturu miniaturního tepelného spínače, který je určen pro použití v kosmu jako regulátor teploty např. elektronických zařízení. Teplovodivá struktura musí mít možnost pohybu, korespondujícím s pohybem parafínového aktuátoru. Zaměření práce je na výrobu součástí pomocí kovové aditivní technologie SLM. Ta je specifická některými požadavky na tvar výrobků a vyznačuje se obvykle hrubším povrchem vyrobených součástí.

Na základě rešeršní části byly stanoveny dosažitelné parametry tisku, jako např. maximální sklon součástí, minimální tloušťka prvků nebo drsnost povrchu. Byly stanoveny materiály, které jsou vhodné pro SLM a zároveň dosahují vysoké tepelné vodivosti.

V další části byly navrženy tři základní uspořádání teplovodivé struktury, které byly rozšířeny o další dvě, které z těch předchozích vycházejí. U každé navržené struktury byl proveden analytický výpočet přestupu tepla, který byl ověřen a zpřesněn numerickou simulací. Výsledné hodnoty tepelné vodivosti překračují požadovanou vodivost a nabízí tak prostor k dalšímu snižování hmotnosti, která ve všech představených návrzích překračuje požadavek na její maximální hodnotu.

Důležitým parametrem je součinitel přestupu tepla, který výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti. Správné určení součinitele je podstatným krokem ke správnému návrhu. Jednou ze vstupních veličin, které na něj mají značný vliv, je drsnost povrchu kontaktních ploch. Pro dosažení dostatečného přestupu tepla je nutno snížit drsnost povrchu kontaktních ploch obráběním. Dalším důležitým parametrem je kontaktní tlak mezi součástmi. Ten musí být vyvozen parafínovou kapslí. Odhad potřebného tlaku v parafínové kapsli ukázal poměrně vysoké hodnoty. U jedné ze struktur byla provedena pevnostní kontrola, která ukázala hraniční hodnoty napětí. V dalším výzkumu by bylo vhodné provést detailnější rozbor pevnostního charakteru, který by popsal deformaci součástí tepelného spínače a její vliv na kontaktní tepelnou vodivost. Další málo popsanou oblastí je možnost zlepšování povrchu vytištěných součástí s komplexní geometrií.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAŠEK, Jakub. Thermo-vacuum test chamber development for airborne and space equipment testing in simulated extreme conditions. *ICAS 2018* [online]. Belo Horizonte, Brazílie, 2018 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0548_paper.pdf
- [2] ESA. *Statement of Work – Miniaturised Heat Switch: Appendix 1 to ITT 1-6801/11/NL/NA*. TEC-MTT/2011/3756/In/SL. Keplerlaan 1, 2200 AG Noordwijk zh, The Netherlands, 2011.
- [3] Additive Design for Aerospace Applications Capabilities: ADAAC-DEL-WP2-D3 Report – Preliminary Design of Additive Components. BUT Brno, 2019, 33 s.
- [4] MAŠEK, Jakub, Marek HORÁK a Pavel ZIKMUND. *Miniaturized Thermal Switch: Report on BB Testing*. Letecký ústav, FSI VUT v Brně, 2018. LU33-2017-MHS.PR.
- [5] NEMATOLLAHI, Mohammadreza, Ahmadreza JAHADAKBAR, Mohammad Javad MAHTABI a Mohammad ELAHINIA. Additive manufacturing (AM). *Metals for Biomedical Devices* [online]. Elsevier, 2019, 331-353 [cit. 2020-05-29]. DOI: 10.1016/B978-0-08-102666-3.00012-2. ISBN 9780081026663. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081026663000122>
- [6] BŘEZINA, Josef. Návrh aditivně vyráběného tepelného výměníku olej-voda pro formuli student. Brno, 2019, 138 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116125>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Daniel Koutný
- [7] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, **211**(2), 275-284 [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610003018>
- [8] YAP, C. Y., C. K. CHUA, Z. L. DONG, Z. H. LIU, D. Q. ZHANG, L. E. LOH a S. L. SING. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews* [online]. 2015, **2**(4) [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.1063/1.4935926. ISSN 1931-9401. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4935926>
- [9] MACONACHIE, Tobias, Martin LEARY, Bill LOZANOVSKI, Xuezhe ZHANG, Ma QIAN, Omar FARUQUE a Milan BRANDT. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design* [online]. 2019, **183** [cit.

