



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TEPELNÝ VÝMĚNÍK VYUŽÍVAJÍCÍ STRUKTUROVANÝ MATERIÁL

HEAT EXCHANGER USING STRUCTURED MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Simon

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej

Vaverka

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jakub Simon**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Vaverka**
Akademický rok: 2023/24

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:

Tepelný výměník využívající strukturovaný materiál

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní technologie se staly efektivním nástrojem pro výrobu strukturovaných materiálů, které mohou být založeny na prutech nebo na plochách. Obzvláště buněčné materiály odvozené od tzv. TPMS (triply periodic minimal surfaces) mají velký potenciál nejen v mechanice, ale také v přenosu tepla. Při správné konfiguraci totiž rozdělují prostor na dvě do sebe propletené domény s velkou teplosměnnou plochou. Jak velkým mohou být přínosem oproti konvenčním výměníkům je potřeba experimentálně ověřit.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je navrhnout aditivně vyrobený tepelný výměník pro ochlazování oleje, který bude využívat TPMS struktury a bude mít stejný tepelný výkon jako referenční komponenta. Zároveň by měl navržený výměník dosáhnout menších rozměrů.

Díličí cíle diplomové práce:

- rešerše současných řešení této problematiky,
- výběr vhodného strukturovaného materiálu,
- návrh výměníku dle zadaného výkonu,
- výroba funkčního vzorku a jeho ověření.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

ALHAMMADI, Alya, Oraib AL-KETAN, Kamran A. KHAN, Mohamed ALI, Reza ROWSHAN a Rashid K. ABU AL-RUB. Microstructural characterization and thermomechanical behavior of additively manufactured AISi10Mg sheet cellular materials. *Materials Science and Engineering A*. 2020, roč. 791. ISSN 09215093.

IYER, Jaisree, Thomas MOORE, Du NGUYEN, Pratanu ROY a Joshua STOLAROFF. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces. *Applied Thermal Engineering*. 2022, roč. 209. ISSN 13594311.

KIM, Jiho a Dong Jin YOO. 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2020, roč. 7, č. 4, s. 527–550. ISSN 22885048.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo vyvinout a popsat metodu návrhu tepelného výměníku využívajícího Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) struktury a ověřit ji návrhem, výrobou a experimentálním otestováním funkčního vzorku. Jedná se o chladič typu olej-voda vyrobený aditivně technologií Laser Powder Bed Fusion na stroji SLM 280 HL z materiálu AlSi10Mg. Po sérii analýz a testů byla pro vyvíjenou metodu zvolena kubická diamond struktura s minimální tloušťkou stěny 0,7 mm a rozsahem relativních hustot 15 až 25 % (délka hrany buňky $11,1 \div 18,5$ mm). Součástí metody je také predikční skript výkonu a dalších parametrů navrhovaného výměníku, který byl vytvořen z dat naměřených během testování vzorků s různými konfiguracemi buněk. Samotná metoda vede uživatele krok za krokem od volby vstupních požadavků, přes odhad výkonu, až po dvoufázové parametrické modelování samotného TPMS výměníku (explicitní a implicitní). Funkční vzorek, vytvořený pomocí této metody, dosáhl tepelného výkonu 315,25 W, což je o 4,2 % více než u referenčního deskového výměníku. TPMS výměník také disponoval o 78 % menším teplosměnným tělesem a o 62 % nižší celkovou hmotností. Rozdíly mezi predikovaným a reálným tepelným výkonem činily až 18 %. Metoda je v současném stavu vhodná pro návrh TPMS výměníků s výkony 50 až 230 W. Obecně je však univerzální a lze s ní zmapovat i oblasti vyšších výkonů, čímž se sama zpřesní.

KLÍČOVÁ SLOVA

tepelný výměník, TPMS struktury, diamond, chladič olej-voda, metoda návrhu

ABSTRACT

The aim of this work was to develop and describe a design method of a heat exchanger using Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) structures and to validate it by design, fabrication, and experimental testing of a working sample. It is an oil-water cooler fabricated additively by Laser Powder Bed Fusion on an SLM 280 HL machine from AlSi10Mg material. After a series of analyses and tests, a cubic diamond structure with a minimum wall thickness of 0.7 mm and a range of relative densities of 15 to 25 % (cell edge length $11.1 \div 18.5$ mm) was chosen for the developed method. The method also includes a prediction script of the performance of the proposed heat exchanger, which was created from data measured during testing of samples with different cells configurations. The method itself guides the user step-by-step from the selection of input requirements, through the estimation of performance, to the two-step parametric modelling of the TPMS exchanger itself (explicit and implicit). The functional sample created using this method achieved heat flows of 315,25 W, which is 4.2 % higher than the reference plate exchanger. The TPMS exchanger also has a 78 % smaller heat transfer body and 62 % less total mass. The differences between predicted and actual heat flows were up to 18%. In its current state, the method is suitable for the design of TPMS heat exchangers with heat flow of 50 to 230 W. However, it is generally versatile and can also be used to map other areas, thus making it more accurate.

KEYWORDS

Heat exchanger, TPMS structures, diamond, water-oil cooler, design method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SIMON, Jakub. Tepelný výměník využívající strukturovaný materiál [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157670>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ondřej Vaverka.

PODĚKOVÁNÍ

Vypracování tohoto diplomového projektu bylo v mnoha oblastech obohacující, ale také náročné. Proto bych chtěl v první řadě poděkovat Ing. Ondřeji Vaverkovi za podporu a přínosné rady při řešení dílčích problémů, které často vyvstaly, ale také práce jako celku. Dále bych rád vyjádřil své díky Ing. Dominice Babičce Fialové Ph.D. za konzultace a pomoc v oblasti výpočtů a pojmů týkajících se tepelných výměníků. Vždy mi otevřely oči a pomohly v pokroku.

Poděkování patří také, přátelům, spolužákům a dalším pracovníkům Ústavu konstruování, kteří mě podporovali nejen v udržení psychické pohody, ale také vždy přispěli svou troškou do mlýna v podobě přínosné rady, či názoru. Na ty pěkné chvíle v učebně A4/514a obohacené nejrůznějšími aktivitami budu ještě dlouho vzpomínat.

Největší díky, ale patří mé rodině, která ve mě vždy věřila a podporovala mě ve studiu na VUT. Bez vás bych to nedokázal. Děkuji.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

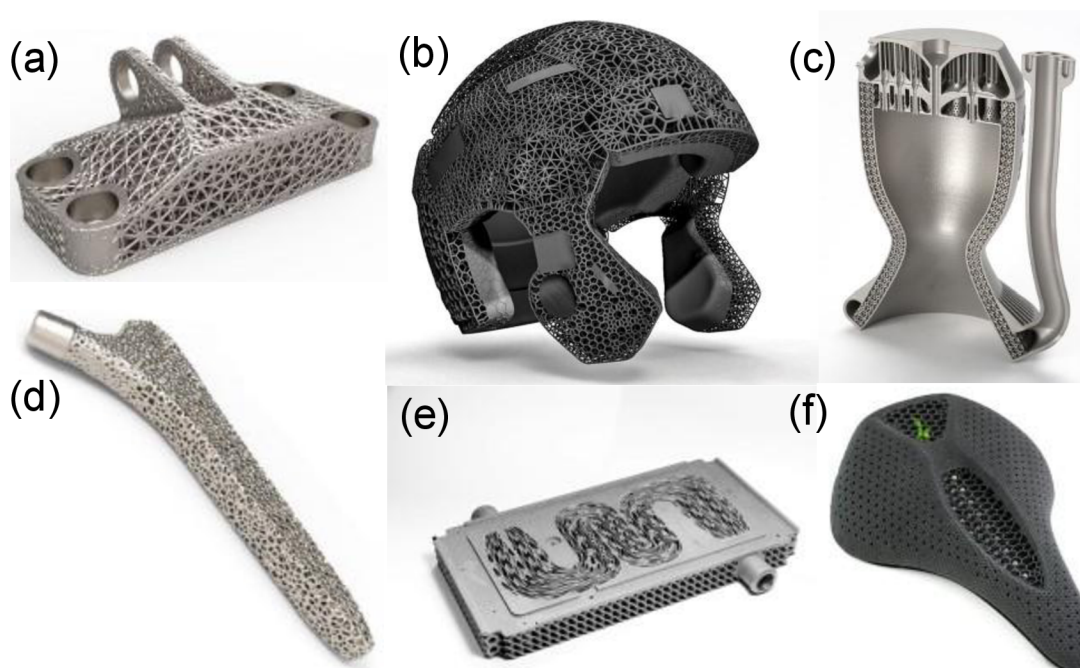
1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
2.1	Rešeršní metody	15
2.2	Rešerše na stav techniky	17
2.2.1	TPMS struktury obecně	17
2.2.2	Aditivní výroba TPMS struktur	18
2.2.3	Přenos tepla a proudění kapaliny TPMS strukturami	20
2.2.4	Design, výroba a testování výměníků s TPMS strukturami	24
2.2.5	Rešerše patentů, firem a softwarů	30
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	32
2.4	Identifikace novosti a příležitosti	33
3	CÍLE PRÁCE	34
3.1	Vymezení problému	34
3.2	Cíle vývoje	37
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	38
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	38
4.1.1	Analýza dílčích cílů	38
4.1.2	Bližší specifikace omezení	39
4.2	Technická a funkční analýza	40
4.2.1	Analýza úhlu, přibližné a minimální tloušťky stěny	41
4.2.2	Testy kvality výroby různě velkých buněk	43
4.2.3	Výpočet relativní hustoty na základě parametrů buňky	45
4.2.4	Testy těsnosti buněk o různé tloušťce	46
4.2.5	Testy tepelných vlastností TPMS buněk	47
4.3	Návrh a analýza alternativních řešení	50
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	52
5.1	Matematický model	52
5.1.1	Výpočty TPMS struktur	52
5.1.2	Výpočty TPMS výměníků	53
5.1.3	Výpočty referenčního výměníku	55

Určení tvarů, rozměrů a materiálů	55	
5.1.4 Materiál výměníku a provozní kapaliny	57	
6	DETAILNÍ NÁVRH	59
6.1	Metoda návrhu tepelného výměníku s TPMS strukturami	59
6.1.1	Predikční skript	59
6.1.2	Schéma a popis metody	60
6.2	Funkční vzorky	61
6.2.1	Návrh	62
6.2.2	Výroba a postprocessing	64
6.2.3	Testování	65
6.3	Odhad výrobních nákladů a objemu výroby	66
6.4	Hodnocení klíčových parametrů	67
6.4.1	Zhodnocení testů tepelných vlastností a predikčního skriptu	67
6.4.2	SWOT analýza metody	70
6.4.3	Zhodnocení parametrů funkčního vzorku	71
7	ZÁVĚR	73
8	VÝSLEDKY VÝZKUMU PODLE RIV	76
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	78
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	82
	Seznam zkratk	82
	Seznam symbolů a veličin	83
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	85
12	SEZNAM TABULEK	88
13	SEZNAM PŘÍLOH	89

1 ÚVOD

Aditivní technologie jsou stále se rozšiřující oblastí, která nachází uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Mezi jejich nesporné přednosti patří především tvarová volnost a možnost spojení více komponent v jeden celek. Rozmach zažívá také integrace více funkcí do jedné součásti (např. zachytávání CO₂ ze spalín spojené s tepelným výměníkem). Právě díky tvarové volnosti odemykají aditivní technologie konstruktérům nové možnosti využití různých strukturovaných materiálů pro své návrhy.

Základní kategorie strukturovaných materiálů jsou náhodné (stochastické, např. pěny) a deterministické, které jsou uspořádané buď ve 2D a vytaženy do prostoru (např. honeycomb), nebo ve 3D struktury. To mohou být např. tzv. *lattice structures*, které se periodicky opakují v různých směrech. Přičemž jsou zpravidla založeny na prutech (např. mikroprutové struktury), nebo plochách. Obě tyto skupiny disponují řadou výjimečných vlastností, kdy za zmínku stojí značný poměr váhy ku únosnosti, velikosti plochy struktur k jejich objemu a velká absorpce mechanické energie. Díky těmto vlastnostem již řada struktur nalézá svá uplatnění v odvětvích průmyslu, kde je požadavek na nízkou hmotnost a/nebo vysoký výkon, ať už z hlediska tlumení rázů a absorpci energie (prutové struktury), nebo při přenosu tepla (plošné struktury). Hlavními oblastmi použití jsou, mimo čistě estetické dekorační předměty (svícný, vázy atd.), automobilní průmysl, letectví a kosmonautika, zdravotnictví, sportovní vybavení a oblast tepelných výměníků (viz Obr. 1-1).



Obr. 1-1: Příklad použití strukturovaného materiálu (a) konzole [1]; (b) helma s lepším tlumením [2]; (c) odlehčený raketový motor [3]; (d) dík kloubního implantátu [4]; (e) chladič závodního automobilu [5]; (f) sedlo závodního kola [6]

Pro použití v oblasti managementu tepla se nabízí speciální druh plošných strukturovaných materiálů, tzv. *Triply Periodic Minimal Surfaces* neboli TPMS struktury. Všechny tyto struktury jsou popsány rovnicemi, složenými z goniometrických funkcí, a mají společnou nulovou střední křivost. Nejznámějšími TPMS strukturami jsou gyroid, diamond (Schwarz D) a primitive (Schwarz P) struktura. Tyto materiály charakterizuje periodicky se opakující vzor, který dokáže rozdělit prostor na dvě vzájemně oddělené části a je pro ně rovněž typická velká plocha vzhledem k využitému prostoru (*SA/Vol ratio*). Tyto vlastnosti z TPMS struktur činí ideální teplosměnné těleso, které je hlavní částí tepelných výměníků (viz Obr. 1-2) a určuje jejich výkon a efektivitu.



Obr. 1-2: Chladič oleje od nTopology [7]

Přestože již byly navrženy a vyrobeny jednotky až nízké desítky TPMS výměníků, neexistuje ucelená metoda jejich návrhu cílená na konkrétní parametry (výkon, teplotní spád, tlaková ztráta). Také nejsou plně popsány ideální typy TPMS buněk, jejich konfigurace a další parametry pro dosažení optimálního výkonu a chybí také limity z hlediska vyrobitelnosti. Proto je v této práci popsán vznik metody návrhu TPMS výměníku a výroba i testování funkčních vzorků. Od navrženého tepelného výměníku se očekává značný poměr výkonu k rozměrům teplosměnného tělesa, přičemž aby byla potvrzena výhoda využití TPMS struktur oproti jiným konvenčním teplosměnným plochám jako jsou např. trubky či lamely, bude funkční vzorek porovnán s referenčním deskovým, rovněž aditivně vyrobeným, výměníkem. Aby bylo možné součásti porovnat z hlediska tepelného výkonu a velikosti, tak jsou dalším požadavkem provozní kapaliny, kdy bude horký olej ochlazován chladnou vodou. Mimo všeobecné požadavky, jako je nemísitelnost kapalin uvnitř výměníku zajištěním dvou oddělených prostor a konstrukce schopné snést provozní podmínky, je v tomto případě podstatná i vyrobitelnost bez významných tvarových vad a nepřesností. Při návrhu tohoto typu výměníku, je třeba myslet zejména na dostatečnou tloušťku stěny a vnitřní prostor výměníku navržený a orientovaný tak, aby zde nebylo nutné tisknout podpory, které by poté bylo velmi obtížné až nemožné odstraňovat.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Aby byl poskytnutý ucelený vhled do problematiky využití TPMS struktur pro přenos tepla uvnitř tepelných výměníků, bylo nutné proniknout do řady oblastí týkajících se nejen tepelných a hydrodynamických vlastností při nucené konvekci TPMS strukturami, ale také samotného procesu návrhu těchto výměníků. Od vymodelování a designu jednotlivých částí přes simulace provozního stavu až po jeho výrobu, experimentální testování a měření. Hlavním cílem systematické rešerše je zhodnotit různé TPMS struktury z hlediska vhodnosti využití v tepelných výměnících a odhalit úskalí a problematiku spojenou s jejich využitím.

2.1 Rešeršní metody

Má-li být systematická rešerše provedena kvalitně a má-li vést k vytyčeným cílům je vhodné použít osvědčených metod před samotným pročitáním zdrojů a sepisováním poznatků. První oblastí, na kterou byla rešerše zaměřena je současné využití TPMS struktur přímo v tepelných výměnících či chladičích. Dále byla pozornost věnována zdrojům věnujícím se proudění tekutin uvnitř TPMS struktur a jejich tepelným vlastnostem. V této části byly upřednostňovány články s experimentálním ověřením ideálně struktur vyrobených z hliníkových slitin. Pozornost byla ale věnována i simulacím spojeným s prouděním tekutin a přestupu tepla TPMS strukturami. Poslední oblastí byla aditivní výroba TPMS struktur, kdy byly preferovány články věnované výrobě pomocí technologie LPBF (*Laser Powder Bed Fusion*) opět z hliníkových slitin.

Po určení oblastí zájmu byly položeny čtyři konkrétní otázky:

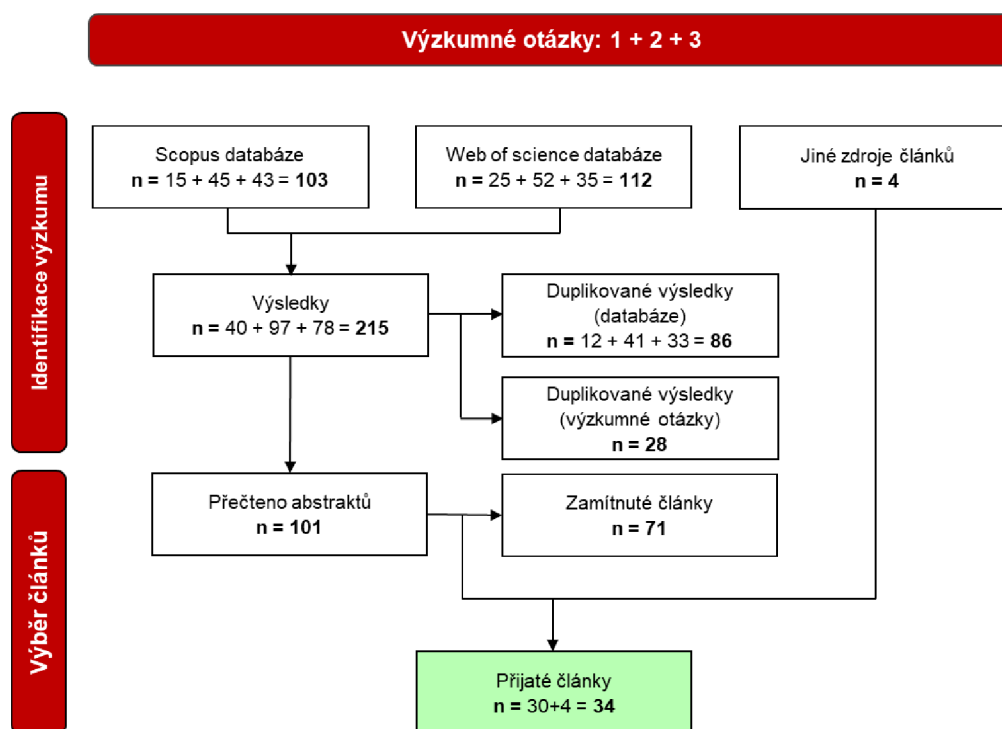
1. Jak moc lze zmenšit rozměry tepelného výměníku s TPMS strukturami, aby byl zachován výkon srovnatelný s aditivně vyrobeným deskovým výměníkem?
2. Které TPMS struktury jsou vhodné pro přenos tepla uvnitř výměníku?
3. Jaké jsou optimální parametry (tloušťka stěny a velikost buňky) vybraných TPMS struktur z hlediska vyrobitelnosti, přestupu tepla a přijatelných tlakových ztrát?
4. Jaká omezení musí konstruktér respektovat, aby byl schopen vyrobit tento typ výměníku pomocí LPBF technologie bez nutnosti podpor uvnitř součástí?

Na základě těchto otázek bylo nutné sestavit vhodné rešeršní dotazy, které byly následně zpřesněny, nebo naopak zobecněny strategiemi stavebních kamenů, případně rostoucí perly. Celkem byly na základě výše zmíněných otázek sepsány čtyři rešeršní dotazy, z nichž jeden, zaměřený na modelování TPMS struktur v různých softwarech, byl po přečtení nalezených článků zcela vyloučen jako nepřínosný. Softwary pro modelování TPMS struktur byly následně nalezeny mimo databáze článků.

Finální rešeršní dotazy zadávané do elektronických databází *Web of Science (WoS)*, *Scopus* a *Google Scholar* zněly:

1. ((Heat AND exchanger) AND (additive AND manufactured) AND (TPMS OR (triplly AND periodic AND minimal AND surfaces))))
2. ((Heat AND transfer) AND (TPMS OR (triplly AND periodic AND minimal AND surfaces)) AND (gyroid OR (schwarz AND primitive) OR diamond))
3. ((Fluid AND flow) AND (TPMS OR (triplly AND periodic AND minimal AND surfaces)) AND (gyroid OR (schwarz AND primitive) OR diamond))

Průzkum databází pomocí těchto rešeršních dotazů proběhl ve dvou iteracích, a to z důvodu novosti a aktuálnosti řešené problematiky. První iterace byla provedena pár měsíců po začátku řešení této práce (jaro 2023) a druhá přibližně po roce (jaro 2024). Databáze našly více než dostatečný počet článků pro sepsání detailní systematické rešerše. Jelikož se ale řada z nich napříč databázemi i jednotlivými dotazy opakovala a některé byly pro tuto diplomovou práci irelevantní, bylo přistoupeno k detailnímu třídění článků, které je vyobrazeno graficky v Prisma diagramu níže (Obr. 2-1). Z velkého množství 215 článků bylo 114 duplicitních. Aktuálnost tématu dokazuje fakt, že se ve zmíněných databázích během jednoho roku počet článků téměř zdvojnásobil (z 53 na 101). U celkem 101 různých článků byly následně přečteny abstrakty a po jejich kritickém zhodnocení na základě tématu, přínosu, výsledků a scientometrických údajů (H-indexy autorů, počet citací a impakt faktory časopisů) bylo vyloučeno 71 z nich. Zbývajících 30 prací z databází a další 4 obdržené z jiných zdrojů byly detailněji rozebrány a získané poznatky vypsány níže.



Obr. 2-1: Prisma diagram nalezených a použitých článků rešerše

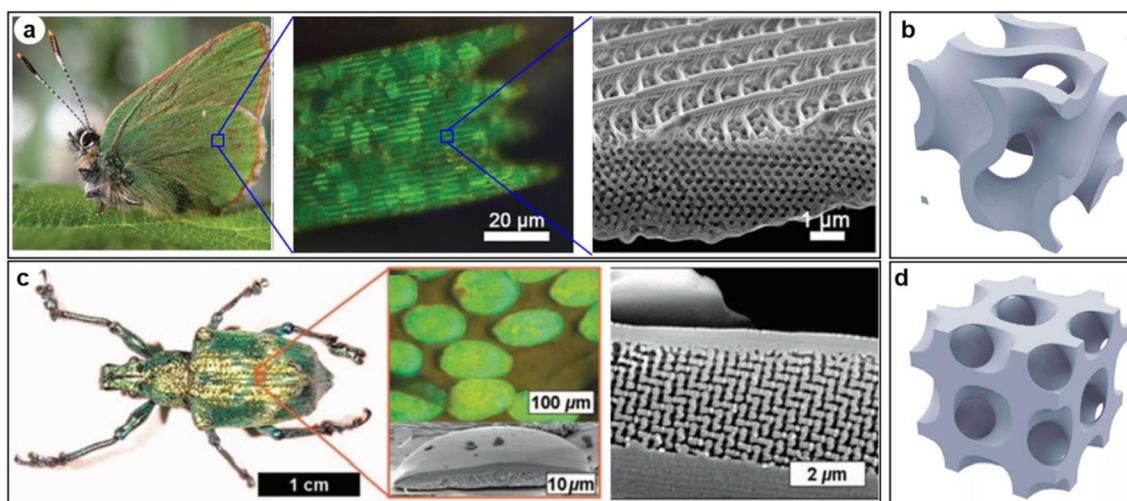
2.2 Rešerše na stav techniky

V této kapitole je obsaženo shrnutí poznatků z výše zmíněných oblastí, na jehož základě je dále vypracováno shrnutí a poté ze získaných poznatků vychází i samotná praktická část této práce.

2.2.1 TPMS struktury obecně

Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) struktury jsou třírozměrná plošná, případně objemová tělesa, která vyjma okrajů buněk neobsahují žádné hrany a v případě, že neprotínají samy sebe, jsou i v prostoru spojitá a rozdělují ho na 2 objemy. Minimal Surfaces se označují proto, že v daném objemu propojují určitá místa s cílem zachovat minimální možný povrch, a tím pádem i nulovou střední křivost (*zero mean curvature*). Tato vlastnost zároveň umožňuje plynulejší proudění tekutin, oproti ostřejším křivostem, či strukturám s ostrými hranami.


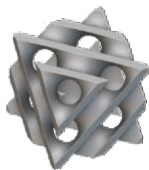
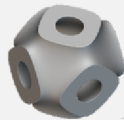

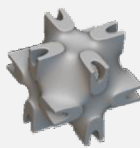
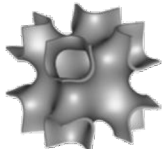
TPMS struktury a jim podobné objekty jsou již delší dobu pozorovány v živočišné říši. Příkladem mohou být detaily motýlích křídel a šupin na hřbetu nosatce *L. Augustus*, pořízené pomocí Skenovací Elektronové Mikroskopie (SEM), kdy v případě motýla byl pozorován gyroid a v případě nosatce diamond struktura (viz Obr. 2-2) a to o velikostech hrany buňky od 300 do 450 nm [8].



Obr. 2-2: Přírodní inspirace TPMS struktur: detailní snímek pomocí SEM a) motýlího křídla; c) hřbetu nosatce; b) gyroid d) diamond struktura [8]

Nejznámější struktury jsou i s rovnicemi popisujícími jejich plošné varianty vypsány v Tab. 2.1. Konstanta C na konci každé z rovnic je parametrem, který jestliže se rovná 0, značí že TPMS struktura je pouze plošná s nulovou tloušťkou. Pokud je ale $C \neq 0$ struktura má tloušťku s hodnotou $2 \cdot C$, která vznikne odsazením dvou isoploch o vzdálenost $+C$ a $-C$ od střední hladiny $C = 0$ [9].

Tab. 2.1: Přehled nejznámějších a nepoužívanějších TPMS struktur

Název	Rovnice	Základní buňka
gyroid	$\sin(x) \cdot \cos(y) + \sin(y) \cdot \cos(z) + \sin(z) \cdot \cos(x) = C$	
diamond	$\sin(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) = C$	
Schwarz P	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = C$	
lidinoid	$0,5 \cdot (\sin(2x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) + \sin(2y) \cdot \cos(z) \cdot \sin(x) + \sin(2z) \cdot \cos(x) \cdot \sin(y) - 0,5 \cdot (\cos(2x) \cdot \cos(2y) + \cos(2y) \cdot \cos(2z) + \cos(2z) \cdot \cos(2x)) + 0,15 = C$	
Neovius	$3 \cdot (\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)) + 4 \cdot (\cos(x) \cdot \cos(y) \cdot \cos(z)) = C$	
I-WP	$2 \cdot (\cos(x) \cdot \cos(y) + \cos(y) \cdot \cos(z) + \cos(z) \cdot \cos(x) - (\cos(2x) + \cos(2y) + \cos(2z))) = C$	

2.2.2 Aditivní výroba TPMS struktur

Kvůli komplexní geometrii všech TPMS struktur je prakticky nemožné vyrábět je subtraktivními a formativními technologiemi výroby. Ty mají své limity a nezvládnou by vyrobit kompaktní periodicky se opakující buňky těchto struktur. Proto jsou pro jejich výrobu využívány výhradně aditivní technologie.

Alhammadi a kol. [10] se ve svém článku věnovali převážně mechanickým vlastnostem TPMS struktur vyrobených z hliníkové slitiny AlSi10Mg metodou LPBF. Konkrétně byly vyráběny buňky *I-graph Wrapped Package* (I-WP) struktury o různých relativních hustotách (ρ_{rel}). Při experimentech bylo zjištěno, že se hodnoty ρ_{rel} , zadané v modeláři (*design*), experimentálně změřené a spočtené z CT (*Computed tomography*) skenu lišily v řádu nižších jednotek procent (viz Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Porovnání relativních hustot [11]

Design	Experimentální	CT sken
10 %	9.34%	9.40%
13 %	11.51%	11.20%
16 %	14.45%	14.27%
19 %	17.40%	17.25%

Tento trend potvrdili i Mulhi a kol. [11] ve svém článku, kde byly vyráběny Schwarz P buňky s relativními hustotami od 10 do 55 % (přepočítáno z porozit $\phi = 45$ až 90 % vztahem $\rho_{rel} = 1 - \phi$). Výsledkem bylo, že se zmenšující se relativní hustotou rostla tloušťka stěny, ale zmenšovaly se *SA/Vol* poměry buněk (také známé jako *surface to volume ratios*) a velikost pórů. Na závěr byla rovněž porovnána tloušťka stěny zadaná v modeláři a skutečně naměřená, přičemž druhá jmenovaná byla vždy menší z důvodu nedostatečného spečení částic kovového prášku u komplexních ploch. Proto je třeba při návrhu buněk s tímto rozdílem počítat.

