



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

MOŽNOSTI VYUŽITÍ 3D TISKU V PROCESNÍM PRŮMYSLU

OPPORTUNITIES FOR 3D PRINTING IN THE PROCESS INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Haltmar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominika Babička Fialová,
Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Jakub Haltmar
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Dominika Babička Fialová, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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 bakalářské práce:

Možnosti využití 3D tisku v procesním průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Procesní průmysl musí čelit novým výzvám, jako je náhrada fosilních zdrojů, snižování dopadů na životní prostředí nebo zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti výroby. Jednou z perspektivních cest je využití aditivních technologií (tzv. 3D tisku) pro výrobu zařízení či jeho dílčích komponent. Práce se zaměřuje na rozbor vhodných aditivních technologií a materiálů s ohledem na provozní podmínky a nároky na zařízení v procesním průmyslu. Kromě příkladů „dobré praxe“ a aktuálního stavu využití aditivně vyrobených dílů je cílem identifikovat také nové aplikační oblasti 3D tisku v rámci tradičních provozů procesního průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

- (1) Zpracovat přehled dostupných aditivních technologií a materiálů, souhrn výhod a limitů 3D tisku s ohledem na specifika procesního průmyslu.
- (2) Vytvořit doporučení pro volbu technologií a materiálů dle návrhových podmínek cílové aplikace.
- (3) U příkladů „dobré praxe“ porovnat vlastnosti aditivně vyrobených dílů s konvenčně vyrobenými komponentami procesních zařízení.
- (4) Zhodnotit potenciál 3D tisku pro budoucí průmyslové využití, vývoj a inovace v oblasti procesního inženýrství.

Seznam doporučené literatury:

CHUA, C.K. a K.F. LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fifth edition of Rapid prototyping. New Jersey: World Scientific, 2017. ISBN 978-981-3146-76-1.

WICHTERLE, K. a M. VEČEŘ. Základy procesního inženýrství. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2580-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi využití aditivních technologií v oblasti procesního průmyslu, zvláště v oblasti tepelných výměníků (chladičů), membránové destilace a strukturované výplně. V první části přináší práce přehled materiálů a aditivních technologií využitých ve zmíněných procesních celcích. Další část je věnována konkrétním příkladům využití 3D tisku v procesních aplikacích a jejich srovnání s konvenčními výrobními technologiemi ve světě. Dále je poskytnut přehled podpořených projektů dle Informačního systému výzkumu, vývoje a inovací v této oblasti a nastíněna situace na trhu v ČR. V diskuzi jsou navržena doporučení vývoje aditivní výroby v procesním průmyslu. V řešené oblasti je nejčastěji dosaženo zlepšení procesů (účinnosti, výkonu či zcela nové aplikace) díky možnosti aditivní výroby produkovat složitou geometrii zvětšující funkční plochu při zachování zástavbových rozměrů a materiálů specifických pro procesní průmysl.

Klíčová slova

3D tisk, aditivní výroba, tepelný výměník, přenos tepla, přenos hmoty, chladič, minikanál, mikrokanál, membránová destilace, strukturovaná výplň, záchyt uhlíku

Abstract

This bachelor thesis deals with the possibilities of using additive technologies in the process industry, especially in the field of heat exchangers (heat sinks), membrane distillation and structured packing. In the first part, the thesis provides an overview of the materials and additive technologies used in these process units. The next part is devoted to specific examples of the use of 3D printing in the process applications and their comparison with conventional manufacturing technologies in the world. Furthermore, an overview of supported projects according to the Research, Development and Innovation Information System projects and the market situation in the Czech Republic is outlined. Recommendations for the development of additive manufacturing in the process industry are proposed in the discussion. In the addressed area, process improvements (efficiency, performance or completely new applications) are most often achieved due to the ability of additive manufacturing to produce complex geometries increasing the functional area while maintaining built-up dimensions and materials specific to the process industry.

Keywords

3D printing, additive manufacturing, heat exchanger, heat transfer, mass transfer, heat sink, minichannel, microchannel, membrane distillation, structured packing, carbone capture

Bibliografická citace

HALTMAR, Jakub. *Možnosti využití 3D tisku v procesním průmyslu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-5-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/150019>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Dominika Babička Fialová

Prohlášení o původnosti

Prohlašuji při plném vědomí, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, za použití zdrojů uvedených v seznamu literatury a dle pokynů vedoucího práce.

V Zábřeze dne 25. 5. 2023

.....
Jakub Haltmar

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucí práce paní Ing. Dominice Babičce Fialové, Ph.D. za její odbornou pomoc, cenné rady a nepřetržitou ochotu při řešení bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svojí přítelkyni, rodičům a spoluhráčům za neutuchající podporu v průběhu celého akademického roku i bakalářského studia.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Materiály a technologie.....	12
2.1	Aditivní technologie.....	12
2.1.1	Plasty.....	12
2.1.2	Kovy a slitiny.....	14
2.1.3	Keramika.....	16
2.2	Přehled materiálů a jejich vlastností.....	17
2.2.1	Plasty.....	17
2.2.2	Kovy a slitiny.....	20
2.2.3	Keramika.....	24
3	Přenos tepla a hmoty, příklady „dobré praxe“.....	26
3.1	Výměník tepla.....	26
3.1.1	TPMS struktury.....	27
3.1.2	<i>Fractal-tree heat exchangers</i>	28
3.1.3	Úprava teplosměnného povrchu.....	29
3.1.4	Keramika.....	31
3.2	Pasivní chladiče.....	32
3.2.1	Optimalizace topologie.....	33
3.2.2	Chladiče elektroniky.....	36
3.3	Minikanály a mikrokanály.....	38
3.3.1	Minikanály.....	39
3.3.2	Mikrokanály.....	40
3.4	Membránová destilace.....	44
3.5	Strukturovaná výplň.....	46
3.5.1	Záchyt uhlíku.....	47
4	3D tisk v českých projektech VaVaI.....	51
4.1	Projekty statní podpory VaVaI.....	51
5	Situace v průmyslovém sektoru v České republice.....	53
5.1	České firmy zabývající se aditivní výrobou.....	53
6	Výstup řešerše použití 3D tisku v procesních aplikacích.....	54
6.1	Výměník tepla.....	54
6.2	Pasivní chladiče.....	55
6.3	Minikanály.....	55
6.4	Mikrokanály.....	56
6.5	Membránová destilace.....	57
6.6	Strukturovaná výplň.....	57
6.7	Záchyt uhlíku.....	58
7	Závěr.....	59

Seznam použité literatury.....	60
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	68

1 Úvod

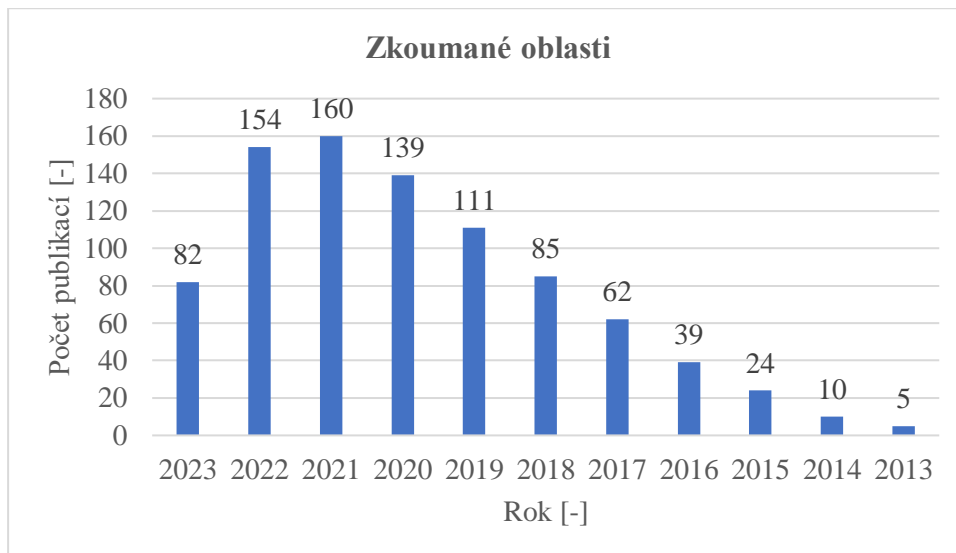
Výroba dílů pomocí 3D tisku sahá do osmdesátých let minulého století. První metodou uvedenou na trh byla metoda stereolitografie (*Stereolithography, SLA*), tedy tisk plastových dílů pomocí speciální pryskyřice citlivé na světlo. Ta je vytvrzována působením laserového paprsku. Masivnější rozvoj aditivních technologií je datován do přelomu tisíciletí, kdy se začalo tisknout i z jiných než plastových materiálů. První kovová prášková tiskárna byla prodána firmou Optomec v roce 1998. Později se aditivní technologie dostaly až do domácností nadšenců do tohoto progresivního výrobního stylu. Nejrozšířenější domácí technologií je technologie FDM, což je tisk nanášením roztaveného filamentu tiskovou hlavou. Ve firemním sektoru je 3D tisk využíván pro tvorbu vizuálních ale i funkčních prototypů či těžko dostupných náhradních dílů, někdy dokonce i k malosériovým výrobkům. Největší výhodou je časová úspora, kdy lze celý proces od návrhu dílu až po jeho vyhotovení snížit na jednotky hodin času. Oproti konvenčním metodám výroby dílů, kdy se proces od návrhu po hotový výrobek pohybuje v rádech dnů, představují aditivní technologie nespornou časovou výhodu. Další výhodou je téměř libovolná možnost geometrie výrobku. Jednou z hlavních nevýhod je softwarová náročnost návrhu a samotného tisku složitějších součástí, dále pak cena zvláště u jednoduchých geometrií při velkosériové výrobě, kdy nelze konkurovat konvenčním výrobním postupům hlavně z důvodu vyšší ceny základního materiálu, delšího strojové času nebo nutné expertízy obsluhy. [1]

Tento progresivní styl výroby dílů je ve velkém využíván i v procesním inženýrství. Procesní inženýrství je široký inženýrský obor, který se zabývá konstrukčními a technologickými aspekty procesů (od návrhu kompletních zpracovatelských linek k detailnímu řešení dílčích systémů) a jejich následným hodnocením. Využití 3D tisku v tomto oboru slibuje nejen zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti výroby, ale i možnost vyšší účinnosti pomocí aditivně vyrobených dílů využívaných v zařízeních. To je způsobeno faktem, že konvenční metody výroby mnohdy nejsou schopny vytvořit složité díly se složitou geometrií, jakou je schopna vytvořit aditivní technologie. S postupujícím technologickým pokrokem je nutné produkovat stále více energie na provoz zařízení, ale také více řešit udržitelnost a ochranu životního prostředí. Proto budou následující generace nuceny řešit problémy především v oblasti nahrazení ropy a zemního plynu obnovitelnými zdroji a otázkou zachytu uhlíku a ostatních emisních plynů. Pro bezproblémové fungování společnosti bude nutné nejen najít nová řešení v oblasti energetiky, ale také zvyšovat účinnost stávajících procesů, čehož bude možné dosáhnout právě i efektivnějším využitím 3D tisku.

Cílem této bakalářské práce je poskytnout přehled o dostupných aditivních technologiích a materiálech používaných v procesním průmyslu společně s jejich výhodami, nevýhodami a limity (viz kapitola 2 Materiály a technologie). Dále práce v kapitole 3 Přenos tepla a hmoty, příklady „dobré praxe“ nastiňuje příklady „dobré praxe“ využití aditivní výroby v případech typických součástí nebo celků využívaných v procesním průmyslu k jednotkovým operacím, především přenosu tepla a hmoty. Mezi nejčastěji zastoupené aplikace patří zejména výměníky tepla s podskupinou pasivních chladičů, nebo strukturované výplně.

Nutno poznamenat, že v kapitole 2 Materiály a technologie jsou zohledněny a zařazeny jen ty aditivní technologie a materiály, které byly zmíněny ve studiích analyzovaných v rozsáhlé rešerši, jejíž výsledky jsou prezentovány v kapitole 3 Přenos tepla a hmoty, příklady „dobré praxe“, a jsou schopny vydržet provozní podmínky zmiňovaných součástí a jejich výroba je realizovatelná. Mezi hlavní posuzovaná kritéria patří teplota tání materiálu, objemová stálost, tloušťky tisknutých vrstev, tloušťka tisknutých stěn, rezistence vůči teplotním šokům, potřeba podpor, *postprocessing*, potřeba ochranné atmosféry, hladkost stěn. Každému z jednotlivých aparátů a aplikací procesního průmyslu je v praktické části práce věnována samostatná podkapitola, kde je postup aditivní výroby srovnán s konvenčními výrobními technologiemi. V jednotlivých podkapitolách jsou uvedeny nejcitovanější a nejzajímavější odborné publikace z uplynulých 7 let. V další části práce (kapitola 4 3D tisk v českých projektech VaVaI) je pak kladen důraz na potenciál budoucího využití 3D tisku v tomto odvětví, také je polemizováno nad možností vývoje a inovací jednotlivých procesů a poskytnut přehled a specifika výroby dílů pro procesní průmysl firmou zabývající se 3D tiskem.

V rámci bakalářské práce byl zpracován také přehled všech odborných článků vydaných v posledních 10 letech z databáze Scopus o zmíněných konstrukčních celcích v oblasti 3D tisku ke dni 15. 4. 2023. Obrázek 1.1 ukazuje, že trend používání 3D tisku v procesním průmyslu dosahuje svého vrcholu. Pro rok 2023 jsou výsledky neúplné, protože jsou zobrazeny pro čtvrtý měsíc roku. Z dosavadního přírůstku článků pro rok 2023 ale lze odhadovat, že počet článků za rok 2023 překoná rok 2022 přibližně o 80 článků.



Obrázek 1.1 Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013—2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a jednotlivý konstrukční celek oblasti procesního průmyslu. V tomto grafu jsou sečteny všechny články z klíčových slov: „heat exchanger“, „membrane distillation“, „heat sink“, „minichannel“, „microchannel“, „structured packing“, „carbon capture“. Grafy jednotlivých konstrukčních celků jsou zmíněny v obrázcích v samostatných kapitolách

2 Materiály a technologie

Rozvoj 3D tisku byl zaznamenán hlavně na začátku 21. století [1]. První pokusy se datují už do 80. let minulého století, kdy prvními tisknutelnými materiály byly polymery, na přelomu tisíciletí byly poprvé tisknuty i kovy [1]. V dnešní době lze vyjma dříve zmíněných materiálů tisknout i z keramiky nebo betonu.

Dle předních světových odborníků věnujících se 3D tisku dosahuje 3D tisk svého vrcholu „začátečnické technologie“. Postupně se začne zařazovat mezi běžné technologie výroby, dojde ke zdokonalení materiálů a metoda bude ve velkosériové výrobě cenově konkurovat konvenčním technologiím, protože s rostoucí složitostí již úměrně neporoste cena výrobku. Oblast procesního průmyslu čelí problémům se stále zvyšujícími se požadavky zvláště na tepelnou výměnu mezi požadovanými zařízeními se zvyšujícími se nároky na úsporu místa. Tento problém může být vyřešen aditivními technologiemi, které díky specifickému výrobnímu procesu umožňují vyrábět téměř neomezené geometrie, čehož je využíváno zvláště v problematice přenosu tepla (u tepelných výměníků, pasivních chladičů, mini a mikro kanálových struktur), přenosu tepla a hmoty (prvky užívané při membránové destilaci nebo strukturované výplně) či ve velmi aktuálních oblastech zachytu uhlíku. Geometrie výrobku není omezena konvenčními technologiemi, a proto lze v procesním průmyslu nalézt využití extrémně členitých a větvených tokových systémů a vodicích prvků, různé varianty úprav smáčeného povrchu, či samonosné struktury splňující vysoké nároky na pevnostní i tokové parametry.

V následujícím textu jsou uvedeny jen ty technologie a materiály, u kterých bylo na základě výsledků rešerše zjištěno použití v oblasti procesního průmyslu.

2.1 Aditivní technologie

V této části jsou popsány metody aditivní výroby dílů z plastů, slitin a čistých kovů a keramiky. Kromě výrobních specifik a speciálních požadavků tisku jsou uvedeny i odkazy na nejčastěji užívané výrobní materiály a procesní aplikaci.

2.1.1 Plasty

SLS (*Selective Laser Sintering*)

SLS (*Selective Laser Sintering*) je technologie, která k tisku obvykle využívá jako materiál polymer, který je spékán CO₂ laserem vrstvu po vrstvě. V průběhu tisku je vždy na tiskovou podložku nanesen prášek, který je nahříván na teplotu skelného přechodu (těsně pod teplotu tavení) rovnoměrně na celé ploše tiskové podložky. Poté laser vypálí strukturu, tzn. speče částice materiálu jen na určitých místech ve vrstvě dle předem definované geometrie dílu, zbytek nespečeného prášku slouží jako přirozená podpora a je ho možno po skončení procesu recyklovat. Hlavní výhodou spékání oproti tavení je fakt, že při tavení mění materiál svůj objem, a není proto dosaženo takové rozměrové přesnosti. Po dokončení jedné vrstvy obvykle tisková podložka klesne o výšku vrstvy a celý proces se opakuje. V uzavřené výrobní komoře se nachází inertní plyn, většinou dusík, díky kterému je výsledná struktura méně porézní, jelikož materiál není v kontaktu s okolní atmosférou. Tloušťka vrstvy je minimálně 30 μm do maxima 150 μm. [1]

Hlavní výhodou této technologie je nízká cena, možnost tisknout geometricky neomezeně velké struktury díky možnosti lepit výsledné výrobky, absence tiskových podpor a vysoká přesnost. Výrobek díky své rozměrové přesnosti nutně nevyžaduje *postprocessing*, avšak v závislosti na cílové aplikaci bývá obvykle broušen, tryskán nebo lakován. Nevýhodou je velká energetická náročnost, což lze zmírnit přidáním ohřivačů materiálu těsně před laserem. Další nevýhodou je nutnost použití inertního plynu, který je potřeba skladovat za speciálních podmínek v tlakových nádobách (při využití dusíku možno využít integrovaného vyvíječe). Touto metodou lze tisknout i kov nebo keramiku. [1]

V oblasti procesního průmyslu je technologie SLS používána zejména v oblasti membránové destilace, kde je tisknuto z materiálu PA2202 a PA12, pasivních chladičů a strukturované výplně (PA12).

SLA (*Stereolithography*)

Metoda SLA (*Stereolithography*) je vůbec první používaná aditivní technologie, která pracuje na principu fotopolymerizace tekutého monomeru laserem v UV oblasti, kdy tímto spojením vznikne polymer, případně řetězce polymerů. Požadavkem na tiskový materiál musí být možnost vytvrditelnosti světlem. Kapalný monomer je při SLA metodě v zásobovací kádi, do které je ponořena posuvná tisková podložka. Samotný proces fotopolymerizace probíhá v rozsahu 25—500 μm , tedy že je pryskyřice vytvrzována po více než jedné vrstvě, následně se tisková podložka posune o požadovanou vzdálenost dolů a tiskne se další vrstva, což mění orientaci podpor a je možné dosažení jejich menšího užití. Ovládání podložky je řízeno optickým skenovacím systémem. Do systému náleží i stěrač, který po vytvrzení každé vrstvy díl přetře kvůli zbavení přebytečného kapalného materiálu. Tloušťka vrstev se pohybuje v rozsahu 25—125 μm v závislosti na typu tiskárny. [1]

Výhodou SLA je téměř neomezený tiskový prostor (stovky milimetrů, možnost lepit), při správném nastavení laseru i přesnost dílů a možnost dosažení nejnižší drsnosti povrchu ze všech aditivních technologií. Mezi nevýhody technologie patří nutnost po samotném tisku díly sekundárně vytvrdit v peci, čímž se prodlužuje čas výroby a nutnost tisku a odstranění podpor. V praxi je tato metoda často používána pro tvorbu prototypů, vizualizací procesů a funkční testování díky své možnosti tisknout z průhledného materiálu. [1]

V oblasti procesního průmyslu je technologie SLA používána zejména v oblasti tepelných výměníků a strukturované výplně.