- 2020-06-05]. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127519305751>
- [10] ZHENG DONG, Liu. *Economic comparison of selective laser melting and conventional subtractive manufacturing processes*. Boston, Massachusetts, 2017. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/2047/D20249117>. Masters theses. Northeastern University.
- [11] FATERI, Miranda a Maziar KHOSRAVI. On-site Additive Manufacturing by Selective Laser Melting of composite objects. *Concepts and Approaches for Mars Exploration* [online]. 2012 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/marsconcepts2012/pdf/4368.pdf>
- [12] PENG, Tao, Karel KELLENS, Renzhong TANG, Chao CHEN a Gang CHEN. Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**, 694-704 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1016/j.addma.2018.04.022. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860417302646>
- [13] Gooseneck Krueger Flap Actuation Bracket. *SLM Solutions* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/Case_Study_Ascos_Gooseneck_Bracket1912.pdf
- [14] Future Ariane Propulsion Module: Simplified by Additive Manufacturing. *EOS* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www.eos.info/01_parts-and-applications/case_studies_applications_parts/_case_studies_pdf/en_cases/cs_m_aero_space_arianegroup_en.pdf
- [15] CHANGHUI, Song, Yang YONGQIANG, Ye ZIHENG a Wang DI. Digital design and direct manufacturing of non-assembly mechanisms by selective laser melting. In: *2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 142-144 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1109/ISAM.2013.6643511. ISBN 978-1-4799-1657-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6643511/>
- [16] SU, Xubin, Yongqiang YANG, Di WANG a Yonghua CHEN. Digital assembly and direct fabrication of mechanism based on selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2013, **19**(3), 166-172 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1108/13552541311312157. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552541311312157/full/html>
- [17] BOSCHETTO, A. a L. BOTTINI. Manufacturability of non-assembly joints fabricated in AlSi10Mg by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **37**, 425-437 [cit. 2020-06-07]. DOI:

- 10.1016/j.jmapro.2018.12.021. ISSN 15266125. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612518312246>
- [18] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ziheng YI a Xubin SU. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **65**(9-12), 1471-1484 [cit. 2020-06-09]. DOI: 10.1007/s00170-012-4271-4. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4271-4>
- [19] WANG, Di, Shibiao WU, Yuchao BAI, Hui LIN, Yongqiang YANG a Changhui SONG. Characteristics of typical geometrical features shaped by selective laser melting. *Journal of Laser Applications* [online]. 2017, **29**(2) [cit. 2020-06-10]. DOI: 10.2351/1.4980164. ISSN 1042-346X. Dostupné z: <http://lia.scitation.org/doi/10.2351/1.4980164>
- [20] CALIGNANO, F., G. CATTANO a D. MANFREDI. Manufacturing of thin wall structures in AlSi10Mg alloy by laser powder bed fusion through process parameters. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2018, **255**, 773-783 [cit. 2020-06-10]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.01.029. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361830030X>
- [21] MAJEED, Arfan, Altaf AHMED, Abdus SALAM a Muhammad Zakir SHEIKH. Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* [online]. 2019, **2**(4), 288-295 [cit. 2020-06-10]. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2019.08.001. ISSN 25888404. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2588840419300708>
- [22] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2014, **64**, 203-213 [cit. 2020-06-10]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.043. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914005755>
- [23] YADROITSEV, Igor. *Selective laser melting: direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders*. Saarbrücken: LAP Lambert, c2009. ISBN 9783838317946.
- [24] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2014, **1-4**, 77-86 [cit. 2020-06-10]. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.001. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860414000062>