Ve článku od Catchpole-Smithe a kol. [12] byly opět pomocí metody LPBF aditivně vyrobeny TPMS buňky, konkrétně gyroid, diamond a Schwarz P, u kterých byla pro různé porozity změřena tepelná vodivost (λ). Pro oba materiály, ze kterých byly buňky vyráběny (Hastelloy-X a Ti6Al4V), byly naměřené hodnoty proloženy přímkami (viz Obr. 2-3) s koeficienty C_I a C_{II} uvedenými v Tab. 2.3 počítanými rovnicí:

$$\lambda = C_I \cdot V_f + C_{II} \quad (1)$$

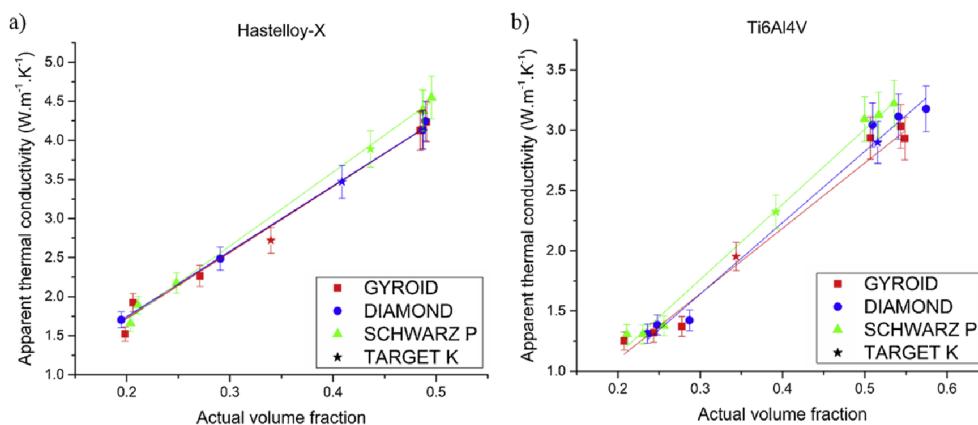
kde:

λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	je tepelná vodivost
V_f	-	poměrný objem (<i>volume fraction</i>)
$C_I; C_{II}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	interpolační konstanty

Tak lze z poměrného objemu (V_f), který je totožný s relativní hustotou, určit přibližnou hodnotu λ ještě před samotnou výrobou.

Tab. 2.3: Přehled vybraných parametrů TPMS buněk [12]

		C_1	C_2
H-X	GYR	8.631	-0.039
	SCH	9.415	-0.174
	DIA	8.507	+0.032
Ti6Al4V	GYR	0.056	-0.024
	SCH	0.063	-0.129
	DIA	0.060	-0.149



Obr. 2-3 Lineární závislost tepelné vodivosti na poměrném objemu pro materiály (a) Hastelloy-X, (b) Ti6Al4V [12]

2.2.3 Přenos tepla a proudění kapaliny TPMS strukturami

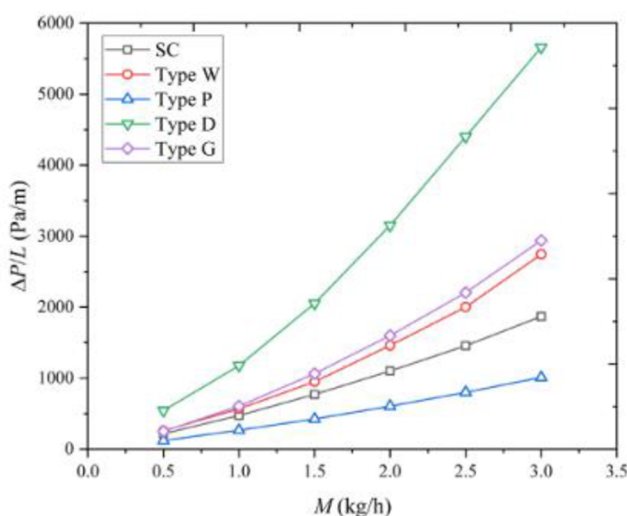
Gado a kol. [13] ve svém článku rozebírají využití TPMS struktur pro adsorpční chladicí systémy, které se používají jako alternativa klasického kompresního chlazení. Konkrétně testovali, gyroid, diamond, Lidinoid, Schwarz P (primitive) a I-WP struktury, které poté porovnali s běžnou žebrovanou. Zkoumané struktury byly nejprve vymodelovány jako plošná tělesa v Pythonu, a poté v softwaru GeoDict byly vygenerovány 3D topologie. Následný převod v konečno prvkovou síť a numerické simulace byly provedeny v softwaru Ansys Fluent. Autoři zde popisují vliv tortuosity a porozity na jmenovitý chladicí výkon jednotlivých buněk, což je obdoba tepelného výkonu. V tabulce Tab. 2.4 jsou vypsány efektivní tepelné vodivosti a tortuosity jednotlivých TPMS struktur při 50% relativní hustotě, velikosti buňky $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ a počtu buněk 1; 1; 3 ve směrech X, Y, Z.

Tab. 2.4: Přehled vybraných parametrů TPMS buněk [13]

Topology	Specific surface area (cm^2/cm^3)	Effective thermal conductivity ($\text{W}/\text{m K}$)	Geometric Tortuosity (-)
Fins-based	270.045	97.926	1
Gyroid	308.191	98.739	1.565
Diamond	371.818	98.617	1.244
IWP	368.353	98.621	1.350
Primitive	230.500	98.589	1.251
Lidinoid	625.859	98.587	1.374

Čím vyšší má struktura tortuozitu tím větší odpor klade k proudění tekutiny skrz své vnitřní póry a tím vzrůstají tlakové ztráty. Numerické simulace ukázaly, že gyroid, diamond a Schwarz P mají nejlepší kinematické vlastnosti pro chlazení média.

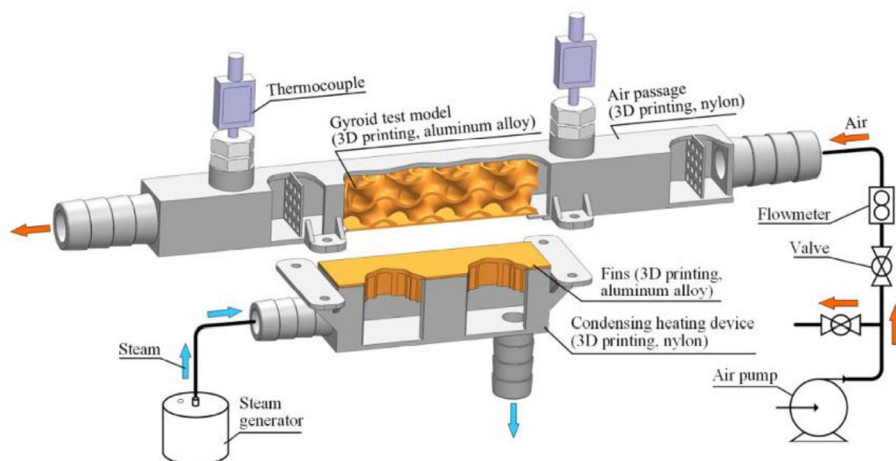
Vlivem geometrických parametrů (morfologie) na odpor proti proudění a přestup tepla se zabývali Cheng a kol. [14], kteří opět porovnávali I-WP, Schwarz P, diamond a gyroid struktury. Simulace byly v této práci prováděny v Ansys Fluent na plošných strukturách o relativní hustotě 55,8 %. Výsledky ukázaly, že nejnižší odpor proti proudění a s ním související tlakové ztráty vykazuje Schwarz P struktura, a naopak nejvyšší tlakové ztráty přiřadili struktuře diamond (Obr. 2-4).



Obr. 2-4: Závislost tlakové ztráty na hmotnostním toku pro různé struktury [14]

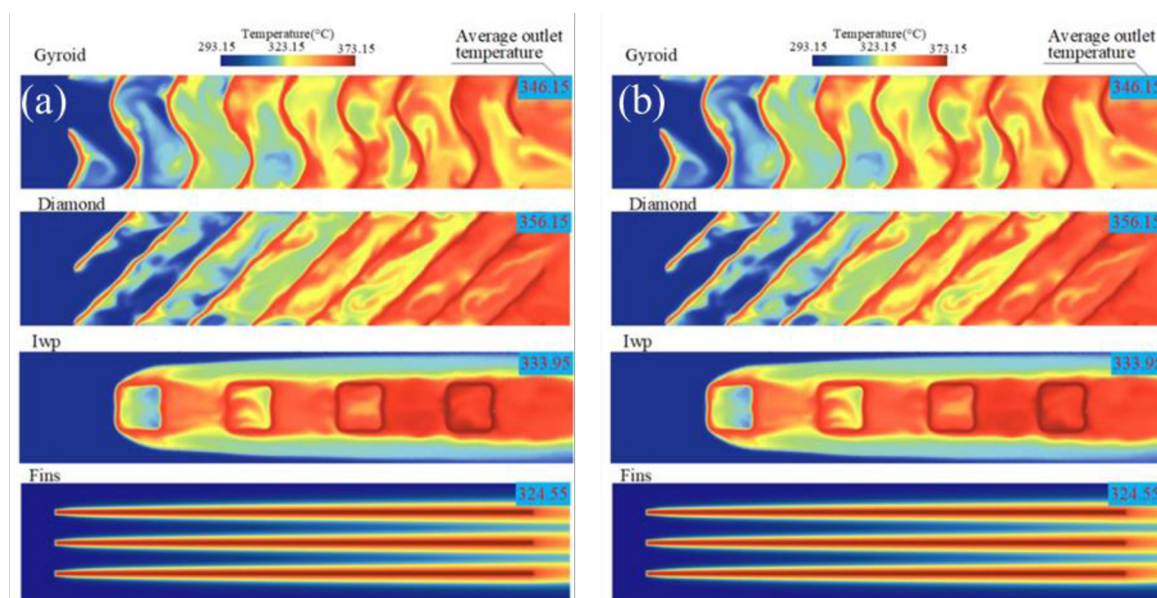
Pohled na propojení topologické optimalizace a TPMS struktur přinesli ve svém článku Modrek a kol. [15], kteří nejprve topologicky optimalizovali metodou SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*) běžný nosník s multifyzikálními okrajovými podmínkami (vlastní váha a tepelné zatížení), a poté na výsledné tvary namapovali TPMS struktury gyroid, diamond, Schwarz P a I-WP struktury. Přestože se po namapování jednalo o gradientní struktury, CFD (*Computational Fluid Dynamics*) analýzy následně ukázaly, že nejvyšší efektivní tepelnou vodivostí disponuje Schwarz P struktura.

Na rozdíl od výše zmíněných článků, Tang a kol. [16] testovali tepelné vlastnosti TPMS struktur nejen simulacemi, ale i experimentálně. Aditivně vyrobené struktury gyroid, diamond a I-WP porovnávali s žebrovanou. Zkoumané struktury měly velikost buňky $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ se čtyřmi buňkami ve směru průtoku ohříváné tekutiny. Všechny vzorky byly vyrobeny z nespecifikované hliníkové slitiny (*Aluminum*, nebo *aluminum alloy*), přičemž provozní tekutinou byl vzduch, ohříváný horkou párou (viz Obr. 2-5). Měření bylo provedeno pro různé objemové průtoky, přičemž měřeny byly teploty na vstupech a výstupech z TPMS struktur.



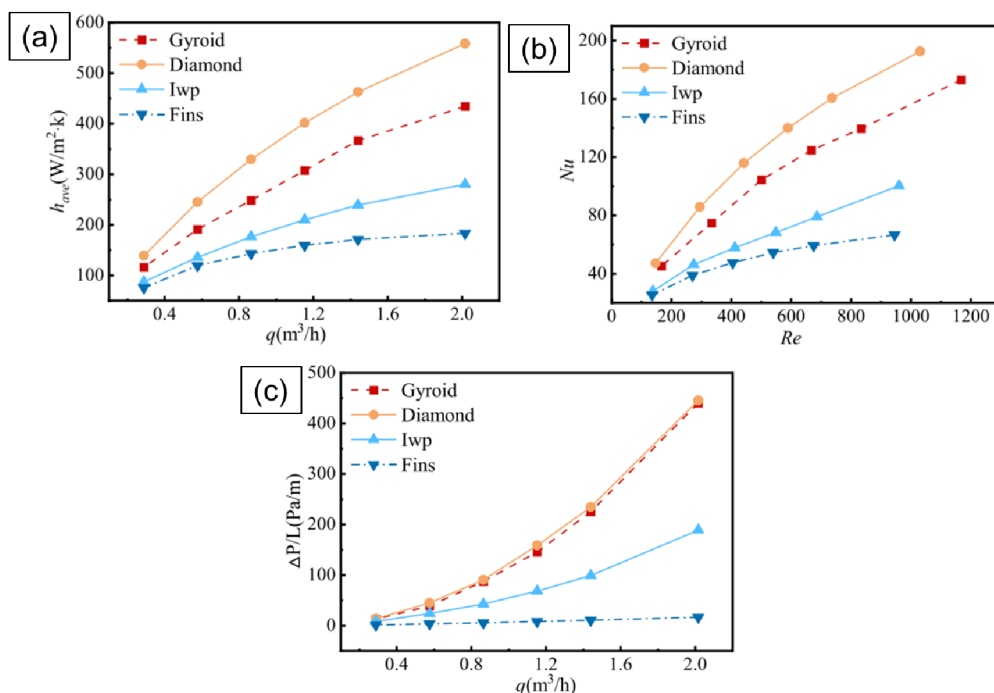
Obr. 2-5: Experimentální měřicí systém [16]

Experimentální a numericky spočtené hodnoty teplotního spádu na vstupu a výstupu se lišily v řádu nižších jednotek kelvinů pro různé objemové toky, přičemž experimentální hodnoty byly nižší. V článku je rovněž vykreslený průběh teplotního spektra ve dvou vzájemně kolmých rovinách po délce buněk TPMS struktur (Obr. 2-6).



Obr. 2-6: Teplotní spektrum uvnitř testovaných vzorků v (a) horizontálním řezu, (b) vertikálním řezu [16]

Výsledky určily pořadí tří TPMS a jedné žebrované z hlediska přestupu tepla, Nusseltova čísla určujícího součinitel přestupu tepla (h), tlakové ztráty a součinitele tření. Přičemž nejvyššími hodnotami vždy disponuje diamond struktura, následovaná gyroidem, I-WP a nejnižší hodnoty byly spočteny pro žebrovanou strukturu (Obr. 2-7).



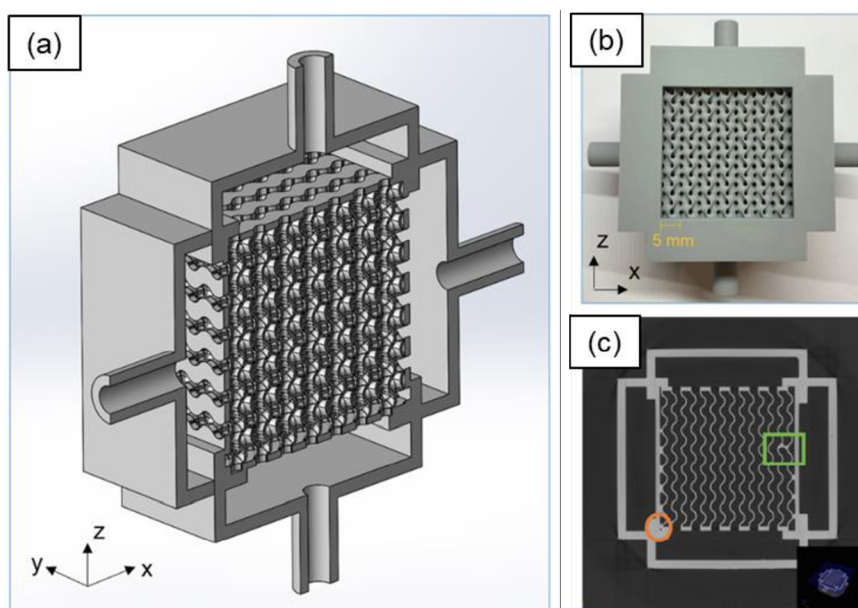
Obr. 2-7: Změna (a) součinitele přestupu tepla (b) Nusseltova čísla a (c) tlakové délkové ztráty na objemovém průtoku, resp. Reynoldsově čísle [16]

Více na hydrodynamické vlastnosti je zaměřen článek Castra a kol. [17], kteří numericky a experimentálně otestovali permeabilitu Schwarz P, diamond a gyroid struktur. Ty byly vyrobeny MultiJet 3D tiskem a poté byly otestovány s cílem popsat průtok tekutiny. Numerické simulace probíhaly v softwaru ABAQUS za účelem nalezení míst uvnitř TPMS struktur s potenciálem pro koncentraci tekutiny. Výsledky mimo jiné určily, že není žádný přímý vztah mezi permeabilitou a rozložením toku kapaliny uvnitř TPMS struktur. Při shodných porozitách bylo spočteno, že gyroid disponuje největší permeabilitou, Schwarz P nejmenší pravděpodobností uváznutí kapaliny uvnitř a diamond struktura se projevila jako nejslabší v obou aspektech.

Santos a kol. [18] se také zabývali experimentálním určováním permeabilit a došli ke stejnému závěru jako výše zmíněný Casterův článek, tedy že nejlepší permeabilitu má gyroid, a proto by měla tekutina nejlépe proudit právě skrz něj.

2.2.4 Design, výroba a testování výměníků s TPMS strukturami

Jeden z možných designů tohoto typu tepelných výměníků ukázali ve svém článku Dixit a kol. [19], kteří zvolili jako teplosměnnou plochu gyroid o relativní hustotě 20 %. Tepelný výměník byl vyroben pomocí stereolitografie (SLA) z tuhého polymeru PlasGRAY podobného ABS (Akrylonitril Butadien Styren), přičemž za těchto podmínek byl nejmenší vytisknutelný rozměr bez větších defektů určen hodnotou 300 μm . Tato hodnota byla použita jako tloušťka stěny TPMS buňky. Protože relativní hustota, tloušťka stěny a velikost buňky spolu úzce souvisejí, aby byly zachovány první dvě jmenované hodnoty byla spočtena velikost buňky 4,6 mm. Pro vymodelování TPMS buněk i samotného výměníku byl využit software SolidWorks, kde byla komplexní geometrie gyroid vytvořena pomocí obálkových křivek, které zformovaly souvislou plochu. Poměr plochy ku objemu buňky (*SA/Vol ratio*) poté vyšel 670 m^2/m^3 , což překonalo 400 m^2/m^3 , které autor uvádí jako spodní hranici pro efektivní kompaktní tepelné výměníky typu kapalina – kapalina. Kompletní teplosměnnou plochu výměníku tvořila matice buněk $7 \times 7 \times 7$. A na závěr byl pomocí CT analyzován vnitřní prostor výměníku, kde byly nalezeny dvě drobné vady (viz Obr. 2-8, c) v podobě spečeného materiálu, který zaslepl část buňky.



Obr. 2-8: (a) CAD model výměníku s gyroid strukturou, (b) aditivně vyrobený výměník, (c) nalezené imperfekce ([19], upraveno)

Pro testování výměníku byl sestaven recirkulační okruh, který čerpal vodu o teplotě 20 °C do jednoho kanálu a vodu o teplotě 60 °C do druhého. Jednalo se o výměník s křížovým tokem, kdy na obou výstupech byla měřena teplota horké i chladné kapaliny. Teplotní spád/nárůst se pohyboval v rozmezí 10 až 20 °C v závislosti na objemovém průtoku $\dot{V} = 100 \div 270$ ml/min. Ze změřených hodnot byl spočten součinitel prostupu tepla $U = 120 \div 160$ W·m⁻²·K⁻¹ a pro horkou kapalinu Reynoldsovo číslo v rozmezí 10 ÷ 40. Na závěr byl výměník s TPMS strukturami porovnán s termodynamicky ekvivalentním, nejefektivnějším protiproudým výměníkem, přičemž první zmíněný byl o 55 % efektivnější při desetině velikosti druhého zmíněného.

Iyer a kol. [20] se věnovali numerickému výpočtu tepelných vlastností a využití nejen TPMS, ale i PNS (*Periodic Nodal Surfaces*) struktur v tepelných výměnících. Modely sedmi struktur byly vygenerovány v softwarovém balíčku MathMod, který umožňuje modelování 3D geometrií popsaných implicitními nebo parametrickými rovnicemi. Konkrétní simulace byly prováděny v COMSOL Multiphysics na buňkách s konfiguracemi 1×1×4 pro Fischer Koch S, F-RD, gyroid, Neovius, diamond, Schwarz P a C(I₂-Y**) struktur. Na všechny modely byl použit laminární model proudění ve směru 4 buněk za sebou, přičemž základní geometrické vlastnosti struktur jsou vypsané v Tab. 2.5.

Tab. 2.5: Geometrické vlastnosti TPMS a PNS struktur (l – délka hrany krychlové buňky) [20]

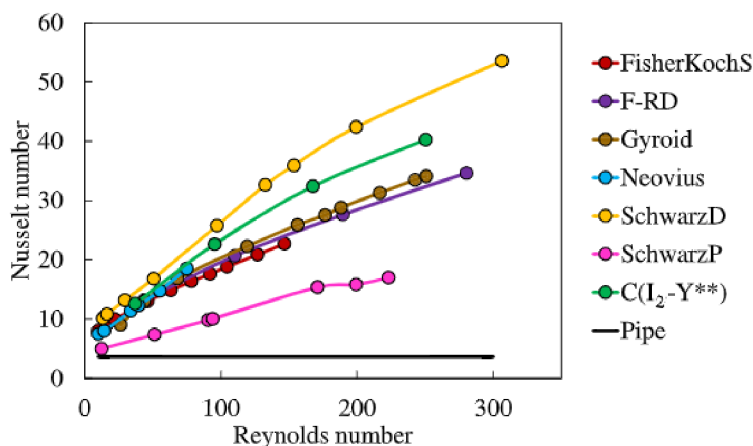
Name	Volume	Surface area	Hydraulic diameter
Fisher Koch S	$0.5l^3$	$5.44l^2$	$0.37l$
F-RD	$0.57l^3$ & $0.43l^3$	$4.87l^2$	$0.47l$ & $0.35l$
Gyroid	$0.5l^3$	$3.10l^2$	$0.65l$
Neovuis	$0.5l^3$	$3.54l^2$	$0.56l$
Schwarz-D	$0.5l^3$	$3.85l^2$	$0.52l$
Schwarz-P	$0.5l^3$	$2.35l^2$	$0.85l$
C(I ₂ -Y**)	$0.51l^3$ & $0.49l^3$	$5.76l^2$	$0.35l$ & $0.34l$

Z numerických simulací získaných dat byla určena korelační závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově, kdy bylo pevně dáno Prandtlovo číslo o hodnotě 6,97. Ze základních termomechanických vzorců a teorie podobnostních čísel plyne, že čím vyšší je Nusseltovo číslo, tím vyšší je součinitel přestupu tepla a také tepelný výkon výměníku. Získaná data tedy určují Schwarz P strukturu jako nejméně vhodnou pro přestup tepla, a naopak diamond strukturu za nejlepší (viz Tab. 2.6 a Obr. 2-9).

Tab. 2.6: Korelační závislosti Nusseltova čísla na Reynoldsově pro určité rozsahy [20]

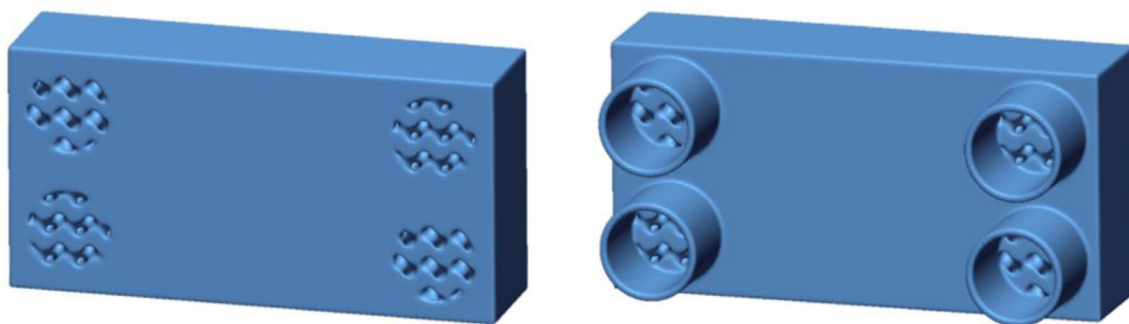
Name	Correlation	Range for Re
Fisher Koch S	$Nu = 3.02Re^{0.40}$	$10 < Re < 140$
F-RD	$Nu = 1.74Re^{0.54}$	$35 < Re < 290$
Gyroid	$Nu = 1.48Re^{0.57}$	$25 < Re < 250$
Neovuis	$Nu = 2.48Re^{0.45}$	$10 < Re < 75$
Schwarz-D	$Nu = 2.24Re^{0.55}$	$15 < Re < 300$
Schwarz-P	$Nu = 1.39Re^{0.45}$	$15 < Re < 250$
C(I ₂ -Y**)	$Nu = 1.52Re^{0.60}$	$40 < Re < 260$

Článek také výpočty dokázal, že při pevně dané tlakové ztrátě lze navrhnout 3 až 10krát menší tepelný výměník s TPMS nebo PNS strukturami než běžný trubkový, kdy oba druhy dosahují stejných tepelných výkonů.



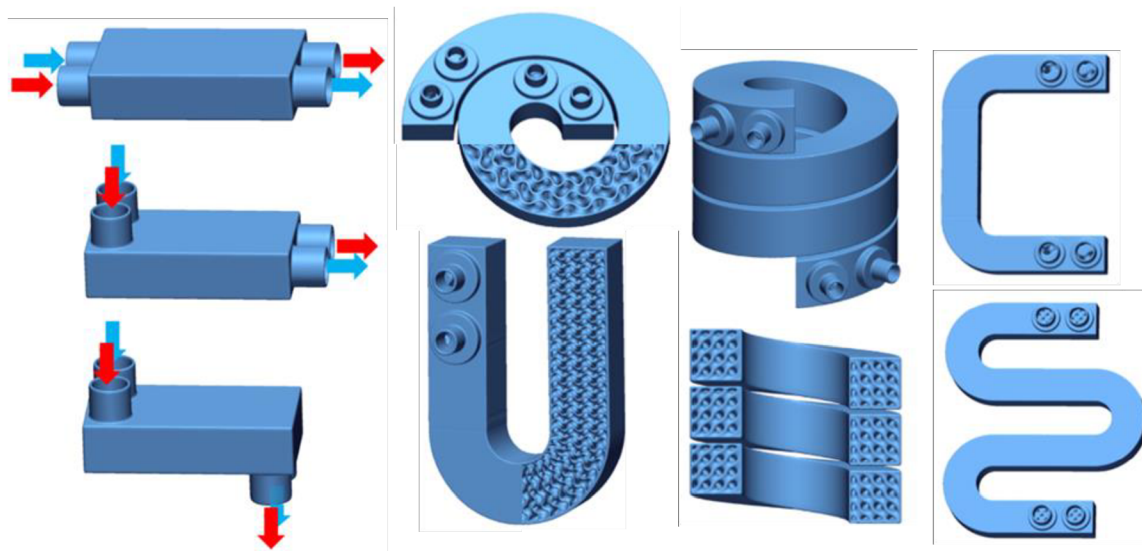
Obr. 2-9: Závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro buňky 10 mm [20]

Velmi podrobný popis návrhu a testování tepelných výměníků s TPMS strukturami vytvořili Kim a kol. [21] ve článku, kde se detailně věnují strategii designování kompaktních tepelných výměníků (v článku označovaných jako CHXs – *Compact Heat eXchangers*) pomocí objemových distančních polí a jejich booleovských operací. V zásadě je zde řečeno, že model výměníku lze vytvořit sloučením skříně (case), jádra s TPMS strukturami a vstupních/výstupních přírub pro horkou a chladnou kapalinu. Nutné je také zaslepit příslušné výstupy z TPMS buněk u konkrétního vstupu či výstupu, aby nedošlo ke smísení obou pracovních látek (viz Obr. 2-10). Posledním krokem návrhového algoritmu je export implicitní geometrie do .stl formátu v podobě meshe.



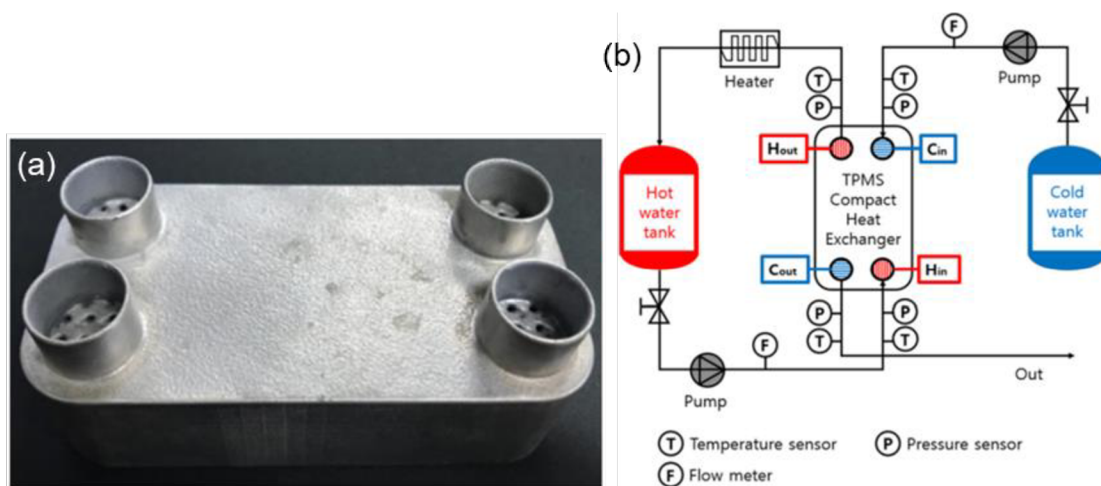
Obr. 2-10: Booleovské sloučení jádra, skříně a záslepek (vlevo) s přírubami (vpravo) [21]

Podstatnou roli při návrhu geometrie výměníku hraje řada faktorů, jako jsou tvar skříně, její typ, velikost a relativní hustota TPMS buňky a umístění vstupních a výstupních kanálů. Tyto faktory lze při použití výše popsané metody variovat (viz Obr. 2-11). Ne všechny vyobrazené tvary jsou však praktické a je třeba myslet i na vyrobiteľnosť a vznikajúci tlakové ztráty.