FDM (*Fused Deposition Modelling*)

Technologie FDM (*Fused Deposition Modelling*) je založeno na tisku z pevného materiálu, filamentu, uskladněného vedle tiskárny v cívce, pomocí ohřátí do polotekutého stavu a nanesení tiskovou hlavou na tiskovou podložku vrstvu po vrstvě. Tisková podložka zůstává buď ve stále stejné výšce a pohybuje se tisková hlava ve třech osách, anebo se pohybuje i tisková podložka, záleží na typu tiskárny. Přesnost výsledných struktur závisí mimo jiné na průměru a typu trysky na tiskové hlavě, dále pak na výšce vrstvy a druhu materiálu. Tiskovým materiálem může být průhledný polymer, polykarbonát, termoplast nebo biokompatibilní materiál. Minimální výška vrstvy může být až 50 μm , běžně se pohybuje okolo 150 μm , maximální může dosahovat až 330 μm . [1]

Výhodou FDM je fakt, že při tisku není potřeba inertní atmosféra a samotný proces je velice levný. Doplnění cívek s materiálem je díky skladování materiálu mimo stroj také velice jednoduché, tisknutelné materiály vykazují chemickou odolnost. Nevýhodou technologie FDM je nutnost tisku podpor, které lze po dokončení operace poměrně lehce odstranit odlomením (u strojů s jednou tryskou), vodou nebo speciálními rozpouštědly (u strojů s více tryskami). Při tisku více tiskovými hlavami najednou lze podpory vytisknout z jiného materiálu se specifickými vlastnostmi (např. jiná teplota tání), čehož se poté dá využít při jejich odstraňování. Nedostatkem tiskáren je malá přesnost, hlavně kvůli limitu minimálního průměru trysky, která se v dnešní době pohybuje mezi 0,1—1 mm. Dalším problémem je časová náročnost a nepředvídatelné smrštění při tuhnutí. FDM tiskárny jsou velice rozšířeny mezi nadšenci 3D tisku, ale jsou využívány i ve firmách na výrobu prototypů. [1]

V oblasti procesního průmyslu je technologie FDM používána zejména v oblasti tepelných výměníků, kde jsou tisknuty zejména prototypy z materiálu ABS.

DLP (*Digital Light Processing*)

Technologie DLP (*Digital Light Processing*) je velice podobná technologii SLA. Také je zapotřebí pracovat s tekutým materiálem citlivým na světlo, fotopolymerem. Kád' s materiálem je osvětlována zespodu DLP projektorem a po dokončení části (obvykle více vrstev najednou) se výrobek zvedne nahoru, tedy je stavěn od vrchní části po spodní. Tento fakt mění orientaci podpor, tedy je možné dosáhnout menšího užití podpor. Ke tvorbě obrazu je zapotřebí zařízení DMD (*digital micromirror device*), které je vlastně polovodičové hliníkové zrcadlo usměrňující fotony na přesná požadovaná místa dílu. Výška vrstev se pohybuje v rozmezí 25—125 μm . [1]

Výhodou technologie je minimum podpor kvůli opačnému směru stavby, vysoká rychlost výstavby (přibližně 15 mm/hodina) a není nutné použít stíracího zařízení. Tato technologie je výhodná pro tisk

zařízení, které mají být složeny z více materiálů, jelikož je v jednu chvíli využíváno malé množství materiálu, a proto je možné ho velice rychle měnit. Dalším benefitem je malé objemové smrštění díky okamžitému vytvrzování proudem fotonů. Nevýhodou technologie je nutnost *postprocessingu*, minimálně odstranění podpor, někdy je dokonce potřeba následné vytvrzování v peci. Použití DLP projektoru, které umožňuje zrychlit tisk, však zároveň limituje přesnost výroby, která je závislá na rozlišení projektoru a vrstva je vždy rozrašťována (nelze tedy vytvořit např. hladkou křivku). Využití v průmyslu je podobné jako u technologie SLA. [1]

Pomocí technologie DLP lze tisknout i keramiku, čehož je využíváno v procesním průmyslu zejména v oblasti zachytu antropogenního CO₂, kde je tisknuto z SiO₂. DLP je ve výčtu technologií uvedena v metodách pro tisk plastu, jelikož vznikla a nejvíce se používá pro plastový tisk.

DLS (*Digital Light Synthesis*)

Metoda DLS (*Digital Light Synthesis*) je metoda pro tisk tekutých polymerů, které jsou vytvrzovány UV světlem (fotochemický proces). Tisk probíhá od nejvrchnější části dílu po spodní, kdy z kádě naplněné tekutým polymerem postupně vystupuje hotový díl, který je UV světlem vytvrzován kontinuálně, nejedná se tedy o tisk po vrstvách. Na dně nádrže na materiál je speciální sklo propouštěcí kyslík, na němž vzniká zóna s vyšší koncentrací kyslíku o tloušťce přibližně 20 μm, která zabraňuje tuhnutí materiálu v blízkosti spodní stěny kádě, čímž zabraňuje přilepení vytvrzeného dílu. Tloušťka vrstvy se obvykle pohybuje v desítkách mikrometrů. [1; 2]

Výhodou metody jsou mechanické vlastnosti výsledného dílu srovnatelné s metodou vstřikování, oproti jiným aditivním metodám vyniká DLS totožnou pevností ve všech směrech z důvodu vytvrzení celé součásti najednou bez vrstev. Metoda vyžaduje tisk podpor, které musí být následně odstraněny, jinak technologie většinou nevyžaduje následný *postprocessing*. V některých případech je nutné výsledný výrobek vytvrdit v peci. [1; 2]

V oblasti procesního průmyslu je technologie DLS používána zejména v oblasti mikrokanálů, kde je tisknuto z materiálu EPX 82.

TPP (*Two-Photon Polymerisation*)

Technologie TPP (*Two-Photon Polymerisation*) je výjimečná procesem výroby, kdy je krátkými pulsy laseru do přesného místa kapalného materiálu vyvolána dvoufotonová absorpce a následná polymerace (fotolytický proces). Po odstranění neopolymerizovaného materiálu ethanolem lze dosáhnout libovolné geometrie bez stavby podpor. V možnostech TPP je libovolná geometrie téměř bez omezení, kdy je výrobek tisknut najednou bez vrstvení, protože laserem je možné cílit na jakoukoli hloubku v kapalném materiálu, a tak vzniká „opravdová“ 3D struktura. Je možné dosáhnout minimálního rozlišení v řádech stovek nanometrů, avšak tloušťky vrstvy pouze v řádech desítek mm. [1] [3]

Výhodou procesu je možnost změnou monomerů v materiálu měnit mechanické vlastnosti výsledných polymerů, jako je např. tvrdost nebo míra smrštění, a možnost tisknout na vložený díl. Přidáním vhodných aditiv do kapalné pryskyřice lze měnit fyzikální, chemické, biologické a optické vlastnosti. Jelikož je používán laser v infračerveném spektru, které nepoškozují tkáň živých organismů, lze tisknout i v prostředí s nimi. Další výhodou je velmi přesná geometrie a možnost řídit přesnost nastavením pulzů laseru. Nevýhodou je požadovaný vysoký výkon laseru, aby bylo možné provést fotolytický proces. Dalším nedostatkem je chybějící škálovatelnost tiskáren a při nastavení maximálního rozlišení je požadován malý příkon laseru, který způsobuje nelinearitu mezi *voxel size* (velikost pixelu a výška řezu), intenzitou laseru a rychlostí zápisu. [1]

V oblasti procesního průmyslu je technologie TPP diskutována pro tisk membránové destilace, avšak její využití v praxi nebylo dohledáno.

2.1.2 Kovy a slitiny

PBF (*Powder Bed Fusion*)

Metoda PBF (*Powder Bed Fusion*) lze rozdělit na dvě podtechnologie. První z nich je PBF-L (*Powder Bed Fusion-Laser*), kdy je do kovového prášku rozprostřeného na tiskové podložce svíceno laserem (patří sem metody DMLS a SLS), který taví částice na teplotu tání v inertní atmosféře. Metoda vyžaduje

tisk podpor. Druhou metodou je PBF-EB (*Powder Bed Fusion-Electron Beam*), která pracuje s elektronovým paprskem ve vakuové komoře, který nejdříve speče prášek a poté ho ohřeje na teplotu tání a spojí (patří sem metoda EBM). Podmínkou pro použití PBF-EB je elektricky vodivý prášek, avšak podpory nejsou vyžadovány. Minimální tloušťka vrstvy obou technologií je 30 μm . [4]

Metody jsou nejvíce využívány pro tisk kovových slitin, prášek lze po tisku recyklovat, avšak lehce natavený materiál při druhém tisku poskytuje horší rozměrovou přesnost. Výhodou technologií je vysoká rychlost tisku a rozměrová přesnost. Nevýhodou je v závislosti na typu tiskárny limit velikosti součásti a při požadavku na menší drsnost povrchu nutnost *postprocessingu*. Mezi *postprocessingové* metody patří leštění, broušení nebo tepelné zpracování k odstranění vnitřních napětí. PBF je možné vytisknout nejnižší aritmetickou drsnost povrchu (Ra) 7 μm . [4]

V rámci práce je metoda PBF uváděna v přehledech samostatně, jelikož v řešovaných studiích byla tato metoda tisku často uváděna jako výrobní a dále nespecifikována.

V oblasti procesního průmyslu je technologie PBF používána zejména v oblasti pasivních chladičů, kde je tisknuto z hliníku, mikrokanálů (Inconel 718, Ti-6Al-4V, AlSi₁₀Mg, 17-4PH) a minikanálů (Ti-6Al-4V, AlSi₁₀Mg).

DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*)

Princip metody DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) vychází z metody SLS, kdy je materiál ve formě prášku spékán CO₂ laserem vrstvu po vrstvě. Na celé ploše tiskové podložky je rozprostřen kovový prášek, který je nahříván a poté spečen laserem do požadované geometrie, kdy zbytek nespečeného prášku je možné po skončení tisku vrstvy znovu použít. Pomocí DMLS je možné dosáhnout minimální tloušťky vrstvy od 30 μm až do stovek μm . [1]

Předností technologie je relativně nízká cena tisku složitých geometrií. DMLS je často volena kvůli kvalitě výrobku, který se svými mechanickými vlastnosti blíží odlitkům nebo obrobkům. Nevýhodou je nutnost *postprocessingu* dílu např. tryskáním, broušením nebo obráběním, protože po samotném tisku vykazuje velkou drsnost povrchu způsobenou částečným natavením okolního prášku, který se nalepí na povrch dílu. Další komplikací je nutnost využití inertního plynu, který je nutné uchovávat a přivádět do tiskového procesu. Obvykle je jím dusík nebo argon. DMLS lze tisknout většinu kovů i nekovů, jako je nerezová ocel, ocel, titan, hliník, křemík, hořčík a jejich slitiny. [1]

Drsnost povrchu po procesu tisku může být výhodou u mini a mikrokanálů, kde může působit jako intenzifikační prvek pro dosažení vyššího tepelného výkonu.

V oblasti procesního průmyslu je technologie DMLS používána zejména v oblasti tepelných výměníků (17-4PH), pasivních chladičů (AlSi₁₀Mg, MS1), minikanálů (AlSi₁₀Mg, CoCr, Inconel 718, hliník) a mikrokanálů (Inconel 718).

SLM (*Selective Laser Melting*)

Technologie SLM (*Selective Laser Melting*) využívá kovový prášek tavený laserem k tisku 3D struktur, v dnešní době je možné touto metodou tisknout z celé řady materiálů (ocel, nerezová ocel, hliník, měď, titan, platina či zlato). V procesu projde prášek přes teplotu tání, což je rozdíl oproti metodám typu *Sintering*, kdy laser prášek jen částečně nataví a spojí. Díky úplnému roztavení je výsledný produkt celistvější a poskytuje lepší mechanické vlastnosti, avšak technologie vyžaduje inertní atmosféru. Minimální tloušťka vrstvy se pohybuje mezi 20–75 μm . [1]

Hlavní předností jsou dobré mechanické vlastnosti výrobku, možnost tisknout ze širokého množství materiálů, rozměrová přesnost, objemová stálost a možnost tisku tenkých stěn (okolo 150 μm). Mezi nevýhody patří vysoká energetická náročnost, protože laser spotřebovává mnoho energie na přímé tavení prášku, a dlouhá doba tisku. Použití této technologie je díky materiálovým možnostem velice široké, uplatnění metoda nachází pro výrobu nástrojů pro tvářecí a lisovací operace, prototypů, hliníkových slitin pro letecký a kosmický průmysl nebo součásti pro biomedicínský průmysl. Zajímavou aplikací je výroba zlatých šperků. [1] [5]

V oblasti procesního průmyslu je technologie SLM používána zejména v oblasti tepelných výměníků, kde je tisknuto z materiálu 316L, pasivních chladičů (měď) a mikrokanálů.

EBM (*Electron Beam Melting*)

Technologie EBM (*Electron Beam Melting*) je založena na tavení kovového prášku elektronovým paprskem. Při procesu je na tiskovou podložku nanesen kovový prášek, který je elektronovým paprskem spojen dohromady, následně je tisková podložka snížena o výšku vrstvy a proces se opakuje. Celý proces probíhá ve vakuu, díky čemuž lze kvalitně tisknout i slitiny titanu a jiné silně reaktivní sloučeniny. Minimální tloušťky vrstvy lze dosáhnout okolo 100 μm . [1]

Výhodou EBM jsou dobré mechanické vlastnosti výsledného výrobku, vysoká přesnost, nízká drsnost povrchu díky tisku ve vakuu a malá nebo skoro žádná nutnost podpor. Vysoká teplota v komoře v kombinaci s nahřátím materiálu a pomalým chladnutím snižuje objemové smrštění a zbytková napětí v součásti. Hlavní nevýhodou je výše zmíněná vakuová komora limitující rozměry tiskového prostoru, bez níž by se výrazně zhoršovaly výsledné vlastnosti součásti a vysoká spotřeba energie na provoz elektronového paprsku. Technologie produkuje nebezpečné γ záření, a proto je nutné vakuovou komoru udržovat a kontrolovat její nepropustnost, což vyžaduje velké množství času před samotným tiskem. [1]

V oblasti procesního průmyslu je technologie EBM využívána v oblasti mikrokanálů a minikanálů.

2.1.3 Keramika

DIW (*Direct Ink Writing*)

Technika DIW (*Direct Ink Writing*) je technika tisku nanášející keramickou kaši vrstvu po vrstvě na předeřátou tiskovou podložku. Kaše se skládá z vody, keramického prášku a organického pojiva, jehož množství by se mělo pohybovat okolo 2 % celkového objemu. Při použití jiných metod keramického tisku (např. LCM) je nutné použít přibližně polovinu objemu organického materiálu, což zapříčiní vzduchové bubliny ve výrobku vzniklé při slinování, které zhoršují jeho mechanické vlastnosti. Slinování probíhá při teplotě 1600 $^{\circ}\text{C}$ s postupným ohřevem 2 $^{\circ}\text{C}$ za minutu, kdy se organické přísady nejlépe rozloží, jinak hrozí popraskání. [2]

Výhodou DIW je rychlost výroby, kdy oproti jiným technologiím tisku keramiky je možné vyrobit díl o rozměrech desítek milimetrů pod 24 hodin. Nevýhodou je nízká přesnost a nutnost udržovat viskozitu kaše v pseudoplastickém režimu blízkému k přechodu do dilatantního, protože po vytlačení materiálu z trysky přechází do dilatantního režimu, což lze ovlivnit teplotou tiskové podložky. [2]

V oblasti procesního průmyslu je technologie DIW využíváno v oblasti tepelných výměníků, kde je tisknuto z Al_2O_3 a SiO_2 , a pro záchyt CO_2 , kde je tisknuto z PPO. Technologie DIW umožňuje tisk plastu nebo kovu.

LCM (*Lithography-based Ceramics Manufacturing*)

Technologie LCM (*Lithography-based Ceramics Manufacturing*) tiskne z kaše složené z keramického prášku (nejčastěji Al_2O_3) a fotovytvrditelné organické matrice. K tisku je zapotřebí zdroj světla s DMD, což je polovodičové hliníkové zrcadlo usměrňující fotony na přesná požadovaná místa dílu, čímž vytvrzují kašovitý materiál na pevnou keramickou strukturu. Tato metoda vychází z metody DLP, kdy je proces vytvrzení totožný. Výrobek se tiskne po vrstvách, kdy se po každé vrstvě posune tisková podložka o výšku jedné vrstvy dolů a stěrač setře přebytečný materiál. Výsledná struktura je kompozit, který vyžaduje slinování a tepelné zpracování pro odstranění pojiva. Výška jedné vrstvy se pohybuje mezi 10—125 μm . [1; 6]

Hlavní výhodou metody je vysoká přesnost a možnost tisknout libovolnou geometrii se zachováním stejných mechanických vlastností jako keramika vyrobená konvenční cestou. Dalším benefitem je vysoká rychlost výroby. Nevýhodou technologie je nutný *postprocessing*, jehož čas se pohybuje okolo 4 dní, velké smrštění, které činí 10—25 %, a nepoužitelnost technologie pro výrobky složené z více materiálů. [1; 6]

V oblasti procesního průmyslu je technologie LCM využívána v oblasti tepelných výměníků za použití Al_2O_3 .

2.2 Přehled materiálů a jejich vlastností

V této části práce jsou uvedeny nejčastěji používané materiály pro 3D tisk. Pro lepší přehlednost jsou opět roztrženy na tři hlavní kategorie (plasty, kovy a slitiny a keramiku). Přehledy materiálových vlastností a výrobních požadavků jsou navíc u jednotlivých materiálů doplněny také o grafická schémata, ze kterých jasně vyplývá přiřazená forma materiálu (prášek, tekutý materiál, pevný materiál např. ve formě filamentu atd.), výrobní metoda (viz kapitola 2.1 Aditivní technologie) a oblast použití.

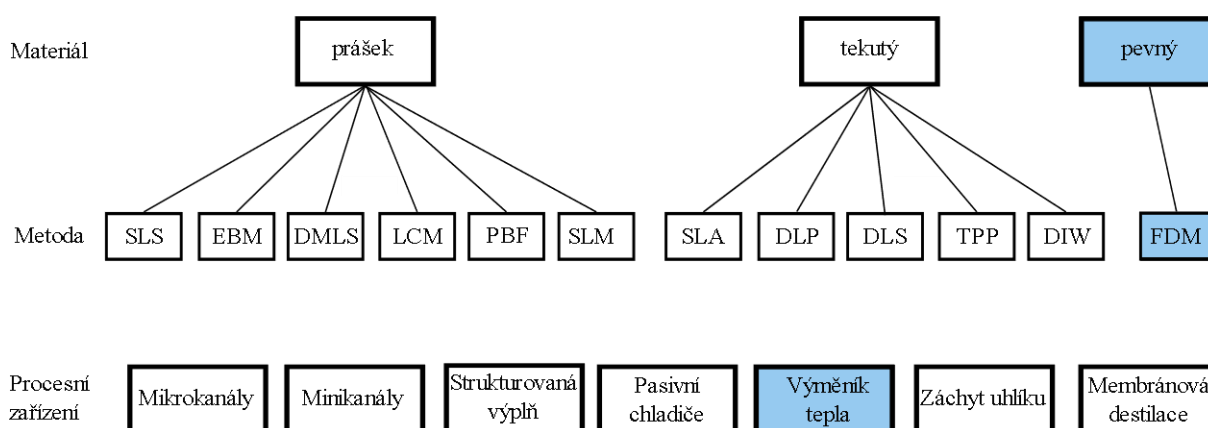
2.2.1 Plasty

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je amorfní termoplastický pevný kopolymer, který vykazuje odolnost proti kyselinám, hydroxidům olejům a tukům. Tiskové teploty se pohybují od 220—275 °C, tepelná odolnost je do 80 °C. Pevný, neporušený materiál je zdravotně nezávadný a odolává teplotním šokům, mez pevnosti v tahu se pohybuje mezi 30—40 MPa. Při tisku ale vzniká silný zápach a potenciálně nebezpečné výpary, které je nutné odvětrávat, materiál je náchylný na dlouhodobé působení slunečních a povětrnostních vlivů a nadměrnému vystavení vlhkosti. [7; 8]

Tiskovou metodou je technologie FDM, často se dle provedené rešerše využívá v procesním průmyslu k prototypování tepelných výměníků.

Obrázek 2.1 popisuje využití materiálu v oblasti procesního průmyslu společně s užívanými technologiemi tisku a konkrétními procesními celky.