- [25] EOS GMBH – ELECTRO OPTICAL SYSTEMS. *Material data sheet: EOS Aluminium AlSi10Mg* [online]. 2014, 5 s. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://gpiprototype.com/images/PDF/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf
- [26] CHEN, Hongyu, Dongdong GU, Jiapeng XIONG a Mujian XIA. Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **250**, 99-108 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.044. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013617302728>
- [27] PAKKANEN, Jukka, Flaviana CALIGNANO, Francesco TREVISAN, Massimo LORUSSO, Elisa Paola AMBROSIO, Diego MANFREDI a Paolo FINO. Study of Internal Channel Surface Roughnesses Manufactured by Selective Laser Melting in Aluminum and Titanium Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. 2016, **47**(8), 3837-3844 [cit. 2020-06-13]. DOI: 10.1007/s11661-016-3478-7. ISSN 1073-5623. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-016-3478-7>
- [28] MAŠEK, Jakub, Daniel KOUTNÝ a Robert POPELA. Thermal conductivity of Cu7.2Ni1.8Si1Cr copper alloy produced via SLM and ability of thin-wall structure fabrication. In: *13th Research and Education in Aircraft Design: Conference proceedings* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2018, 2019, s. 119-129 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.13164/conf.read.2018.12. ISBN 978-80-214-5696-9. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/137300>
- [29] CHARLES, Amal, Ahmed ELKASEER, Lore THIJS, Veit HAGENMEYER a Steffen SCHOLZ. Effect of Process Parameters on the Generated Surface Roughness of Down-Facing Surfaces in Selective Laser Melting. *Applied Sciences* [online]. 2019, **9**(6) [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.3390/app9061256. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/6/1256>
- [30] CONSTANTIN, Loic, Zhipeng WU, Nan LI, Lisha FAN, Jean-François SILVAIN a Yong Feng LU. Laser 3D printing of complex copper structures. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **35** [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101268. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860420306400>
- [31] SÉLO, Richard R.J., Sam CATCHPOLE-SMITH, Ian MASKERY, Ian ASHCROFT a Christopher TUCK. On the thermal conductivity of AlSi10Mg and lattice structures made by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **34** [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101214. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860420305868>
- [32] FIOCCHI, J., C.A. BIFFI a A. TUISSI. Selective laser melting of high-strength primary AlSi9Cu3 alloy: Processability, microstructure, and mechanical properties. *Materials & Design* [online]. 2020, **191** [cit. 2020-06-14]. DOI:

- 10.1016/j.matdes.2020.108581. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127520301155>
- [33] SLM SOLUTIONS GROUP AG. *Material Data Sheet: Al-Alloy AlSi9Cu3* [online]. 2019 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_AL-Alloy_AISI9Cu3_0219.pdf
- [34] SLM SOLUTIONS GROUP AG. *Material Data Sheet: Al-Alloy AlSi7Mg0,6* [online]. 2019 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_Al-Alloy_AISI7Mg0_6_0219.pdf
- [35] AIRBUS APWORKS GMBH. *Material Data Sheet - Scalmalloy®* [online]. 2017, 4 s. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.apworks.de/wp-content/uploads/2015/07/20170217_SCALMALLOY_Extended_REV0008.pdf
- [36] BEJAN, Adrian a Allan D. KRAUS. *Heat transfer handbook*. Hoboken (New Jersey): Wiley, 2003. ISBN 04-713-9015-1.
- [37] MATEÁŠIK, Timko Marek. *Tepelný přechodový odpor plošných kontaktů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117064>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Jakub Mašek.
- [38] SOLVAY SPECIALTY POLYMERS. *Technical Data Sheet: Torlon® 4203L* [online]. 2016, 6 s. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://catalog.ides.com/datasheet.aspx?I=42041&FMT=PDF&E=1455>
- [39] LESYK, D.A., S. MARTINEZ, B.N. MORDYUK, V.V. DZHEMELINSKYI, A. LAMIKIZ a G.I. PROKOPENKO. Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2020, **381** [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125136. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897219311272>
- [40] SANKAR, M. Ravi, V. K. JAIN a J. RAMKUMAR. *Abrasive flow machining (AFM): An Overview* [online]. 2011 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/228747468>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Schéma tepelného spínače [3]

Obr. 2-2 Teplovodivá struktura CTB [3]

Obr. 2-3 Příklady vybraných flexibilních struktur [3]

Obr. 2-4 Princip metody SLM [6]; [7]

Obr. 2-5 Příklady využití SLM: a) Závěs Krügerovy klapky [13], b) Vstřikovací hlava raketového motoru [14]

Obr. 2-6 a) Různé zakřivení spoje; b) Řez jedním z vytištěných vzorků [17]

Obr. 2-7 Vybrané procesní parametry SLM [6] [24]

Obr. 2-8 a) Princip vzniku warping efektu; b) Znázornění akumulované deformace [18]