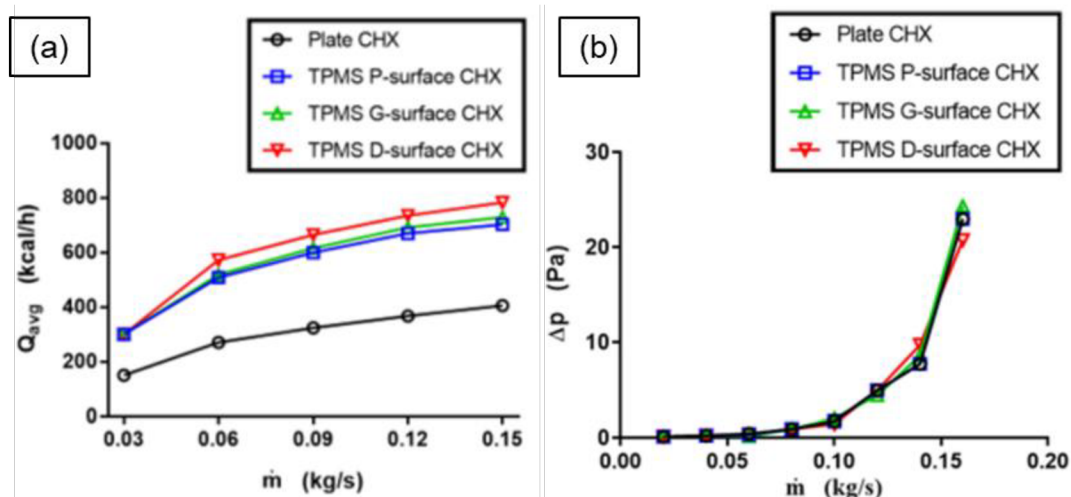


Obr. 2-11: Různé varianty umístění kanálů, typů TPMS buněk a tvarů skříní výměníků ([21], upraveno)

V rámci výzkumu byla aditivně vyrobena řada prototypů z polymeru i z hliníkové slitiny technologií LPBF (Obr. 2-12, a). U kovových výměníků byly na vstupech i výstupech měřeny teploty, tlak i průtok kapaliny (Obr. 2-12, b). Naměřená data a z nich spočtené hodnoty byly velmi detailní a plyne z nich, že mezi testovanými strukturami (gyroid, Schwarz P a diamond) vychází nejlépe z hlediska tepelného výkonu diamond. Nicméně i ostatní testované struktury prokázaly lepší hodnoty než deskový tepelný výměník při podobných tlakových ztrátách (Obr. 2-13, a, b).

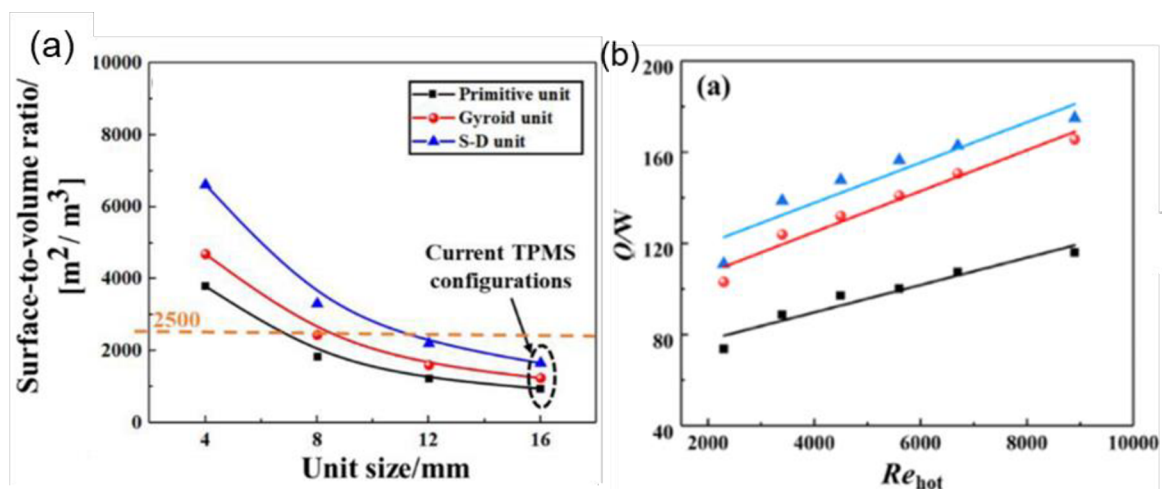


Obr. 2-12: (a) Aditivně vyrobený prototyp z hliníkové slitiny, (b) měřicí okruh pro testování [21]

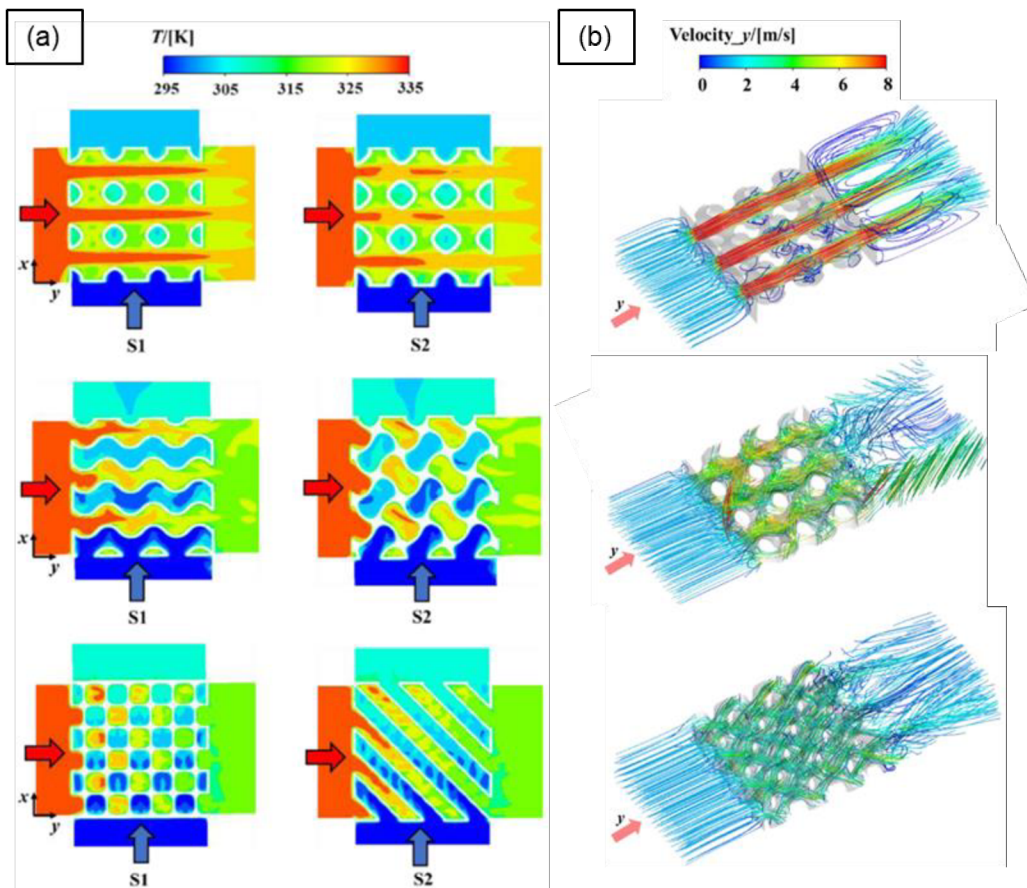


Obr. 2-13: (a) Spočtené tepelné výkony, (b) naměřené tlakové ztráty [21]

Další článek, který se zabýval výrobou a testováním TPMS výměníků sepsali Liang a kol. [22]. Obdobně zde byly jako ve výše zmíněných člancích z hliníkové slitiny metodou LPBF aditivně vyrobeny výměníky s gyroid, diamond a Schwarz P strukturami. Po výrobě následovala kontrola defektů pomocí CT, kdy nalezeny byly pouze drobné póry, které neovlivnily funkci výměníku. Simulace vyobrazily teplotní i rychlostní profil uvnitř navržených výměníků (Obr. 2-15). V článku je rovněž popisováno experimentální testování, kdy provozními tekutinami byl horký a chladný vzduch a v měřicím obvodu byly měřeny pomocí termočlánků a tlakových senzorů, teploty a tlaky na vstupech i výstupech. Experimentálně a numericky získaná data součinitele prostupu tepla a s ním související tepelný výkon byly porovnány mezi jednotlivými strukturami, přičemž nejlepší výsledky vykazoval opět diamond (Obr. 2-14). Přínosné také bylo zjištění, že se vzrůstající velikostí buňky klesá poměr SA/Vol .

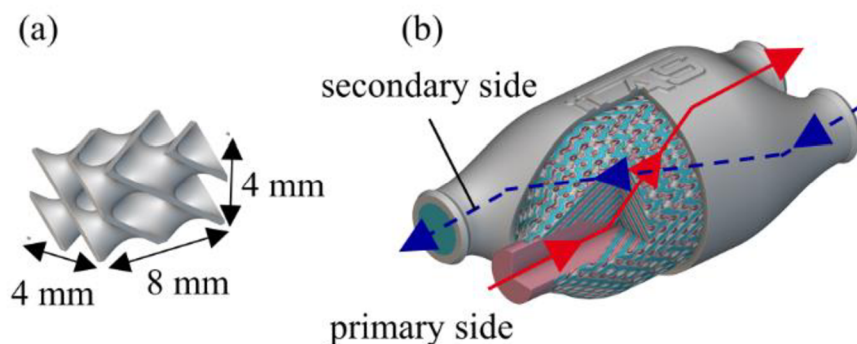


Obr. 2-14: Závislost (a) SA/Vol poměru na velikosti buňky, (b) tepelného výkonu na Reynoldsově čísle [22]



Obr. 2-15: (a) Teplotní profily v různých řezech, (b) Rychlostní profily proudění výměníky ([22], upraveno)

Röver a kol. [23] se zabývali opět porovnáním TPMS struktur a tentokrát žebrovaného výměníku, kdy navržený komponent využíval rektangulárně mapovanou strukturu diamond (viz Obr. 2-16), protaženou ve směru proudění. Cílem bylo, aby měl diamond výměník vyšší kompaktnost, nižší hmotnost, ale zároveň dosahoval vyšších výkonů než žebrovaný. Pro modelování struktur byl využit software nTopology, k výrobě technologie LPBF a materiál AlSi10Mg. Dříve zmíněné cíle se podařilo naplnit s hmotností redukovanou o 54 %, objemem o 41 %, nárůstem kompaktnosti o 104 % a zvětšením teplosměnné plochy o 22 %.

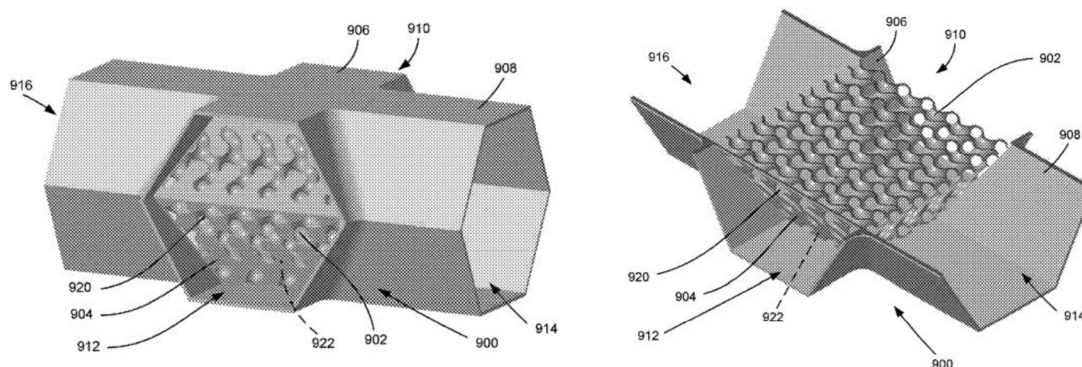


Obr. 2-16: (a) základní diamond buňka; (b) finální výměník v částečném řezu s naznačenými toky [23]

Poslední nalezený článek týkající se využití TPMS struktur v tepelných výměnících byl přehledový (*review*), kde Dutkowski a kol. [24] shrnují poznatky a současný stav této problematiky. Poukazují na v době vydání zatím malé množství článků zabývajících se tématem TPMS výměníků, které experimentálně testují zpravidla čtyři TPMS struktury, kterými jsou Schwarz P, gyroid, diamond a I-WP. Z těchto struktur je z hlediska nízkého odporu vůči proudění nejvhodnější Schwarz P a nejméně vhodný diamond, ovšem tento parametr významně závisí na geometrii TPMS buněk. Ovšem většina autorů se shoduje, že na úkor vyššího odporu proudění je z hlediska efektivity přenosu tepla pro tepelné výměníky nejvíce slibný diamond. Podle Dutkowského a kol. je ovšem potřeba další výzkum v této oblasti, jelikož není dostatečné množství publikací pokrývajících znalosti této problematiky. To již v současné době nemusí platit, jelikož článků se díky trendu téma vydává stále více.

2.2.5 Rešerše patentů, firem a softwarů

Nalezen byl také jeden patent od M. Vlahinose a kol. [25], který ukazuje jednoduchý výměník s jádrem tvořeným gyroid strukturou a vstupními i výstupními přírubami tvaru šestiúhelníku (viz Obr. 2-17). Tento patent byl však již zrušen, a proto se není třeba obávat jeho porušení.



Obr. 2-17: Patentovaný tepelný výměník s gyroid teplosměnným tělesem [[25], upraveno]

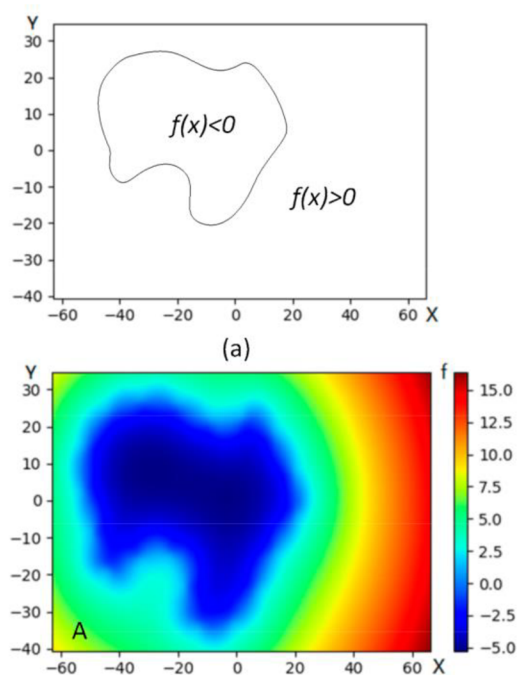
Dále také na trhu působí společnost zabývající se vývojem, výrobou a distribucí aditivně vyráběných výměníků. Jedná se o australskou společnost Conflux technology [26], která je na trhu již od roku 2015 a v současnosti má pobočku i v USA. Zabývá se vývojem tepelných výměníků zákazníkům přímo na míru. Vyznačují se velmi efektivními aditivně vyráběnými výměníky pro speciální aplikace jako je chlazení provozních kapalin výkonných průmyslových strojů, paliva závodních automobilů, či raketových motorů. Při vývoji efektivních výměníků se zaměřují na některé z klíčových oblastí, jako je maximální teplosměnná plocha, minimální tloušťka stěny, tlakové ztráty a hmotnost. Nebyl však dohledán žádný produkt využívající TPMS struktury. Vybrané aditivně vyrobené výměníky společnosti Conflux tech. jsou na Obr. 2-18.



Obr. 2-18: Vlevo první patent firmy Conflux tech. a vpravo jeden z nejnovějších designů výměníku (2023) [26]

Co se týče modelování TPMS struktur tak již existuje několik doplňků do osvědčených CAD softwarů, které dokáží modelovat několik základních TPMS struktur. Softwary jako Solidworks, Autodesk Fusion 360 & Netfabb, Carbon Design Engine a Siemens NX mají zabudované doplňky, které dokáží vymodelovat některé základní TPMS struktury, avšak často v omezené míře a komplexitě, případně za vysokou cenu licence. CAD softwary mohou také při generování TPMS struktur zatěžovat procesor počítače a je proto třeba výkonné zařízení.

Oproti běžnému (explicitnímu) CAD modelování je pro složitější, či větší strukturovaná tělesa vhodnější alternativou takzvané implicitní modelování. To je založeno na reprezentaci geometrie pomocí distančních polí (*distance fields*), jež jsou v prostoru popsána implicitními rovnicemi. Příklad implicitního pole v určité hladině Z je vyobrazen na Obr. 2-19. Výhodou oproti explicitnímu přístupu je, že implicitní geometrie je v případě TPMS struktur výrazně rychleji generována a soubory komplexních těles mají několikanásobně menší velikost.



Obr. 2-19: Příklad implicitního distančního pole ([27], upraveno)

Mezi implicitními modeláři stojí za zmínku Altair Sulis a Ultrasim 3D Lattice Engine, nástroje určené speciálně pro design aditivně vyráběných součástí s širokými možnostmi tvarové komplexnosti periodických lattice struktur. Patrně nejznámějším a nejpoužívanějším implicitním modelářem je však v současnosti nTopology [28], které umožňuje uživateli prakticky plnou kontrolu nad většinou aspektů modelování TPMS struktur včetně možnosti vymodelovat vlastní základní buňku. Výhodou softwaru je také možnost tvorby sešitů s konkrétními *workflows*, složených z pracovních bloků obsahujících různé proměnné. Design v nich vytvořený je tedy plně parametrický a pomocí real-time vizualizace je možné téměř okamžitě vidět upravený design.

2.3 Shrnutí hlavních zjištění

Z provedené rešerše vychází několik zásadních zjištění. Přibližně od roku 2019 probíhá vývoj a výzkum tepelných výměníků s TPMS strukturami, kdy řada autorů se svými týmy výměníky nejen navrhla a testovala simulacemi, ale v řadě případů byly výměníky i vyrobeny a otestovány experimentálně. Nejčastěji využívané a zkoumané TPMS buňky byly kubicky či rektangulárně mapovaný gyroid, diamond, Schwarz P a I-WP. Každá ze struktur má výhodu v některé oblasti a z toho důvodu nelze vyloučit ani jednu ze zmíněných z dalšího výzkumu. Kupříkladu Schwarz P struktura disponuje nejlepšími mechanickými vlastnostmi, nejkratším výrobním časem a zajišťuje nejhladší průtok tekutiny, a tudíž nejnižší tlakové ztráty. Pro tepelné výměníky je však nejpodstatnější tepelný výkon, který je zajištěn převážně velikostí teplosměnné plochy. V této oblasti však Schwarz P za ostatními typy zaostával. Nejvyšší tepelný výkon byl experimentálně naměřen u výměníků s diamond strukturou, která je však v ostatních dříve zmíněných oblastech až na třetí příčce. Zlatou střední cestou je gyroid (viz Tab. 2.7).

Tab. 2.7: Pořadí TPMS struktur v jednotlivých oblastech (dle provedené rešerše)

TPMS struktura	Tepelný výkon	Průtok tekutiny a tlakové ztráty	Čas výroby	Mechanické vlastnosti
diamond	1.	3.	3.	3.
gyroid	2.	2.	2.	2.
Schwarz P	3.	1.	1.	1.

Právě díky nejlepšímu tepelnému výkonu byla pro tuto práci vybrána struktura diamond. Jaké parametry a konfiguraci má diamond struktura ve výměníku mít, ale z rešerše patrně nebylo. Hlavními charakteristikami TPMS struktur jsou tvar základní buňky, přibližná tloušťka stěny (t), velikost hrany buňky (a), případně poloměr (r) a počet buněk v jednotlivých směrech (X; Y a Z). Z tloušťky stěny a velikosti hrany buňky lze spočítat její relativní hustotu (ρ_{rel}), což je další podstatný parametr při návrhu buňky. Ve výše zmíněných člancích používaly téměř všechny výměníky kubicky mapované buňky. Další parametry se již lišily více, ale z některých zdrojů (např. [22] a [29]) lze určit minimální tloušťky stěny $t_{min} \approx 0,75$ mm a velikost buňky $a = 7$ až 12 mm, což odpovídá relativním hustotám $\rho_{rel} = 10$ až 20 %.

Ohledně aditivní výroby z rešerše vyplynulo, že je možné relevantní TPMS buňky vyrábět bez podpor, avšak nebylo nalezeno, do jaké velikosti hrany lze stabilně dosahovat dostatečné kvality výroby, aby nedošlo ke zborcení. Při návrhu parametrů buňky je také třeba uvažovat, že reálná relativní hustota bude po výrobě nižší než designová zadaná v modeláři, a to až o nižší jednotky procent. Rovněž nebylo zjištěno, jak spolehlivé, z hlediska těsnosti, jsou buňky s nízkou tloušťkou stěny pro konkrétní využitou aditivní technologii.

2.4 Identifikace novosti a příležitosti

Ze získaných poznatků plyne, že přestože se využití TPMS struktur v tepelných výměnících věnuje několik týmů po celém světě, je v této oblasti stále mnoho k popsání a ujasnění, případně zpřehlednění. Tato práce vyplní požadavek zákazníka RIAT (odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií) na metodu návrhu tepelného výměníku využívajícího vhodně nakonfigurovanou TPMS strukturu. Uživatel bude schopen pomocí výsledné metody navrhnout tepelný výměník na konkrétní požadovaný výkon. V nalezených zdrojích také chybí limity výroby TPMS struktur, aby dosahovaly dostatečné rozměrové a tvarové kvality a zajišťovaly spolehlivě těsnost výměníku za provozních tlaků. Úspěšné působení společnosti Conflux technology na trhu dokazuje, že po aditivně vyrobených výměnících zajišťujících vysoký výkon při nízké hmotnosti je dostatečná poptávka. Dá se také očekávat, že zájem poroste s vývojem a vylepšováním stávajících technologií, které spotřebovávají velké množství energie, která je často měněna kromě práce i na teplo. Teplo, které je třeba z provozních tekutin odvádět kupříkladu pomocí kompaktních a efektivních výměníků.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Vymezení problému

Účelem tepelných výměníků je převádět energii v podobě tepla, dle druhého zákona termodynamiky z teplejší tekutiny do chladnější. Existuje široké rozpětí typů tepelných výměníků, od historicky nejpoužívanějších trubkových a deskových (žebrovaných) až po různé speciální konstrukce. Široký rozsah oblasti využití tepelných výměníků motivuje konstruktéry k návrhům stále kreativnějších a specifitějších koncepcí a tvarů, a to zejména v případě vnitřních prostor výměníků, tzv. teplosměnných těles, nebo také jader. Teplotní výkon lze počítat také pomocí Fourierova zákona:

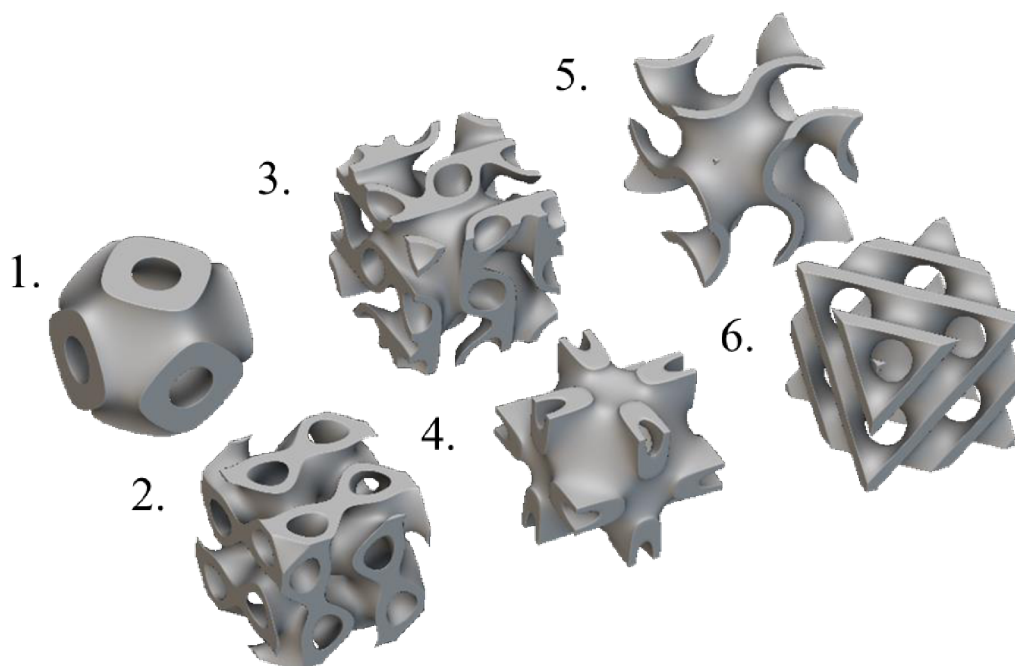
$$Q_F = -\lambda \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

kde:

Q_F	W	je tepelný výkon dle Fourierova zákona
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	tepelná vodivost materiálu
dT/dx	K	charakter proudění
A_s	mm^2	velikost teplosměnné plochy

První veličinu, tepelnou vodivost, lze zvýšit pouze výběrem materiálu, přičemž její nárůst je u některých kovů (např. litiny a slitin hliníku) spojen s poklesem pevnosti v tahu a dalších vlastností. Speciální materiály s dobrými teplotními i pevnostními vlastnostmi navíc bývají často drahé a těžko zpracovatelné do komplikovanějších tvarů. Proto konstruktéři častěji volí úpravu výkonu pomocí změny geometrie, tedy zvětšením teplosměnné plochy, jejím zhuštěním, nebo zakřivením.

Od konce 19. století jsou známy již popsané TPMS struktury (Obr. 3-1), které disponují vysokým poměrem plochy k objemu, díky kterému mají vysoký potenciál pro převod tepla. Jejich tvar, goniometrickými funkcemi popsané plochy, jimž byla přiřazena tloušťka, je ovšem natolik komplikovaný, že až donedávna nebylo možné tyto struktury ekonomicky výhodně vyrábět. S rozvojem aditivních technologií, které již dokáží tyto struktury vyrábět poměrně rychle a v dostatečné kvalitě, vzrostl i zájem o jejich využití jako výplň tepelných výměníků. V současnosti je možné těmito technologiemi zpracovat širokou škálu kovových materiálů včetně lehkých slitin s dobrou tepelnou vodivostí (jako např. AlSi10Mg) a vyvstává tak otázka: Jak navrhnout optimální design tepelného výměníku s TPMS strukturami, aby bylo dosaženo požadovaného tepelného výkonu, při malých rozměrech a nízké hmotnosti?



Obr. 3-1: Základní buňky TPMS struktur (1. Schwarz P, 2. split P, 3. lidinoid, 4. neovius, 5. gyroid, 6. diamond)

Od roku 2019 vyšla řada článků pojednávajících o tepelných vlastnostech TPMS struktur jako takových, případně konkrétně o jejich využití v tepelných výměnících. Některé studie byly zaměřeny na numerické výpočty přestupu tepla a proudění tekutin skrz TPMS buňky, jiné přistoupily k experimentálnímu testování. Žádná z nich však neporovnávala různé konfigurace a geometrické parametry buněk přímo ve výměníku s dosaženým výkonem, ani neuváděla celistvou metodu jejich návrhu.

V případě metody návrhu výměníku se strukturovaným materiálem, kterou se tato práce zabývá, se jedná o vývoj průmyslového produktu, jehož výstupem je funkční vzorek tepelného výměníku, který disponuje vysokým poměrem výkonu k jeho velikosti. Tato vlastnost z výsledného produktu činí ideální komponent pro použití např. v leteckém, kosmickém, energetickém, zdravotnickém, či automobilním průmyslu, kde je třeba chladit či ohřívat provozní kapaliny výkonných strojů (motorový a hydraulický olej, voda aj.) a zároveň je zde kladen důraz na nízkou hmotnost a malé zástavbové rozměry. Očekávaná úroveň technologické připravenosti (*Technology Readiness Level – TRL*) produktu je hodnoty 4 – technologie ověřená v laboratoři.

Zákazníkem vývoje finálního produktu je RIAT (odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií), který dlouhodobě cílí na vývoj aditivní výroby a její využití pro produkci průmyslových produktů. Vývoj v této diplomové práci spadá pod projekt specifického výzkumu FSI-S-23-8340 – Aditivní výroba pokročilých materiálů a struktur. Dále pak navazuje na projekt Výzkum a vývoj elektrického pohonu kolového nakladače (FW01010156), který proběhl za podpory TAČR v rámci veřejné soutěže TAČR TREND. Tvarová koncepce přírub výměníku zde byla odvozena z diplomové práce Ing. Březiny [30], přičemž výměník vzniklý v tomto projektu je použit jako referenční pro porovnání tepelného výkonu (deskový oproti TPMS strukturám). V neposlední řadě byla v rámci vymezení problému vytvořena tabulka (Tab. 3.1) přehledu cílů, funkcí, omezení a způsobů, jak dosáhnout vytyčených cílů.

Tab. 3.1: Specifikace potřeb projektu (C – cíle, F – funkce, O – omezení, Z – způsoby)

Charakteristika	C	F	O	Z
Výběr a vymodelování vhodné TPMS struktury	✓			
Optimalizace parametrů buňky zvolené TPMS struktury	✓			
Částečně, nebo plně parametrický model	✓			
Teplosměnné těleso vhodně vyplněné TPMS strukturami	✓			
Navrhnout metodou funkční vzorek	✓			
Shodný tepelný výkon s referenční komponentou při menších rozměrech	✓			
Zajištění odděleného prostoru pro obě kapaliny		✓		
Chlazení oleje vodou		✓		
Mínimální tloušťka stěny (vyrobitelnost)			✓	
Výroba ze slitiny AlSi10Mg			✓	
Přizpůsobení modelu pro aditivní výrobu LPBF (podpory, orientace tělesa a jeho prvků...)			✓	
Rešeršní analýza				✓
Implicitní modelování				✓
Experimenty s TPMS strukturami				✓
Výroba výměníku pomocí LPBF				✓
Otestování funkčního vzorku				✓

3.2 Cíle vývoje

Hlavním cílem práce je vyvinout metodu návrhu aditivně vyráběného výměníku. Konkrétně chladiče typu olej-voda, který bude využívat vhodnou TPMS strukturu jako teplosměnné těleso. Výstupem bude funkční vzorek s optimální konfigurací a relativní hustotou TPMS struktur, který bude dosahovat srovnatelného tepelného výkonu se zvolenou referenční komponentou. U funkčního vzorku navrženého metodou z této práce jsou zároveň očekávány nižší rozměry a hmotnost oproti referenčnímu.