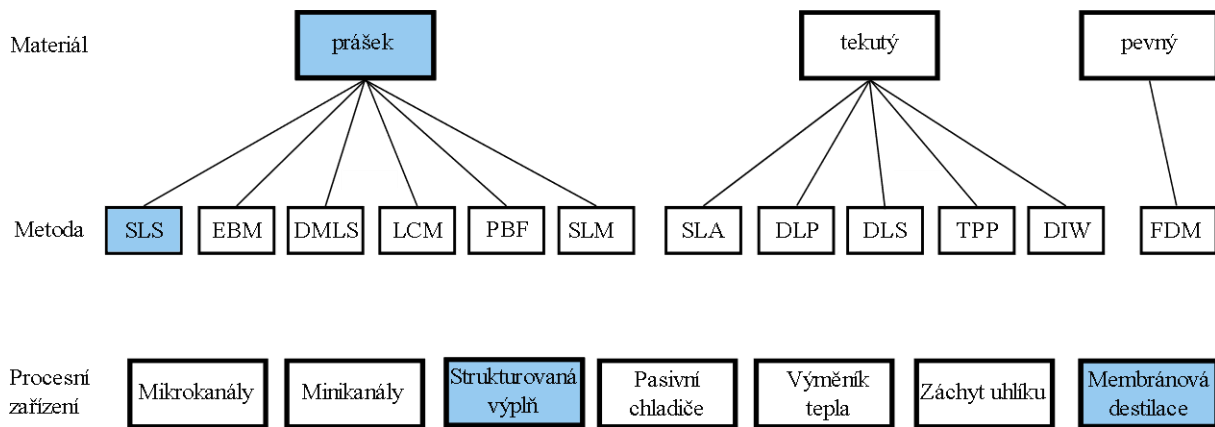


Obrázek 2.1 Schéma využití ABS ve vyšetřovaných oblastech

Polyamid (PA12)

Polyamid (PA12) patří do skupiny polyamidů, které se vyznačují flexibilitou v tenkých vrstvách a pevností a mechanickou odolností v tlustých vrstvách díky silné adhezi mezi vrstvami. Skupina polyamidů je označována jako nylony a tisknou se metodou SLS. Charakteristické jsou jeho hydrofobické vlastnosti, kdy materiál absorbuje vzdušnou vlhkost, a proto musí být skladován s odvlhčovačem a před tiskem dokonale vysušen několikahodinovým procesem při zvýšené teplotě (limit 90 °C). V případě nevysušení při tisku vznikají v materiálu vzduchové kapsy. Tisková teplota PA12 se pohybuje mezi 235—260 °C, teplota podložky okolo 100 °C a teplota tání 175 °C, mez pevnosti ve všech rovinách je 48 MPa. Význačnou pozitivní vlastností materiálu je odolnost proti teplotním šokům, avšak negativem je kroucení při tisku a nebezpečné výpary. [9; 10]

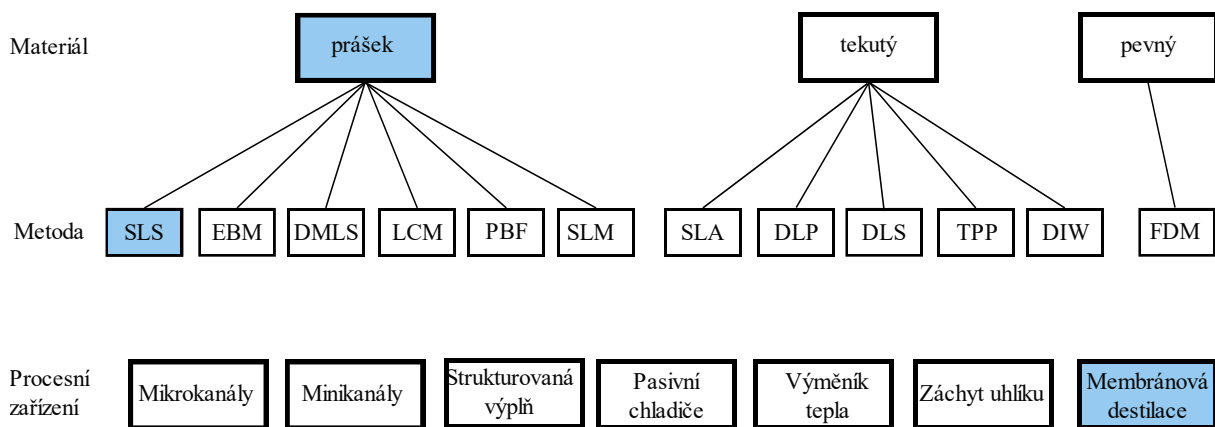
Rešerše odborné literatury ukázala, že v oblasti procesního průmyslu je tento materiál používán v oblasti strukturované výplně a membránové destilace technologií SLS (viz obrázek 2.2).



Obrázek 2.2 Schéma využití PA12 ve vyšetřovaných oblastech

Polyamid (PA2202)

PA2202 patří do skupiny polyamidů, jehož vlastnosti byly zmíněny v kapitole Polyamid (PA12) [11; 12]. Pevnost v tahu je 50 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovými vrstvami, tisková teplota se pohybuje v rozsahu 230—250 °C [11; 12]. PA2202 se tiskne technologií SLS z prášku, v procesním průmyslu v oblasti membránové destilace (viz obrázek 2.3).

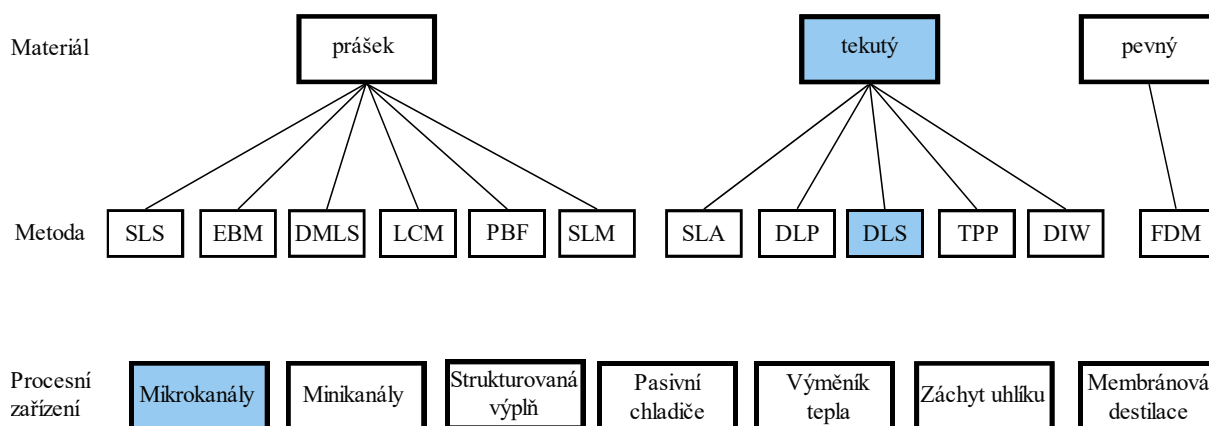


Obrázek 2.3 Schéma využití PA2202 ve vyšetřovaných oblastech

EPX-82

Materiál EPX-82 patří do skupiny polyuretanů, vyznačuje se svou elasticitou, díky níž se z něj dobře tiskne mřížková geometrie. Materiál vykazuje vysokou odolnost proti teple (až do 130 °C) a pevnost v tahu 80 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovou rovinou. Navíc je chemicky odolný zejména proti vlhkosti a kolísání teplot. [13; 14]

Tisknout lze technologií DLS v tekutém stavu, lze ji použít např. pro tisk mikrokanálových tepelných výměníků (viz obrázek 2.4).

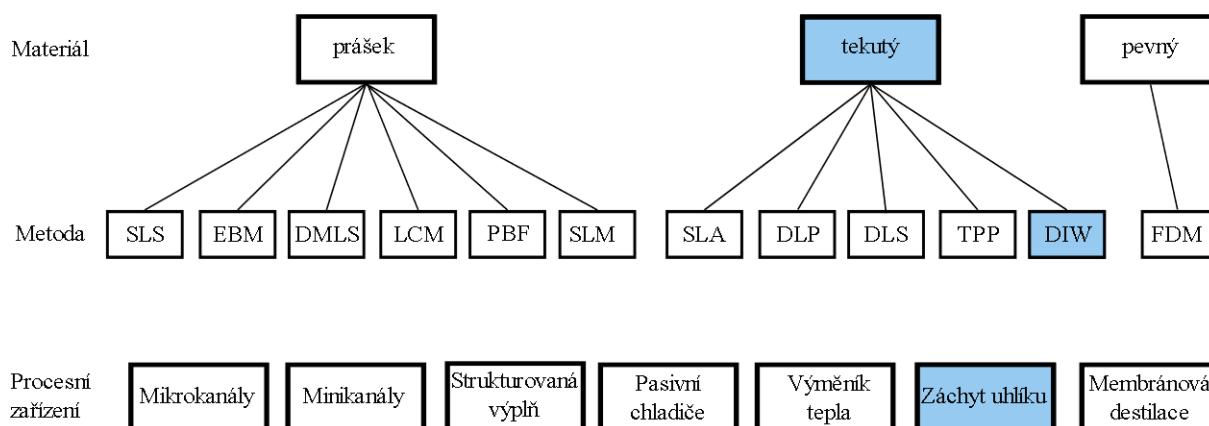


Obrázek 2.4 Schéma využití EPX-82 ve vyšetřovaných oblastech

Poly(2,6-dimethyl-1,4-difenylenoxid) (PPO) polyfenylenoxid

Materiál PPO (poly(2,6-dimethyl-1,4-difenylenoxid) je plast, který vykazuje teplotu tání 268 °C a teplotu skelného přechodu 211 °C, pracovní teplota je od -50 °C do 150 °C. Je rozpustný v toluenu nebo chloroformu a nevyžaduje žádné speciální podmínky na skladování. [15]

Vytisknutý díl z PPO lze použít jako matici pro ostatní látky jako je např. brom, které plní hlavní funkci cílové aplikace, jako je např. záchyt CO₂ nebo palivový článek. Materiál se v oblasti procesního průmyslu dle provedené rešerše tiskne metodou DIW z tekutého roztoku a je dále zpracováván metodou *amine-grafting* nebo hypersíťováním (viz obrázek 2.5).

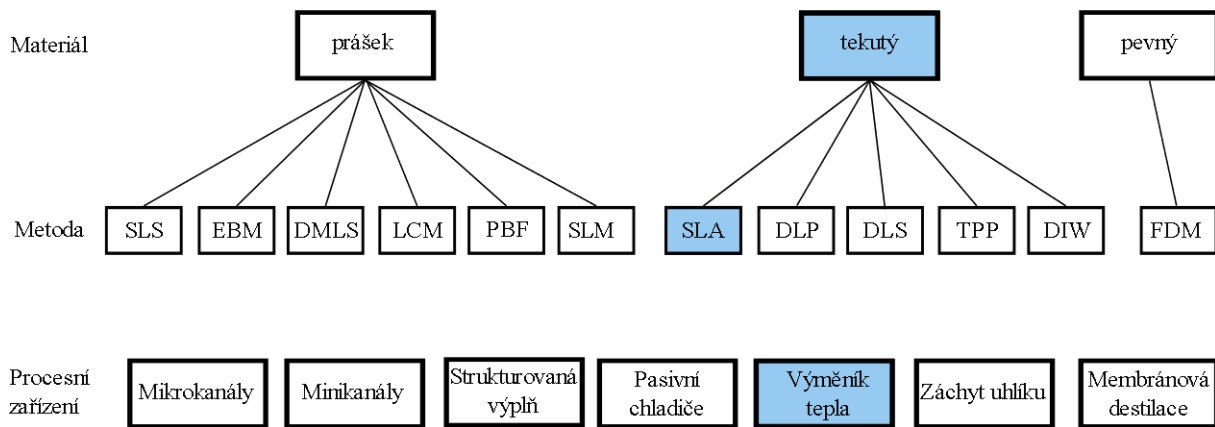


Obrázek 2.5 Schéma využití PPO ve vyšetřovaných oblastech

PlasGRAY V2 (PGV2)

Materiál PlasGRAY V2 vykazuje podobné mechanické vlastnosti jako materiály PP nebo ABS. Je chemicky odolný, lze z něj vyrábět přesné díly s možností povrchových úprav. Minimální tloušťka vrstvy PlasGRAY V2 je 10 µm, pevnost v tahu 51 MPa, pevnost v ohybu 87 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovou rovinou a teplota skelného přechodu 84 °C. [16; 17]

Materiál je možné tisknout technologií SLA v tekutém stavu, dle provedené rešerše jsou oblastí využití v procesním průmyslu především prototypy tepelných výměníků (viz obrázek 2.6).



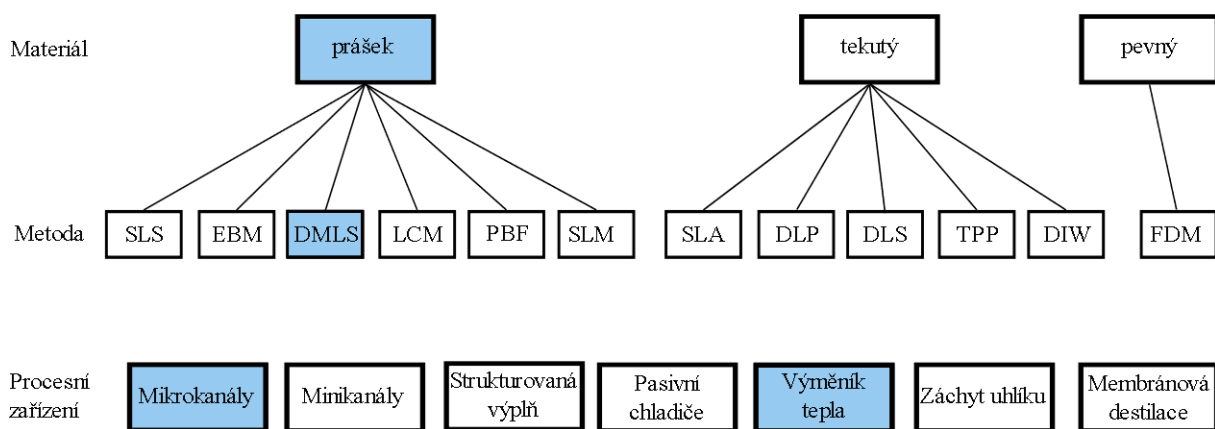
Obrázek 2.6 Schéma využití PGV2 ve vyšetřovaných oblastech

2.2.2 Kovy a slitiny

17-4PH EN 1.4542

Ocel 17-4 PH v evropské normě známá jako EN 1.4542 je nerezová ocel možná tisknout z prášku jakoukoli technologií ze skupiny PBF-L, jejíž mez kluzu je 1050 MPa a pevnost v tahu 1250 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovou rovinou. 17-4 PH vykazuje odolnost proti korozi do 600 °C a vysokou houževnatost do 310 °C. Použití oceli je doporučeno mezi provozními teplotami 50—450 °C. [18; 19]

Jak vyplývá z provedené rešerše, v oblasti procesního průmyslu je možné využít tuto ocel např. pro tisk gyroidních struktur tepelných výměníků a mikrokanálových tepelných výměníků technologií DMLS (viz obrázek 2.7)

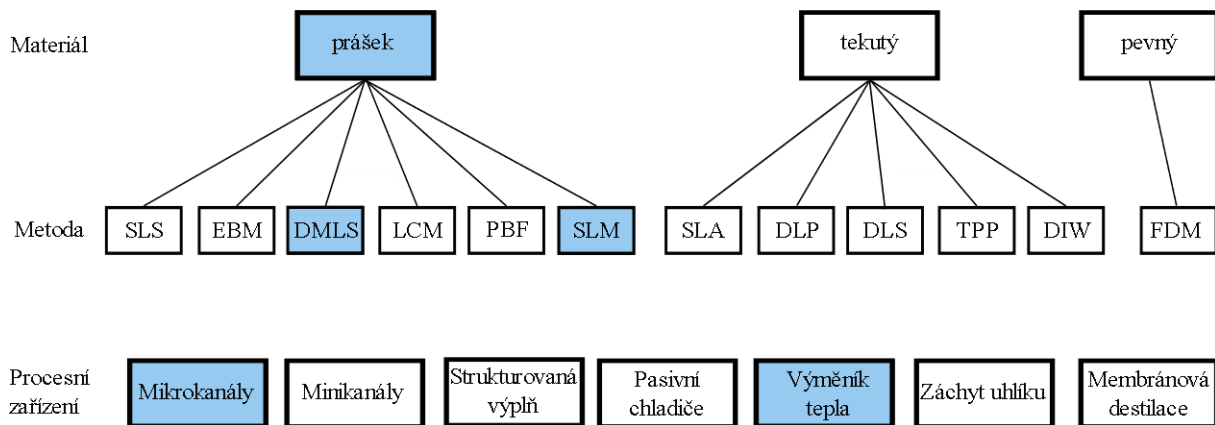


Obrázek 2.7 Schéma využití 17-4PH ve vyšetřovaných oblastech

316L EN 1.4404

Nerezová ocel 316L v evropské normě EN 1.4404 vykazuje silnou odolnost proti korozi díky vysokému obsahu niklu. Ocel lze použít do teplot 550 °C, teplota tání je 1400 °C a pevnost v tahu 640 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovou rovinou. Tisk práškové formy je možný metodou SLM i DMLS a lze za předpokladu ideálního nastavení tiskárny dosáhnout nejvyšší přesnosti kovového tisku, jehož minimální tloušťka se pohybuje mezi 30—40 μm. Nejdůležitější *postprocessingovou* metodou je tepelné zpracování z důvodu odstranění vnitřních napětí. [20; 21]

Z provedené rešerše vyplývá, že v procesním průmyslu je tato ocel využívána na úpravu trubek tepelných výměníků a kompaktních tepelných výměníků (mikrokanálů), tisková metoda je SLM a DMLS (viz obrázek 2.8).