Obr. 2-9 Tenké stěny vyrobené technologií SLM: a) [19] b) [20]

Obr. 2-10 a) Znázornění schodovitého efektu [6] [19], b) Princip tvorby drossu [6] [29]

Obr. 2-11 a) Návrh převislého tvaru, b) Tvorba drossu na jednom ze vzorků, c) Vliv hustoty energie na drsnost spodní strany převislé struktury [26]

Obr. 2-12 a) Tvar jednoho z tištěných vzorků, b) Závislost drsnosti povrchu na orientaci součásti [27]

Obr. 4-1 Schéma spínače a modře vyznačený návrhový prostor [3]

Obr. 5-1 Modelový případ přenosu tepla

Obr. 5-2 Závislost minimálních ploch

Obr. 5-3 Rozložení prvků v modelu SK01

Obr. 5-4 Jednotlivé návrhové parametry a jejich vazby

Obr. 5-5 Rozdělení struktury SK01 na jednotlivé odpory

Obr. 5-6 (a) Síť modelu a (b) rozložení teploty sloupkového konceptu

Obr. 5-7 Závislost tepelné vodivosti na počtu sloupků

Obr. 5-8 Závislost parametru K/m na počtu sloupků

Obr. 5-9 Různá konfigurace počtu kontaktů

Obr. 5-10 Závislost parametru K/m na počtu kontaktů

Obr. 5-11 a) Schéma zatížení spínače [autor: Ing. František Löffelmann], b) Vyztužení BP v místě pylonu

Obr. 5-12 a) Síť modelu, b) Okrajové podmínky

Obr. 5-13 Výsledky pevnostní analýzy: a) Celková deformace, b) Ekvivalentní napětí

Obr. 5-14 Výsledky zaměřené na CTB, a) Celková deformace, b) Ekvivalentní napětí

Obr. 5-15 Různá orientace součástí při tisku

Obr. 5-16 a) Šestina konceptu KM01, b) Základní rozměry struktury

Obr. 5-17 Rozdělení struktury KM01 na jednotlivé odpory

Obr. 5-18 a) Síť modelu, b) Rozložení teploty KM01

Obr. 5-19 Tepelný tok v ose z (KM01)

Obr. 5-20 Šestina modelu konceptu KM02 se základními rozměry

Obr. 5-21 a) Rozložení teploty, b) Tepelný tok v ose z (KM02)

Obr. 5-22 Koncept RSV01

Obr. 5-23 Rozdělení RSV01 na jednotlivé odpory

Obr. 5-24 Koncept RSV02

Obr. 5-25 a) Základní rozměry, b) Rozdělení odporů (RSV02)

Obr. 5-26 Výsledky numerické simulace RSV02: a) Rozložení teploty, b) Tepelný tok v ose z

Obr. 5-27 a) Upravené rozměry stěn, b) Rozložení tepelného toku v ose z

Obr. 5-28 Tepelná vodivost jednotlivých konceptů

Obr. 5-29 Specifický parametr jednotlivých konceptů

9 SEZNAM TABULEK

tab. 4-1 Přehled vstupních parametrů

tab. 5-1 Parametry konceptu SK01

tab. 5-2 Jednotlivé tepelné odpory SK01

tab. 5-3 Porovnání konfigurací s různým počtem sloupků

tab. 5-4 Vlastnosti modelu při změně počtu kontaktů

tab. 5-5 Přehled zatížení a ploch, na které působí

tab. 5-6 Materiály použité v modelu

tab. 5-7 Parametry konceptu KM01

tab. 5-8 Jednotlivé tepelné odpory KM01

tab. 5-9 Vstupní hodnoty pro termální analýzu (KM01)

tab. 5-10 Parametry konceptu KM02

tab. 5-11 Parametry konceptu KM01

tab. 5-12 Jednotlivé tepelné odpory RSV01

tab. 5-13 Vstupní hodnoty pro termální analýzu (RSV01)

tab. 5-14 Parametry konceptu RSV02

tab. 5-15 Jednotlivé tepelné odpory RSV02

tab. 5-16 Vstupní hodnoty pro termální analýzu (RSV02)

tab. 5-17 Výsledné parametry všech konceptů

tab. 5-18 Odhad tlaku v parafínové kapsli