Na metodu návrhu se kladou požadavky:

- Jasný a přehledný postup
- Definovaná omezení (provozní podmínky, rozměrová apod.)
- Ověření metody bude vzorovým funkčním vzorkem (*proof of concept*)

Dílčí cíle práce jsou:

- Výběr vhodné TPMS struktury a určení rozmezí jejích parametrů (tloušťka, velikost buňky a relativní hustota)
- Tvorba částečně, nebo plně parametrického modelu výměníku s výpočtem odhadu jeho tepelného výkonu
- Srovnání tepelného výkonu aditivně vyrobeného TPMS výměníku s deskovým

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

Po přesném vymezení problémů a specifikaci cílů bylo možné přejít ke koncepčním návrhům. V této kapitole je popsáno řešení jednotlivých úkonů a činností spojených s vytvářením metody návrhu TPMS výměníku a funkčního vzorku. Nejprve byly analyzovány cíle a omezení, které byly poté blíže specifikovány. V technicko – funkční analýze byla vytvořena schémata vstupních a výstupních faktorů v podobě *black boxu* a *glass boxu*. Rovněž byla popsána i řada analýz a testů vedoucích k optimálnímu návrhu metody a funkčního vzorku.

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

4.1.1 Analýza dílčích cílů

Výběr a vymodelování vhodné TPMS struktury

Jelikož je popsáno nejméně 8 TPMS buněk, z nichž 4 jsou v současné době zkoumány za účelem využití pro přenos tepla, bylo třeba důkladně rozebrat tyto struktury a závěry z jejich výzkumů týkající se přenosu tepla a proudění skrz ně. Na základě rešerše byla vyhodnocena jako nejlepší struktura diamond (v některých zdrojích označována Schwarz D, či D surface), díky nejvyšší hodnotě součinitele přestupu tepla a s ním souvisejícího tepelného výkonu. Uvažovány také byly struktury gyroid, díky nejnižším tlakovým ztrátám a druhému nejvyššímu výkonu, případně Schwarz primitive struktura, pro její nejjednodušší tvar, snadnou výrobu a možnost návrhu tenkých stěn. Díky své složitosti je nutné tyto buňky modelovat implicitně, jelikož při jejich větším počtu by byl soubor z běžného CAD softwaru datově příliš obsáhlý a výpočetně náročný. Použitý byl implicitní modelář nTopology (nyní jen nTop), který studentům poskytuje licenci zdarma a pro účely této práce je svými funkcemi více než postačující.

Optimalizace parametrů buňky zvolené TPMS struktury

Po výběru základní buňky je nutné zvolit optimální parametry. Základními geometrickými charakteristikami TPMS buněk jsou jejich velikost a tloušťka stěny. Z nich lze poté určit relativní hustotu základní buňky, která je stěžejní pro cílený tepelný výkon.

Částečně, nebo plně parametrický model

Aby byla metoda návrhu co nejjednodušší a uživatelsky přívětivá, je jedním z dílčích cílů i tvorba parametrického modelu. Jelikož nTopology je určený primárně k úpravě a analýze importovaných geometrií např. z CAD modelářů jsou jeho běžné modelovací funkce poměrně omezené. Zásadní roli, zda bude model částečně, nebo plně parametrický hraje komplexnost vnějšího tvaru výměníku a jeho přírub.

Teplosměnné těleso výměníku vhodně vyplněné TPMS strukturami

Aby bylo možné docílit požadovaného výkonu při nejnižších možných rozměrech (vzhledem k omezením), je třeba vybrat vhodný tvar celkového teplosměnného tělesa a vyplnit ho vybranou TPMS strukturou, tak aby nevznikaly příliš velké tlakové ztráty a nedocházelo k vířivým proudům při přechodu z/do přírub, nebo u záslepek pro chladnou či horkou kapalinu.

Navrhnout metodou funkční vzorek

Jedním z výstupů práce je i funkční vzorek, který je navržen vytvořenou metodou a musí splňovat požadovaná kritéria. S tímto vědomím je nutné vzorek vyrobit a otestovat jeho parametry, konkrétně teploty, tlaky a průtoky na vstupech i výstupech chladné a horké kapaliny do/z výměníku. Za tímto účelem je nutné sestavit testovací a měřicí okruh s vhodnými teplotními a tlakovými senzory a průtokoměry.

Srovnatelný tepelný výkon s referenční součástí při menších rozměrech

Nejdůležitějším dílčím cílem je, aby funkční vzorek disponoval srovnatelným tepelným výkonem, ale byl kompaktnější než referenční komponenta, která byla vyrobena stejnou technologií za shodných podmínek, ale místo TPMS struktur její teplosměnné těleso tvoří 2 desky oddělující prostory kapaliny s desítkami tenčích desek podél směru proudění.

4.1.2 Bližší specifikace omezení

Minimální tloušťka stěny

Z různých studií jsou známy minimální tloušťky rovných, případně lehce zakřivených, stěn dostatečně kvalitně vyrobitelných pomocí technologie LPBF na stroji SLM 280 HL (viz hodnota 0,5 mm pro materiál AlSi10Mg [31]). Avšak geometrie TPMS buněk, včetně zvolené diamond, je natolik složitá, že je nutné provést zkoušky vyrobitelnosti a těsnosti pro různé tloušťky, které jsou při zadání v nTopology pouze přibližné. Podstatná je minimální tloušťka stěny TPMS buňky, která se také liší v CAD softwaru oproti reálně vyrobené buňce.

Výroba ze slitiny AlSi10Mg

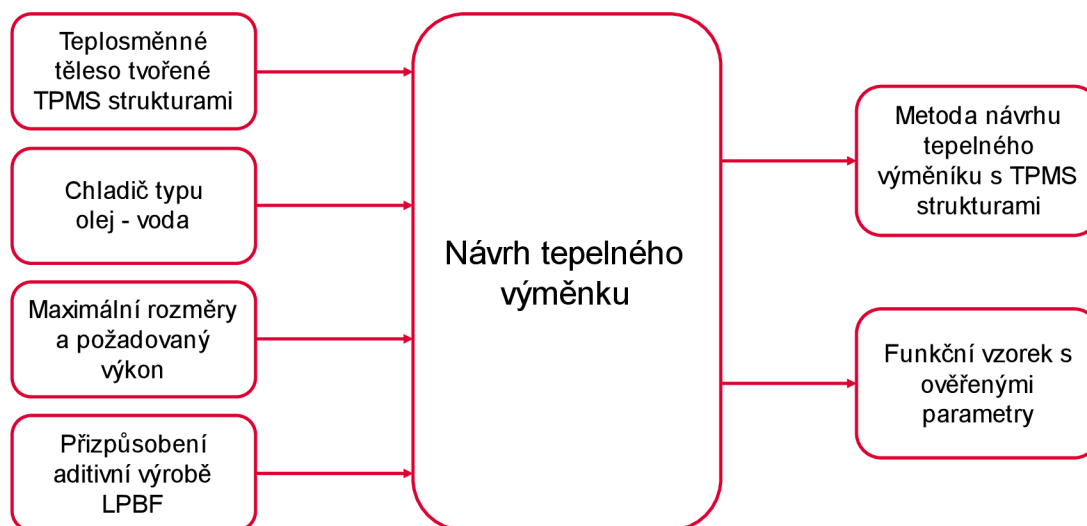
Stroj SLM 280 HL, na kterém je funkční vzorek vyroben, je schopen vyrábět z řady materiálů, včetně nerezových a nástrojových ocelí, kobalt-chromu, hořčíku a čisté mědi. Zásadní pro navrhovaný tepelný výměník je hmotnost a dobrý tepelný výkon, takže bylo třeba zvolit materiál s dobrou tepelnou vodivostí a nízkou hustotou. Nejlepší zkušenosti i z hlediska postprocessingu a kvality výroby jsou na Ústavu konstruování s hliníkovou slitinou AlSi10Mg, která splňuje výše popsané požadavky.

Přizpůsobení modelu aditivní výrobě LPBF

Při návrhu tepelného výměníku je třeba také dbát na technologické požadavky a omezení plynoucí z aditivní výroby na stroji SLM 280 HL. Například navržený vnitřní prostor výměníku musí být samonosný (tedy bez podpor), jelikož není možné bez destrukce komponenty odstranit vnitřní podpory.

4.2 Technická a funkční analýza

Do návrhu tepelného výměníku vždy vstupuje řada kritérií a požadavků, přičemž jeho výstupem může být funkční vzorek a metoda, která návrh popíše. Lze tak na proces návrhu nahlížet jako na *black box*. Konkrétní schéma pro případ této práce (viz Obr. 4-1) zahrnuje mezi vstupy hlavní požadavky a vystupuje z něho metoda návrhu tepelného výměníku s TPMS strukturami a otestovaný funkční vzorek.



Obr. 4-1: Black box – schéma vstupů a výstupů z procesu diplomové práce

Jelikož jde o poměrně komplexní proces návrhu, musí být *black box* otevřen a detailněji rozpracován v tzv. *glass box* (Obr. 4-2). Ten již obsahuje i dílčí kroky procesu návrhu a ukazuje ve kterých částech jsou zohledněny jednotlivé vstupy včetně posloupnosti procesu.

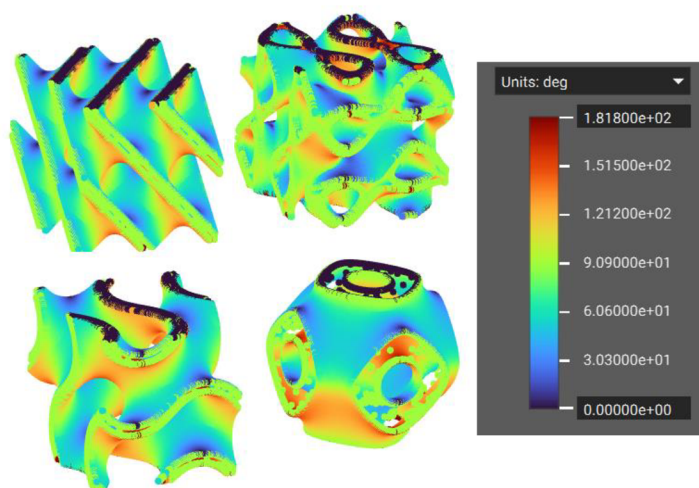


Obr. 4-2: Glass box – detailní schéma procesu diplomové práce

Provedená rešerše ukázala, že nejvhodnější strukturou pro přenos tepla ve výměnících je diamond, který se využívá s relativní hustotou mezi 15 až 25 %. Velikost buňky se lišila napříč články ještě více, a to od 4,6 mm po 16 mm. Výměníků s TPMS strukturami však bylo vyrobeno a otestováno příliš málo, aby bylo možno jednoznačně určit, nejlepší kombinaci tloušťky stěny, tvaru a velikosti buňky.

4.2.1 Analýza úhlu, přibližné a minimální tloušťky stěny

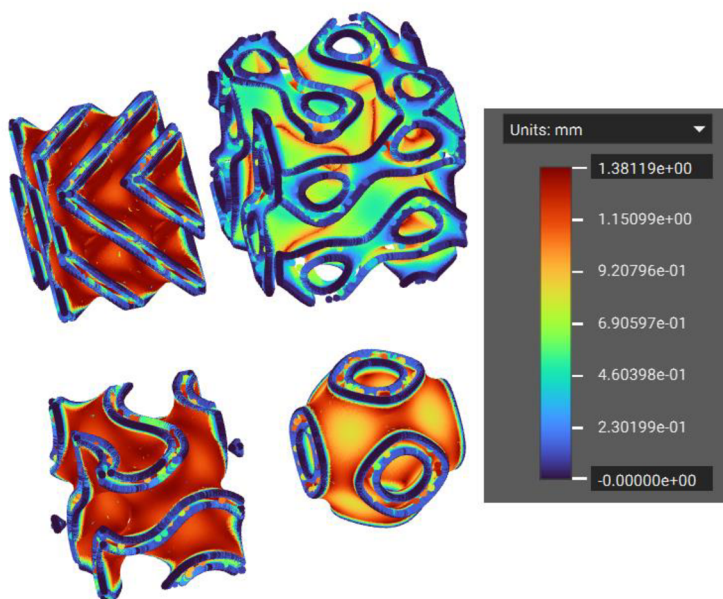
Před samotnými testy bylo provedeno několik analýz v prostředí nTopology a Matlab, přičemž první byla zaměřena na určení úhlů jednotlivých částí buňky s tiskovou platformou. Při LPBF výrobě je totiž možné tisknout bez podpor od úhlů $\geq 45^\circ$. Na Obr. 4-3 je vidět ukázka výsledků analýzy z prostředí nTopology, kdy jsou pomocí barevné škály zvýrazněny úhly jednotlivých elementů meshe u buněk diamond, split P, gyroid a Schwarz P. Sešit nTop, ve kterém lze analyzovat úhly i dalších typů a konfigurací buněk, obsahuje Příloha F1.



Obr. 4-3: Analýza úhlu s tiskovou platformou

Výsledky analýzy prokázaly, že části všech TPMS buněk sice dosahují kritických a nižších úhlů, avšak pouze na malých ploškách, a tedy do určité velikosti buňky není třeba využívat podpory. Ty jsou však v některých případech nezbytné v rozích buněk, kde by mohlo dojít k lokální nepřesnosti vrstvy kvůli nedostatečné opoře okolních částí struktury.

Software nTopology také umožňuje analyzovat tloušťky stěn pro jednotlivé elementy meshe (Obr. 4-4). Toho bylo využito z důvodu ověření vztahu v nTop zadaného parametru *approximate thickness* a minimální tloušťky, které daná konfigurace buňky dosáhne. Pro výrobu a následnou funkci výměníku (těsnost při určitých tlacích) je kritická právě minimální tloušťka. Z analýzy v nTopology bylo možné získat intervaly tlouštěk stěn pro jednotlivé buňky na základě zadané přibližné (*approximate*).



Obr. 4-4: Analýza tloušťky stěn buněk

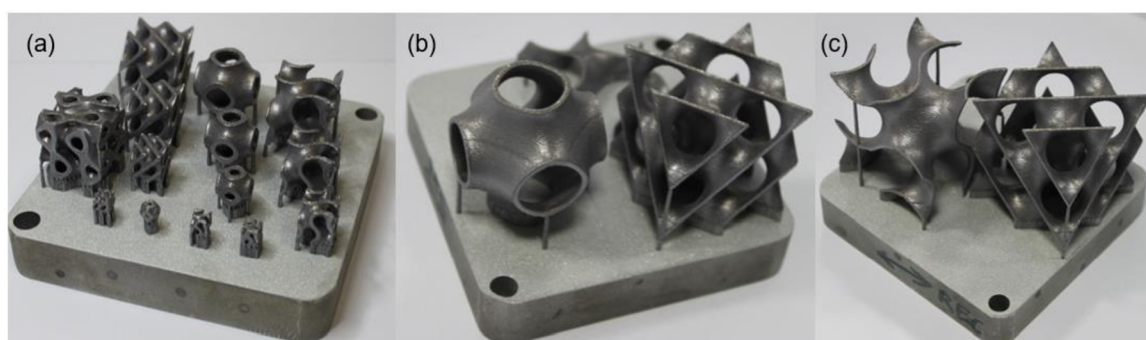
Výsledky byly následně ověřeny v Inventoru, kam byly meshe exportovány a tloušťky změřeny vždy v nejúžším místě středního průřezu buňky. Podrobné výsledky analýzy a jejich porovnání je zobrazeno v Tab. 4.1. Obdobně jako u analýzy úhlu je nTop sešit umožňující provést tuto analýzu i u dalších typů a konfigurací buněk součástí Příloha F2.

Tab. 4.1: Výsledky analýzy tloušťky buněk

	Přibližná tloušťka (nTop)	Interval opravdové tloušťky	Minimální tloušťka (CAD)
gyroid	1	0,5 - 0,7	0,6
	1,5	0,8 - 1	1
	2	1,1 - 1,4	1,3
	3	1,7 - 2,1	2
Schwarz P	1	1,1 - 1,8	1,4
	1,5	1,6 - 2,6	2,1
	2	2,2 - 3,5	2,6
	3	-	-
diamond	1	0,5 - 0,6	0,6
	1,5	0,7 - 1	0,95
	2	1 - 1,3	1,3
	3	1,6 - 2	2
split P	1	0,3 - 0,9	0,45
	1,5	0,4 - 1,4	0,7
	2	0,6 - 1,8	1
	3	0,9 - 2,6	1,5
	3,5	1 - 3,1	-

4.2.2 Testy kvality výroby různě velkých buněk

V prvním testu bylo celkem ve 3 stavbách vyrobeno 18 buněk různých typů a velikostí s cílem ověřit kvalitu výroby a odhalit hraniční délku hrany buňky, při jejímž překročení již tvarové nepřesnosti neumožní samonosné stavby. Vyráběny byly buňky gyroid, diamond, Schwarz P a split P (viz Obr. 4-5), které mají na základě rešerše největší potenciál v tepelných výměnících. Postupně byla zvětšována velikost hrany krychlové buňky od 5 mm po 40 mm (Tab. 4.2), přičemž každá vyrobená buňka byla následně naskenována pomocí 3D skeneru Atos [32].

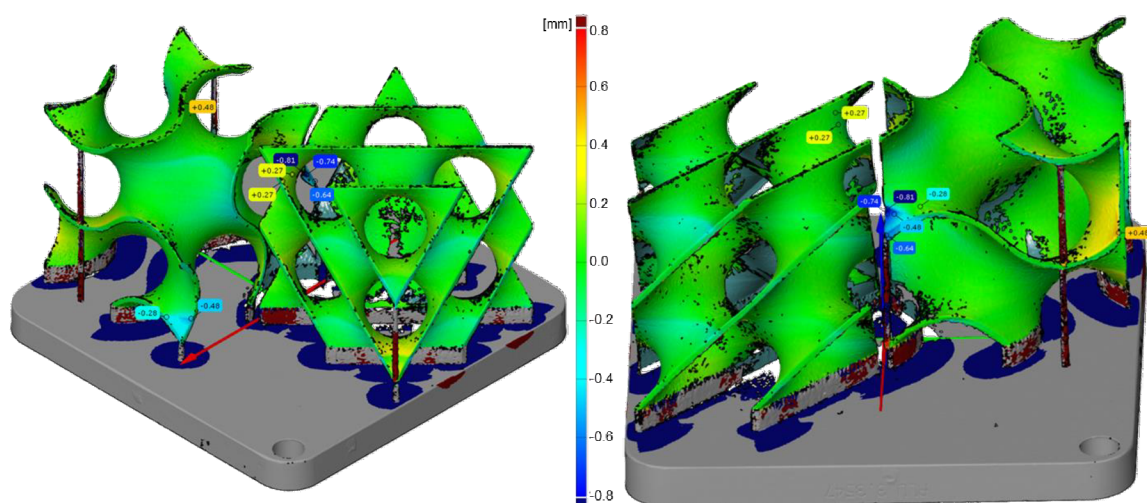


Obr. 4-5: Stavby buněk pro 1. test: (a) nejmenší (5 až 20 mm); (b) střední 30 mm; (c) největší 40 mm

Tab. 4.2: Výpis buněk postavených pro 1. test

Buňka č.	Typ TPMS	Délka hrany [mm]
1	gyroid	5
2		10
3		15
4		20
5	Schwarz P	5
6		10
7		15
8		20
9	diamond	5
10		10
11		15
12		20
13	split P	5
14		20
15	Schwarz P	30
16	diamond	30
17	gyroid	40
18	diamond	40

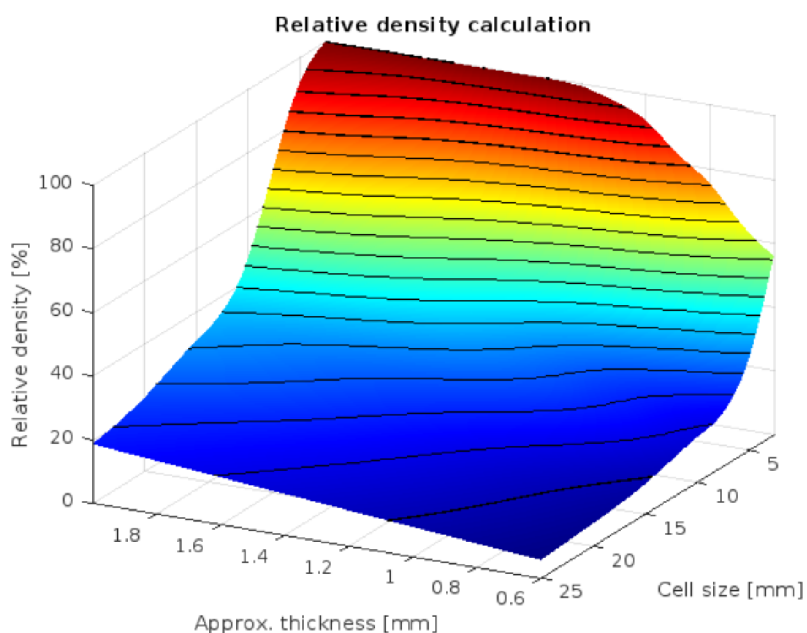
3D skenováním obdržena data byla převedena na mesh a následně porovnána v softwaru Gom Inspect s .stl modelem konvertovaným z implicitní geometrie (Obr. 4-6). Závěrem bylo, že lze kvalitně a bez podpor vyrábět buňky diamond a gyroid struktur do velikosti 30 mm, jelikož při větších délkách hrany obálkové krychle může dojít ke skokové odchylce vrstvy až o 0,7 mm, což je pro funkční vzorek výměníku již nepřijatelné.



Obr. 4-6: Vyhodnocení odchylek vyrobených buněk od CAD modelu

4.2.3 Výpočet relativní hustoty na základě parametrů buňky

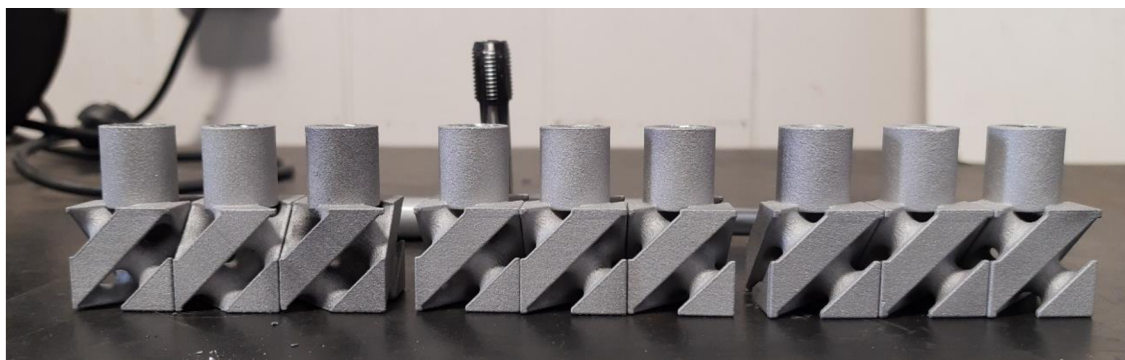
Základní parametry popisující TPMS buňky, tedy tloušťka stěny (t) a velikost buňky, resp. její hrany (a), společně určují hodnotu relativní hustoty (ρ_{rel}). Neexistuje však analytický vzorec pro výpočet jednoho z těchto parametrů ze zbylých dvou, přitom by takový vztah uživateli metody značně ulehčil návrh cílené buňky. Jelikož byla pro tuto práci vybrána kubická diamond struktura, byla v nTopology vymodelována sada těchto buněk s různými tloušťkami stěn a velikostmi buňky. Pro každou kombinaci byl spočten objem buňky a vypsána relativní hustota. Takto sestaveným trojrozměrným souborem bodů (souřadnice: t ; a ; ρ_{rel}) byla poté v Matlabu interpolována plocha odezvy (Obr. 4-7), která byla definována dvěma parametry a popsána polynomickou funkcí 2. a 3. stupně. Vytvořený skript je schopný vypsát hodnotu relativní hustoty pro libovolnou kombinaci tloušťky stěny a velikosti buňky v daném intervalu. Funkční skript obsahuje Příloha D1.



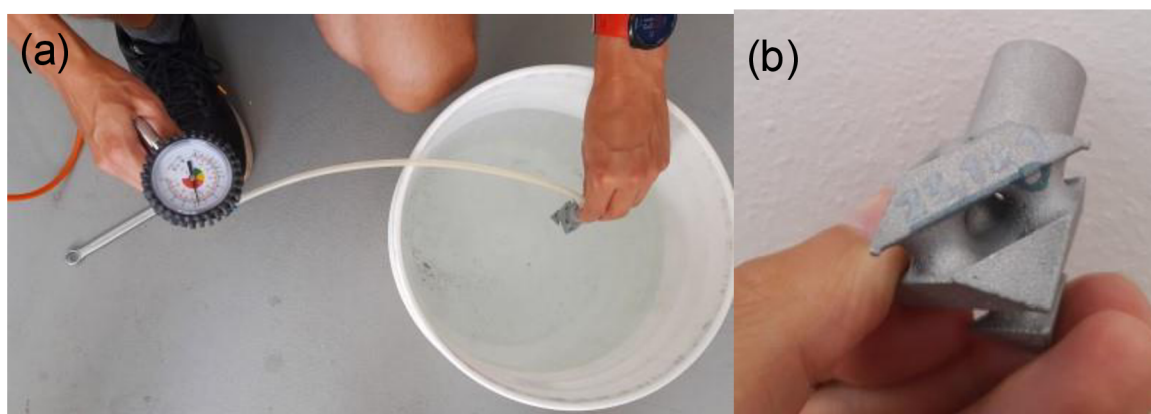
Obr. 4-7: Plocha odezvy závislosti relativní hustoty diamond buňky na velikosti buňky a tloušťce stěny

4.2.4 Testy těsnosti buněk o různé tloušťce

Po analýze tloušťky stěny ve virtuálním prostředí byla sice známa minimální tloušťka odpovídající přibližně, definované v nTopology, avšak bylo také třeba ověřit těsnost buněk za určitých tlaků. Před tímto testem byla brána minimální tloušťka stěny vyrobitelná v dostatečné kvalitě o hodnotě 1 mm, což odpovídalo 1,5 mm definovaným v nTop. Z rovnice pro výpočet součinitele prostupu tepla plyne, že s nižší tloušťkou stěny výměníku je přestup tepla větší, a proto bylo cílem tloušťku co nejvíce snížit, ovšem s ohledem na dostatečnou spolehlivost výměníku (nesmísení provozních kapalin). Proto byl proveden druhý test, kdy byla vyrobena sada testovacích vzorků o různých tloušťkách. Konkrétně byly vyrobeny 3 sady o 3 vzorcích s tloušťkami 1,4; 1,2 a 1,0 mm (viz Obr. 4-8), které byly poté natlačovány vzduchem o 7,8 bar a ponořeny do vody (Obr. 4-9 (a)). U všech vzorků bylo pozorováno, zda neunikají bubliny vzduchu. Test byl na každém vzorku proveden třikrát, kdy netěsnil pouze 1 ze 3 vzorků s tloušťkou stěny 1,0 mm. Tento vzorek měl v místě viz Obr. 4-9 (b) menší otvor, který mohl vzniknout při výrobě, nebo následné manipulaci a postprocessingu.



Obr. 4-8: Tři sady po 3 vzorcích pro testování těsnosti tlouštěk stěn



Obr. 4-9: (a) Testování těsnosti; (b) Otvor, kterým unikál vzduch

Po provedených testech byly vzorky rozříznuty a byla změřena reálná minimální tloušťka stěn vzorků, kdy namísto 1,4; 1,2 a 1,0 mm byly naměřeny tloušťky 0,9; 0,7 a 0,6 mm. Závěrem z testu bylo, že je možné vyrábět buňky s přibližnou tloušťkou stěny od $t = 1,2$ mm.

4.2.5 Testy tepelných vlastností TPMS buněk

Aby bylo možné vytvořit uživatelsky přívětivou metodu a pomocí ní navrhnout funkční vzorek s požadovaným tepelným výkonem bylo třeba otestovat jednotlivé konfigurace a velikosti buněk s cílem zjistit teplotní spád, tlakovou ztrátu a další parametry, které jsou buňky schopny za stanovených podmínek poskytnout. Hlavní však bylo určení vlivu konfigurace a velikosti buňky na tepelný výkon a další klíčové parametry výměníků.

Vzorky

Pro účely těchto testů bylo vyrobeno celkem 8 testovacích vzorků (v podstatě malé výměníky viz Obr. 4-10) s konfiguracemi od $1 \times 1 \times 1$ po $5 \times 5 \times 2$, kdy konfigurace $5 \times 1 \times 1$ měla 3 provedení s různými velikostmi buněk (odpovídajícími $\rho_{rel} = 15; 20$ a 25%). Sada vzorků byla navržena tak, aby pokryla relevantní oblast parametrů plynoucí z řešerše a testů v předchozích kapitolách. Vstupní parametry vyrobených a testovaných vzorků jsou vypsány v Tab. 4.3.