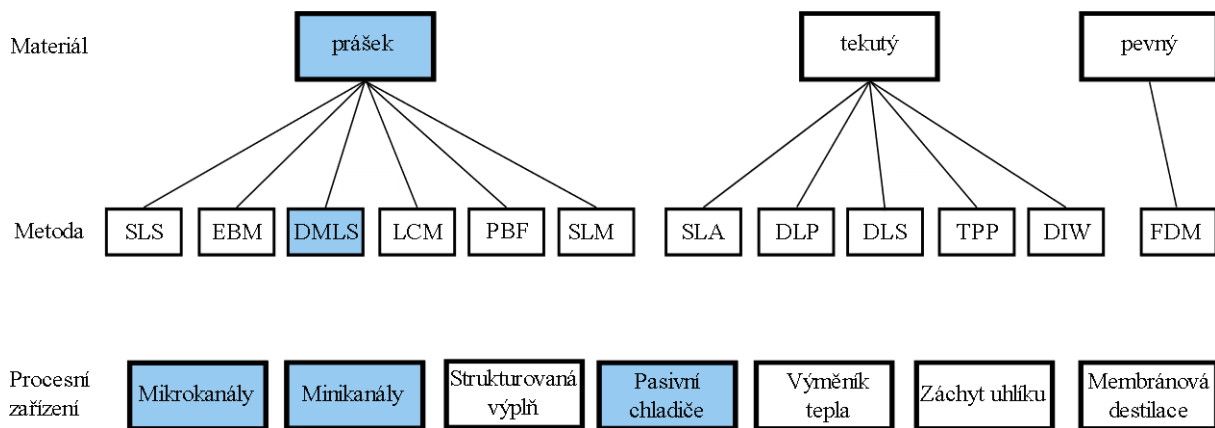


Obrázek 2.8 Schéma využití 316L ve vyšetřovaných oblastech

AlSi₁₀Mg

Materiál AlSi₁₀Mg je slitina, kterou je možné po tisku leštit, brousit, otryskat nebo tepelně opracovat z důvodu snížení vnitřního napětí. Pevnost v tahu se může pohybovat okolo 460 MPa a mez kluzu okolo 245 MPa, avšak v praxi jsou hodnoty po tisku mnohem nižší (pevnost v tahu např. pouze 100 MPa). Teplota tání je 590 °C a provozní teploty slitiny se pohybují v rozmezí 20—100 °C. Stejně jako další hliníkové slitiny i u AlSi₁₀Mg je hlavní předností její nízká hmotnost a dobrá odolnost proti korozi, navíc lze využít její dobrou tepelnou vodivost. [22; 23; 24]

Díky zmíněným vlastnostem je slitina v procesním průmyslu nejčastěji využívána na výrobu mikrokanálových a minikanálových tepelných výměníků a pasivních chladičů metodou DMLS (viz obrázek 2.9)

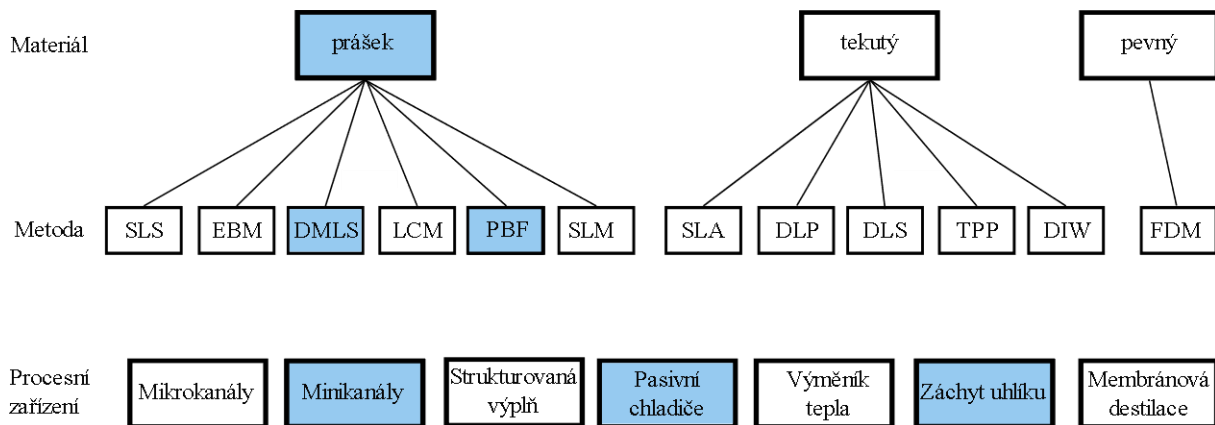


Obrázek 2.9 Schéma využití AlSi₁₀Mg ve vyšetřovaných oblastech

Čistý hliník

V oblasti procesního průmyslu je možné tisknout z téměř čistého hliníku, který vykazuje nízkou hustotu a vysokou tepelnou vodivost. Nevýhodou hliníku jsou jeho špatné mechanické vlastnosti, jako je mez pevnosti v tahu okolo 70 MPa. [25]

V procesním průmyslu je dle získaných informací použit jeho tisk pro pasivní chladiče, minikanálové tepelné výměníky nebo kolony pro záchyt uhlíku. Je možné ho tisknout metodou PBF-L nebo DMLS z prášku s minimální tloušťkou vrstvy 30 μm v závislosti na nastavení tiskárny (viz obrázek 2.10).

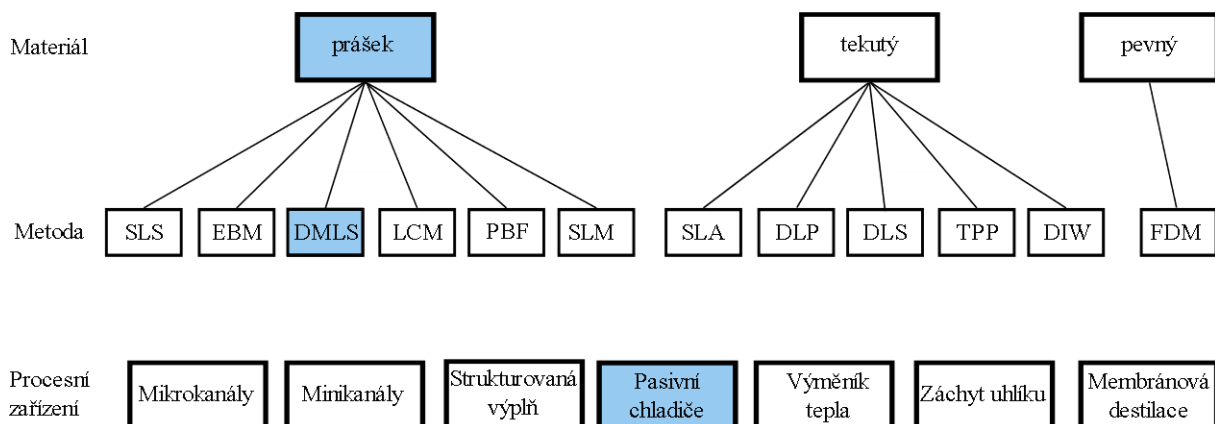


Obrázek 2.10 Schéma využití hliníku ve vyšetřovaných oblastech

MS1 EN 1.2709

Maraging Steel (MS1) pod evropskou značkou EN 1.2709 je nástrojová ocel vhodná pro tisk metodou DMLS z prášku. Ocel vykazuje pevnost v tahu 1100 MPa a mez kluzu 1050 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovou podložkou, je kalitelná až na 54 HRC a je možné zlepšit její mechanické vlastnosti stárnutím. Minimální tloušťky vrstvy je možné dosáhnout 40 μm a ocel je možno dobře svařovat. [26; 27]

V procesním průmyslu dle provedené rešerše byly z tohoto materiálu vyráběny pasivní chladiče metodou DMLS, avšak materiál byl zvolen čistě jako testovací prototyp s cílem pouze prozkoumat možné geometrie chladičů (viz obrázek 2.11).

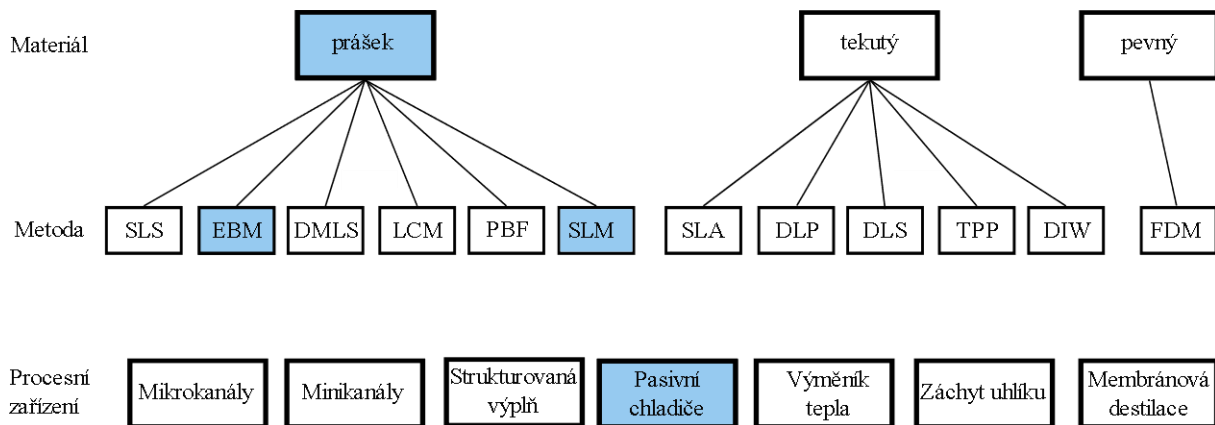


Obrázek 2.11 Schéma využití MS1 ve vyšetřovaných oblastech

Čistá měď

Aditivní výroba čisté mědi byla dlouhou dobu nemožná kvůli vysoké odrazivosti materiálu (paprsky laseru mohly po odrazu poškodit optiku nástroje), efektivitu tisku navíc znesnadňuje i vysoká hodnota tepelné vodivosti čisté mědi. Tepelná vodivost mědi je dvakrát větší než tepelná vodivost slitin hliníku, navíc materiál vykazuje výborné elastické vlastnosti a je antibakteriální. Nevýhodou mědi je její oxidace s typickou nazelenalou barvou, která nastává okamžitě při kontaktu s atmosférou a degraduje materiál. Mez pevnosti v tahu v tiskové rovině je 190 MPa a mez kluzu 140 MPa. [28; 29; 30; 31]

Jak ukázala rešerše literatury, z mědi je možné tisknout pasivní chladiče technologií SLM nebo EBM (viz obrázek 2.12), avšak pro dosažení kvalitních výsledků je potřeba speciální laser a v praxi jsou často upřednostňovány slitiny mědi [32].

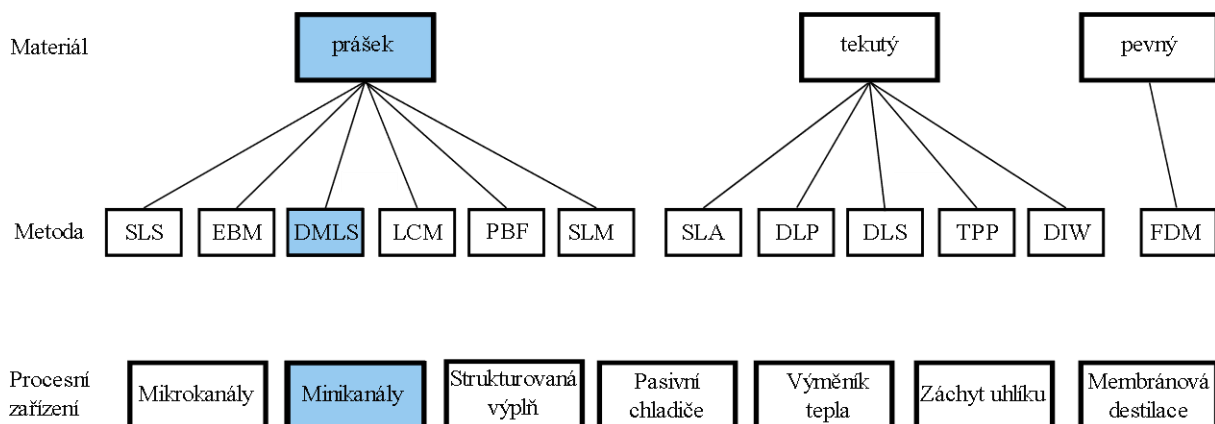


Obrázek 2.12 Schéma využití mědi ve vyšetřovaných oblastech

CoCr MP1

Slitina kobaltu a chromu MP1 se vyznačuje svou tepelnou vodivostí a chemickou odolností. Je možné ji bez změny mechanických vlastností provozovat až do 1000 °C, přičemž mez pevnosti v tahu je 1150 MPa a mez kluzu 880 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovou podložkou. Z důvodu odstranění vnitřního pnutí po procesu tisku je možné ji tepelně zpracovat. [33; 34; 35]

MP1 je možné tisknout metodou DMLS z prášku a minimální tloušťkou vrstvy 20 µm, v oblasti procesního průmyslu je slitina nejčastěji využívána na tisk minikanálových tepelných výměníků (viz obrázek 2.13).

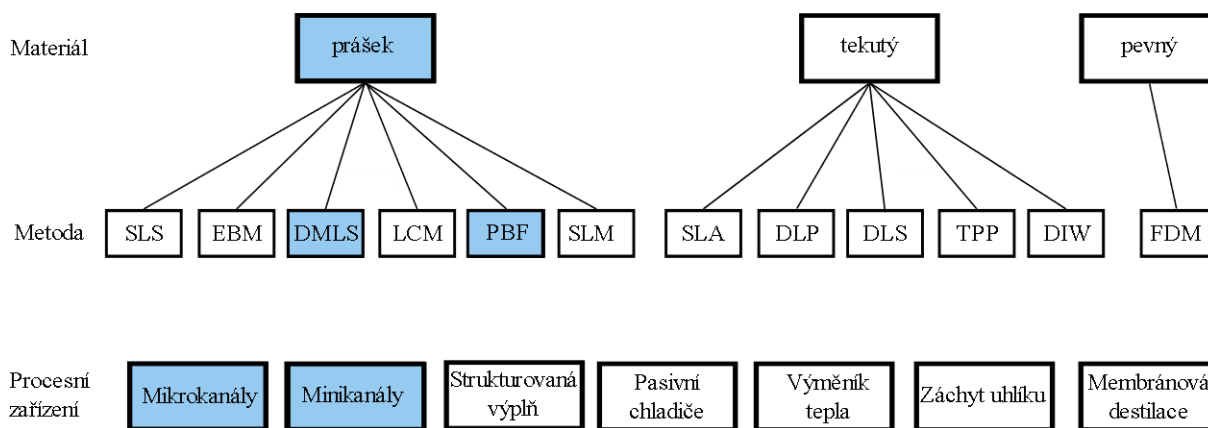


Obrázek 2.13 Schéma využití CoCr ve vyšetřovaných oblastech

Inconel 718 (IN 718) EN 2.4668

Nikl-chromová superslitina Inconel 718 v evropské normě EN 2.4668 vykazuje vysokou chemickou odolnost, její použití díky tepelné odolnosti je do 700 °C. Pevnost v tahu je 940 MPa a mez kluzu 750 MPa v rovině rovnoběžné s tiskovou podložkou. Materiál je možné kalit na tvrdost 300 HV. [36]

Dle získaných poznatků z rešerše jsou v procesním průmyslu ze slitiny tisknuty mikrokanálové a minikanálové tepelné výměníky metodou DMLS nebo PBF, u kterých může být vysoká drsnost díky zvětšení teplosměnné plochy výhodou (viz obrázek 2.14).

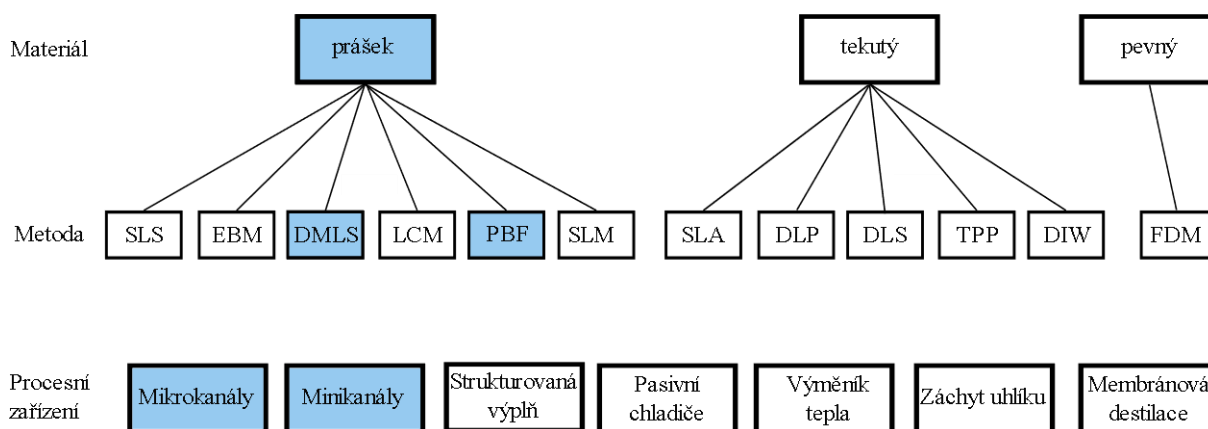


Obrázek 2.14 Schéma využití Inconel 718 ve vyšetřovaných oblastech

Ti-6Al-4V EN 3311

Slitina titanu, hliníku a vanadu Ti-6Al-4V je v evropské normě označována EN 3311, někdy je také nazývána Ti64. Slitina vykazuje pevnost v tahu 980 MPa a mez kluzu 900 MPa. Díky tvorbě zoxidované vrstvy na povrchu při kontaktu s atmosférou je slitina korozivzdorná, její použití je možné i do roztoků slané vody, vlhkého prostředí nebo kyselého prostředí. Ti-6Al-4V taje při teplotě 1600 °C a její použití je možné do teplot okolo 800 °C, protože poté dochází k rekrystalizaci a slitina ztrácí mechanické vlastnosti. Slitina lze z důvodu odstranění vnitřního pnutí tepelně opracovat. [37; 38]

Minimální tloušťka vrstvy je 30 µm a je možná ji tisknout technologií DMLS nebo PBF-L, v oblasti procesního průmyslu je využití Ti64 nejčastěji v oblasti minikanálových a mikrokanálových tepelných výměníků (viz obrázek 2.15).



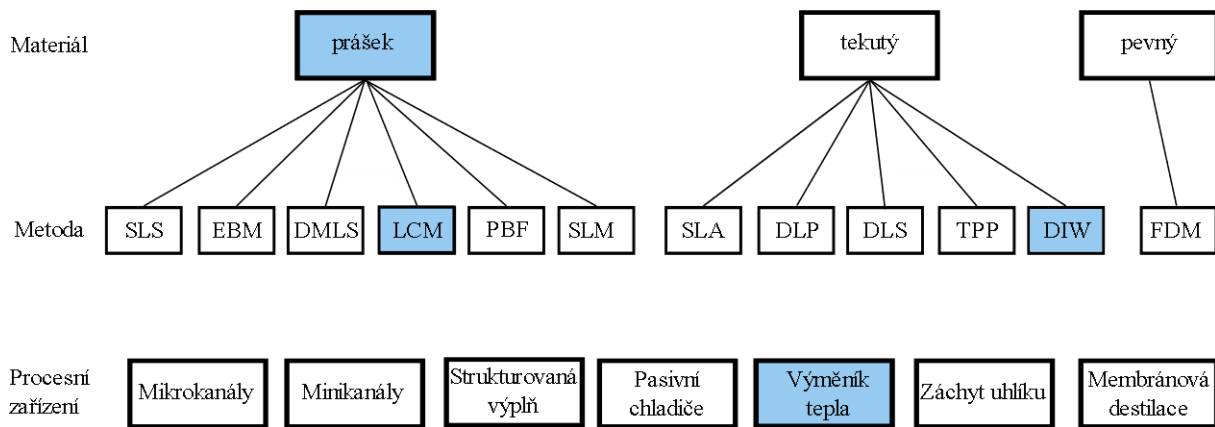
Obrázek 2.15 Schéma využití Ti-6Al-4V ve vyšetřovaných oblastech

2.2.3 Keramika

Oxid hlinitý Al₂O₃

Prášek Al₂O₃ je nejlevnější materiál pro tisk keramiky, díky kterému lze tisknout přesné geometrie (průměrně v řádech stovek µm) s minimální Ra = 0,4 µm. Materiál vykazuje nízkou tepelnou roztažnost, nevede elektrický proud, je chemicky odolný a nevyžaduje speciální požadavky na uskladnění. Al₂O₃ je žáruvzdorný a lze jej použít do 1500 °C při teplotě tání 2072 °C. Další výhodou je jeho tvrdost až 2000 HV a možnost až 99 % hustoty tisku. Slinutý Al₂O₃ je velmi křehký, což tvoří jeho hlavní nevýhodu. [39; 40]

V oblasti procesního průmyslu, dle poznatků získaných rešerší, je materiál využit pro keramické tepelné výměníky tisknuté metodou DIW a LCM (viz obrázek 2.16).

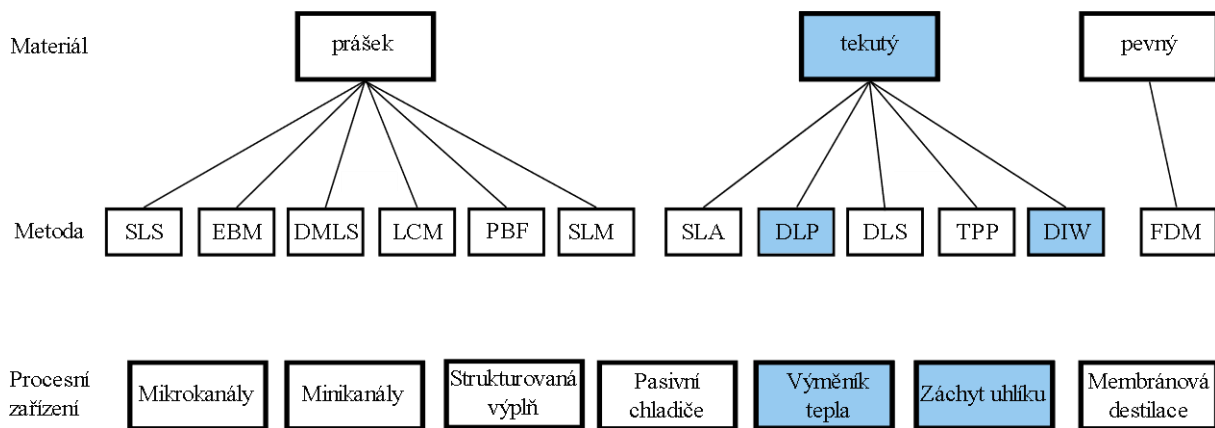


Obrázek 2.16 Schéma využití Al_2O_3 ve vyšetřovaných oblastech

Oxid křemičitý SiO_2

Prášek SiO_2 je materiál pro tisk keramiky, který vykazuje velice vysokou přesnost tisku, kdy se rozlišení pohybuje v jednotkách desítek μm v závislosti na nastavení tiskárny, formě materiálu atp. Materiál je izolant, je chemicky odolný, vykazuje bod tání $1730\text{ }^\circ C$ a oblast použití se pohybuje do $1200\text{ }^\circ C$ tedy potenciální aplikace SiO_2 je nižší než Al_2O_3 . Další výhodou je vysoká tvrdost, ale nízká pevnost. [41; 42]

Jak vyplývá z provedené rešerše, v oblasti procesního průmyslu je materiál používán na tisk keramických tepelných výměníků metodou DIW a na tisk kolon pro záchyt antropogenního uhlíku metodou DLP z kašovitého substrátu (viz obrázek 2.17). Metoda DLP poskytuje vyšší přesnost než DIW, ale je časově a finančně náročnější.