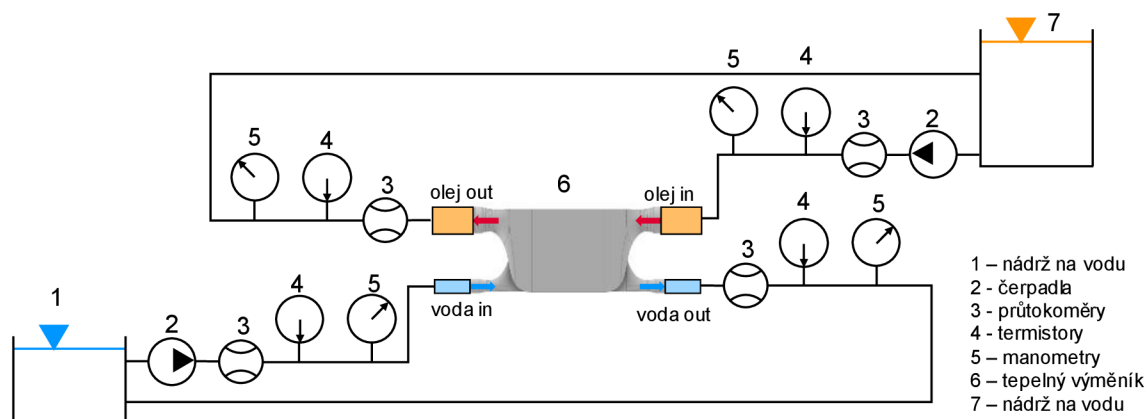
Obr. 4-10: Testovací vzorky pro určení tepelných vlastností konfigurací TPMS struktur

Tab. 4.3: Přehled parametrů vyrobených vzorků

Konfigurace buněk	Tloušťka stěny [mm]	Velikost buňky [mm]	Relativní hustota [%]	Váha [g]
$1 \times 1 \times 1$	1,2	11,1	25	29
$3 \times 1 \times 1$				42,9
$5 \times 1 \times 1$				49,5
$5 \times 1 \times 1$		13,9	20	61,5
$5 \times 1 \times 1$				85,5
$10 \times 1 \times 1$		11,1	25	103,5
$5 \times 5 \times 1$				98,6
$5 \times 5 \times 2$				138,4

Měřicí okruh

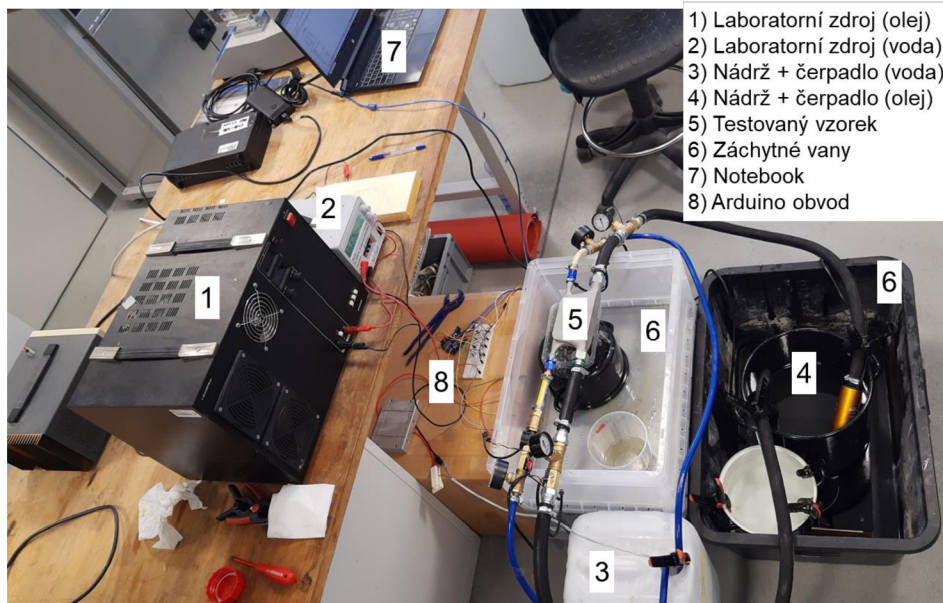
Následovalo iterační sestavování a zkoušení testovacího okruhu, který může po menších úpravách sloužit jak k testování výše zmíněných vzorků, tak i referenčního výměníku a navržených finálních funkčních vzorků. Okruh je schematicky zobrazen na Obr. 4-11.



Obr. 4-11: Schéma testovacího okruhu výměníků včetně legendy komponent

Voda o teplotě přibližně 23 °C je v chladné větvi okruhu ponorným čerpadlem hnána z nádrže do průtokoměru, skrz přímou spojku se zašroubovaným termistorem a T-kus s manometrem. Poté voda projde výměníkem a opět skrz šroubení s termistorem a manometrem zpět do nádrže. Obdobně je sestavena i olejová větev, ovšem s rozdílem většího průměru hadic (místo 13 s 20 mm), výkonnějšího čerpadla a kovové nádrže, kde je olej za pomoci indukční varné desky zahříván na teplotu přibližně 45 °C, při které vstupuje do okruhu. Obě čerpadla v okruhu jsou ponorná, a aby byla zajištěna určitá kontrola nad jejich výkony (a souvisejícími průtoky), jsou napájena z laboratorních zdrojů.

Tlaky z manometrů jsou pak odečítány vizuálně, a pro obdržení hodnot objemových průtoků a teplot již bylo zapotřebí sestavit okruh s deskou Arduino a vytvořit sketch v prostředí Arduino IDE, který zajišťoval přepočty a výpis hodnot (Příloha E). Z tohoto důvodu byl při testech zapotřebí i notebook se softwarem Arduino IDE. Je třeba ještě poznamenat, že i přes důkladné utěsnění teflonovou páskou, v některých spojích vlivem výměny vzorků a další opakované montáže a demontáže unikalo drobné množství kapalin, proto byla velká část okruhu umístěna nad zachytnými vanami (viz Obr. 4-12). Soupis konkrétních komponent využitých v řetězci a popis kalibrace senzorů obsahuje Příloha C.



Obr. 4-12: Testovací okruh pro určení tepelných vlastností vzorků

Průběh testování a měření

Hodnoty pro každý vzorek byly měřeny při 4 různých průtocích chladného média (odpovídajících napětím 6; 8; 10 a 12 V na napájecím zdroji čerpadla). Každý vzorek byl změřen minimálně dvakrát pro ověření opakovatelnosti měření.

Postup každého měření probíhal následovně:

1. Zapnutí ohřevu varné desky (dokud teploměr v nádrži s olejem neukazuje (~48 °C).
2. Zapnutí samotného vodního čerpadla (průtok dle napětí na zdroji pro daný pokus).
3. Čekání, dokud se hodnoty z termistorů (Arduino IDE serial monitor T1 a T2) neustálí na teplotě přibližně stejné jako teploměr v nádrži s vodou (~20 °C).
4. Vypnutí vodního čerpadla.
5. Zapnutí samotného olejového čerpadla. Setrvání, dokud se termistory neustálí (Arduino IDE serial monitor T3 a T4 ~ 48 °C) na podobné teplotě, jako teploměr v nádrži (bod 1).
6. Až přestanou teploty oleje (vstup, výstup T3 a T4) růst a budou přibližně stejné, zapnout vodní čerpadlo s daným napětím.
7. Zapsat hodnoty tlaků (vstup voda a vstup olej) do excel sešitu. Manometry výstup vody i oleje by měly ukazovat 0 bar.
8. Počkat, dokud se teplotní diference (T2-T1, a T3-T4) neustálí. Ideální ve chvíli, kdy T1 = 23,02 °C a T3 = 45,05 °C (cca po 2 minutách chodu obou čerpadel současně).
9. Vypnout obě čerpadla.
10. Zapsat hodnoty ze seriál monitoru Arduino IDE (T1 až T4 + průtok vody a oleje). V případě že hodnoty kolísají zapsat nejčastější hodnotu, či průměr 2 až 3 sousedních.
11. Přihřát, nebo počkat až zchladne olej. Případně vyměnit vodu za chladnější.

Výsledná data z těchto testů sloužila jako podklad pro vytvoření predikčního skriptu, resp. ploch odezvy jednotlivých veličin pro různé prostorové konfigurace a velikosti buněk. Konkrétně naměřenými veličinami byly:

Relativní tlaky na vstupech:	p_1 a p_2	[bar]
Teploty na vstupech a výstupech:	$T_{1,in}; T_{1,out}; T_{2,in}; T_{2,out}$	[°C]
Objemové průtoky	$\dot{V}_1; \dot{V}_2$	[l/min]

kde index 1 náleží oleji a index 2 vodě. Dále vyplynuly z testů i provozní podmínky, za kterých byly testovány závěrečné funkční vzorky:

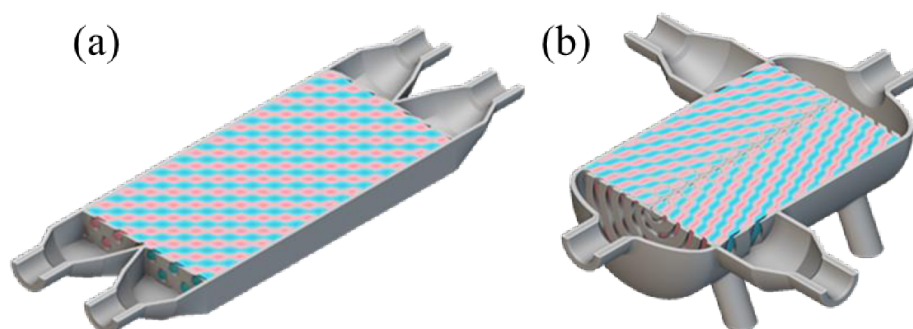
$$T_{1,in} = 45,05 \text{ °C}; \quad \dot{V}_1 = 2,8 \text{ l/min}$$

$$T_{2,in} = 23,02 \text{ °C}; \quad \dot{V}_2 = 5 \text{ l/min}$$

Vstupní teploty kapalin a objemové průtoky byly takto zvoleny dle možností používaných čerpadel, konkrétně výkonu při daném napájecím napětí (max 12 V) a maximální provozní teplotě dané výrobcem.

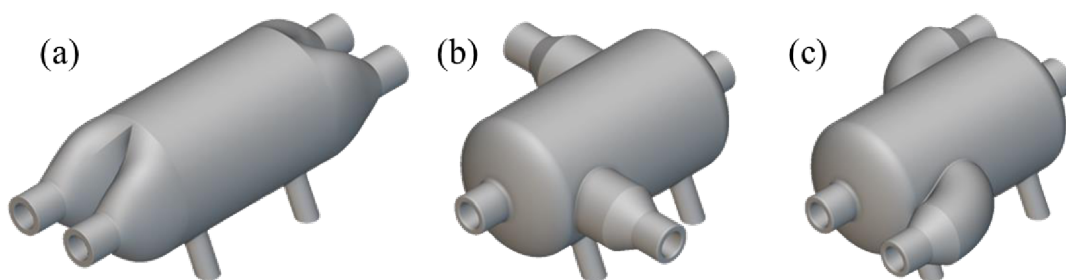
4.3 Návrh a analýza alternativních řešení

Dále byly vypracovány 2 zjednodušené modely alternativních řešení TPMS výměníku, kdy nejprve vyvstala otázka celkové koncepce skříně výměníku. Přičemž po úvaze a diskuzích s vedoucím práce a dalšími kolegy z Ústavu konstruování, ohledně úskalí a obtížnosti výroby, postprocessingu a výpočtů byl zvolen běžný kvádrový (viz Obr. 4-13 a). Hlavními důvody bylo snadnější upínání výměníku při obrábění funkčních ploch a využitelnost dat z dosud provedených analýz a testů, které se zaměřovaly výhradně na kubické buňky, většinou v kvádrovém obálkovém tělese.



Obr. 4-13: Základní tvarové koncepty celého výměníku (a) kvádrový; (b) válcový

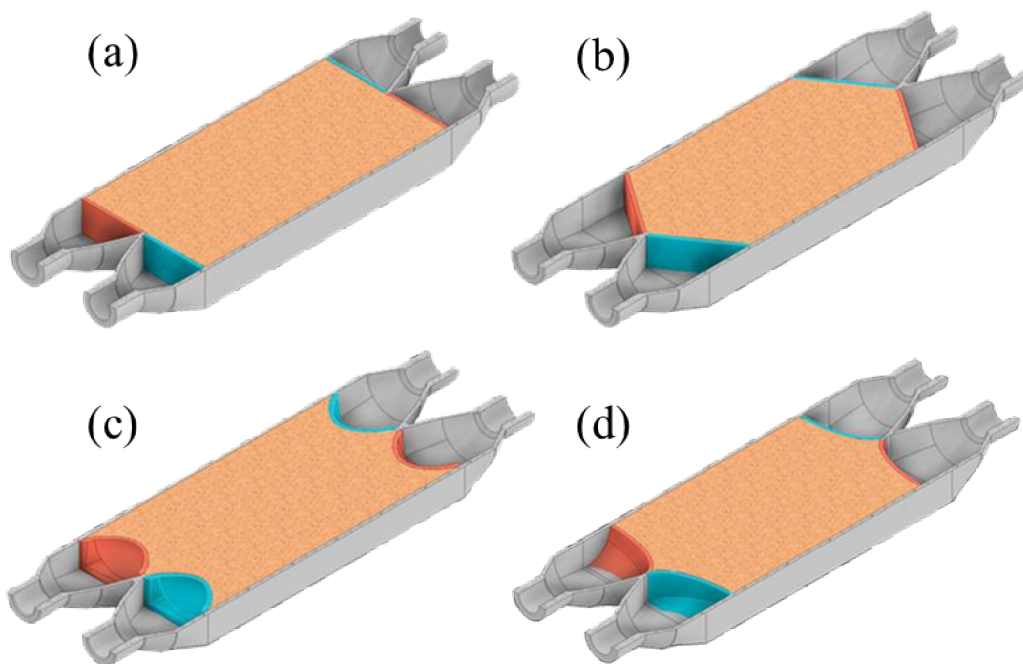
Další otázkou při návrhu funkčního vzorku byly směry a umístění vtokových a výtokových přírub. I zde byly vytvořeny 3 koncepty (viz Obr. 4-14). Jejich rozdíl je nejvíce patrný při aplikaci na válcový výměník, ovšem lze příruby obdobně umístit i na zvolenou kvádrovou koncepci. V zásadě se jednalo, jestli je z hlediska efektivity proudění, souvisejících tlakových ztrát a postprocessingu výměníků výhodnější umístit příruby z čel skříně, či z boků a zda by měly vůči sobě směřovat souběžně, nebo příčně.



Obr. 4-14: Koncepty umístění a směru přírub (a) přímé z čel; (b) po stranách napříč; (c) po stranách souběžně

Cílem bylo, aby obě kapaliny vůči sobě proudily podél co nejdelší dráhy, a aby byla zajištěna protiproudost. Jelikož příruby po bocích výměníku vedou spíše na křížový tok, byla zvolena varianta (a) s přírubami na čelech.

Poslední zásadní otázkou byl tvar přechodu teplosměnného tělesa v již zmíněné příruby, tedy budoucí záslepka pro chladnou, či horkou kapalinu. V tomto kroku byly vytvořeny koncepte 4 (viz Obr. 4-15), kdy první 3 vycházely z práce Vlahinose a O'hary [33], kteří uvažovali obdobná napojení u jejich válcového gyroid výměníku. Čtvrtá koncepce je šablonování obdélníkového otvoru vedoucího z jádra vždy na bok výměníku, kde je nakreslena půlkružnice s průměrem rovným výšce jádra. Šablonování je provedeno podél čtvrtiny elipsy propojující nejvzdálenější body dříve zmíněných tvarů. Tato koncepce (d) byla vybrána po konzultaci s odborníky na CFD ze společnosti TechSoft Engineering, spol. s r.o. na jednom ze seminářů. Zvolena byla díky očekávaným nižším tlakovým ztrátám, v porovnání s ostatními variantami.



Obr. 4-15: Koncepte napojení teplosměnného tělesa na příruby (a) přímé; (b) šikmé; (c) paraboloidní; (d) šablonování

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Po zvolení nejlepšího konceptu funkčního vzorku TPMS výměníku, bylo třeba vytvořit matematický model pro jeho přesný návrh a dopočet jeho parametrů. Těmi jsou např. tepelný výkon, součinitel prostupu tepla a teplotní efektivita. Je třeba myslet také na výpočty samotných TPMS struktur, kterých není nutno provádět mnoho, ale dobře popíší jádro výměníku. Mimo matematický model jsou níže určeny přesnější tvary a rozměry funkčních vzorků. Také jsou v kapitole 5.1.4 popsány materiál výměníku a provozní kapaliny včetně jejich, pro tuto aplikaci podstatných, vlastností. Na závěr je uvedena a popsána cenová rozvaha, tedy odhad výrobních nákladů funkčních vzorků.

5.1 Matematický model

Při tvorbě metody návrhu tepelného výměníku a produktu samotného, je matematický model důležitý kvůli popsání TPMS struktury a její zvolené konfigurace. Také byly vytvořeny matematické modely pro TPMS výměníky a referenční komponent, resp. pro výpočet jejich tepelných výkonů. Není však radno opomíjet ani další parametry samotných TPMS buněk, které ve svých publikacích uvádí autoři článku zmíněných v kap. 2.2.

5.1.1 Výpočty TPMS struktur

V případě přestupu tepla skrz stěny TPMS struktury je klíčovým parametrem tzv. *surface area to volume ratio (SA/Vol)*, neboli poměr plochy ku objemu. V některých publikacích se tento poměr označuje také jako kompaktnost a je definován:

$$SA/Vol = \frac{S_{TPMS}}{V_{TPMS}} = compactness \quad (3)$$

kde:

S_{TPMS} m² je plocha TPMS struktury

V_{TPMS} m³ objem TPMS struktury

Relativní hustota TPMS buňky je důležitým parametrem, jelikož pozitivně ovlivňuje přestup tepla, ale obvykle na úkor mechanických vlastností. Obecně lze relativní hustotu, označovanou kromě ρ_{rel} , také $\bar{\rho}$ spočítat:

$$\rho_{rel} = \left(1 - \frac{V_{solid} - V_{TPMS}}{V_{solid}}\right) \cdot 100\% \quad (4)$$

kde:

V_{solid} m³ je objem plné buňky

V_{TPMS} m³ objem základní TPMS buňky

Avšak ani u základních TPMS struktur není známý analytický vzorec pro výpočet jejich objemu, proto byl v softwaru nTopology vymodelován statistický vzorek buněk s parametry přibližné tloušťky stěny a délky hrany:

- $t = 0,2 \div 0,8$ s krokem po 0,2 mm a $1 \div 2$ mm s krokem po 0,1 mm
- $a = 2,5$ a $5 \div 25$ mm s krokem po 5 mm

Postup zpracování dat a tvorba plochy odezvy je popsána v kapitole 4.2.3. Zde je uveden příklad rovnice ji popisující v případě, že je vytvořena plošným polynomem 3. stupně, tedy vztahu pro výpočet relativní hustoty diamond buňky:

$$\begin{aligned} \rho_{rel} \cong & 0,431 \cdot t^3 + 0,473 \cdot t^2 \cdot a - 9,817 \cdot t^2 - 0,069 \cdot t \cdot a^2 - \\ & -4,814 \cdot t \cdot a + 78,52 \cdot t - 0,017 \cdot a^3 + 0,835 \cdot a^2 - 11,955 \cdot a + 42,612 \end{aligned} \quad (5)$$

Funkci je možné zpřesnit zaznamenáním více kombinací ve zkoumané oblasti tlouštěk a délek hran, případně proložením polynomem vyššího stupně. To však platí jen do určité hodnoty stupně polynomu.

5.1.2 Výpočty TPMS výměníků

Jelikož se v případě TPMS struktur jedná o velmi složitá tělesa, neexistuje zatím slušný matematický model, který dokáže vypočítat tepelný výkon pro různé konfigurace buněk. Největší problém je při určování součinitele prostupu tepla U (*Overall heat transfer coefficient*). Proto je třeba využít přístup dopočítání těchto veličin z experimentálně naměřených dat (viz kap. 4.2.5). Běžně je tepelný výkon definován vztahem:

$$Q_1 = C_1 \cdot \Delta T_1 \quad \text{resp.} \quad Q_2 = C_2 \cdot \Delta T_2 \quad (6)$$

$$\Delta T_1 = T_{1,in} - T_{1,out} \quad \text{resp.} \quad \Delta T_2 = T_{2,out} - T_{2,in} \quad (7)$$

$$C_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p,1} \quad \text{resp.} \quad C_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p,2} \quad (8)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \quad \text{resp.} \quad \dot{m}_2 = \dot{V}_2 \cdot \rho_2 \quad (9)$$

kde:

$Q_{1;2}$	W	je tepelný výkon
C	W·K ⁻¹	tepelná kapacita
ΔT	K	teplotní rozdíl kapaliny
T_{in}	K	teplota na vstupu
T_{out}	K	teplota na výstupu z výměníku
\dot{m}	kg·s ⁻¹	hmotnostní tok
\dot{V}	m ³ ·s ⁻¹	objemový tok

c_p	$\text{W} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^3$	hustota kapaliny

Indexy 1 a 2 značí veličiny přiřazené jednotlivým kapalinám dle důležitosti a jelikož se jedná o chladič oleje, primární je olej s indexem 1 a sekundární voda s indexem 2. Rozdíl spočtených výkonů pro chladnou a horkou kapalinu je však příliš velký, a proto je třeba přistoupit k řešení pomocí metody P1–NTU1, kterou popisuje ve své knize např. Shah a Sekulic [34]. Jedná se o metodu využívanou pro komplikované případy výměníků a tepelný výkon je zde počítán:

$$Q = P_1 \cdot C_1 \cdot \Delta T_{max} \quad (10)$$

$$P_1 = \frac{T_{1,out} - T_{1,in}}{T_{2,in} - T_{1,in}} \quad (11)$$

$$\Delta T_{max} = |T_{2,in} - T_{1,in}| \quad (12)$$

kde:

Q	W	je tepelný výkon dle metody P-NTU
P_1	-	termická účinnost
ΔT_{max}	K	maximální teplotní rozdíl

S ohledem na složitost geometrie teplosměnné plochy byl také testován vliv uspořádání toku (křížový, resp. protiproudý tok), přičemž z porovnání relativních chyb vyplynulo, že předpoklad protiproudého toku nevnáší významnou chybu. Ta vyšla v případě vzorku 5×5×1, který má největší potenciál křížového toku pouze 0,14 % (viz Příloha H). Charakter toku (protiproudý, křížový či sou proudý) zohledňuje parametr F , který má pro čistě protiproudý výměník hodnotu 1 a pro všechna ostatní uspořádání nabývá hodnot (0; 1). Korekční součinitel F je poté provázaný se součinitelem prostupu tepla U a počtem přenosových jednotek NTU (*Number of Transfer Units*) vztahy:

$$U_{cf} = \frac{Q}{A_s \cdot F \cdot \Delta T_{lm}} \quad (13)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_{he} - T_{ce}}{\ln \left(\frac{T_{he}}{T_{ce}} \right)} \quad (14)$$

$$T_{he} = T_{1,in} - T_{2,out} \quad \text{resp.} \quad T_{ce} = T_{1,out} - T_{2,in} \quad (15)$$

$$NTU = \frac{\ln \left(\frac{1 - R_1 \cdot P_1}{1 - P_1} \right)}{F \cdot (1 - R_1)} \quad (16)$$

$$R_1 = \frac{T_{2,in} - T_{2,out}}{T_{1,out} - T_{1,in}} \quad (17)$$

$$Q_{rel} = \frac{Q}{A_s} \quad (18)$$

kde:

U_{cf}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	je součinitel prostupu tepla pro protiproudý výměník
A_s	m^2	velikost teplosměnné plochy
ΔT_{lm}	K	střední logaritmický teplotní rozdíl
T_{he}	K	rozdíl teplot na horké straně výměníku (s nátokem horké kap.)
T_{ce}	K	rozdíl teplot na chladné straně vým. (s nátokem chladné kap.)
F	-	korekční součinitel (v tomto případě volen 1)
NTU	-	počet přenosových jednotek
R_1	-	poměr tepelných kapacit
Q_{rel}	$W \cdot m^{-2}$	poměrný tepelný výkon

Velikost teplosměnné plochy (A_s) jádra výměníku s TPMS strukturami je běžnými metodami obtížné určit, avšak v nTopology lze poměrně jednoduchým propojením bloků tento údaj obdržet (součástí souborů 3; 4 a 7 viz Příloha F). Příklad konkrétního výpočtu pro vzorek 5×5×1, obsahuje Příloha H.

5.1.3 Výpočty referenčního výměníku

Pro kontrolní výpočet referenčního aditivně vyrobeného kompaktního deskového výměníku bylo vyzkoušeno několik přístupů a na závěr byla použita opět metoda P1-NTU1. Pro případ referenčního vzorku odpovídá tepelný výkon $Q = 302,6$ W a jelikož je řešený výměník blízký deskovému s profilovanými deskami, jsou pro stanovení teplosměnné plochy A_s využity výpočetní vztahy dle Hewitta a kol. kapitola 7, knihy Process Heat Transfer [35].

$$A_s = 2 \cdot L \cdot W \quad (19)$$

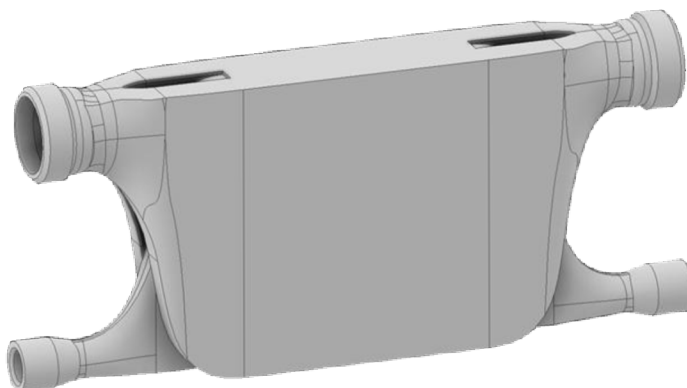
kde:

W	mm	šířka teplosměnného tělesa referenčního výměníku
L	mm	délka teplosměnného tělesa referenčního výměníku

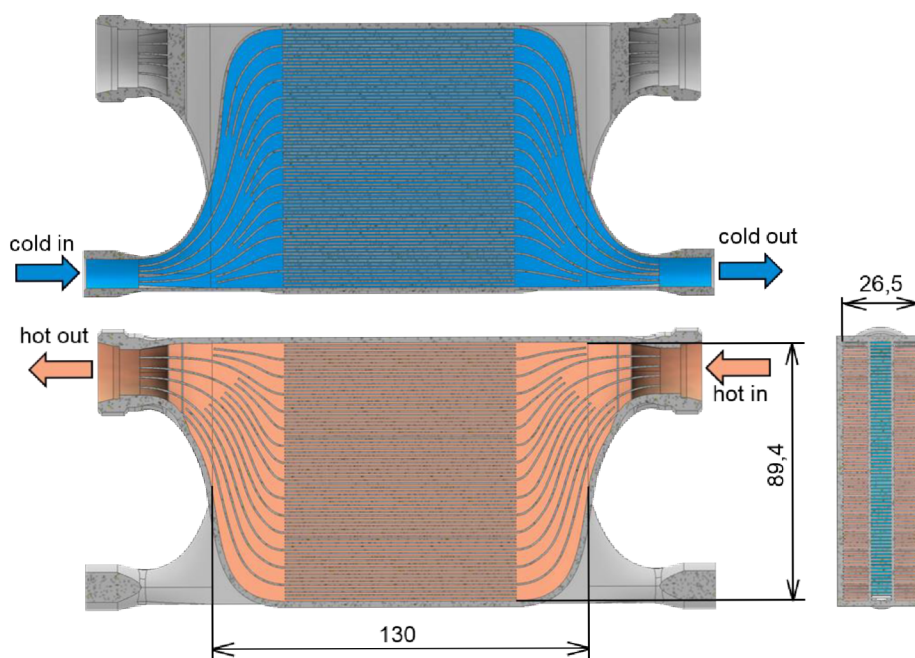
Určení tvarů, rozměrů a materiálů

Jak již bylo zmíněno v 4.3, výsledná koncepce pro funkční vzorky byla zvolena kvádrová s kubicky mapovanou diamond buňkou o délce hrany $a = 11,1; 13,9$, anebo $18,5$ mm a tloušťkou stěny $t = 1,2$ mm (reálná minimální $0,7$ mm). Model výměníku vytvořený v prostředí Autodesk Inventor je parametrický, takže postrádá význam zmiňovat konkrétní rozměry (v případě funkčních vzorků jsou bližší rozměry a specifika popsána v kapitole 6.2).

Ze zadání však plynou maximální rozměry jader funkčních vzorků, které jsou omezeny rozměry jádra referenční komponenty (Obr. 5-1), tedy hodnotami: $130 \times 89,4 \times 26,5$ mm (viz Obr. 5-2). Maximální rozměry celého referenčního výměníku jsou $218 \times 97,4 \times 30,5$ mm, avšak ty nejsou pro další práci příliš relevantní. V případě referenčního vzorku se jedná o výměník s protiproudým tokem vyznačeným na Obr. 5-2.

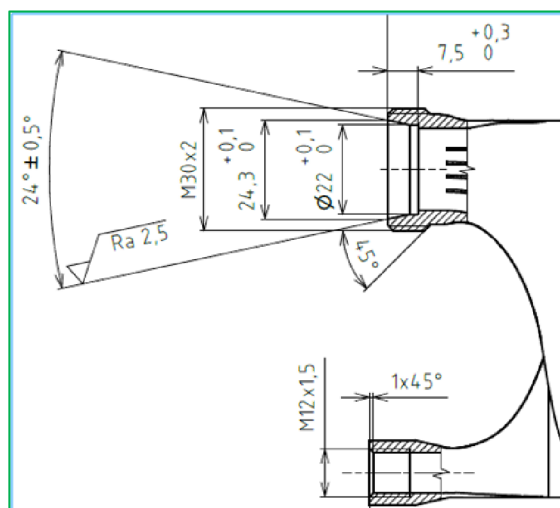


Obr. 5-1: Model referenční komponenty z prostředí Inventor



Obr. 5-2: Řezy referenčním výměníkem s rozměry teplosměnného tělesa a oblastmi průtoku obou kapalin

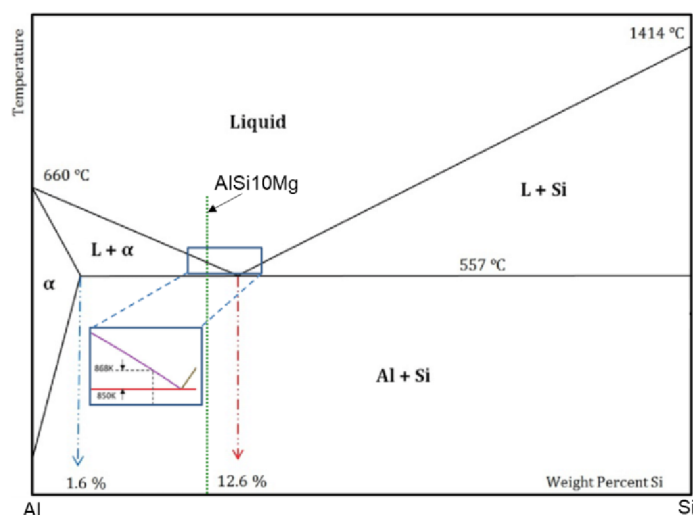
Při návrhu funkčního vzorku byly s ohledem na porovnatelnost s referenční komponentou zachovány připojovací rozměry a rozměry vnitřních prostorů přírub viz Obr. 5-3.



Obr. 5-3: Rozměry připojovacích částí přírub referenčního vzorku

5.1.4 Materiál výměníku a provozní kapaliny

Pro funkční vzorek chladiče byla vybrána podeutektická slitina AlSi10Mg (viz Obr. 5-4), která se běžně používá ve slévárství, a to zejména díky své nízké hustotě, značné mezi kluzu a dobré slévatelnosti, kdy je z ní možné vyrábět velmi lehké a zároveň pevné komponenty. Slitina je také vhodná pro aditivní výrobu, kde se využívá ve formě atomizovaného prášku. Slitina se používá v automobilní, leteckém a kosmickém průmyslu, kde nachází široké uplatnění také díky korozivzdornosti a dobré tepelné vodivosti. Právě tyto vlastnosti z ní činí ideální materiál pro tepelné výměníky. AlSi10Mg je také dobře obrobitelná, což usnadňuje následný postprocessing dílů (odstraňování podpor, vyřezávání závitů, broušení atd.) a lze ji také svařovat a případně povlakovat. Základní vlastnosti AlSi10Mg používaného při LPBF výrobě v této práci jsou zaneseny v Tab. 5.1.



Obr. 5-4: Fázový diagram slitin hliníku (Al) a křemíku (Si) – [21, upraveno]

Tab. 5.1: Vlastnosti používané slitiny AlSi10Mg pro LPBF výrobu [36]

Vlastnost	Hodnota
Hustota ρ [g/cm ³]	2,67
Mez pevnosti R_m [MPa]	340 ± 20
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	220 ± 20
Youngův modul pružnosti E [GPa]	70 ± 10
Tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	110

Kromě materiálů samotné skříně výměníku jsou podstatné pro jeho výkon i provozní kapaliny. Jako horká, je dle zadání používán olej, ovšem kvůli nejasnosti konkrétního typu, byl vybrán, dle osvědčení z předchozích projektů a dostupnosti v prodejnách, hydraulický olej HM 46 [37]. Jako chladná kapalina, byla z důvodu obtížného přichlazování a značného množství experimentů s nutností výměny kapaliny, vybrána kohoutková voda. Vlastnosti obou kapalin jsou vypsány v Tab. 5.2 a byly brány pro střední teploty, kterých daná kapalina dosahuje při experimentech popsaných v kapitole 4.2.5.

Tab. 5.2: Vlastnosti provozních kapalin

	Voda (23,5 °C)	Olej HM 46 (47 °C)
Hustota ρ [kg·m ⁻³]	998,2	1952
Měrná tepelná kapacita c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	4182	882
Tepelná vodivost λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,6	0,128
Dynamická viskozita η [Pa·s]	0,001003	0,046

6 DETAILNÍ NÁVRH

V této kapitole je rozepsána následná práce s hodnotami vycházejícími jak z měření tepelných vlastností různých konfigurací TPMS struktur (viz kapitola 4.2.5), tak z hodnot spočtených dle rovnic z kapitol 5.1.2 a 5.1.3. Na základě těchto dat byl poté vytvořen predikční skript a dle dalších výsledků dílčích analýz, poznatků z rešerše a osobních zkušeností mohla být vytvořena také finální metoda návrhu TPMS výměníků. V druhé části kapitoly je pak popsán návrh, výroba, postprocessing a testování funkčních vzorků, které slouží jako *proof of concept* funkčnosti a limitů metody.

6.1 Metoda návrhu tepelného výměníku s TPMS strukturami

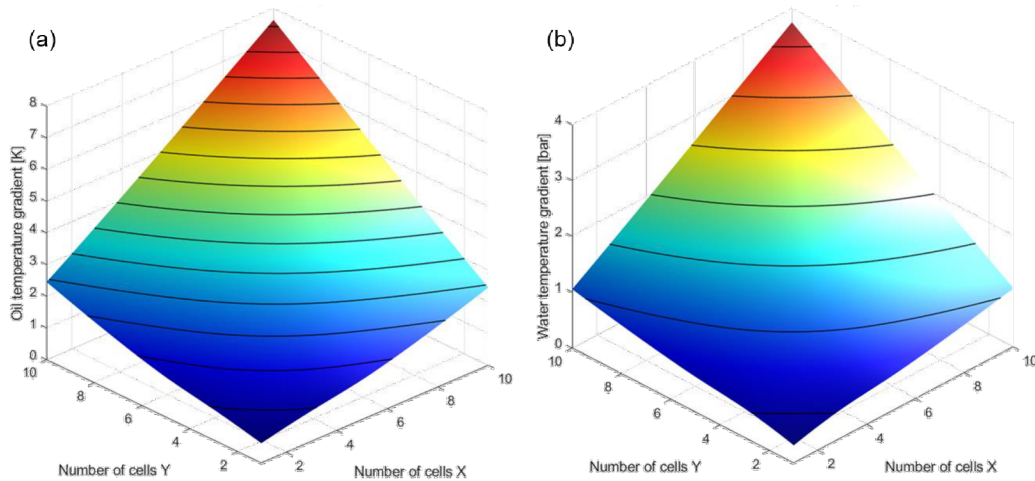
Hlavním výstupem z této práce je již zmíněná metoda, která provede uživatele procesem návrhu tohoto typu výměníku. Na následujících stránkách je popsána pouze stručným shrnutím její tvorby, formátu, funkce a dalších dílčích částí. Detailní popis a přesné instrukce k jejímu použití pak obsahuje Příloha G.

6.1.1 Predikční skript

Na základě vyhodnocených dat z již zmíněných kapitol 4.2.5 a 5.1 bylo možné vytvořit nástroj, který umožní uživateli metody získat odhad žádaných vlastností navrženého výměníku. Pro udržení konzistence s již vzniklým skriptem pro výpočet ρ_{rel} (viz kap. 4.2.3) a možností jež software nabízí byl pro jeho tvorbu opět zvolen software Matlab. Celý skript (viz Příloha D2) lze rozdělit do 4 částí:

1. *Initial* – v této části jsou jednak úvodní funkce (např. vyčištění *command window* a smazání starých proměnných), ale také informace o omezeních výpočtu, *toolboxech* nutných pro správnou funkci, a také jsou zde skriptu zadány provozní podmínky (\dot{V}_1 ; \dot{V}_2 ; $T_{1,in}$; $T_{2,in}$; $c_{p,1}$; ρ_1), pro která jsou data naměřena
2. *Input parameters* – zde již uživatel zadá zkoumané hodnoty, tedy počet diamond buněk ve směrech X; Y a Z; velikost buňky a ; případně je možnost do matic x a y zadat vlastní měřené konfigurace vzorků
3. *Main process* – poté proběhne samotný výpočet, kdy je počítána velikost teplosměnné plochy (A_s), teplotní gradienty oleje (ΔT_1) a vody (ΔT_2), a také tepelný výkon (Q) a součinitel prostupu tepla (U_{cf}), včetně s nimi souvisejících veličin ($T_{1,out}$; $T_{2,out}$; P_1 ; \dot{m}_1 ; C_1 ; ΔT_{max} ; T_{he} ; T_{ce} ; a ΔT_{lm}), všechny tyto veličiny jsou počítány buď analytickými vztahy, nebo interpolovanými funkcemi z naměřených dat

4. *Display results* – na závěr se uživatelé po spuštění skriptu vypíší žádané parametry (viz předchozí odrážka) a vykreslí závislosti tepelných gradientů na počtech buněk v X a Y (viz Obr. 6-1). Závislost na více proměnných není vykreslována, jelikož by se jednalo o 5D záležitost. 😊

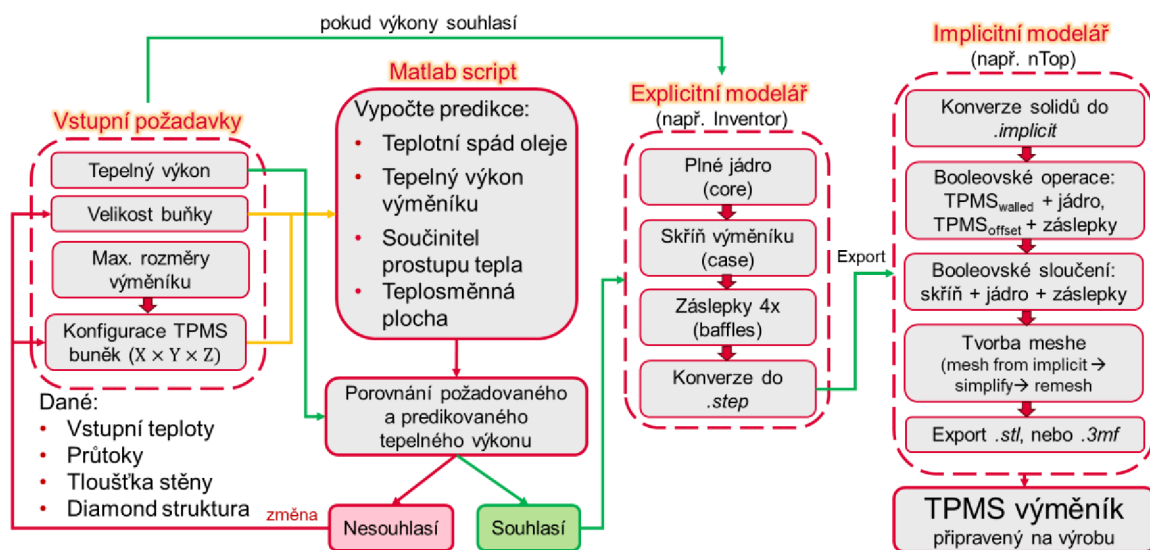


Obr. 6-1: Závislost teplotního gradientu (a) oleje a (b) vody na počtu buněk ve směrech X a Y

Podstatné je také zmínit, že predikční skript počítá s daty interpolovanými z naměřených hodnot, kdy interpolace odpovídá zvoleným provozním podmínkám (viz závěr kap. 4.2.5) a predikované hodnoty tak platí pouze pro tyto podmínky výměníku.

6.1.2 Schéma a popis metody

Popsaný skript poté slouží jako jeden z nástrojů, které společně s popisem jednotlivých kroků tvoří metodu návrhu TPMS výměníku. Schematicky je ve zjednodušené podobě zobrazena na Obr. 6-2.



Obr. 6-2: Schéma metody návrhu tepelného výměníku s TPMS strukturami

I metodu návrhu lze rozdělit do 4 hlavních částí:

1. Určení vstupních požadavků – Jak bývá u návrhu výměníků obvyklé, i v této metodě jsou vstupními parametry požadovaný tepelný výkon a maximální rozměry komponenty. Z nich se poté dají určit možné kombinace velikosti TPMS buňky a počtu těchto buněk ve směrech X; Y; Z (nazýváno konfigurace).
2. Využití Matlab skriptu pro predikci cílených hodnot – Při návrhu běžného výměníku (např. žebrovaného či trubkového), je v dalším kroku počítán odhad tepelného výkonu dle některé z běžných metod (LMTD; ϵ -NTU; P-NTU). Při návrhu TPMS výměníku je však postup jeho určení ulehčen díky sadě naměřených vzorků a vytvořenému predikčnímu skriptu v Matlabu, který ho dokáže odhadnout. Přesnější funkce a omezení skriptu jsou popsány v předchozí kapitole. Na závěr tohoto kroku uživatel porovná požadovaný a predikovaný výkon pro zvolenou konfiguraci a velikost buňky. V případě že výkony nesouhlasí, je třeba změnit vstupní veličiny a znovu spustit výpočet skriptu. Pokud je odchylka výkonů přijatelná, pokračuje se dalším krokem.
3. Operace v explicitním modeláři – Poté je na řadě modelování samotného výměníku, kdy nejprve probíhá práce v explicitním modeláři, jako je například Autodesk Inventor, Solidworks, nebo Creo. V některém z těchto softwarů je třeba vymodelovat několik oddělených těles (solidů). Konkrétně plné jádro kvádrového tvaru (*core*), skříň výměníku (*case*) a 4 záslepky (*baffles*) mezi jádrem a vtokovými, resp. výtokovými kanály. Pokud uživatel zvolí parametrický model, viz Příloha F-7, lze v něm snadno zvolit počet buněk, jejich velikost a tloušťku pláště, přičemž se model automaticky přepočítá do požadovaného tvaru. Export ze softwaru je doporučen ve formátu *.step*.
4. Operace v implicitním modeláři – Závěrečný krok návrhu probíhá v softwaru nTopology, kam se importuje *.step* model do jednoho z bloků a dále přes převážně booleovské operace je vytvořena z plného jádra a záslepek příslušná diamond struktura a následně finální součást. Nutné je zkontrolovat počet těles, které nTopology detekoval a jestli je rozdělil do správných konverzních bloků do *.implicit* formátu (více viz Příloha G). Software mimo jiné spočítá řadu geometrických parametrů (ρ_{rel} ; A_s ; SA/Vol ; objem výměníku atd.) a ve finálním kroku konvertuje sloučené těleso (výměník) do zvoleného formátu *meshe* (*.stl* nebo *.3mf*).

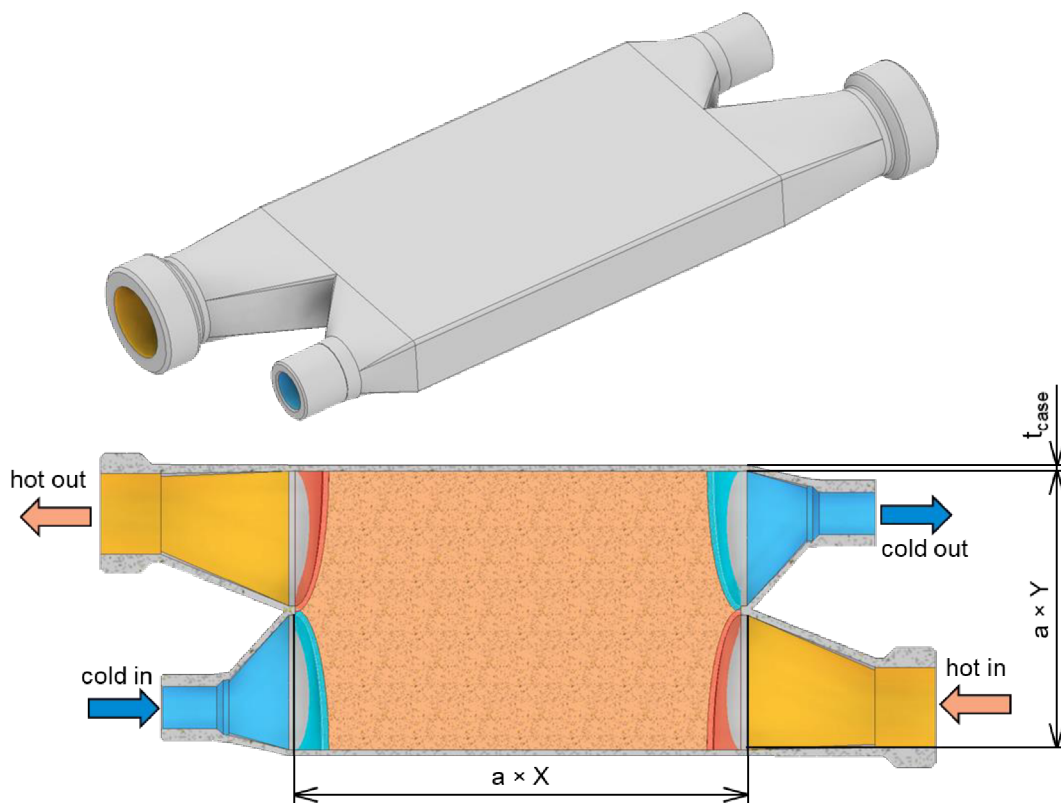
6.2 Funkční vzorky

Aby byla ověřena funkčnost a přivětivost vytvořené metody, byla použita pro návrh funkčních vzorků. Nejprve byl zamýšlen pouze 1 funkční vzorek, avšak aby bylo porovnání predikovaných a změřených hodnot ve větším rozsahu, bylo rozhodnuto o návrhu a výrobě vzorků tří.

6.2.1 Návrh

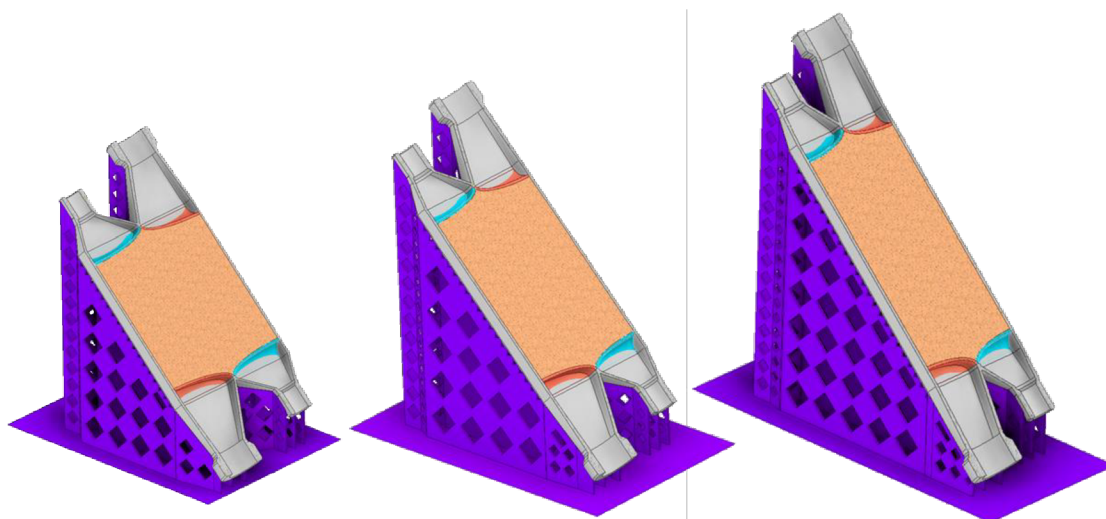
Jak již bylo zmíněno samotný návrh probíhal dle výše popsané metody s cílem dosáhnout výkonu odpovídajícího referenčnímu. Cílený tepelný výkon byl při zvolených podmínkách ze změřených dat spočten 315,25 W. Jelikož je však referenční výkon počítán u referenčního i TPMS výměníku z objemového toku, vlastností provozních kapalin a teplotních rozdílů, je možné místo výkonů porovnávat pouze teplotní rozdíly. Ty se totiž jako jediné napříč experimenty mění. Teplotní rozdíl vody činil u referenčního vzorku 2,37 °C a u oleje 4,13 °C. Nejprve byly v predikčním skriptu iteračně určeny 3 konfigurace diamond buněk s odpovídajícími teplotními rozdíly (a výkonem). Jednalo se o 9×4×1; 8×5×1 a 7×6×1 při velikosti buňky 13,9 mm. Teplotní spády oleje byly určeny 4,16; 4,33 a 4,41 °C.

Pro každou z těchto konfigurací byl poté v parametrickém modelu v Inventuru vymodelován příslušný výměník (viz Obr. 6-3). Přibližná tloušťka stěny buňky byla ponechána s hodnotou 1,2 mm (viz výsledky z kapitoly 4.2.4) a tloušťka stěny pláště byla zvolena shodná s tloušťkou stěn přírub referenčního vzorku, tedy 1,5 mm. Na Obr. 6-3 jsou krom celkového vzhledu první fáze modelu naznačeny také tok obou kapalin a nejdůležitější parametrizované rozměry, kde a je velikost TPMS buňky a X ; Y značí počet buněk v příslušném směru. Příruby olejové větve jsou oproti menším (vodním) protějškům vysunuty vně kvůli prostoru pro vyřezávání vnějšího závitu příslušným očkem ve vratidlu.



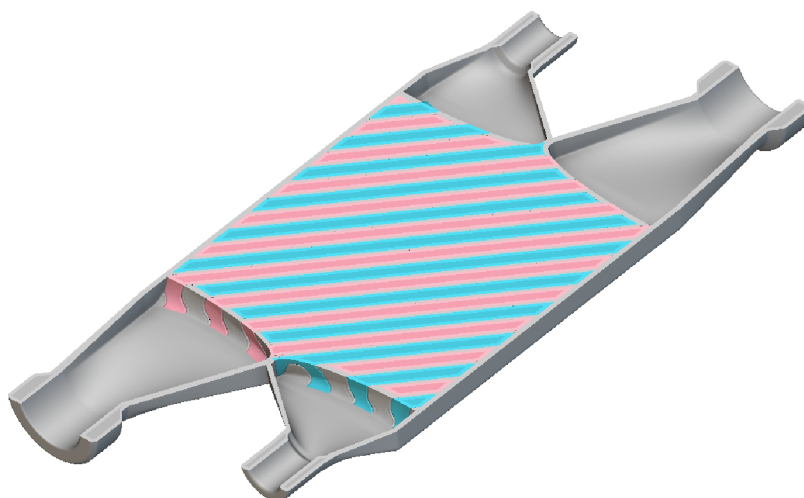
Obr. 6-3: Parametrický model funkčního vzorku, podélný řez a naznačeny směry toku s některými rozměry

V další fázi bylo třeba připravit model na LPBF výrobu, což obnášelo rozhodnout o sklonu vzorků při stavbě, aby nebylo nutné vyrábět podpory uvnitř přírub, které by bylo poté obtížné odstraňovat. Proto se vzorky stavěly pod sklonem 45° a bylo tak nutné domodelovat již neparametrická žebra s příslušnými otvory (opět jako oddělený solid viz Obr. 6-4). Žebra mají funkci stabilizace stavby vzorků a lepší odvod tepla. Čtvercové otvory jsou v žebrech rozmístěny kvůli úspoře materiálu a trojúhelníkové (u napojení žeber na výměník) kvůli snadnějšímu odstraňování žeber v postprocessingu. Aby nTopology po importu geometrie identifikoval žebra jako jedno těleso je vhodné propojit všechna žebra tenkou (0,01 mm) plochou.



Obr. 6-4: Výstupní modely z Inventoru do nTop (v podélném řezu)

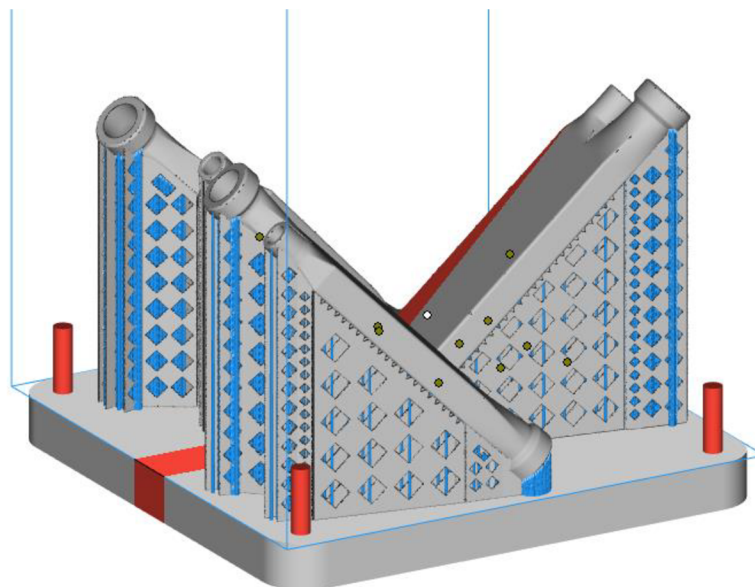
Dle poslední, čtvrté, fáze metody byly modely ve formátu .step importovány do prostředí nTopology, kde byly jádro a záslepky booleovským průnikem proloženy diamond strukturami o zvolených parametrech. Výsledný tvar s naznačenou horkou a chladnou tekutinou (růžová a modrá je zobrazen v řezu na Obr. 6-5). Z nTopology byly poté exportovány 3 optimalizované meshe ve formátu .3mf. Optimalizací se myslí redukce počtu elementů a distribuce včetně změny velikosti elementů dle lokální složitosti tvaru.



Obr. 6-5: Funkční vzorek z nTop s jádrem a záslepkami proniknutými diamond strukturou

6.2.2 Výroba a postprocessing

Vytvořené meshe byly poté zpracovány v softwaru Materialise Magics, kde byly na nutných místech vně vzorků vygenerovány podpory (modré struktury na Obr. 6-6) a nastaveny standartní výrobní parametry pro podobné stavby. Procesní parametry jsou pak vypsány v Tab. 6.1, přičemž následně mohla být vygenerována výrobní data.



Obr. 6-6: Rozložení stavby funkčních vzorků s vygenerovanými podporami v Magics

Tab. 6.1: Procesní parametry použité pro stavbu funkčních vzorků

Předehřev platformy [°C]	Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mm·s ⁻¹]	Výška vrstvy [μm]	Šířka mezi návary [μm]
150	350	930	50	0,17

Samotná LPBF výroba funkčních vzorků trvala přibližně 29 hodin a probíhala na stroji SLM 280HL Twin, který je vybaven 2 lasery pro spékání prášku, což má za výhodu rychlejší stavbu. Vyrobené vzorky bylo po očištění od nespečeného prášku možné vyndat společně s platformou z komory. Poté nastala řada dodatečných kroků postprocessingu:

1. Vysypávání prášku z vnitřních prostor
2. Odříznutí z platformy
3. Odstranění žeber a podpor
4. Broušení zbytků žeber a podpor
5. Obrábění funkčních ploch na vertikálním obráběcím centru Haas VF-2SS [38].
6. Pískování
7. Řezání závitů

Na Obr. 6-7 jsou vzorky po provedeném postprocessingu, kdy jejich základní geometrické parametry jsou vypsány v Tab. 6.2. Dodatečné fotografie této fáze pak obsahuje Příloha A.



Obr. 6-7:Finální podoba funkčních vzorků (s vyřezanými závitů)

Tab. 6.2: Přehled parametrů funkčních vzorků a referenčního výměníku

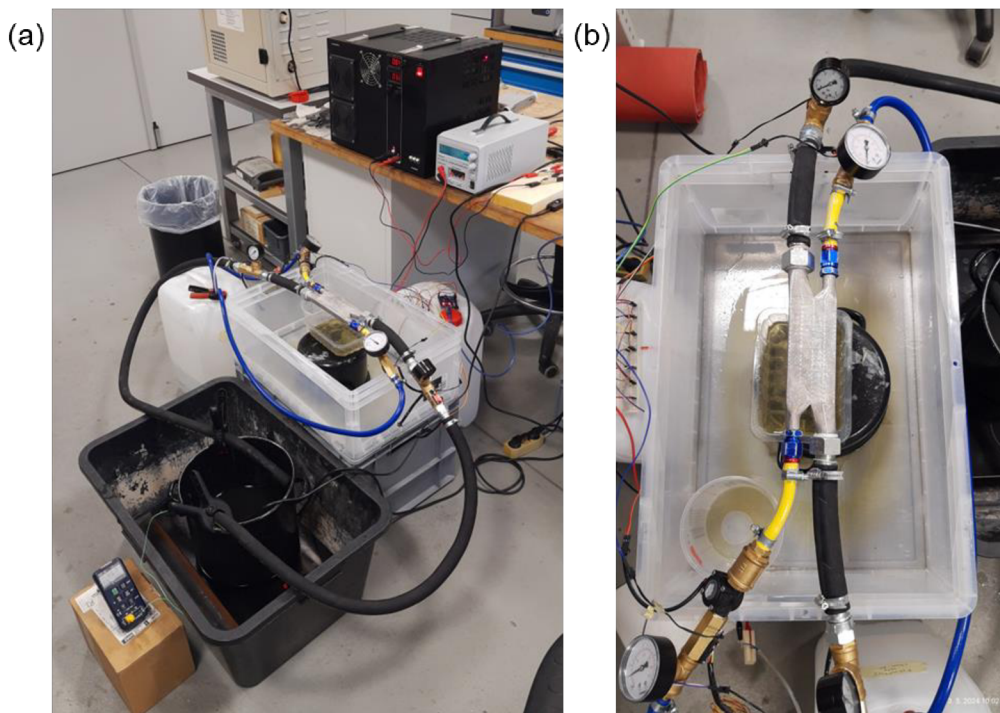
Vzorek č.	Konfigurace buněk	Tloušťka stěny [mm]	Velikost buňky [mm]	Relativní hustota [%]	Max. rozměry [mm]
1	7 × 6 × 1				194 × 87,5 × 30
2	8 × 5 × 1	1,2	13,9	20	208 × 78,3 × 30
3	9 × 4 × 1				222 × 69 × 30

6.2.3 Testování

Před hlavními provozními testy byly všechny vzorky otestovány na těsnost obdobně jako v kapitole 4.2.4. pouze s rozdílem nutnosti ucpání výstupního otvoru z vodního okruhu výměníku, přičemž všechny 3 výměníky testem prošly. Hlavní testování provozu a určování tepelných vlastností pak probíhalo obdobně jako v kapitole 4.2.5. Zaměřeny byly pouze hadice a šroubení propojující olejovou větev výměníku s měřicími komponenty (

Obr. 6-8).