Obrázek 2.17 Schéma využití SiO_2 ve vyšetřovaných oblastech

3 Přenos tepla a hmoty, příklady „dobré praxe“

V této části práce jsou podrobně rozebrány příklady „dobré praxe“ použití 3D tištěných dílů a jsou porovnány s díly vyrobenými konvenčními technologiemi. V rámci každé podkapitoly byla vytvořena tabulka v této práci zmíněných odborných článků, které byly vybrány právě jako reprezentativní příklady problematiky.

3.1 Výměník tepla

Využití aditivních technologií při výrobě komponentů výměníků tepla se postupně rozšiřuje. Důvodem je množství konfigurací, díky kterému se dá experimentovat s vlastnostmi výměníků. Některé díly se tedy výhradně tisknou z důvodu nevyrobitelnosti konvenčními metodami, avšak četné zastoupení použití aditivních technologií u výměníků tepla má i tvorba prototypů. Při použití konvenčních metod výroby testovacích dílů by se celý proces prodražil a časově prodloužil.

Výměník tepla je zařízení, ve kterém je možné předávat teplo proudu tekutiny přes pevnou stěnu druhému proudu. Při návrhu výměníků je využívána rovnice (1) popisující tepelný výkon zařízení. Po výměníku je požadován co největší součinitel prostupu tepla U , co největší plocha S a co největší teplotní spád ΔT . Často není možné nahradit pracovní média, proto bývá výsledný koeficient prostupu tepla zvyšován vhodnou volbou konstrukčního materiálu, geometrií výměníku, případně úpravami vedoucími k vyšší turbulenci pracovních látek nebo náhradou volné konvekce za nucenou. Požadavky na velikost teplosměnné plochy bývají opět řešeny vhodnou volbou typu výměníku (trubka v trubce nebo se svazkem trubek v plášti, deskový výměník a mnoho dalšího), počtem paralelních větví, případně tvarováním teplosměnných ploch (např. umístěním žeber na trubky nebo použití profilovaných desek); naopak teplotní spád bývá limitován požadavky provozovatele a vlastnostmi tekutin, a proto ho často není možné ovlivnit. Patrně nejrozšířenějším typem výměníku je typ trubka v trubce nebo deskové výměníky. Složitější geometrie výměníků, které jsou popsány níže v práci, se v praxi vyskytují méně a často se jedná o experimentální zařízení. Další komentář k problematice aditivně vyrobených výměníků nabízí kapitola 5 Situace v průmyslovém sektoru v České republice. [43]

$$Q = U \cdot S \cdot \Delta T \quad (1)$$

Kde příslušné symboly mají následující význam

Q ...tepelný tok přenášený v mikrokanálovém výměníku tepla [J],

U ...součinitel prostupu tepla [$W/(m^2 \cdot K)$],

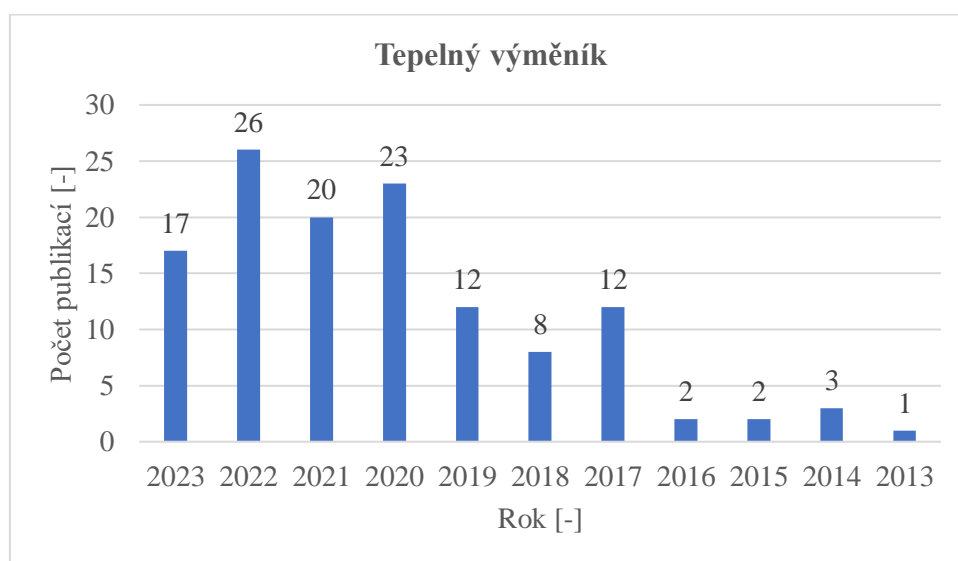
S ...plocha výměníku [m^2],

ΔT ...střední teplotní spád [K].

V kapitole 3.1 Výměník tepla jsou záměrně vynechány pasivní chladiče, mikrokanálové a minikanálové výměníky tepla kvůli jejich velkému zastoupení v oblasti aplikace aditivních technologií. Pro lepší přehlednost jsou tato témata zpracována v samostatných kapitolách 3.2 Pasivní chladiče a 3.3 Minikanály a mikrokanály. Tabulka 3.1 poskytuje přehled rešeršovaných zdrojů v této oblasti problematiky. Obrázek 3.1 prezentuje rostoucí trend zájmu o problematiku 3D tisku tepelných výměníků v rámci odborných publikací. Rok 2023 je zřetelně vykreslen faktem, že je graf zpracován ke dni 15. 4. 2023, avšak z výsledků lze vyvodit, že výsledný počet publikací za rok 2023 výrazně překročí roky předchozí.

Tabulka 3.1 Přehled rešeršovaných zdrojů v oblasti tepelných výměníků

Autor	Rok vydání	Podkapitola	Technologie tisku	Materiál	Reference
Dutkowski a kol.	2022	TPMS struktury	neuveдено	neuveдено	[44]
Peng a kol.	2019	TPMS struktury	DMLS	17-4PH	[45]
Dixit a kol.	2022	TPMS struktury	SLA	PlasGRAY V2	[46]
Wang a kol.	2019	<i>Fractal-tree heat exchangers</i>	SLA	neuveдено	[47]
Zilio a kol.	2022	Úprava teplosměnného povrchu	SLM	316L	[48]
Hansjosten a kol.	2018	Úprava teplosměnného povrchu	SLM	316L	[49]
Wang a kol.	2023	Úprava teplosměnného povrchu	FDM	ABS	[50]
Ahmadi a kol.	2023	Keramika	SLA a DIW	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	[2]
Scheithauer a kol.	2018	Keramika	LCM	Al ₂ O ₃	[51]



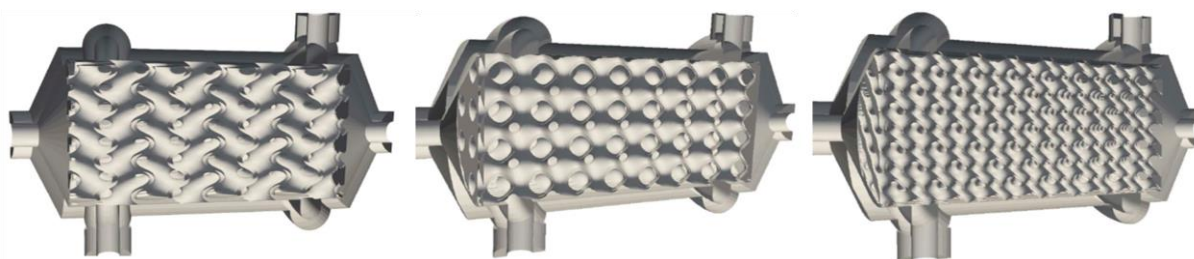
Obrázek 3.1 Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013—2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a „heat exchanger“

3.1.1 TPMS struktury

U tepelných výměníků se často diskutuje o výrobě trojnásobně periodické minimální plochy stěn (*triple periodic minimal surfaces*, TPMS), konkrétně gyroidní struktury. Útvary, ze kterých je tato struktura tvořena se označují jako katenoidy, což jsou nejmenší možné plochy mezi dvěma rovnoběžnými kružnicemi [44]. Struktura je konvenčně prakticky nevyrobitelná. Z výsledků studie skupiny prof. Dutkowského [44] vyplývá, že u výměníků roste Nusseltovo číslo (Nu) o desítky procent, čímž se

zlepšuje i efektivita přenosu tepla, další výhodou je zmenšení velikosti až o 60 % při zachování stejného tepelného výkonu výměníku. Velkou nevýhodou konstrukce je nemožnost automaticky vytvářet tyto struktury v běžných CAD (*computer-aided design*) systémech, které pracují na principu objemového modelování. Existuje však velké množství specializovaných softwarů, díky kterým lze tyto struktury vytvářet a převádět do formátu STL (*Standart Triangle Language*), které podporují běžné CAD systémy [44]. V budoucnosti je velice pravděpodobné, že při využití aditivních technologií bude většina výkonných tepelných výměníků využívat tuto monolitickou strukturu, která díky své jednoduté a samonosné vytištěné struktuře navíc neobsahuje lokální odpory vzniklé lepením nebo svařováním jednotlivých komponent.

Obrázek 3.2 zobrazuje příčné řezy TPMS výměníků ze studie doktora Reynoldse [52], která pojednávala o testování různých druhů TPMS struktur v tepelných výměnících.



Obrázek 3.2 Možnosti geometrie výměníků tepla s TPMS strukturou – upraveno dle [52]

Studie texaské univerzity [45] prokázala, že rychlost tepelného toku při použití TPMS a vstupní rychlosti proudu 20 mm/s je přibližně 7,5-krát efektivnější, než při použití konvenčně vyráběného výměníku. Pro výrobu byla v této studii použita metoda DMLS s tloušťkou vrstvy 40 μm s použitím prášku 17-4PH (EN 1.4542) [45].

Mezi nejmenší testovanou tloušťkou stěn výměníků při použití gyroidní struktury byla autory zkoumána tloušťka 300 μm s materiálem PlasGRAY V2 (fotopolymer) a technologií SLA. Jejich kompaktní „mikrovýměník“ vykazoval 55% zvýšení účinnosti přenosu tepla ve srovnání s termodynamicky ekvivalentním konvenčně vyrobeným výměníkem. Takto malý výměník by se vyráběl konvenčním způsobem jen velice těžko, a proto byly charakteristiky výměníku TPMS přepočítány a porovnány s naměřenými charakteristikami konvenčního výměníku v poměru 1:10. Při testování bylo nutné udržovat nízké průtoky v rozmezí 100—270 ml/min, jinak by byla poškozena stěna výměníku, Reynoldsovo číslo (Re) 10—40 a $U = 120—160 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Celé měření bylo provedeno s velmi vysokou nejistotou 17 %, kdy dle výzkumu měl být důvodem přepočet rozměrů výměníků. [46]

3.1.2 Fractal-tree heat exchangers

Fraktálové stromové výměníky tepla (*fractal-tree heat exchangers*) jsou výměníky svou geometrií inspirované přírodními systémy, které distribuují určitou tekutinu v těle rostlin a živočichů s minimálními ztrátami [47]. Mezi ně můžeme zařadit strukturu větvení cév člověka, větvení žilnatiny na listech rostlin nebo větvení kmenů dřevin. Veškeré tepelné výměníky inspirované touto strukturou jsou projektovány nejenom pro svou vysokou tepelnou účinnost přenosu tepla, ale především pro nízké tlakové ztráty, nicméně jejich užití v praxi je omezeno výrobními postupy konvenčních technologií. Důvodem je složitá geometrie složená ze soustavy trubek pravidelně uspořádaných do stromového obrazce. Ta by šla vyrobit některou z metod přidávání materiálu (svařování), to by ale způsobilo přidání kontaktních odporů a hrozil by vznik nerovnoměrných teplotních dilatací z důvodu různého zahřátí trubek, anebo metodou odlévání, která se zase vyznačuje vyšší nepřesností odlitku vlivem smršťování.

Studie šanghajské skupiny [47] si dala za cíl experimentálně ověřit tepelné vlastnosti stromových výměníků oproti konvenčně vyrobeným aparátům. Srovnány byly dvě konkrétní konfigurace fraktálového stromového výměníku tepla (typ „Y“ viz obrázek 3.3a, typ „H“ viz obrázek 3.3b) a konvenční spirálovitý tepelný výměník (viz obrázek 3.3c). V první fázi byly diskutovány aditivní technologie FDM, SLS a SLA, pro finální porovnání byly všechny tři výměníky vytisknuty metodou SLA, jelikož poskytovala největší přesnost a hladkost povrchu [47]. Navíc tato technologie umožňuje

tisknout průhledné struktury, což bylo pro zkoumání proudění výměníkem důležité. Přesnou výšku vrstev, materiál, šířku trysky, případně další nastavení tiskárny výzkumná skupina nezveřejnila. Jako pracovní látka byla v experimentu použita deionizovaná voda a bylo potvrzeno, že výměník typu „Y“ a „H“ dosahoval v rozsahu $Re = 500\text{—}7000$ lepších vlastností než konvenční spirálový hlavně v oblasti poklesu tlaku a zvýšení přenosu tepla, což bylo dokázáno jak numericky, tak experimentálně [47]. Pokles tlaku při průtoku 100 l/h byl pro konvenční výměník 8 kPa, zatímco pro výměníky typu „H“ a „Y“ pouze 4 kPa [47]. Velkou výhodou kanálu typu „Y“ je nízký koeficient tření, kdy bylo při turbulentním režimu proudění dosaženo hodnot srovnatelných s přímou trubicí, zatímco při laminárním režimu byl třecí koeficient u přímé trubky menší o jeden řád [47]. Výsledek studie dokazuje, že oblast stromových výměníků zasluhuje další zkoumání, a hlavně zařazení do běžného provozu, jelikož technologie 3D tisku kovů je připravena tisknout tyto struktury.



Obrázek 3.3 Schématické zobrazení geometrie fractal-tree heat exchangers, a) typ „Y“, b) typ „H“, c) konvenční

3.1.3 Úprava teplosměnného povrchu

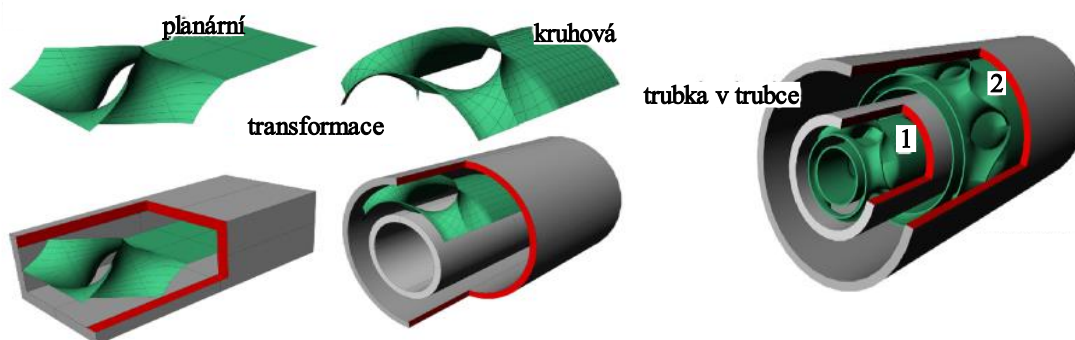
Intenzifikace procesu je inženýrský pojem, který znamená zefektivnění procesu minimálním zásahem [53].

S využitím aditivních technologií v oblasti úpravy povrchu tepelných výměníků je diskutováno pasivní a aktivní zlepšení přenosu tepla, tedy zmíněná intenzifikace procesu přenosu tepla. Nejedná se o změnu celkové geometrie výměníku, ale jen o úpravu vnitřních povrchů trubek nebo změnu podmínek proudění. Aktivním způsobem je např. pulzace toku vačkami nebo elektromagnetickou indukci, díky které se začnou tvořit víry alepší se přenos. Pasivním způsobem je použití složek upravující povrch trubky, např. použitím generátorů víru (GV), zvlnění samotných trubek, změna drsnosti trubek nebo přidání žeber do kanálů výměníku. Je také možné kombinovat pasivní a aktivní metody dohromady. [54]

Kompaktní výměníky tepla jsou výměníky, které kombinují malé zastavěné objemy s velkým tepelným výkonem. Najdeme je v aplikacích, které limituje prostor (automobily, lodě, letectví, kosmický průmysl). Mezi častá řešení pro vysoké tlaky patří i výměník s tištěným okruhem (*printed circuit heat exchanger*, PCHE). Největším problémem konstrukce je výroba jader, které jsou půlkruhové a mají hydraulický průměr (D_h) 0,1—3 mm, lze je tedy považovat za výměníky s minikanály, na jejichž ostrých rozích se iniciují trhliny. Konvenční metody výroby by tento problém řešily některou z metod s přídavným materiálem, jako je např. svařování, které by kvůli přidanému materiálu zhoršilo prostup tepla. Při využití aditivní technologie, konkrétně technologie SLM, se tento problém podařilo vyřešit. Ve studiích můžeme považovat za prozkoumané využití nerezové ocele 316L (SS316L), kdy nejdůležitějším parametrem se ukázala být orientace vrstev tisku. [55; 48]

V rámci studie skupiny *Thermal Fluid Flow group* [48] byly vytištěny dvě konfigurace, první ve směru osy Y, druhá ve směru osy Z. Ve druhé konfiguraci jsou podélné kanály kolmé k rovině tisku, příčné kanály rovnoběžné, což ale nezpůsobilo žádné viditelné zhoršení povrchu. Po několika sériích testování bylo dokázáno, že oba vzorky vydržely požadovaný tlak 700 000 kPa bez netěsností, dalším aspektem bylo obrábění vnějších povrchů a následné žihání pro snížení vnitřních napětí, které snížilo vnitřní napětí o 15 % [48].

Studie Hansjosten a kol. [49] zkoumala použití usměrňovačů toku (*fluid flow guiding elements*, FGE), což jsou vložky na vnitřní povrch trubek tepelných výměníků široké v řádech stovek mikrometrů, které nemají za cíl generovat turbulentní proudění, ale vést tok požadovanou cestou v trubce, díky které lze defacto programovat (místit) tok podle potřebné aplikace. Cílem využití FGE je vytvořit velký teplotní gradient na stěně trubky s co nejmenším dodatečným poklesem tlaku, čehož lze dosáhnout vhodnou strukturou FGE, která je natolik složitá, že jediná možná výrobní volba je aditivní technologie. V této studii byla vložka široká 150 μm vytisknuta metodou SLM s geometrií povrchů volného tvaru (NURBS), materiálem nerezové oceli 316L (EN 1.4404), na tiskárně SLM125 s výškou vrstvy 30 μm bez následného *postprocessingu* při zachování samonosnosti konstrukce [49]. Struktura FGE se skládá z jednotlivých jednotek usměrňovače toku (*fluid flow guiding unit*, FGU), která každá sama o sobě dokáže místit tok, a tak zlepšovat přenos tepla [49]. Jelikož cílovou aplikací byl tepelný výměník trubka v trubce (tedy kanál válcového tvaru), bylo nutné vygenerovat strukturu kruhového průtočného průřezu, která dle studie vykazovala stejné vlastnosti jako tzv. planární struktura pro kanál s obdélníkovým průtočným průřezem (viz obrázek 3.4). Následnými experimenty a porovnáním stejných výměníků bez FGE a s FGE bylo dokázáno, že při průtoku deionizované vody v rozsahu 5–30 kg/h byla výstupní teplota testovaných výměníků rozdílná o 20 K, což znamenalo dosažení dvojnásobného tepelného výkonu výměníků s FGE oproti výměníkům bez FGE [49].