Vzorky byly měřeny za již zmíněných provozních podmínek a vykazovaly nižší hodnoty teplotního rozdílu než predikované, a to v nejhorším případě o 21 % (vzorek 7×6×1_13,9). Je třeba ale také poznamenat, že byl znovu změřen i referenční vzorek, který vykazoval také pokles naměřených hodnot, avšak pouze o 9 %. Pro ověření reprodukovatelnosti dat byla měření zopakována s odstupem jednoho dne a vykazovala přibližně stejné hodnoty. Co se týče tlakových ztrát, ty se podařilo za daných provozních podmínek snížit na 0,13 ± 0,17 bar, a to hlavně díky volbě větší buňky a vhodnějšího tvaru zásepek oproti testovacím vzorkům. Tepelné výkony a hodnoty součinitele prostupu tepla byly poté počítány dle vztahů 8 ± 15 z kapitoly 5.1.2 Vyšší hodnoty, než referenční výměník vykazoval pouze vzorek 7×6×1_13,9. Hlavní výsledky jsou vypsány v Tab. 6.3.



Obr. 6-8: Testovací a měřicí okruh pro funkční vzorky

Tab. 6.3: Výsledné parametry funkčních vzorků

Vzorek	Hmotnost m [g]	Tlaková ztráta p_1 [bar]	Teplotní spád oleje ΔT_1 [°C]	Tepelný výkon Q [W]	Součinitel prostupu tepla U_{cf} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
7 × 6 × 1_13,9	224,4	0,13	3,92	315,25	738,7
8 × 5 × 1_13,9	216,0	0,15	3,60	289,3	688,0
9 × 4 × 1_13,9	203,2	0,17	3,28	263,8	681,3

6.3 Odhad výrobních nákladů a objemu výroby

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, funkční vzorek tepelného výměníku je vyroben z materiálu AlSi10Mg pomocí technologie LPBF. V rámci práce proběhla řada staveb testovacích vzorků, kterých byly vyrobeny nízké desítky a zpravidla se jednalo o rozměrově menší kusy. V případě funkčních vzorků již šlo o rozměrnější kusy, a proto byla zpracována cenová rozvaha (viz Tab. 6.4) v níž se promítají odhady cen za jednotlivé činnosti. Jedná se tedy o kusovou výrobu, kde nejdražší položkou je samotná výroba na stroji SLM 280HL z důvodu značného času, který výroba zabere. Jelikož se funkční vzorky vyráběly a zpracovávaly 3 současně, v tabulce uvedená cena 37 400 Kč je přesný údaj.

V případě že by se vyráběl pouze jediný výměník (v tomto případě 7×6×1_13,9 viz kap. 6.3), ne všechny položky by se snížily na 1/3, např. samotná výroba by místo 29 trvala stále 12 hodin a obdobně by poklesla cena materiálu z 6 300 Kč na 4 900 Kč (hlavně kvůli argonu, jímž se plní stavební komora). Celkově odhad činí 17 450 Kč za 1 kus.

Tab. 6.4: Odhad výrobních nákladů 3 funkčních vzorků

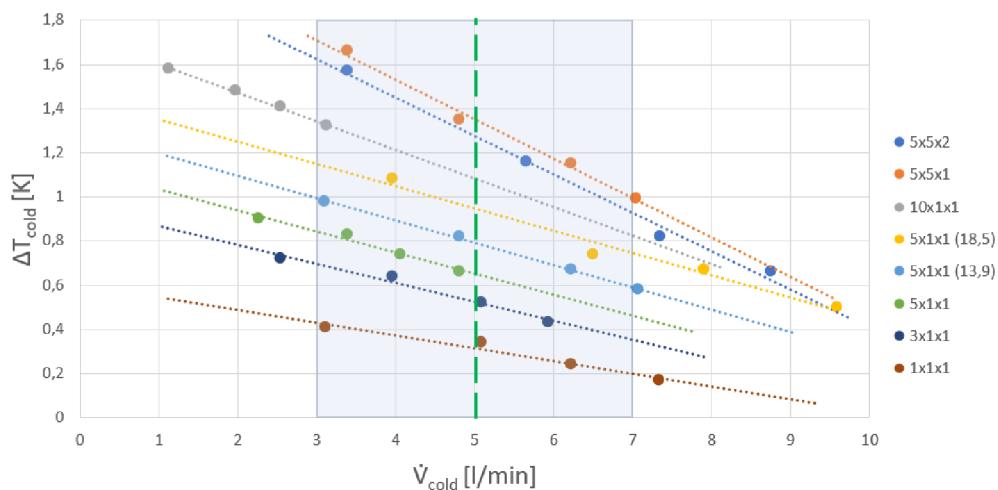
Fáze procesu	Konkrétní operace	Cena za 3 kusy	Cena za 1 kus
Pre-processing	Příprava stroje	1 h · 320 Kč = 320 Kč	1 h → 320 Kč
	Příprava dat pro výrobu	12 h · 500 Kč = 6 000 Kč	5 h → 2 500 Kč
Samotná výroba	Materiály (argon, prášek...)	6 300 Kč	4 900 Kč
	Výroba dílu na příslušném stroji	29 h 09 min · 680 Kč/h = 19 822 Kč	12 h 05 min → 8 217 Kč
Post-processing	Mechanické odstraňování podpor	3 h · 200 Kč = 600 Kč	1 h → 200 Kč
	Broušení povrchů od zbytků podpor	2 h · 250 Kč = 500 Kč	45 min → 188 Kč
	Obrábění funkčních částí (závity, otvory pro šrouby)	5 h · 750 Kč = 3 750 Kč	1,5 h → 1 125 Kč
	Pískování	20 min · 300 Kč = 100 Kč	9 min → 45 Kč
Celkem		≈ 37 400 Kč;	17 450 Kč

6.4 Hodnocení klíčových parametrů

Tato kapitola slouží jako analogie diskuze pro vývojovou práci s cílem vyvinout metodu návrhu tepelného výměníku se strukturovaným materiálem a otestovat ji výrobou funkčního vzorku s výkonem srovnatelným s referenční součásti. Jelikož je práce poměrně obsáhlá, je tato kapitola rozdělena na hodnocení výsledků testů tepelných vlastností a s nimi souvisejícího predikčního skriptu, poté byla provedena SWOT analýza samotné metody a na závěr byl zhodnocen finální funkční vzorek.

6.4.1 Zhodnocení testů tepelných vlastností a predikčního skriptu

Na obrázcích Obr. 6-9 až Obr. 6-11 jsou vyobrazeny přímé závislosti teplotních spádů chladné vody (ΔT_{cold}), resp. horkého oleje (ΔT_{hot}) a tlakových ztrát (p_{cold}) na průtoku chladné kapaliny, což bylo hlavní proměnnou při testech popsanych v kapitole 4.2.5. U všech zkoumaných vzorků byly naměřené hodnoty teplotních spádů proloženy přímkami, které s odchylkou maximálně 8 % v případě vody a 5 % v případě oleje, odpovídají naměřeným hodnotám. Lze však předpokládat správnost této interpolace pouze v určité oblasti (naznačená modře), jelikož by se jednak dané závislosti při vyšších průtocích protnulý mezi sebou, ale také by v určité oblasti protnulý nulovou hladinu a pokračovaly do záporu.

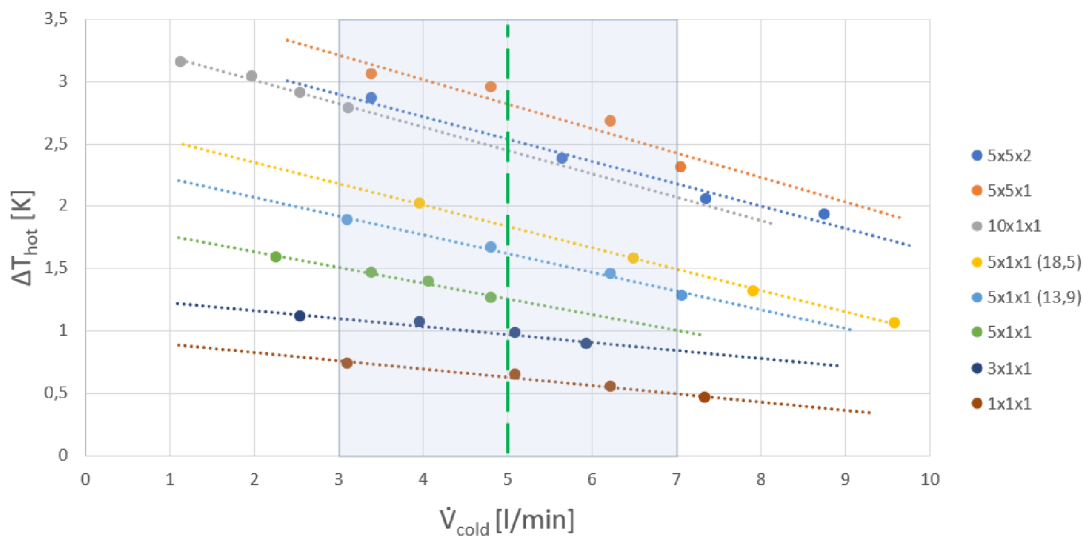


Obr. 6-9: Naměřené teplotní spády vody pro testovací vzorky

Možné je také pozorovat při stejném průtoku větší ochlazení oleje (ΔT_1) oproti vodě (ΔT_2), což může být zapříčiněno větší citlivostí termistorů při reagování na změnu teploty o vyšší hodnotě, ale co má větší vliv je bilance kalorimetrické rovnice:

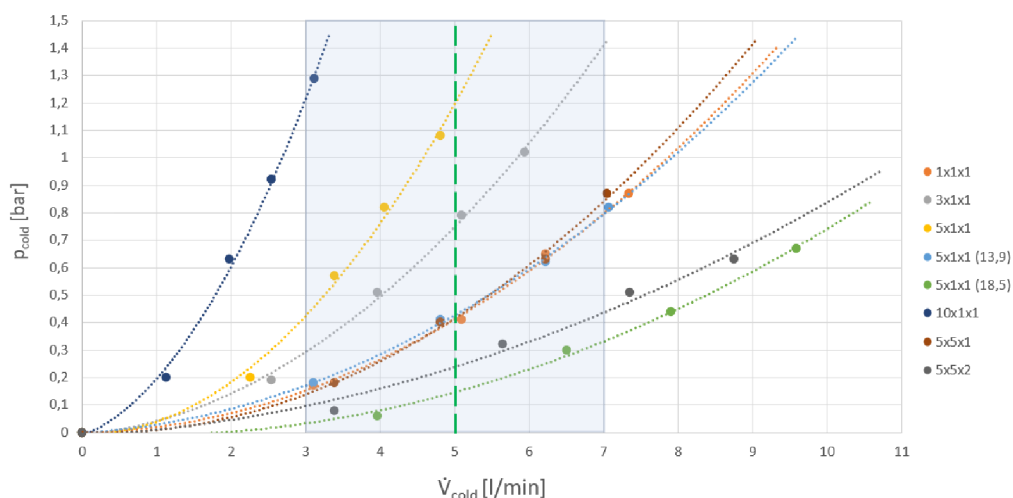
$$Q_1 = Q_2 \rightarrow \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta T_2 \rightarrow \text{jestliže se } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \text{ pak platí } \rightarrow c_{p1} \cdot \Delta T_1 = c_{p2} \cdot \Delta T_2$$

A jelikož je c_{p1} několikanásobně menší než c_{p2} (viz Tab. 5.2), pak se vybízí, že ΔT_1 bude naopak větší než ΔT_2 . Toto chování bylo pozorováno při experimentech se všemi vzorky, i přes snahu dosáhnout ustálených podmínek, aby všechny 4 termistory stihly správně vyhodnotit změnu teploty.



Obr. 6-10: Naměřené teplotní spády oleje pro zkušební vzorky

Závislost tlakových ztrát ve vodním okruhu na objemovém toku vody již lineární závislost nevykazovaly, a to již ze samotné logiky nulové tlakové ztráty při nulovém průtoku. Proto byly změřené hodnoty proloženy kvadratickou funkcí začínající právě v nule, což odpovídá Darcyho-Weissbachově rovnici a jejího vztahu k rovnici kontinuity. Je vidět, že v případě nižších průtoků a větších vzorků se proložená křivka již značně odchyluje od naměřených dat. Dále je u největšího vzorku $10 \times 1 \times 1$ s velikostí buňky 11,1 mm možné pozorovat velmi prudký nárůst tlakové ztráty již při nízkých průtocích, což by vedlo k predikci velmi vysokých tlaků v případě, že by se pro funkční vzorky využilo více než 10 těchto menších buněk v jednom směru a nevytvořil se zároveň širší prostor přidáním buněk i do šířky (směr Y). Tlak ovšem také závisí na tvaru a orientaci záslepek jednotlivých kapalin u příslušných přírub, kterými ho bylo možné optimalizovat.



Obr. 6-11: Naměřená závislost tlakových ztrát na objemovém toku chladného média

Zelené přerušované čáry značí zvolený průtok ($V_2 = 5$ l/min) pro tvorbu predikčního skriptu, následný návrh a testování funkčních vzorků. Jak je patrné ze všech 3 grafů, tato hodnota byla zvolena, jelikož se nachází ve středu intervalu ($3 \div 7$ l/min), který obsahuje nejvíce přímo naměřených hodnot. Měřené průtoky jednotlivých vzorků byly dány výkonem čerpadla v bezpečném rozsahu napájecího napětí. Průtoky kapalin obecně jsou však většinou dány zákazníkem a metoda se dá po zmapování dané oblasti využívat za jiných hodnot.

Nepřesnosti měřených hodnot mohly být do výsledků zaneseny kvůli již zmíněné malé citlivosti měřicích přístrojů (průtokoměry a termistory), které s půlvteřinovým vzorkováním vypisovaly hodnoty $\pm 0,08$ °C, resp. $\pm 0,3$ l/min. Každá z teplot, z nichž byly spočteny teplotní gradienty vykreslené ve výše zobrazených grafech, byla zprůměrována ze 3 po sobě následujících hodnot u každého měření. Hodnoty se vždy odečítaly ve stejném okamžiku, přesně 2 minuty po spuštění obou čerpadel viz postup z kapitoly 4.2.5. Výsledky by také zpřesnilo nahrazení varianty Arduino obvodu, kde se mohou například uvolnit kabely, přesnějšími měřicími přístroji zapojenými do obvodu s PLC (Programmable Logic Controller).

Je třeba také zmínit, že při zde uvedeném nastavení experimentů nelze přesně určit kdy nastanou ustálené podmínky měření, hlavně v případě teplot. Jelikož byla voda čerpána ze stejné nádrže kam po protečení výměníkem ohřátá opět vtékala (a obdobně u oleje), měnily se mírně i teploty kapalin na vstupech (voda se ohřívala a olej chladnul). Tento proces byl zmírněn použitím většího množství kapalin v nádržích a občasnou výměnou vody za chladnější a přihřevem oleje na mírně vyšší teplotu než 45 °C. Problém by mohl být eliminován použitím oddělených nádrží pro vtok a výtok obou kapalin (celkem tedy 4 nádrží), případně doplněním okruhů o chladič a ohřivač pro stabilizaci teplot obou kapalin.

Co se týče predikčního skriptu, který je na výše zmíněných závislostech postaven, kvůli komplexnosti řešeného problému, konkrétně predikce tepelných a geometrických vlastností ze 4 proměnných, má skript řadu omezení. Nejzásadnější je, že pracuje pouze s diamond TPMS strukturami mapovanými kubicky o tloušťce stěny 1,2 mm ($t_{\min} = 0,7$ mm). Dále jsou omezujícím faktorem použité kapaliny (voda a hydraulický olej HM 46) a provozní podmínky, tedy průtoky 2,8 a 5 l/min a vstupní teploty 45 a 23 °C.

Obecně se dá také říci, že pokrytá oblast kombinací různého počtu buněk v různé konfiguraci a o určité délce hrany buňky je poměrně malá a bylo by vhodné otestovat i větší počty buněk nejen ve směrech X a Y, ale také do výšky Z. Rovněž by hodnoty z predikčního skriptu zpřesnilo proměření obdobných konfigurací buněk s delší hranou (kromě $a = 11,1$ mm vyrobít a otestovat stejné konfigurace buněk s $a = 13,9$ mm resp. 18,5 mm). Případně lze stejným stylem vytvořit predikční skript i pro jiné parametry, ať už se jedná o rozdílné TPMS buňky, nebo jiné provozní podmínky, či kapaliny.

6.4.2 SWOT analýza metody

Jelikož se jedná o vývoj nového produktu, který může najít uplatnění v řadě oblastí průmyslu, bylo rozhodnuto o vytvoření SWOT analýzy, která mapuje a zhodnocuje vnější a vnitřní faktory ovlivňující daný produkt.

Silné stránky

Hlavní výhodou metody je její jednoduchost a uživatelská přívětivost. Provede uživatele procesem krok po kroku od vstupních požadavků až po modelování geometrie a přípravu meshe pro výrobu výměníku s TPMS strukturou. Silnou stránkou je také možnost změny geometrie první fáze modelu v explicitním modeláři, kdy druhá fáze v nTopology dokáže po drobných kontrolách a případných úpravách proložit i novou geometrii žádanou strukturou. Stejně tak je možné snadno změnit typ a tloušťku buňky, ovšem v takovém případě již nebude predikce výkonu funkční a bude třeba vyrobít a změřit další vzorky a poté data do skriptu manuálně zadat. TPMS výměníky navržené touto metodou mají rovněž jednoduchou konstrukci a spolehlivý provoz. Při zvolené tloušťce stěny těsnilo všech 14 vyrobených vzorků napříč všemi testy.

Slabé stránky

Do této kategorie patří již zmíněná menší oblast přesných predikcí tepelného výkonu a hodnot dalších veličin z predikčního skriptu. Proces tvorby modelu rovněž není plně parametrický, ale pouze částečně, s nutností exportu dat mezi dvěma CAD softwary. To může být pro některé uživatele náročnější, nicméně Příloha G popisuje úskalí s tímto exportem spojená včetně jejich řešení. Z ekonomického hlediska jsou slabou stránkou vyšší výrobní náklady oproti konvenčním typům výměníků (např. trubkovým) a nemožnost dosáhnout sériové výroby komponenty.

Příležitosti

Jak je naznačeno ve výpisu silných stránek, je možné predikční skript zpřesnit zadáním dalších dat pro jiné konfigurace, čímž se pokryje větší oblast rozsahu parametrů. To z metody dělá v zásadě adaptivní iterativní proces s potenciálem pro neustálé zpřesňování návrhu. Příležitosti z hlediska uplatnění metody je možné vidět v oblastech průmyslu, kde je výhodou kompaktní konstrukce a nízká hmotnost, zároveň s vysokým výkonem. Mohou to být již zmíněné oblasti leteckého a kosmického průmyslu, nebo oblast chladičů ve sportovních automobilech. Lze také očekávat zvyšující se zájem o TPMS výměníky, díky vývoji a zlepšování stávajících technologií, které spotřebovávají velké množství energie. Ta je často měněna kromě práce i na teplo, které je třeba z provozních tekutin odvádět.

Hrozby

Metodu celkově může nejvíce ohrozit vznik univerzálnější metody, nebo rostoucí požadavek na modernější a esteticky vylepšený vzhled, více se podobající např. výměníkům od společnosti Conflux technology [26]. Jednoduchá kvádrová koncepce výměníků vznikajících z vytvořené metody je zvolena z důvodu zachování co největší míry parametrickosti modelu. Také hrozí, že metoda narazí na své limity v podobě vyvrácení některých závislostí, které již nebudou odpovídat předpokládanému vývoji, např. místo lineární závislosti teplotních gradientů se ukáže ve větším měřítku závislost polynomická. Pak by bylo třeba upravit samotné rovnice (o 4 proměnných).

6.4.3 Zhodnocení parametrů funkčního vzorku

Jako *proof of concept* metody posloužil funkční vzorek. Konkrétně se jednalo o vzorek $7 \times 6 \times 1$ s velikostí buňky 13,9 mm. Velikost buňky byla volena s cílem dosažení nižších tlakových ztrát a zároveň zachování menších rozměrů teplosměnného tělesa než u referenčního výměníku. Ukázalo se, že disponuje parametry viz Tab. 6.5, kde je zároveň porovnán se referenčním výměníkem. Tepelné vlastnosti ΔT_1 a Q pak vyšly pro TPMS vzorek o $2,5 \div 4$ % vyšší oproti referenčnímu. Tlakovou ztrátu se podařilo optimalizovat na 0,13 bar, což je oproti referenčnímu o 30% vyšší.

Tab. 6.5: Porovnání parametrů referenčního a funkčního TPMS vzorku

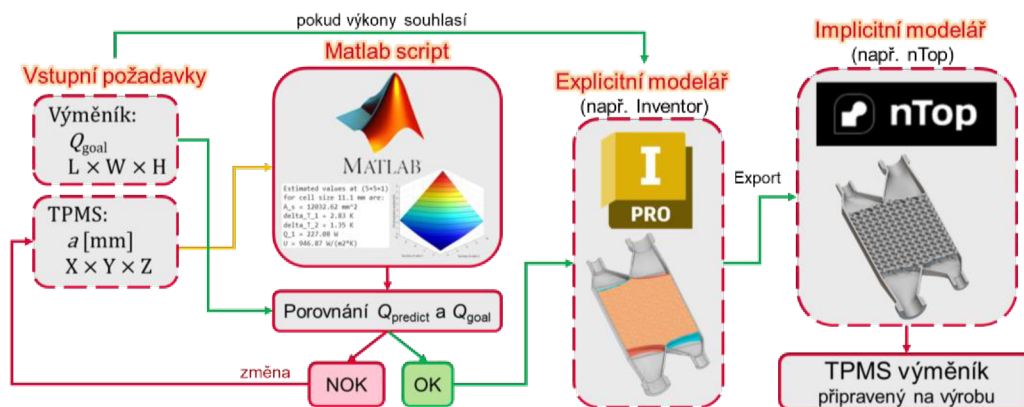
Vzorek	Hmotnost m [g]	Tlaková ztráta p_1 [bar]	Teplotní spád oleje ΔT_1 [°C]	Tepelný výkon Q_{rel} [W]	Součinitel prostupu tepla U [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
Referenční	594,4	0,10	3,77	302,6	717,39
7 × 6 × 1_13,9	224,4	0,13	3,92	315,25	738,72

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá vývojem metody návrhu výměníku se strukturovaným materiálem, konkrétně TPMS strukturami, kdy jako tzv. *proof of concept* byl s jejím využitím vyroben funkční vzorek navržený s cílem dosáhnout srovnatelného tepelného výkonu (běžný výkon vztažený k teplosměnné ploše) jako u referenčního deskového výměníku. Řada počátečních nejasností a mezer v problematice je zodpovězena v systematické rešerši, ze které vychází odpověď na první z dílčích cílů. Tedy že nejvhodnější strukturou z hlediska přenosu tepla a dosažení vysokých výkonů vzhledem k ploše je diamond struktura (označována také Schwarz D, nebo D-surface). Aby bylo dosaženo optimální konfigurace pro zvolené podmínky výroby a materiál, tedy technologii LPBF a AlSi10Mg, byla provedena řada analýz a testů. Vytvořen je Matlab skript pro určení relativní hustoty buňky z její velikosti a tloušťky. Testy těsnosti je stanovena nejmenší vyhovující tloušťka stěny 1,2 mm, odpovídající 0,7 mm minimální tloušťky. Maximální velikost buňky, kterou je možné při použitých procesních parametrech vyrobit bez defektu je 30 mm.

Nejdůležitějšími testy pro tvorbu metody a kvalitního funkčního vzorku byly testy tepelných vlastností, při nichž byl sestaven testovací a měřicí okruh, kde byla změřena řada vzorků o různém počtu buněk s relativními hustotami od 15 do 25 %. Z těchto experimentů také plynou zvolené provozní podmínky $T_{1,in} = 45,05$ °C; $\dot{V}_1 = 2,8$ l/min; $T_{2,in} = 23,02$ °C; $\dot{V}_2 = 5$ l/min, kde index 1 značí horký olej a index 2 chladnou vodu. Ukázalo se, že největší vliv na zvýšení teplotního spádu a souvisejícího tepelného výkonu poskytuje přidání TPMS buněk do délky výměníku, poté do šířky a nejmenší vliv má přidání buněk do výšky. Co se týče zvětšování buňky (a související snížení relativní hustoty), to má za následek rovněž zvýšení výkonu, avšak za cenu nárůstu rozměrů výměníku.

Pro výpočet tepelných výkonů (Q) a součinitelů prostupu tepla (U), je sestaven matematický model, který však vzhledem ke komplexnosti práce s TPMS strukturami nemusí odpovídat 1:1 realitě. Na základě výsledků dílčích testů a výpočtů byl vytvořen predikční skript, který dává uživateli odhad některých parametrů navrhovaného výměníku (A_s ; ΔT_1 ; ΔT_2 ; Q ; U_{cf}) pro zvolenou konfiguraci a velikost buněk. Na základě porovnání daných hodnot s požadovanými může uživatel buď iteračně měnit vstupní parametry predikce, nebo pokračovat na dvoufázový modelovací proces (viz Obr. 7-1).



Obr. 7-1: Zjednodušené a zobecněné schéma metody návrhu TPMS výměnku

Dvoufázový je proces kvůli větší variabilitě tvarů a rychlejšímu generování geometrie. Exportu se však uživatel nevyhne a musí znovu zadat některé parametry i do implicitního modeláře. Klady a zápory vyvinuté metody a jejího testování jsou:

- + Snadná změna geometrie, resp. velikosti výměníku při požadavku rozdílného výkonu (parametrický model)
- + Velký potenciál pro zpřesnění predikce při naměření více vzorků s dalšími variantami konfigurací a velikostí buněk
- V rámci práce byla pokryta oblast nižších výkonů a malých výměníků ($1 \times 1 \times 1$ až $10 \times 1 \times 1$) s relativní hustotou 25 %.
- Méně spolehlivý měřicí a testovací okruh. Olejové čerpadlo není určeno pro vyšší teploty, kdy už kolísá výkon. Termistory a průtokoměry je nutné před začátkem testů znovu zkalibrovat, a i přesto kolísají v určitém rozmezí hodnot.

V sestaveném měřicím okruhu byl poté změřen referenční deskový výměník a podle teplotního rozdílu (ochlazení) oleje byl určen požadovaný tepelný výkon. Následně byly s pomocí vytvořené metody navrženy 3 funkční vzorky, které byly vyrobeny a otestovány. Predikované a reálně naměřené/spočtené hodnoty se liší v nejhorším případě o 21 %. Proto byl znovu změřen také referenční vzorek, který se rovněž liší, avšak pouze o 9 %. Tyto rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny kombinací nepřesnosti měřicího obvodu a nižší přesností predikčního skriptu v oblasti těchto parametrů buněk. Přesto však funkční vzorek $7 \times 6 \times 1_{13,9}$ splňuje dílčí cíl a dosahuje mírně většího tepelného výkonu než referenční.

Tab. 7-1: Přehled vlastností funkčního vzorku

Fyzikální vlastnosti:

Hmotnost	224,4 g
Velikost teplosměnné plochy	22 525,4 mm ²
Kompaktnost	2 980 m ² /m ³

Tepelné vlastnosti a proudění kapalin:

Průtok chladné vody	5 l/min
Tepelný výkon	315,25 W
Poměrný tepelný výkon	13 995,18 W/m ²
Tlaková ztráta	0,13 bar
Součinitel prostupu tepla	738,72 W/(m ² ·K)

Prostor pro zlepšení a další pokrok v této oblasti je vidět v možnosti neustálého zpřesňování predikčního skriptu vkládáním dalších dat z jiných proměřených konfigurací diamond výměníků. Také je možné znovu ověřit, zda použitá tloušťka stěny 1,2 mm (odpovídající minimální tloušťce 0,7 mm), je skutečně nejmenší možnou, které lze dosáhnout bez rizika defektu v podobě otvoru ve stěně. Je možné buď vyrobit a na těsnost otestovat více shodných buněk, nebo optimalizovat procesní parametry LPBF výroby pro dosažení přesnějších tvarových prvků i pro složitou strukturu, jako je diamond.

8 VÝSLEDKY VÝZKUMU PODLE RIV



Název:

Aditivně vyrobený tepelný výměník využívající TPMS strukturu diamond

Autoři:

Bc. Jakub Simon; Ing. Ondřej Vaverka; doc. Ing. Daniel Koutný Ph.D.

Typ produktu:

G – funkční vzorek

Apollo index:

188614

Technický popis:

Aditivně vyrobený výměník typu olej – voda využívá jako svou teplosměnnou plochu strukturovaný materiál, konkrétně tzv. Triply Periodic Minimal Surfaces strukturu typu Diamond. Výhodou tohoto řešení jsou malé rozměry teplosměnného tělesa, které je díky tomu o 78 % menší než deskový výměník srovnatelného výkonu. Použitá hliníková slitina AlSi10Mg zaručuje nejen nízkou hmotnost výměníku ale také dostatečný součinitel přestupu tepla. Slitina je také dobře zpracovatelná technologií Laser Powder Bed Fusion.

Základní technické parametry:

Maximální rozměry: 194,3 × 30 × 87,6 mm

Hmotnost: 224,4 g

Průtok oleje (45 °C): 2,8 l/min; Průtok vody (23 °C): 5 l/min

Tepelný výkon: 315 W; Součinitel prostupu tepla: 739 W/(m²·K)

Tlaková ztráta: 0,13 bar

Způsob realizace:

Funkční vzorek byl aditivně vyroben technologií Laser Powder Bed Fusion, a poté byl proveden standardní post-processing bez tepelného zpracování. Funkční plochy vzorku byly obrobeny na CNC frézce.

Výsledky zkoušek:

Výsledky jednotlivých testů vzorku jsou popsány v kapitole 6.2.3.