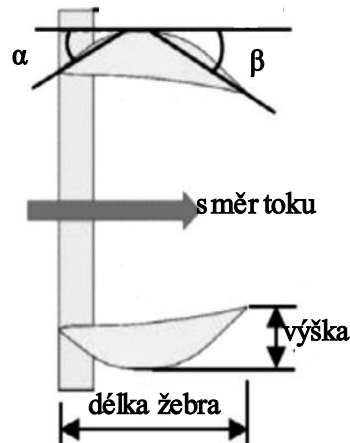


Obrázek 3.4 Schéma převodu planární struktury na kruhovou, výsledný typ výměníku trubka v trubce – upraveno dle [49]

Více je problematika úpravy povrchu výměníků pasivním způsobem diskutována v kapitole 3.3 Minikanály a mikrokanály.

Ve studii Wang a kol. [50] byl zkoumán vliv úhlu natočení žebér hadovitého tepelného výměníku, na jehož výrobu prototypů byl použit 3D tisk, konkrétně technologie FDM a materiál ABS. Do výzkumu byla použita inovativní oddělená zakřivená žebra zvětšující svou teplosměnnou plochu ve směru toku. Díky tomu bylo zjištěno, že žebra indukují proudění na horní i spodní stěnu a urychlují tok v blízkosti stěn a jádra na rozdíl od konvenčních žebér, čímž zvyšují odstředivou sílu v oblasti otáčení proudu. Ve výzkumu je experimentováno s úhlem konvergence (α) a divergence žebér (β), poměrem vzdálenosti a výšky žebér a faktoru tepelného výkonu (*thermal power factor*, TPF), kdy maximální hodnota TPF byla zjištěna pro úhel $\alpha = 35^\circ$ $\beta = 40^\circ$, tyto hodnoty platí pro poměr délky (25 mm) a výšky (7,38 mm) žebér 3,38 [50]. Obrázek 3.5 schematicky znázorňuje zkoumané žebro .

Toto konstrukční řešení by velice snadno šlo vyrobit i konvenčními výrobními metodami, 3D tisk byl využit hlavně pro testování vlastností žebér a rychlé výrobě nových konfigurací (tzv. prototypování).



Obrázek 3.5 Schéma žebra s vyznačenými úhly a směrem toku – upraveno dle [50]

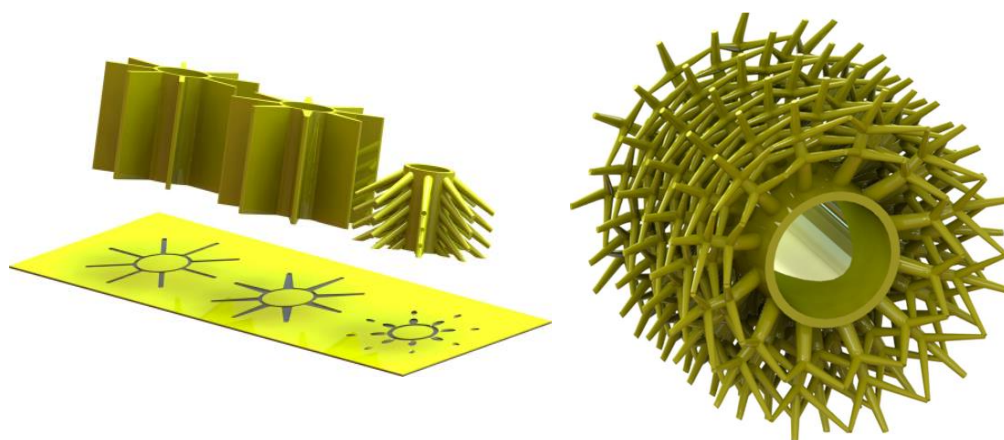
3.1.4 Keramika

Některé aplikace procesního průmyslu (např. chlazení superkritických elektráren) mají zvýšené nároky na tepelnou odolnost materiálu, a proto se využívá keramika, jejíž vlastnosti jsou rozebrány v kapitole 2.2.3 Keramika. Ta se vyznačuje tepelnou stálostí, což lze považovat za žádaný benefit. Mezi jiné výhody patří chemická odolnost.

V superkritických elektrárnách (elektrárny používající k chlazení vodu, která přešla přes kritický bod) bývá často problém výměna tepla při vysokých teplotách. Ty se pohybují okolo 1000 °C, což použití kovových materiálů silně limituje z důvodu nutnosti dostatečného odvodu tepla, bez kterého by mohlo po určité době dojít ke *creepu*, případně vinou velké tepelné roztažnosti ke zničení tepelného výměníku [2]. Pro takovéto výměníky je volena keramika, která má podstatně lepší tepelnou odolnost. Ve studii Ahmadi a kol. [2] byly tisknuty tepelné výměníky právě z keramiky, a proto bylo nutné řešit problémy tisku keramiky zmíněné v kapitole 2.2.3 Keramika. Ve výzkumu byla použita metoda SLA plastu pro porovnávací prototyp a DIW z Al_2O_3 a SiO_2 pro samotný funkční výrobek [2]. Metoda DIW přinesla rychlejší výrobu bez nutnosti podpor, avšak vykazovala vyšší nepřesnosti a horší kvalitu povrchu než SLA. Nevýhodou SLA byla nutnost tisku podpor, tloušťka vrstev obou technologií byla 100 μm , důležitou částí dokončení výroby DIW bylo slinování [2]. Je tedy jasné, že metoda SLA přináší přesnější výsledek, ale bohužel nebude moci použít v cílové aplikaci, protože touto metodou nelze tisknout keramiku. Metoda DIW je oproti SLA méně přesná, ale je časově méně náročná a nevyžaduje podpory. Topologie tisknutých dílů byla inspirována plícemi člověka, tedy tiskem porézní struktury připomínající právě lidské plíce. Takto přesně definovaná porézní struktura napodobující v určitých ohledech lidské plíce je v podstatě konvenčně nevyrobitelná. I při tisku se vědci potýkali s problémem propustnosti stěn keramického výměníku, a tak byla na povrch nanesena zinková vrstva, která navíc zlepšila účinnost výměny tepla o 20 % oproti nepozinkovanému keramickému výměníku [2]. Díky aditivní výrobě pokročilých topologií keramiky je možné zvyšovat účinnost nejen superkritických elektráren, ale i jakýchkoliv vysokoteplotních provozů [2].

Studie Scheithauer a kol. [51] použila technologii výroby keramiky LCM pro výrobu trubek tepelného výměníku z Al_2O_3 s podporami za účelem zvýšení teplosměnné plochy za udržení stejných zástavbových rozměrů. Prvním konstrukčním zlepšením obyčejné trubky bylo přidání komolých žebor na její povrch, čehož by však mohlo být dosaženo konvenčními technologiemi výroby keramiky ve fázi vytvarování (přímé vstřikování, lití, vytlačování), další změna geometrie už zvýhodňovala využití aditivních technologií, konkrétně LCM, kdy jednotlivá žebra byla ještě rozdělena na samostatné útvary [51]. Konvenční výrobní postupy by zahrnovaly dodatečné obrábění keramických žebor při velkém opotřebením nástroje. Posledním zlepšením byla složitá struktura, kterou je možné vyrobit pouze aditivními technologiemi, a jejíž teplosměnná plocha je o 56 % větší než konstrukce s komolými žebry, výška vrstvy byla 25 μm s následným slinováním za teploty 1600 °C po dobu 2 hodin [51]. Po slinování byly na

součástech žebrovitého typu pozorovány trhliny rovnoběžné s tisknutými vrstvami v řádech mikrometrů, zatímco na ostatních strukturách ne, což byla další výhoda výsledné aditivně vyrobené konstrukce. Obrázek 3.6 prezentuje jednotlivé vytištěné struktury.



Obrázek 3.6 Průběh optimalizace topologie keramických výměníků vytištěných technologií LCM, zleva doprava – upraveno dle [51]

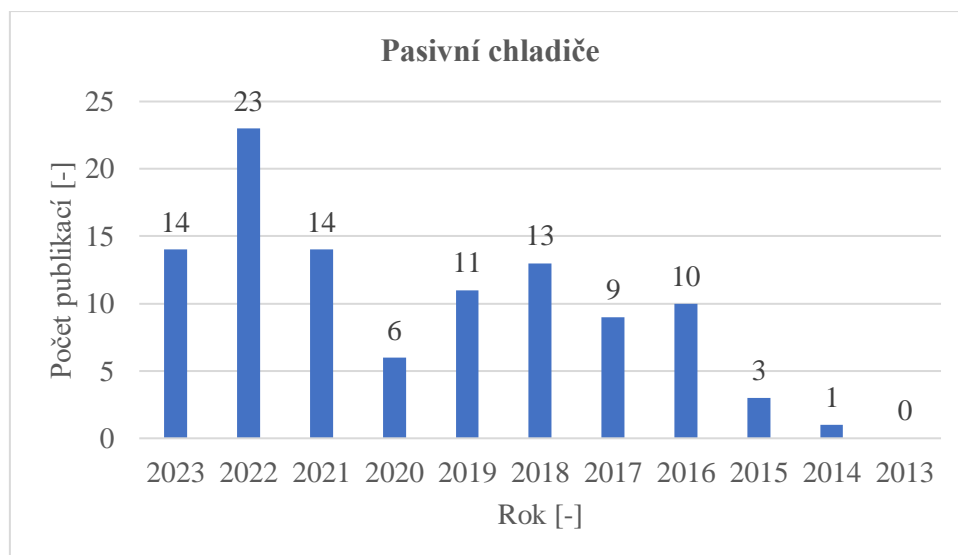
3.2 Pasivní chladiče

Pasivní chladiče jsou výměníky tepla s jednou pracovní látkou, velmi často vzduchem. Výměna tepla probíhá konvekcí díky vhodnému materiálu s velkou tepelnou vodivostí a zvětšenému povrchu chladiče, což přináší řadu omezení. Většina odvětví hledá řešení odvodu tepla s co nejmenšími výslednými rozměry chladičů, a proto se v problematice pasivních chladičů hledají nové způsoby zlepšení přenosu tepla, většinou novou geometrií teplosměnné plochy. S novou geometrií chladičů vznikají výrobní problémy, protože technologie výroby odléváním nepřináší potřebnou přesnost a technologie s přídavnými materiály vnáší do chladičů pasivní odpory, které zhoršují přenos tepla. Vyrábění chladiče metodou úběru materiálu pro diskutované aplikace většinou není možné (mimo jiné je i zde silně limitováno zmíněnou přesností výroby), a proto se velice často přechází k aditivním technologiím.

Hlavním bodem zájmu aditivních technologií v oblasti pasivních chladičů je chlazení elektroniky (tepelný management zařízení), které se potýká s otázkou úspory místa se zachováním minimálně stejného chladičového výkonu. Dalším aspektem je rostoucí výkon zařízení, což podmiňuje použití stále výkonnějších chladičů. Téma minikanálových a mikrokanálových pasivních chladičů je v této práci zpracováno v samostatné kapitole 3.3 Minikanály a mikrokanály. Tabulka 3.2 poskytuje přehled řešených zdrojů v této oblasti problematiky. Obrázek 3.7 ukazuje rostoucí trend zájmu o problematiku 3D tisku pasivních chladičů v rámci odborných publikací. Rok 2023 je zkrácen faktem, že se graf je zpracován ke dni 15. 4. 2023, avšak z počtu publikací pro rok 2023 lze usuzovat, že konečný počet publikací překoná rok 2022.

Tabulka 3.2 Přehled rešeršovaných zdrojů v oblasti pasivních chladičů

Autor	Rok vydání	Podkapitola	Technologie tisku	Materiál	Reference
Fasano a kol.	2016	Optimalizace topologie	DMLS	AlSi ₁₀ Mg	[56]
Bornoff, Parry	2015	Optimalizace topologie	SLS	neuveveno	[57]
Wu a kol.	2017	Optimalizace topologie	neuveveno	hliník	[58]
Irudukunda a kol.	2020	Optimalizace topologie	DMLS	AlSi ₁₀ Mg	[59]
Shamvedi a kol.	2018	Chladiče elektroniky	DMLS	MS1	[60]
Al-Ketan a kol.	2021	Chladiče elektroniky	PBF	hliník	[61]
Constantin a kol.	2020	Chladiče elektroniky	SLM	měď	[31]

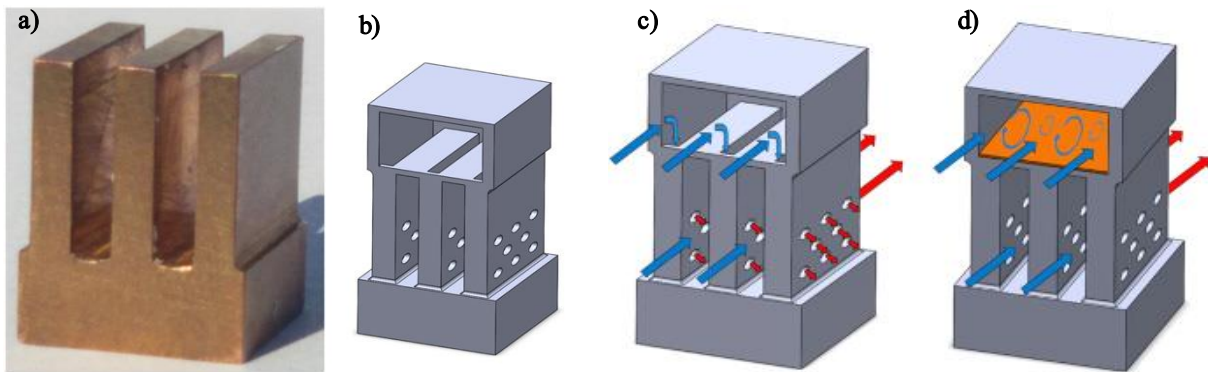


Obrázek 3.7. Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013—2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a „heat sink“

3.2.1 Optimalizace topologie

Optimalizace topologie pasivních chladičů vyrobených aditivními metodami může být založena na úpravě stávající geometrie, na nové softwarově generované geometrii nebo použití materiálu se specifickými vlastnostmi. Všechny tyto úpravy by měly vést ke zvýšení tepelného výkonu chladiče.

Ve studii Fasano a kol. [56] je prezentován pasivní chladič s efektem Pitotovy trubice, který zapříčiní sekundární tok chladičem. V jejich práci byly porovnávány dva chladiče, první konvenčně vyrobený frézováním bez Pitotových trubice a druhý s Pitotovými trubicemi vyrobenými aditivní metodou DMLS z materiálu AlSi₁₀Mg. Obrázek 3.8a a obrázek 3.8b porovnává konvenční chladič a aditivně vyrobený pasivní chladič.

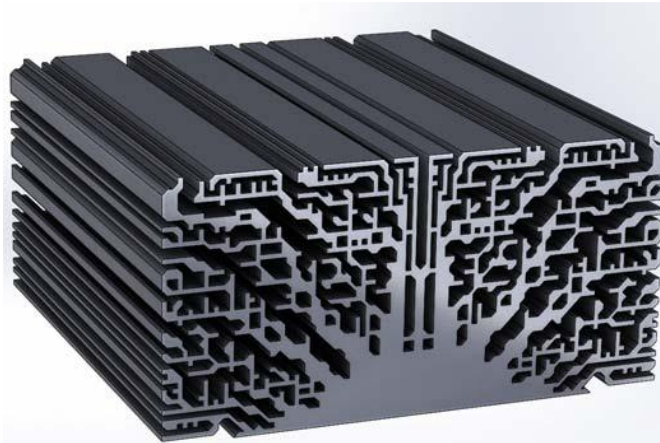


Obrázek 3.8 a) fotografie konvenčního pasivního chladiče, b) aditivně vyrobený pasivní chladič s Pitotovými trubicemi c) model proudění v aditivně vyrobeném pasivním chladiči s Pitotovými trubicemi v testovacím režimu s efektem Pitotových trubic (otevřená varianta), d) model proudění v aditivně vyrobeném pasivním chladiči s Pitotovými trubicemi v testovacím režimu s potlačením efektu Pitotových trubic (uzavřená varianta) – upraveno dle [56]

Oba dva chladiče ze studie Fasano a kol. byly testovány v tunelu s nuceným prouděním, které mělo turbulentní charakter. Toho bylo dosaženo dostatečně dlouhým tunelem, celkem $25D_h$. Rychlost proudícího vzduchu se pohybovala v rozmezí 3—15,5 m/s a v délce 20metrů stěny tunelu byl umístěn konvenční snímač tepelného toku. Chladič s Pitotovými trubicemi byl nejprve testován s potlačením efektu Pitotových trubic (uzavřená varianta, trubice zakryty tenkou měděnou fólií, model proudění viz obrázek 3.8d), aby se dokázal přímý vliv této geometrie na výsledný tepelný výkon. Poté byl testován bez fólie (otevřená varianta, model proudění viz obrázek 3.8c) a následně byl testován konvenční chladič. [56]

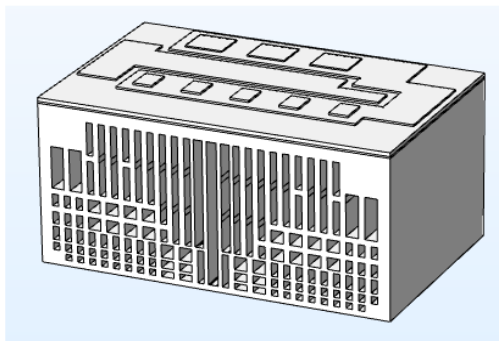
Výsledkem testu studie Fasano a kol. byla závislost tepelné propustnosti (T_r ; jednotka opakem tepelného odporu) na Re , kdy s rostoucím Re rostla i T_r . Otevřený chladič s Pitotovými trubicemi měl v celém rozmezí $Re = 2000—16000$ nejvyšší T_r (průměrný 25% pokles vykazoval chladič v uzavřené konfiguraci, 50% pokles oproti otevřené konfiguraci vykazoval konvenční), což bylo způsobeno sekundárním obtokem okolo žeber chladiče, viz obrázek 3.8c, čímž je intenzifikován přenos tepla konvekcí. Sekundární proud Pitotovými trubicemi navíc proudil kolmo k primárnímu a tím také zvyšoval U . Další dva efekty, které nesouvisely s Pitotovým jevem, ale i přesto byly zodpovědné za 50% nárůst tepelného výkonu chladiče, byly zvýšení teplosměnné plochy z důvodu horní tlakové zátky a vyšší drsnost povrchu způsobená 3D tiskem. [56]

Aditivní výroba v oblasti pasivních chladičů umožňuje nejen využít různorodé geometrie tvořené NURBS plochami, ale také umožňuje vyrobit extrémně členité geometrie, které vznikly coby výsledky evolučních optimalizačních nástrojů. Toho důkazem je studie Bornoff a Parry, která se zaměřila na aplikaci pasivního chladiče s nucenou konvekcí. Pro výrobu tohoto chladiče byla použita metoda tolerance růstu, která přidávala materiál chladiče v předem určeném prostoru jen v případě, že by to vedlo ke zlepšení přenosu tepla o určitou hodnotu (geometrie chladiče viz obrázek 3.9). Ve studii byly použity čtvercové trubice, které tvořily větvenou strukturu, přičemž přidání materiálu mohlo mít pozitivní (zvětšení kontaktní plochy) i negativní efekt (zvýšení povrchového tření z důvodu schodovité struktury čtvercových struktur). Negativní dopady minimalizoval následující krok, při němž byla zohledněna výrobitelnost dílu aditivní technologií (např. zkosení ostrých úhlů, obecně „vyhlazení“ těchto zakřivených struktur). Díky tomuto kroku bylo dosaženo u finálního návrhu snížení tepelného odporu o 1,8 %. Metodou tisku bylo SLS a chladič byl porovnáván s konvenčními řešeními, která byla doporučena jako optimum tradiční parametrickou analýzou. Materiál studií nebyl zveřejněn. [57]



Obrázek 3.9 Geometrie pasivního chladiče vytisknutého pomocí 3D tisku kovů navrhnutého pomocí optimalizace topologie – upraveno dle [57]

Studie Wu a kol. [58] zkoumala využití optimalizace topologie přímo v procesu inspirovanou růstem stromu. Software za pomoci předem definovaných kritérií tolerance růstu přidával větve chladiče v případě, že zlepšily tepelný výkon a nepřesáhly hraniční hodnoty stanovených kritérií, v opačném případě generaci ukončil, což je označováno jako genetický algoritmus (*genetic algorithm*, GA) za použití metody konečných prvků (*Finite Element Analysis*, FEA) [58]. Takto vygenerovaný pasivní chladič byl vytisknut metodou, která studií nebyla zveřejněna, za použití hliníku. Je důležité zmínit, že výsledný pasivní chladič (viz obrázek 3.10) nepůsobí složitým designem jako ten ze studie Robin Bornoff a kol., avšak jeho vyrobiteľnosť konvenčnými technológiami bude opäť veľmi náročná, ne-li nemožná.