Vazba na projekt:

FSI-S-23-8340 – Aditivní výroba pokročilých materiálů a struktur

Umístění:

Ústav konstruování, Odbor reverzního inženýrství

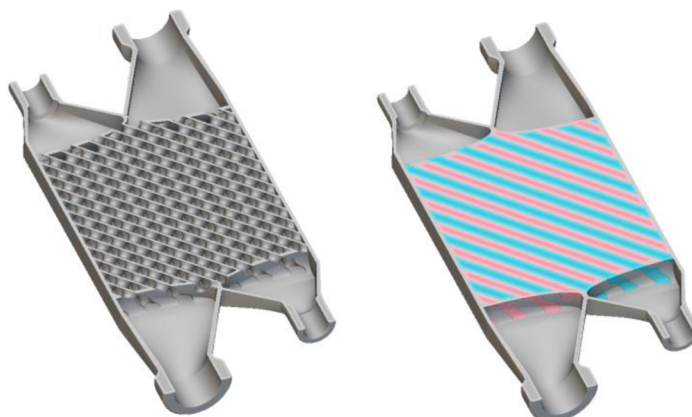
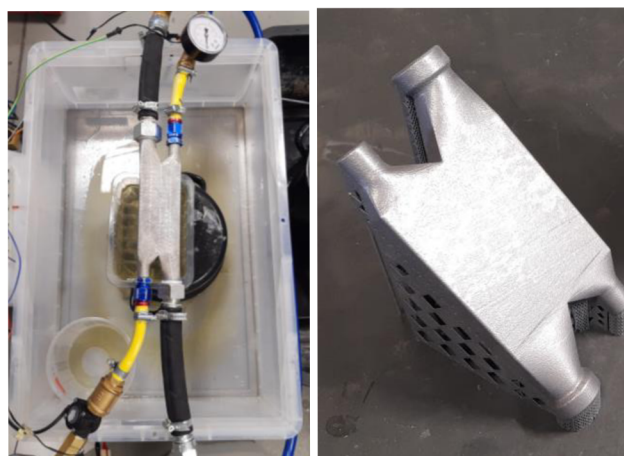
Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

Kontaktní osoba:

Ing. Ondřej Vaverka

Funkční schéma:**Fotografická dokumentace:**

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *What are the types of lattice structures and AM created lattice geometries?* 2021 [vid. 15. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.3dsculptlab.xyz/Blog/post/Types-of-lattices-structures>
- [2] *CCM Hockey and Carbon Create the First-Ever NHL Certified 3D Printed Hockey Helmet Liner.* 2020 [vid. 15. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/products/carbon-design-engine>
- [3] *Rocket propulsion engine built with selective laser melting technology from SLM Solutions.* 2019 [vid. 15. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/rocket-propulsion-engine-selective-laser-melting-slm-solutions/>
- [4] YOUNES C. *How to design and optimize a patient-specific additively manufactured hip implant stem.* 27. duben 2020.
- [5] PUNTOZERO. *Heat exchanger design with additive manufacturing.* 2022 [vid. 15. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.ntop.com/resources/blog/heat-exchanger-design-with-additive-manufacturing/>
- [6] *fizik and Carbon® Announce Partnership to Create Digitally Printed Bike Saddle: Adaptive.* 2019 [vid. 15. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/products/carbon-design-engine>
- [7] O'HARA R a VLAHINOS M. *Unlock Breakthrough Heat Exchanger Designs with Gyroids.* 22. leden 2020 [vid. 16. březen 2024]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/blog/heat-exchanger-designs-gyroids>
- [8] LI, Weihong, Guopeng YU a Zhibin YU. *Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO₂ cycles.* *Applied Thermal Engineering.* 2020, roč. 179, s. 115686 [vid. 3. květen 2024]. ISSN 1359-4311.
- [9] DUTKOWSKI, Krzysztof, Marcin KRUZEL a Krzysztof ROKOSZ. *Review of the State-of-the-Art Uses of Minimal Surfaces in Heat Transfer.* *Energies.* 2022, roč. 15, č. 21 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 19961073.
- [10] ALHAMMADI, Alya, Oraib AL-KETAN, Kamran A. KHAN, Mohamed ALI, Reza ROWSHAN a Rashid K. ABU AL-RUB. *Microstructural characterization and thermomechanical behavior of additively manufactured AISi10Mg sheet cellular materials.* *Materials Science and Engineering A.* 2020, roč. 791 [vid. 20. březen 2023]. ISSN 09215093.

- [11] MULHI, Ali, Shirin DEHGAHI, Prashant WAGHMARE a Ahmed QURESHI. Dimensional assessment of uniformly periodic porosity primitive TPMS lattices using additive manufacturing laser powder bed fusion technique. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023, roč. 124, č. 7–8, s. 2127–2148 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 14333015.
- [12] CATCHPOLE-SMITH, S., R. R.J. SÉLO, A. W. DAVIS, I. A. ASHCROFT, C. J. TUCK a A. CLARE. Thermal conductivity of TPMS lattice structures manufactured via laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*. 2019, roč. 30 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 22148604.
- [13] GADO, Mohamed G., Shinichi OOKAWARA a Hamdy HASSAN. Utilization of triply periodic minimal surfaces for performance enhancement of adsorption cooling systems: Computational fluid dynamics analysis. *Energy Conversion and Management*. 2023, roč. 277 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 01968904.
- [14] CHENG, Zhilong, Ruina XU a Pei Xue JIANG. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021, roč. 170 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 00179310.
- [15] MODREK, Mohamad, Asha VISWANATH, Kamran A. KHAN, Mohamed I. HASSAN ALI a Rashid K. ABU AL-RUB. Multi-objective topology optimization of passive heat sinks including self-weight based on triply periodic minimal surface lattices. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023, roč. 42, s. 102684 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 2214157X.
- [16] TANG, Wei, Hua ZHOU, Yun ZENG, Minglei YAN, Chenglu JIANG, Ping YANG, Qing LI, Zhida LI, Junheng FU, Yi HUANG a Yang ZHAO. Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023, roč. 201 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 00179310.
- [17] CASTRO, A. P.G., T. PIRES, J. E. SANTOS, B. P. GOUVEIA a P. R. FERNANDES. Permeability versus design in TPMS scaffolds. *Materials*. 2019, roč. 12, č. 8 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 19961944.
- [18] SANTOS, Jorge, Tiago PIRES, Bárbara P. GOUVEIA, André P.G. CASTRO a Paulo R. FERNANDES. On the permeability of TPMS scaffolds. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020, roč. 110 [vid. 19. březen 2023]. ISSN 18780180.

- [19] DIXIT, Tisha, Ebrahim AL-HAJRI, Manosh C. PAUL, Perumal NITHIARASU a S. KUMAR. High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing. *Applied Thermal Engineering*. 2022, roč. 210 [vid. 17. březem 2023]. ISSN 13594311.
- [20] IYER, Jaisree, Thomas MOORE, Du NGUYEN, Pratanu ROY a Joshua STOLAROFF. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces. *Applied Thermal Engineering*. 2022, roč. 209 [vid. 19. březem 2023]. ISSN 13594311.
- [21] KIM, Jiho a Dong Jin YOO. 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2020, roč. 7, č. 4, s. 527–550 [vid. 19. březem 2023]. ISSN 22885048.
- [22] LIANG, Dong, Chenwei SHI, Weihong LI, Wei CHEN a Minking K. CHYU. Design, flow characteristics and performance evaluation of bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023, roč. 201 [vid. 19. březem 2023]. ISSN 00179310.
- [23] RÖVER, Tim, Maxim KUEHNE, Floyd BISCHOP, Leighton CLAGUE, Bastian BOSSEN a Claus EMMELMANN. Design and numerical assessment of an additively manufactured Schwarz diamond triply periodic minimal surface fluid-fluid heat exchanger. *Journal of Laser Applications*. 2023, roč. 35, č. 4. ISSN 1042-346X.
- [24] DUTKOWSKI, Krzysztof, Marcin KRUZEL a Krzysztof ROKOSZ. Review of the State-of-the-Art Uses of Minimal Surfaces in Heat Transfer. *Energies*. 2022, roč. 15, č. 21 [vid. 19. březem 2023]. ISSN 19961073.
- [25] VLAHINOS M a ET AL. US20200033070A1. 16/044,890. 30. leden 2020. United States. [vid. 17. březem 2024]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/18/4a/d8/9d66d8b1627a91/US20200033070A1.pdf>
- [26] *Ultra-high performance and efficient heat transfer technology*. [vid. 17. březem 2024]. Dostupné z: <https://www.confluxtechnology.com/>
- [27] ZHONG, De-Yun, Li-Guan WANG a Jin-Miao WANG. Combination Constraints of Multiple Fields for Implicit Modeling of Ore Bodies. *Applied Sciences*. 2021, roč. 11, č. 3, s. 1321. ISSN 2076-3417.
- [28] *Design the future with additive manufacturing*. [vid. 17. březem 2024]. Dostupné z: <https://www.ntop.com/>

- [29] MAHMOUD, Dalia, Shekhar Rammohan Singh TANDEL, Mostafa YAKOUT, Mohamed ELBESTAWI, Fabrizio MATTIELLO, Stefano PARADISO, Chan CHING, Mohammed ZAHER a Mohamed ABDELNABI. Enhancement of heat exchanger performance using additive manufacturing of gyroid lattice structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023, roč. 126, č. 9–10, s. 4021–4036. ISSN 14333015.
- [30] BREZINA, Josef. *Návrh aditivně vyráběného tepelného Výměníku olej-voda pro formuli student*. 2019.
- [31] ZHANG, Yingfeng, Arfan MAJEED, Muhammad MUZAMIL, Jingxiang LV, Tao PENG a Vivek PATEL. Investigation for macro mechanical behavior explicitly for thin-walled parts of AlSi10Mg alloy using selective laser melting technique. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, roč. 66, s. 269–280 [vid. 4. květen 2024]. ISSN 15266125.
- [32] *ATOS Triple Scan Profesionální 3D optický skener 3D souřadnicové měření Skenování a inspekce Kontrola kvality výroby a reverzní inženýrství*. nedatováno.
- [33] VLAHINOS, Maiki a Ryan O'HARA. *Unlocking Advanced Heat Exchanger Design and Simulation with nTop Platform and ANSYS CFX*. 2020.
- [34] SHAH, Ramesh K a Dušan P SEKULIC. *FUNDAMENTALS OF HEAT EXCHANGER DESIGN*. 2003.
- [35] HEWITT, Geoffrey F., G. L. SHIRES a T. Reg BOTT. *Process Heat Transfer*. B.m.: Begell House Inc., 1994. ISBN 978-1-56700-149-5.
- [36] PILAGATTI, Adriano Nicola, Eleonora ATZENI a Alessandro SALMI. Exploiting the generative design potential to select the best conceptual design of an aerospace component to be produced by additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023, roč. 126, č. 11–12, s. 5597–5612. ISSN 14333015.
- [37] *MOL Thermol 46 heat transfer oil*. 2021.
- [38] *Haas CNC VF-2SS*. [vid. 12. duben 2024]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2ss.html>

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam zkratek

3D	trojdimenzionální
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
cos	cosinus
CT	Computed Tomography
FSI	Fakulta Strojního Inženýrství
HEX	Heat EXchanger
CHXs	Compact Heat eXchangers
IDE	Integrated Development Environment
I-WP	I-graph wrapped package
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
NTU	Number of Transfer Units
PLC	Programmable Logic Controller
PNS	Periodic Nodal Surfaces
RIAT	Odbor reverzního inženýrství a aditivních technologií
RIV	Rejstřík infomací o výrobku
SEM	Skenovací Elektronová Mikroskopie
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
sin	sinus
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TAČR	Technologická agentura České republiky
TPMS	Triply Periodic Minimal Surfaces

TRL	Technology Readiness Level
WoS	Web of Science

Seznam symbolů a veličin

a	délka hrany krychlové buňky (velikost buňky)
A_s	velikost teplosměnné plochy
$C; C_I; C_{II}$	konstanty pro výpočty
$C_1; C_2$	míra tepelné kapacity
$c_{p,1}; c_{p,2}$	měrná tepelná kapacita oleje; vody
dT/dx	charakter proudění
$h_{tc1}; h_{tc2}$	součinitel přestupu tepla
$\dot{m}_1; \dot{m}_2$	hmotnostní toky oleje; vody
n_p	počet průchodů (mezer)
NTU	počet přenosových jednotek
P_1	teplotní efektivita
$p_1 (p_{hot}); p_2 (p_{cold})$	tlakové ztráty v olejové a vodní větvi (relativní tlaky)
Q_F	tepelný výkon dle Fourierova zákona
Q	tepelný výkon dle metody P-NTU
$Q_1; Q_2$	tepelný výkon; oleje; vody
Q_{rel}	poměrný tepelný výkon
r	poloměr válcové, nebo kulové TPMS buňky
R_1	poměr tepelných kapacit
$S/V; SA/Vol$	<i>surface to volume ratio</i> , kompaktnost
$S_1; S_2$	průměrná plocha
S_{TPMS}	plocha TPMS struktury
t	přibližná tloušťka stěny
$T_{1,in}; T_{1,out}$	teplota na vstupu; výstupu z olejové větve
$T_{2,in}; T_{2,out}$	teplota na vstupu; výstupu z vodní větve
$T_{he}; T_{ce}$	rozdíl teplot na straně výtoku horké kapaliny; chladné kapaliny

t_{\min}	minimální tloušťka stěny
U_{cf}	součinitel prostupu tepla pro protiproudý výměník
\dot{V}_1 (\dot{V}_{hot}); \dot{V}_2 (\dot{V}_{cold})	objemové průtoky v olejové a vodní větvi
V_f	poměrný objem
V_{solid}	objem plné buňky
V_{TPMS}	objem TPMS struktury
X; Y; Z	směry jednotlivých os kartézského souřadného systému
ΔT_1 (ΔT_{hot})	teplotní rozdíl oleje (mezi vstupem a výstupem)
ΔT_2 (ΔT_{cold})	teplotní rozdíl vody (mezi vstupem a výstupem)
ΔT_{lm}	střední logaritmický teplotní spád
ΔT_{max}	maximální teplotní rozdíl
η	dynamická viskozita
λ	tepelná vodivost
$\rho_1; \rho_2$	hustota oleje; vody
ρ_{rel}	relativní hustota
ϕ	porozita

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1: Příklady použití strukturovaného materiálu (a) konzole [1]; (b) helma s lepším tlumením [2]; (c) odlehčený raketový motor [3]; (d) dřík kloubního implantátu [4] ; (e) chladič deska závodního automobilu [5]; (f) sedlo závodního kola [6]	13
Obr. 1-2: Chladič oleje od nTopology [7]	14
Obr. 2-1: Prisma diagram nalezených a použitých článků rešerše	16
Obr. 2-2: Přírodní inspirace TPMS struktur: detailní snímek pomocí SEM a) motýlího křídla; c) hřbetu nosatce; b) gyroid d) diamond struktura [8]	17
Obr. 2-3 Lineární závislost tepelné vodivosti na poměrném objemu pro materiály	20
Obr. 2-4: Závislost tlakové ztráty na hmotnostním toku pro různé struktury [14]	21
Obr. 2-5: Experimentální měřicí systém [16]	22
Obr. 2-6: Teplotní spektrum uvnitř testovaných vzorků v (a) horizontálním řezu, (b) vertikálním řezu [16]	22
Obr. 2-7: Změna (a) součinitele přestupu tepla (b) Nusseltova čísla a (c) tlakové délkové ztráty na objemovém průtoku, resp. Reynoldsově čísla [16]	23
Obr. 2-8: (a) CAD model výměníku s gyroid strukturou, (b) aditivně vyrobený výměník, (c) nalezené imperfekce ([19], upraveno)	24
Obr. 2-9: Závislost Nusseltova čísla na Reynoldsově pro buňky 10 mm [20]	26
Obr. 2-10: Booleovské sloučení jádra, skříně a záslepek (vlevo) s přírubami (vpravo) [21]	26
Obr. 2-11: Různé varianty umístění kanálů, typů TPMS buněk a tvarů skříní výměníků ([21], upraveno)	27
Obr. 2-12: (a) Aditivně vyrobený prototyp z hliníkové slitiny, (b) měřicí okruh pro testování [21]	27
Obr. 2-13: (a) Spočtené tepelné výkony, (b) naměřené tlakové ztráty [21]	28
Obr. 2-14: Závislost (a) SA/Vol poměru na velikosti buňky, (b) tepelného výkonu na Reynoldsově čísla [22]	28
Obr. 2-15: (a) Teplotní profily v různých řezech, (b) Rychlostní profily proudění výměníky ([22], upraveno)	29
Obr. 2-16: (a) základní diamond buňka; (b) finální výměník v částečném řezu s naznačenými toky [23]	29

Obr. 2-17: Patentovaný tepelný výměník s gyroid teplosměnným tělesem [[25], upraveno]	30
Obr. 2-18: Vlevo první patent firmy Conflux tech. a vpravo jeden z nejnovějších designů výměníku (2023) [26].....	31
Obr. 2-19: Příklad implicitního distančního pole ([27], upraveno)	31
Obr. 3-1: Základní buňky TPMS struktur (1. Schwarz P, 2. split P, 3. lidinoid, 4. neovius, 5. gyroid, 6. diamond)	35
Obr. 4-1: Black box – schéma vstupů a výstupu z procesu diplomové práce	40
Obr. 4-2: Glass box – detailní schéma procesu diplomové práce.....	41
Obr. 4-3: Analýza úhlu s tiskovou platformou	41
Obr. 4-4: Analýza tloušťky stěn buněk	42
Obr. 4-5: Stavby buněk pro 1. test: (a) nejmenší (5 až 20 mm); (b) střední 30 mm; (c) největší 40 mm	43
Obr. 4-6: Vyhodnocení odchylek vyrobených buněk od CAD modelu	44
Obr. 4-7: Plocha odezvy závislostí relativní hustoty diamond buňky na velikosti buňky a tloušťce stěny	45
Obr. 4-8: Tři sady po 3 vzorcích pro testování těsnosti tlouštěk stěn	46
Obr. 4-9: (a) Testování těsnosti; (b) Otvor, kterým unikal vzduch	46
Obr. 4-10: Testovací vzorky pro určení tepelných vlastností konfigurací TPMS struktur.	47
Obr. 4-11: Schéma testovacího okruhu výměníků včetně legendy komponent.....	48
Obr. 4-12: Testovací okruh pro určení tepelných vlastností vzorků	49
Obr. 4-13: Základní tvarové koncepty celého výměníku (a) kvádrový; (b) válcový	50
Obr. 4-14: Koncepty umístění a směru přírub (a) přímé z čel; (b) po stranách napříč; (c) po stranách souběžně	51
Obr. 4-15: Koncepte napojení teplosměnného tělesa na příruby (a) přímé; (b) šikmé; (c) paraboloidní; (d) šablonování	51
Obr. 5-1: Model referenční komponenty z prostředí Inventor	56
Obr. 5-2: Řezy referenčním výměníkem s rozměry teplosměnného tělesa a oblastmi průtoku obou kapalin	56
Obr. 5-3: Rozměry připojovacích částí přírub referenčního vzorku	57
Obr. 5-4: Fázový diagram slitin hliníku (Al) a křemíku (Si) – [21, upraveno]	57

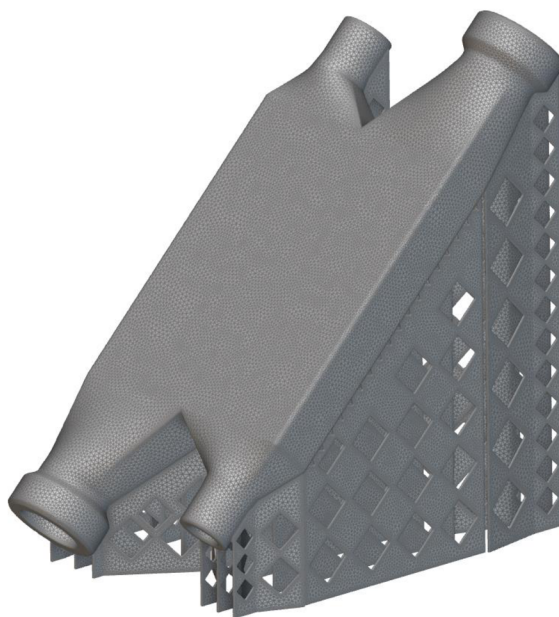
Obr. 6-1: Závislost teplotního gradientu (a) oleje a (b) vody na počtu buněk ve směrech X a Y.....	60
Obr. 6-2: Schéma metody návrhu tepelného výměníku s TPMS strukturami.....	60
Obr. 6-3: Parametrický model funkčního vzorku, podélný řez a naznačeny směry toku s některými rozměry.....	62
Obr. 6-4: Výstupní modely z Inventoru do nTop (v podélném řezu)	63
Obr. 6-5: Funkční vzorek z nTop s jádrem a záslenkami proniknutými diamond strukturou	63
Obr. 6-6: Rozložení stavby funkčních vzorků s vygenerovanými podporami v Magics... ..	64
Obr. 6-7:Finální podoba funkčních vzorků (s vyřezanými závitů).....	65
Obr. 6-8: Testovací a měřicí okruh pro funkční vzorky	66
Obr. 6-9: Naměřené teplotní spády vody pro testovací vzorky	68
Obr. 6-10: Naměřené teplotní spády oleje pro zkušební vzorky	68
Obr. 6-11: Naměřená závislost tlakových ztrát na objemovém toku chladného média.....	69
Obr. 7-1: Zjednodušené a zobecněné schéma metody návrhu TPMS výměníku	74
Obr. 13-1: Mesh funkčního vzorku 7×6×1 exportována pro tvorbu výrobního g-kódu	89
Obr. 13-2: Funkční vzorky uvnitř stavební komory SLM 280 HL (postupné zbavování nespečeného prášku)	89
Obr. 13-3: Postprocessing funkčních vzorků: vysypávání prášku (nahore) a odstraňování podpor (dole).....	90
Obr. 13-4: Testování těsnosti funkčních vzorků.....	90
Obr. 13-5: Současná podoba funkčních vzorků (vlevo); řez reálným vzorkem (vpravo)..	91

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Přehled nejznámějších a nepoužívanějších TPMS struktur	18
Tab. 2.2: Porovnání relativních hustot [11]	19
Tab. 2.3: Přehled vybraných parametrů TPMS buněk [12].....	20
Tab. 2.4: Přehled vybraných parametrů TPMS buněk [13].....	20
Tab. 2.5: Geometrické vlastnosti TPMS a PNS struktur (l – délka hrany krychlové buňky) [20]	25
Tab. 2.6: Korelační závislosti Nusseltova čísla na Reynoldsově pro určité rozsahy [20]..	25
Tab. 2.7: Pořadí TPMS struktur v jednotlivých oblastech (dle provedené rešerše)	32
Tab. 3.1: Specifikace potřeb projektu (C – cíle, F – funkce, O – omezení, Z – způsoby) .	36
Tab. 4.1: Výsledky analýzy tloušťky buněk	43
Tab. 4.2: Výpis buněk postavených pro 1. test.....	44
Tab. 4.3: Přehled parametrů vyrobených vzorků	47
Tab. 5.1: Vlastnosti používané slitiny AlSi10Mg pro LPBF výrobu [36].....	57
Tab. 5.2: Vlastnosti provozních kapalin.....	58
Tab. 6.1: Procesní parametry použité pro stavbu funkčních vzorků.....	64
Tab. 6.2: Přehled parametrů funkčních vzorků a referenčního výměníku	65
Tab. 6.3: Výsledné parametry funkčních vzorků	66
Tab. 6.4: Odhad výrobních nákladů 3 funkčních vzorků	67
Tab. 6.5: Porovnání parametrů referenčního a funkčního TPMS vzorku	72
Tab. 7-1: Přehled vlastností funkčního vzorku.....	75

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Doplnující fotodokumentace



Obr. 13-1: Mesh funkčního vzorku 7×6×1 exportována pro tvorbu výrobního g-kódu



Obr. 13-2: Funkční vzorky uvnitř stavební komory SLM 280 HL (postupné zbavování nespеченého prášku)



Obr. 13-3: Postprocessing funkčních vzorků: vysypávání prášku (nahore) a odstraňování podpor (dole)



Obr. 13-4: Testování těsnosti funkčních vzorků



Obr. 13-5: Současná podoba funkčních vzorků (vlevo); řez reálným vzorkem (vpravo)

Příloha B – Excel sešit s detailními výsledky dílčích i finálních testů a analýz

B_Diamond_analyses_&_tests.xlsx

Příloha C - Seznam nakupovaných/znovu využitých komponent v testovacím okruhu a popis kalibrace senzorů

Kalibrace

Před každým měřením s rozstupem více než pár dní bylo třeba ověřit správný výpis hodnot jednotlivých senzorů a případně měřicí přístroje zkalibrovat. Všechny 4 používané termistory byly zkalibrovány porovnáním teplot, které samy vypisovaly a které naměřily referenční teploměry TES 1307 (který byl dále používán pro kontrolu teploty v olejové nádrži) a Greisinger GTH 175/PT-T. Porovnávané rozmezí bylo od 20 do 70 °C s krokem po 5°C. Když se hodnoty lišily maximálně v jedné desetiné, byl senzor považován za zkalibrovaný, jinak bylo nutné upravit kalibrační rovnici. Co se týče průtokoměrů, tak byly využity 2 typy, přičemž každý byl kalibrován porovnáním vypisovaných hodnot v Arduino IDE a vypočtených hodnot z množství reálně přečerpané kapaliny za konkrétní časový úsek. Hodnoty byly porovnány vždy pro 4 různé průtoky dané rozsahem napájecího napětí čerpadel. Kalibrace probíhala jak s olejovou větví, tak vodní, a to se zapojeným vzorkem (výměnkem) i bez něj. Vzhledem k tomu, že výpis v Arduino IDE kolísal mezi 2 hodnotami, za zkalibrovaný byl průtokoměr považován, pokud spočtená hodnota ležela v intervalu vypsanych hodnot. Jelikož manometry byly nově zakoupeny a pouze přenáší tlak z kapaliny přes mechanismus uvnitř na ručičku ukazující konkrétní hodnotu, nebyly nijak kalibrovány.

Seznam nakupovaných komponent					
	Položka	Popis	Cena za kus s DPH [Kč]	Množství	Cena celkem [Kč]
Nakoupeno pro tento projekt	Mini ponorné čerpadlo - SATRA	na naftu, olej a vodu; $\varnothing 51$ mm; 12V/60W; 25 l/min	283	1	283,00
	Ponorné vodní čerpadlo Comet Ocean Softstart	vodní; 12V, 60 W; 21 l/min; 1,5 baru	1013	1	1 013,00
	OLEJ hydraulický OH HM 46	hydraulický olej viskozni třídy ISO VG 46	66,67	10 l	666,70
	Vsuvka redukovaná mosazná G 1" a x G 3/4" a	vnější závity	54,3	4	217,20
	143.12.08 R3/4" / G1/2" (400bar)	redukční fitinka; vnitřní - vnější	84,94	2	169,88
	A301120-26x46 (46mm - 3/4"BSPP)	přímá spojka - prodloužení	106,24	2	212,48
	M1 50 0-006bar 1/4"	manometr; 0 - 6 bar; závit G1/4	160	2	320,00
	Hrnec smaltovaný s poklicí 28 cm 14 l	hrnec na olej; $\varnothing 28$ cm	799	1	799,00
	Přímá přípojka těleso (GES 20SR - WD)	šroubení metrický - palcový závit; M30x2 - G3/4"	130,32	2	260,64
	DuPont kabely M-M a M-F 2x (40x,40 cm)	dlouhé kabely Arduino - senzory	67	2	134,00
Novaservis Manometr M6304A	zadní šroubení; 0 – 4 bar; G1/4"	109	2	218,00	
Průtokoměr 1-30 l/min	do vodního okruhu	59,98	2	119,96	
Vybavení Ústavu Konstruování	Laboratorní zdroj - 0-30 V - 0-30 A DC - 900 W	pro napájení vodního čerpadla (méně výkonný)		1	
	Laboratorní zdroj DIAMETRAL M130R50D	pro napájení olejvého čerpadla (výkonější)		1	
	Mosazný průtokoměr s termistorem YF-B4	pro olej: 5-15V; 1 - 25l/min; - 25 až + 80°		4	
	Tlakový senzor 0-1,2MPa, závit G1/4	označení: M553A; 0-1,2MPa; závit G1/4		2	
	Varná deska MORA VDS300FF	indukční 9 stupňů ohřevu		1	
	Kanistr	na vodu objem 30 l		1	
	Hadice černá	na olej světlost $\varnothing 20$ mm		4 m	
	Hadice žlutá Quattroflex+	na olej i vodu světlost $\varnothing 1/2"$ (12,7 mm)		2,5 m	
	Drátek arduino samec- samec	Dlouhý 100; 110 cm +		30	
Klon Arduino UNO R3 CH340	hlavní ovládací deska		1		
Celkem					4 413,86

Příloha D – Predikční Matlab skripty

1. Výpočet přibližné relativní hustoty dle parametrů diamond buňky:

D1_Relative_density_calculation.m

2. Predikční skript tepelných a tlakových parametrů výměníku

D2_HEX_performance_prediction.m

Příloha E – Arduino IDE sketch pro odečítání z termistorů a průtokoměrů

E_Final_HEX_test_circuit.ino

*ve stejnojmenné složce

Příloha F – CAD data (Inventor + nTop)

1. Analýza úhlu (převisu):

F1_TPMS_cells_angle_analysis.ntop

2. Analýza tloušťky stěny:

F2_TPMS_cells_thickness_analysis.ntop

3. Sešit pro návrh testovacího vzorku s 1 buňkou:

F3_Test_cell_1x1x1.ntop

4. Sešit pro návrh testovacích vzorků s více buňkami:

F4_Test_cells_config_NxNxN.ntop

5. Parametrický model funkčního vzorku 1. fáze:

F5.1_HEX_final.ipt

F5.2_HEX_final.step

6. Model funkčního vzorku 7x6x1 se sklonem 45° a podpurnými žebry (pro výrobu):

F6.1_HEX_final_7x6x1.ipt

F6.2_HEX_final_7x6x1.step

7. Parametrický model funkčního vzorku 2. fáze:

F7_HEX_final.ntop

8. Výkres pro obrábění funkčního vzorku:

F8_HEX_final_7x6x1_OBRABENI.pdf

Příloha G – Detailní popis metody návrhu TPMS výměníků

G_Metoda_navrhu_TPMS_vymeniku.pdf

Příloha H – Ukázkový výpočet tepelných vlastností výměníku

H1_Vypocet_tep_vlastnosti_5x5x1.pdf

H2_Vypocet_tep_vlastnosti_5x5x1.sm

H3_Vypocet_tep_vlastnosti_ref.pdf

H4_Vypocet_tep_vlastnosti_ref.sm