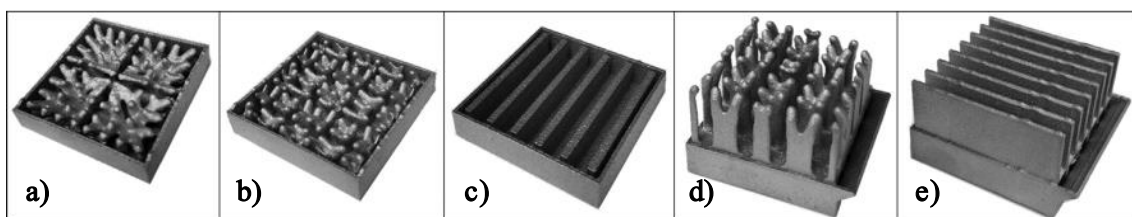


Obrázek 3.10 Schéma pasivního chladiče generovaného pomocí kritérií tolerance růstu – upraveno dle [58]

Dalším příkladem optimalizace topologie je studie Iradukunda a kol. [59], která zkoumala pasivní chladič pro elektronické zařízení využívající médium s fázovou přeměnou (*phase exchange material*, PCM) v požadovaném rozmezí provozních teplot. Hlavní výhodou využití těchto látek je absorpce velkého množství latentního tepla během fázové přeměny, což zároveň podmiňuje jejich aplikaci, neboť je nezbytné zajistit opětovné vychladnutí (a změnu fáze), než bude látka znovu schopna odvádět teplo. Vhodným uplatněním jsou tedy např. procesy s přerušovaným cyklem, kdy je k dispozici dostatečný čas na fázový přechod PCM [59]. Další perspektivou tohoto typu chlazení je jeho použití jako sekundární chlazení, kdy bude možné primární chlazení navrhovat na průměrné hodnoty zátěže a zařízení s fázovou přeměnou bude zapínáno jen při provozních špičkách. Nevýhodou materiálů s fázovou přeměnou je jejich nízká tepelná vodivost, což lze upravovat právě vhodnou geometrií nebo intenzifikačním prvkem (např. kovová pěna) [59].

Ve studii Iradukunda a kol. byly navrženy dva typy chladiče: u prvního typu vyplňoval prostor pouze PCM, proto dominantními mechanismy přenosu tepla byly kondukce a fázová přeměna (viz obrázek

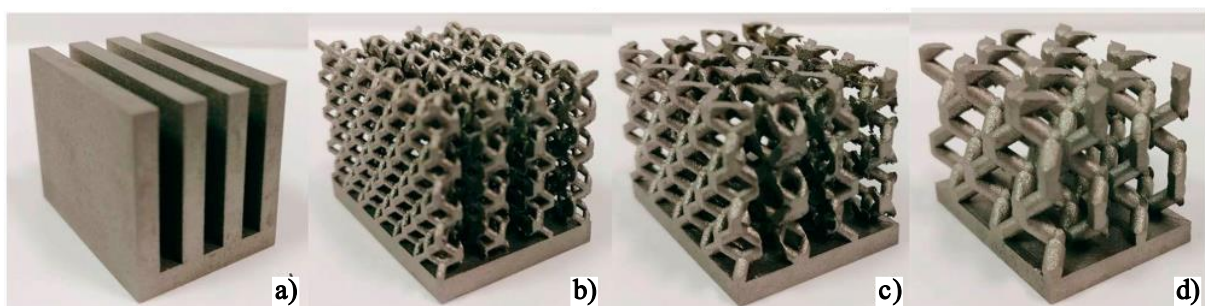
3.11a, obrázek 3.11b), druhý typ hybridní využíval kombinaci konvekce, kondukce a latentního tepla. Objem hybridního chladiče (viz obrázek 3.11d) byl ze 70 % zaplněn PCM a topologicky optimalizovanými žebry a zbylých 30 % z materiálu s vysokou tepelnou vodivostí s topologicky optimalizovanými žebry pro chlazení prouděním. Oba chladiče z důvodu nevyrobitelnosti konvenčními strukturami byly vyrobeny metodou DMLS z materiálu AlSi₁₀Mg. Do experimentu byl zapojen i konvenční chladič s rovnými žebry a PCM (viz obrázek 3.11c) a konvenční chladič bez PCM (viz obrázek 3.11e). Po následném testování bylo zjištěno, že topologicky optimalizovaná žebra vykazují v některých případech stejný tepelný výkon, v některých případech vyšší, než konvenční rovná žebra. Výsledkem studie byl fakt, že hybridní chladič s topologicky optimalizovanou strukturou 3,5-krát prodloužil „pracovní fázi“, tj. čas zvýšení teploty z 50 °C na 100 °C, navíc hybridní chladič zmírnil teplotní špičku. Naopak konvenční chladič z materiálu s fázovou přeměnou vykazoval „pracovní fázi“ jen 3,2-krát vyšší oproti konvenčnímu chladiči z materiálu bez fázové přeměny. Navýšení času nárůstu teploty a zmírnění teplotních špiček zvyšuje spolehlivost regenerace chladiče a zmírňuje degradaci PCM. [59]



Obrázek 3.11 a) topologie PCM první iterace, b) topologie PCM druhá iterace, c) konvenční chladič s rovnými žebry a PCM, d) hybridní chladič e) konvenční chladič bez PCM - upraveno dle [59]

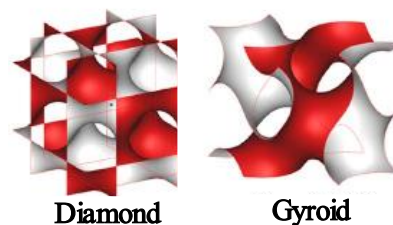
3.2.2 Chladiče elektroniky

Studie Shamvedi a kol. [60] zkoumala 3D tisknuté pasivní chladiče elektroniky technologií DMLS s výškou vrstvy 20 μm z materiálu MS1, který má špatnou tepelnou vodivost. Tento výzkum měl za cíl prozkoumat pouze geometrii chladiče, a proto nebyl použit žádný typický materiál pro výrobu pasivních chladičů s dobrou tepelnou vodivostí, jako je např. měď nebo hliník, jejichž tisk technologie DMLS také umožňuje. Výplň byla použita 30% a jako základní element prutové struktury byla zvolena *rhombohedral dodecahedron* (kosočtvercový dvanáctistěn), s jehož velikostí bylo experimentováno [60]. Byla vytisknuta jedna konvenční geometrie, tj. žebra (viz obrázek 3.12a) a tři velikosti prutové struktury: 5 mm (viz obrázek 3.12b), 7,5 mm (viz obrázek 3.12c) a 12 mm (viz obrázek 3.12d). Výsledky studie ukázaly, že nejlepší tepelný výkon vykazoval konvenční chladič (a), ale čím větší byla velikost struktury, tím více se chladiče výkonem blížily k tomu konvenčnímu, kdy chladič s velikostí struktury 12 mm po 40 min experimentu vykazoval teplotu přibližně 100°C a konvenční chladič 92 °C [60]. Podle autorů studie je důvodem vysoká tlaková ztráta chladičů s prutovými strukturami, kdy se vzduch pohybuje méně volně, z čehož lze usuzovat, že méně husté struktury budou vykazoval lepší odvod tepla, tedy že se konvenčnímu chladiči v testu nejvíce přiblížil chladič (d). Největší výhodou aditivně vyrobených chladičů je výsledné snížení hmotnosti a zvětšení povrchu chladiče. Při stejné hmotnosti by tedy mohlo být dosaženo vyššího výkonu zařízení, nicméně to je podmíněno vhodnou volbou materiálu.



Obrázek 3.12 Fotografie vyrobených pasivních chladičů, a) konvenční, b) velikost mřížky 5 mm, c) velikost mřížky 7,5 mm, d) velikost mřížky 12 mm – upraveno dle [60]

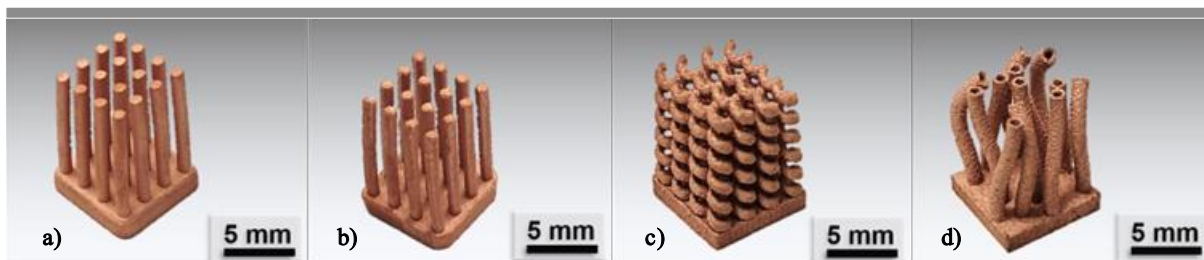
Dalším příkladem využití aditivních technologií pro pasivní chladiče v oblasti elektroniky byla studie Al-Ketan a kol. [61], která využívala strukturu TPMS, konkrétně dvě struktury *Schwarz Diamond* (SD) a *Schwarz Gyroid* (SG) viz obrázek 3.13. V této studii byly vytvořeny modely pasivních chladičů, které byly otestovány pomocí numerického modelování proudění tekutin (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), následně i vyrobeny z hliníku metodou PBF s výškou vrstvy 20 μm . Po vyrobení byly modely naskenovány CT (*Computer Tomography*) s cílem zjistit přesnost výroby dílů. CT snímky odhalily drobné rozměrové odchylky od virtuálního modelu, což bylo přisuzováno hlavně procesu tuhnutí, při němž se přichytávalo více částic prášku, než bylo potřeba. Dalším zdrojem nepřesností byl schodový efekt součástí (vyplývá z technologie výroby), a také pozorované díry na horní straně každé jednotlivé TPMS struktury, což mělo za následek dodatečnou tlakovou ztrátu a pokles tepelného výkonu [61]. Snížení dopadů schodového efektu může být provedeno následným *postprocessingem* (např. brokováním, otryskáním, chemickým *postprocessingem*, tepelným opracováním), což je jedním z možných směrů dalšího zkoumání. Ve studii bylo dokázáno, že TPMS struktura vykazovala největší součin součinitele prostupu tepla a teplosměnné plochy, ale také nejvyšší tlakovou ztrátu kvůli členité struktuře oproti konvenčním řešením pasivního chladiče [61]. Ve srovnání struktur SD a SG vykazovala SD o 32 % větší koeficient přestupu tepla než struktura SG díky více rozvětvené struktuře SD [61].



Obrázek 3.13 Příklad jednotky TPMS struktury *Diamond* a *Gyroid* – upraveno dle [61]

3D tisk čisté mědi, tedy ideálního materiálu z hlediska tepelné vodivosti, se v minulosti z důvodu velké odrazivosti laserových paprsků od materiálu zdál být nemožný. S velkou odrazivostí totiž přichází i velké zatížení samotné optiky laseru, což vedlo k častým opravám, proto byly v minulosti výhradně tisknuty slitiny mědi, které tak vysokou odrazivost nevykazovaly. Nevýhodou slitin mědi je však nutný *postprocessing* tepelným opracováním, aby bylo dosaženo vlastností blízkým čisté mědi. O 3D tisk čisté mědi se pokoušela studie Constantin a kol., která se snažila o výrobu chlazení pro procesor drobné elektroniky, kdy porovnávala konvenčně vyrobený sloupcový pasivní chladič (viz obrázek 3.14a) s aditivně vyrobenými („sloupcový“ viz obrázek 3.14b, „šroubovice“ viz obrázek 3.14c, „ohnuté trubky“ viz obrázek 3.14d). Metodou výroby bylo zvoleno SLM s výškou vrstvy 30 μm , s hustotou výplně 95 % a $R_a = 18 \mu\text{m}$. Studie Loic a kol potvrdila, že nastavení tisku má dominantní vliv na výslednou kvalitu výrobku, kdy nízká depozice energie způsobí vysokou drsnost a pórovitost výrobku. Vysoká depozice energie způsobuje tzv. *balling effect*, což je tvorba kuliček na povrchu výrobku. Dále bylo zjištěno, že vytisknutá měděná struktura vykazovala podobnou tepelnou vodivost (368 W/mK) jako prášková měď (tj. surovina, 385 W/mK). Tepelný výkon všech čtyř chladičů byl porovnán v následném experimentu, ve kterém bylo zjištěno, že tištěný sloupcový chladič má srovnatelný tepelný výkon jako konvenčně vyrobený, zatímco typ „šroubovice“ a typ „ohnuté trubky“ přinesly o 30 % („šroubovice“), resp. o 50 % („ohnuté trubky“) lepší tepelný výkon při teplotě horké části 200 $^{\circ}\text{C}$. Zlepšení bylo přisuzováno zvětšení teplosměnné plochy o 30 %, resp. o 100 % u inovativní geometrie. [31]

Při porovnání výsledků studie bylo dokázáno, že aditivní výroba mědi s vlastnostmi srovnatelnými s konvenčními výrobními metodami přinesla výrazné zlepšení tepelného výkonu pasivních chladičů díky složité, konvenčně nevyrobitelné, geometrii, nicméně tento nárůst nebyl přímo úměrný nárůstu teplosměnné plochy [31].



Obrázek 3.14 Fotografie pasivních chladičů a) sloupcový konvenčně vyrobený, b) sloupcový vytisknutý, c) typ „šroubovice“, d) typ „ohnuté trubky“ – upraveno dle [31]

3.3 Minikanály a mikrokanály

Minikanálové a mikrokanálové výměníky tepla (dále minikanály, resp. mikrokanály) jsou výměníky s jedinou pracovní látkou, lze je tedy považovat za podkategorii pasivních chladičů. Rozhodujícím parametrem pro kategorizaci kanálů je jejich D_h , jejichž dělení poprvé zavedla studie skupiny okolo Kandlikara [62], a jehož dělení se používá i v současné praxi. Všechny kanály s D_h větším než 3 mm jsou považovány za konvenční, s D_h mezi 0,2 mm až 3 mm minikanály a s D_h menším než 0,2 mm [62]. Minikanály a mikrokanály díky většímu poměru teplosměnné plochy k jeho objemu mají větší měrný tepelný výkon než konvenční tepelné výměníky. Mikro a makro výměníky jsou konvenčně vyráběny především metodou mikrofrézování nebo hlubokým reaktivním leptáním [63]. Výroba takovýchto malých rozměrů konvenčními technologiemi s sebou nese velké množství problémů, jako je velké množství netěsností, nepřesností a možnost vyrábět takřka výhradně jen pravidelné obdélníkové tvary kanálů (zakřivené tvary lze vyrábět jen složitě), a proto i sériovou výroby převzaly aditivní technologie [63]. Samozřejmým použitím aditivních technologií v tomto odvětví je prototypování.

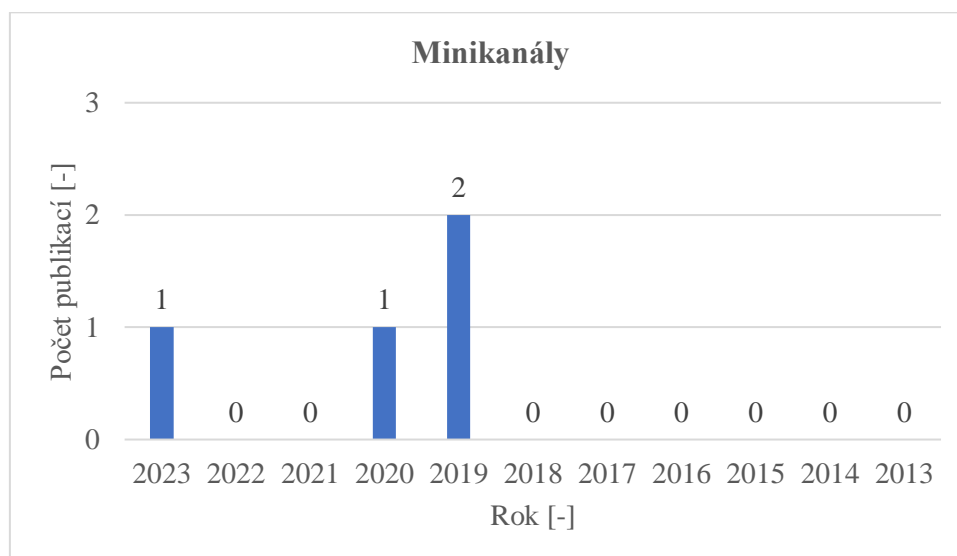
Však i výroba minikanálů a mikrokanálů aditivní cestou s sebou nese také spoustu omezení a nevýhod. Nejzásadnějším z nich je nedostatečná kvalita povrchu výsledného vyrobeného dílu vyžadující *postprocessing* (přestože vyšší drsnosti je však možno pozitivně využít). Mezi nejpoužívanější metody tisku patří DMLS, EBM, PBF a SLM. Tabulka 3.3 poskytuje přehled řešených zdrojů v této oblasti problematiky

Tabulka 3.3 Přehled řešených zdrojů v oblasti minikanálů a mikrokanálů

Autor	Rok vydání	Podkapitola	Technologie tisku	Materiál	Reference
Rastan a kol.	2020	Minikanály	DMLS	AlSi ₁₀ Mg	[64]
Ibrahim a kol.	2019	Minikanály	PBF-L	Ti-6Al-4V	[65]
Stimpson a kol.	2019	Minikanály	DMLS	CoCr (MP1), Inconel 718, hliník	[66]
Kadivar a kol.	2023	Minikanály	PBF	AlSi ₁₀ Mg	[67]
Collins a kol.	2019	Mikrokanály	DMLS	AlSi ₁₀ Mg	[63]
Shen a kol.	2022	Mikrokanály	SLM	neuvedeno	[68]
Rasouli a kol.	2022	Mikrokanály	DLS	EPX-82	[69]
Kirsch, Thole	2017	Mikrokanály	DMLS	Inconel 718	[70]
Kirsch, Thole.	2017	Mikrokanály	PBF-L	Inconel 718	[71]
Arie a kol.	2018	Mikrokanály	DMLS	Ti-6Al-4V, AlSi ₁₀ Mg, 17-4PH	[72]

3.3.1 Minikanály

Obrázek 3.15 ukazuje publikace v oblasti 3D tisku minikanálů v rámci odborných publikací. Rok 2023 je zkrácen faktem, že se graf je zpracován ke dni 15. 4. 2023



Obrázek 3.15 Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013—2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a „minichannel“

Studie Rastan a kol. [64] zkoumala laminární proudění destilované vody v minikanálu obdélníkového průřezu s $Re = 170—1380$ a tepelným tokem 15 kW/m^2 a 30 kW/m^2 . Jejich cílem bylo prozkoumat proveditelnost kovového tisku pro použití minikanálů a zjistit chování minikanálů s a bez generátoru vírů (GV) na vnitřní straně minikanálu. Materiál byl použit $AlSi_{10}Mg$, který se vyznačuje především vysokou tepelnou vodivostí a vysokou odolností proti korozi, metodou tisku byla DMLS kvůli lepší drsnosti povrchu, výměňková jednotka se skládala z dílčích kanálů s $D_h = 2,86 \text{ mm}$ [64]. Nejprve bylo provedeno testování na hladkém kanálu bez GV, následně pak tři různé konfigurace s GV. Čím vyšší bylo Re , tím více se zvyšoval rozdíl Nu mezi kanály s a bez GV hlavně kvůli silnějším podélným vírům. Největší vliv na generaci vírů měla délka GV, kdy nejlepší přenos tepla vykazoval nejdelší GV s délkou 3 mm, a bylo dokázáno, že při $Re = 1380$ je s tímto GV přenos tepla konvekcí více než trojnásobný oproti hladkému kanálu, přičemž bylo dosaženo $Nu = 28$ oproti hladkému s $Nu = 8$ [64]. Z výsledků studie vyplývá, že oproti konvenčně vyráběným minikanálům lze u aditivně vyrobených zařízení snadněji implementovat GV, a tedy snáze dosahovat vyšších tepelných výkonů se zachováním rozměrů minivýměníku, případně se jeví jako jedna z možných cest zmenšení rozměrů výměníku při stejném požadovaném výkonu.

Vícevrstvé oscilační tepelné trubice (*oscillation heat pipes*, OHP) je zařízení skládající se z několika propojených uzavřených zahnutých trubic, které jsou z části naplněny pracovní tekutinou pracující na bázi fázové přeměny [73]. Jejich hlavní výhodou je snadné zmenšení rozměrů a zlepšení přenosu tepla oproti konvenčním výměníkům [73]. Studie Ibrahim a kol. [65] aditivně vyráběla minikanálové trubice ze čtyř vzájemně propojených vrstev s různým příkonem, pracovní látkou (acetón, voda, Novec 7200 a n-pentan) a orientací ohřevu s metodou výroby PBF-L a materiálem Ti-6Al-4V. Důležitým poznatkem pro rozvoj aditivních technologií v tomto odvětví bylo zjištění, že natavený prášek na vnitřní straně trubic, který vznikl vinou konečné přesnosti metody PBF-L, působil pozitivně na čerpání tekutiny v kapilárách a při přenosu tepla, resp. při iniciaci varu během náběhu jednotky OHP [65]. Použití aditivních technologií pro výrobu OHP slibuje také větší svobodu výsledné geometrie.

Vhodným nastavením procesu 3D tisku lze dosahovat různé drsnosti povrchu minikanálů, díky které lze zlepšovat přenos tepla a tedy i celkovou tepelnou účinnost těchto struktur. Drsnost povrchu představuje pasivní způsob intenzifikace přenosu tepla, kdy se obecně díky zvýšení členitosti povrchu

více rozrušuje proudění v mezní vrstvě, proudění se stává více turbulentním, čímž roste i tepelná výměna mezi povrchy. Studie Stimpson a kol. [66] za využití aditivní metody DMLS jako první popsala vliv drsnosti povrchu na přenos tepla v minikanálech. Tiskovým materiálem byl hliník, CoCr a Inconel 718 z důvodu zkoumání komplexní škály materiálů. Do publikované studie byly zahrnuty jen výsledky Nu a koeficientu ztráty třením, přičemž byl uvažován koeficient tření/ D_h větší než 5 %, tedy byly uvažovány povrchy, které by pro svou vysokou drsnost při konvenční výrobě byly vyřazeny a označeny jako zmetky [66]. Studie prokázala vliv D_h a drsnosti povrchu na koeficient ztráty třením pro všechny materiály pro laminární proudění, kdy s klesajícím D_h rostl koeficient ztráty třením kvůli většímu vlivu drsnosti povrchu, zatímco Nu po intenzifikačních úpravách nerostlo s rostoucím koeficientem ztráty třením lineárně (tzv. náhodná závislost) [66]. Studie Kadivar a kol. [67] zkoumala vliv drsnosti povrchu na laminární přenos tepla v minikanálech prostřednictvím CFD. Jako první tato studie nezkoumala jen jediný drsnostní parametr – Ra , ale i výšku, zešikmení a špičatost. Minikanály ve studii byly tisknuty metodou PBF s materiálem AlSi₁₀Mg a bylo dokázáno, že vrcholy povrchu ovlivňují lokální přenos tepla (jeho navýšením) téměř dvakrát více než prohlubně, které způsobují lokální pokles přenosu tepla, naopak tlakové ztráty jsou ovlivněny výstupky a prohlubněmi takřka stejně [67]. Studie od stejné autorské skupiny [74] dokázala, že s rostoucí relativní drsností povrchu při laminárním proudění ve čtvercovém minikanálu se zvyšuje přenos tepla, kdy do hodnoty $Re = 800$ byl pozorován jeho výrazný nárůst, ovšem po překročení hodnoty $Re = 800$ se přenos tepla už téměř nezvyšoval (zkoumán rozsah $Re = 200$ – 1600). Důvodem je dle studie zvětšení teplosměnné plochy a rozrušování proudění drsnostními prvky.

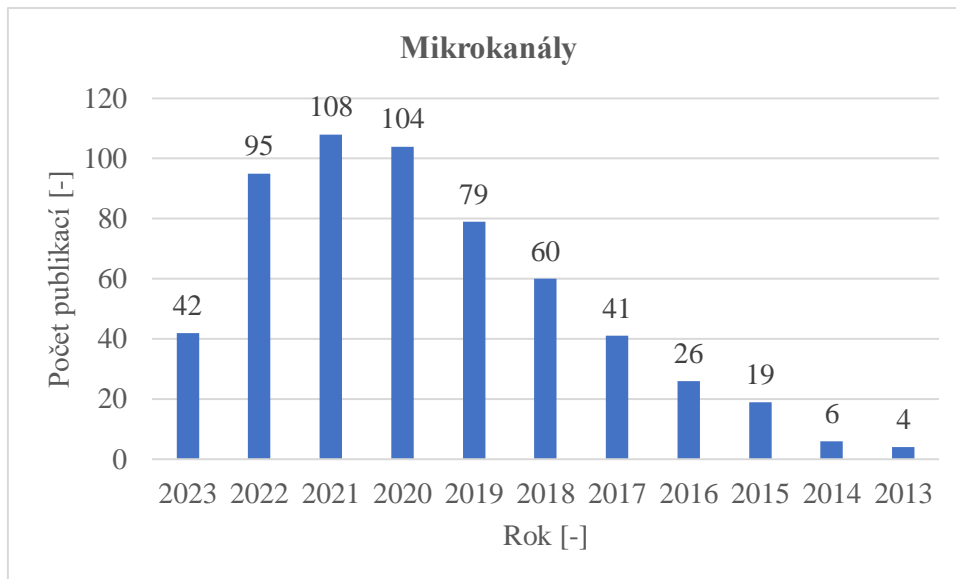
Největší nezodpovězenou otázkou s ohledem na aditivní technologie stále zůstává, jaká konkrétní konfigurace drsností je ta správná pro optimální přenos tepla. Pro minikanály a podobné soustavy s takto malými D_h a zakřivenými geometriemi problémem zůstává samotná úprava drsnosti povrchu, jelikož dostupné *postprocessingové* metody neposkytují dostatečnou možnost regulace drsnosti povrchu. Jisté však je, že čím menší je D_h kanálu, tím více je ovlivněn přenos tepla drsností povrchu [66]. Dále lze tvrdit, že drsnost povrchu dílů zvyšuje tlakovou ztrátu, avšak benefity vyšší drsnosti povrchu převažují negativa zvýšení tlakové ztráty.

3.3.2 Mikrokanály

Jednou z nejdiskutovanějších aplikací mikrokanálů je chlazení drobné elektrotechniky, kde se kvůli rostoucímu výkonu elektroniky začalo upouštět od chlazení vzduchem, protože rostly nároky na výkon chlazení. Chlazení vzduchem bylo nahrazeno chlazením vodou nebo jiným kapalným médiem, díky kterému se podařilo zmenšit rozměry potřebné na udržení požadované teploty elektronických součástek. Kapaliny mají totiž vyšší součinitel přestupu tepla (h), díky kterému se zvyšuje tepelný výkon mikrokanálového výměníku.

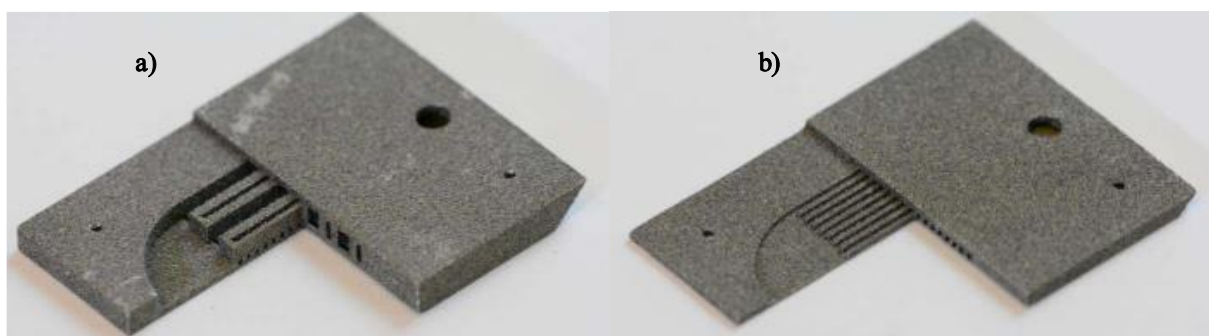
Největším problémem v oblasti mikrokanálů je geometrická nepřesnost výroby, jelikož s klesajícími rozměry roste podíl geometrických nepřesností, které mohou negativně ale i pozitivně ovlivňovat tepelné vlastnosti mikrokanálů.

Obrázek 3.16 prezentuje rostoucí trend zájmu o problematiku 3D tisku mikrokanálů v rámci odborných publikací. Rok 2023 je zkrácen faktem, že graf je zpracován ke dni 15. 4. 2023, avšak z počtu publikací pro rok 2023 lze usuzovat, že konečný počet publikací překoná rok 2022.



Obrázek 3.16 Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013—2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a „microchannel“

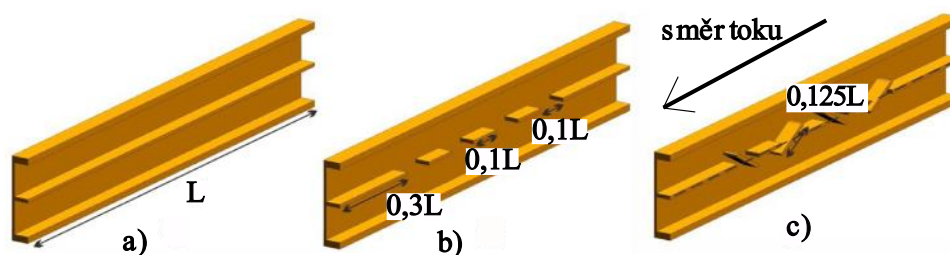
Studie Collins a kol. [63] se zaměřovala na navrhnutí ideální geometrie chladiče aditivní technologií DMLS s $D_h = 500 \mu\text{m}$ a vyřešení tlakové ztráty v mikrokanálech. Tlaková ztráta byla vyřešena rozdělením mikrokanálů (viz obrázek 3.17a) prostřednictvím několika sekundárních distributorů, díky kterým se zpomalí tok a zároveň se zvýší U . Pro porovnání a experimenty byl vytisknut i stejný chladič bez použití rozdělených mikrokanálů (viz obrázek 3.17b), jehož struktura je konvenčně vyrobitelná. Pro technologii DMLS byl použit materiál AlSi₁₀Mg bez následného *postprocessingu* (kromě odstranění podpor) [63]. Zajímavým změřeným poznatkem byla vysoká $R_a = 20 \mu\text{m}$, nezvykle vysoká pro technologii DMLS, což bylo způsobeno malými rozměry tisknutých kanálů, na které se nejvíce projevila nepřesnost tisku [63]. Ze dříve zmíněného z kapitoly 3.3.1 Minikanály vyplývá, že čím větší je drsnost povrchu, tím lepší je přenos tepla, což potvrdily i výsledky testování mikrokanálů [63]. Další výhodou byl poměrně rychlý přechod na turbulentní režim proudění už při $Re = 800$, při němž byl přenos tepla intenzivnější. Tohoto brzkého přechodu na turbulentní režim ale bylo dosaženo i pro konfiguraci bez sekundárních distributorů. Výhodou rozdělených mikrokanálů byla tlaková ztráta při některých Re nižší až o 90 % ($Re = 210$) oproti konvenčnímu chladiči, v celém testovaném rozsahu byla tlaková ztráta nižší (přibližně 40 % pro $Re = 1175$) [63].



Obrázek 3.17 Mikrokanálové pasivní chladiče: a) topologie s rozdělenými kanály, b) topologie s přímými kanály – upraveno dle [63]

Dvouvrstvé kapalinové chladiče s mikrokanály v oblasti elektroniky byly poprvé zkoumány ve studii Vafai a kol. [75], kdy se podařilo dokázat zlepšený chladicí výkon oproti jednovrstvým chladicím zařízením. Postupem času a s dalšími studiemi ale bylo zjištěno několik problémů spojených

s dvouvrstvou strukturou, hlavně nižší chladicí kapacita (průtok násoben rozdílem teplot) v horní vrstvě. Studie Shen a kol. [68] řešila tento problém technologií 3D tisku, kdy vytvářela mezi vrstvami propojovací kanály-deflektory (*deflectors*), díky kterým lze mísit proudící kapalinu a zlepšovat přenos tepla. 3D tiskem, konkrétně metodou SLM, ta byla ve studii použita kvůli požadavkům na rychlé testování více konfigurací a konvenční nevyrobitelnosti chladiče. Celkově byly testovány tři konfigurace, kdy první testovací byla bez deflektorů (viz obrázek 3.18a), druhá s geometricky definovanými mezerami (viz obrázek 3.18b) a třetí se nakloněnými deflektory zasahujícími do toku obou kanálů (obrázek 3.18c). Výsledek studie ukázal, že konfigurace (c) přinesla v některých místech až o 7 K nižší maximální teplotu než konfigurace (a), avšak vzrostla tlaková ztráta o 74,72 %, průměrné Nu je navíc o 20 % vyšší [68]. Konfigurace (b) byla ve všech aspektech srovnatelná s konfigurací „a“ [68].



Obrázek 3.18 Přehled konfigurací mikrokanálů a) bez deflektorů b) s definovanými mezerami c) s nakloněnými deflektory zasahujícími do toku obou kanálů – upraveno dle [68]

Spotřeba elektrické energie klimatizací na světě činí asi 6 % celkové spotřeby [69]. Studie Rasouli a kol. [69] zkoumala využití mikrokanálů v protiproudém tepelném výměníku voda-vzduch klimatizací konfigurace MPHX (*micro-pin heat exchanger*), které oproti tradiční koncepci FTHX (*finned tube heat exchanger*) vykazovaly lepší tepelný výkon o 55 % při jinak stejných stěžejních parametrech výměníku: objemu, poklesu tlaku, průtoku i vstupních teplotách. Konstrukce MPHX byla rozdílná v tom, že využívala samostatné kanály pro proudění vzduchu prostrídáné s kanály pro proudění kapaliny, zatímco konvenční konfigurace FTHX používala pro dělení proudu vzduchu pouze žebra. Výroba těchto soustav několika MPHX desek za sebou vyžadovala využití aditivních technologií, konkrétně DLS s nezveřejněnou tlušťkou vrstvy. Materiálem byla zvolena epoxidová pryskyřice EPX-82, která dokáže při zachování mechanických vlastností odolat teplotě 120 °C, což je pro klimatizace dostačující [69].

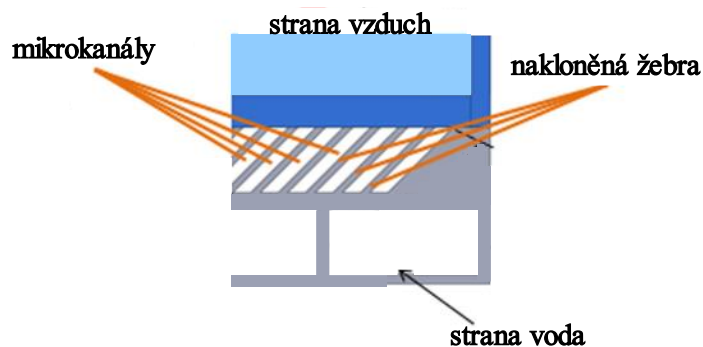
Velkým tématem v oblasti mikrokanálových pasivních chladičů je také otázka odvodu tepla ze spalovacích a plynových turbín. Studie Kirsch, Thole [70] zkoumala vliv různé vlnitých mikrokanálů na přenos tepla a tlakové ztráty u chladicích kanálů plynových turbín. Díky aditivní výrobě lze lehce vyrobit struktury se zvlněním povrchu, které zvýší kontaktní povrch, a tím zlepši tepelnou výměnu. Tisková technologie byla DMLS, materiál Inconel 718 a tlušťka vrstvy 40 μm , kdy byly pro účely studie vytisknuty tři různé konfigurace složené z prvků s vlnovou délkou: (a) 0,1 násobek délky součásti, (b) 0,2 násobek délky a následně (c) 0,4 násobek délky součásti, kdy vlnová délka byla uvažována jako periodicky se opakující geometrie zakřivení [70]. Největším problémem bylo určení drsnosti povrchu z důvodu různého natočení jednotlivých částí při tisku složité geometrie, což bylo nakonec vyřešeno pomocí CT. Pro porovnání součástí a vyhodnocení výsledků byl metodou DMLS vyroben i kontrolní rovný mikrokanálový pasivní chladič z hliníku, který lze vyrábět i konvenčními metodami. Pro rozsah $Re = 1000\text{—}11000$ byl ve studii zjištěn 8—10 krát větší koeficient tření pro konfiguraci (a) 0,1 násobek délky než pro ostatní konfigurace, což bylo způsobeno vlivem nízké hybnosti tekutiny za vrcholky a prohlubněmi vln, které byly nejčastěji právě u této konfigurace [70]. Při nižších hodnotách Re vlnité kanály zlepšovaly přenos tepla (Nu) oproti rovnému kanálu až o 50 %, zatímco pro $Re = 10000$ už byly výsledky prakticky totožné [70].

Ve studii stejného kolektivu autorů [71] za použití metody PBF-L a materiálu Inconel 718, tlušťkou vrstvy 40 μm a s D_h čtvercového kanálu 1,9 mm pro každé žebro, byl zkoumán vliv drsnosti povrchu žebor v chladicí mikrokanálové soustavě plynové turbíny. Žebra, tedy výstupky na ploše kanálu, měla válcový tvar o průměru 1 mm, tlušťku stěny 0,25 mm s plnou výplní a byla testována v rozsahu $Re = 500\text{—}25000$ [71]. I zde aditivně vyrobená žebra mikrokanálů vykazovala mnohem větší drsnost

povrchu, přičemž pozorovaná drsnost povrchu jednotlivých žebor rostla s jejich počtem na jednotku plochy, to bylo způsobeno větším teplotním ovlivním sousedních žebor při tisku [71]. Testování proběhlo na 4 konfiguracích s různým procentuálním navýšením zastoupení kolíků v mikrokanálu (50%, 43%, 58%, 85% navíc vůči ploše kanálu) [71]. Studie zjistila, že soustava s menším počtem žebor na jednotku plochy vykazovala podobný přenos tepla jako soustava s počtem žebor na jednotku plochy šestkrát větší, tzn. tímto krokem lze dospět ke snížení hmotnosti, ale k uchování stejného tepelného výkonu, který je násobně větší než u mikrokanálu bez žebor.

Tepelné elektrárny po celém světě používají z velké většiny ke chlazení vodu, kterou je nutné do komplexu složitě dodávat, anebo stavět elektrárny v blízkosti vodních zdrojů. Dalším problémem je práce se slanou vodou, které je oproti sladké vodě sice dostatek, ale její agresivní složení přináší komplikaci do konstrukce chladících systémů, zvláště kvůli chemickému působení na konstrukce.

Studie Arie a kol. se věnovala zdokonalení suchého chlazení elektráren, tedy výrobě tepelného výměníku (pasivního chladiče) voda-vzduch vyrobeného aditivní technologií, díky kterému lze potřebu vody pro chlazení minimalizovat jen na vnitřní okruh elektrárny. Studie se věnovala zmenšenému modelu, který není možné použít v praxi, protože požadované použití vyžaduje větší rozměry výrobku, než jsou současné maximální možné tisknutelné rozměry i v těch největších 3D tiskárnách. Důvodem využití aditivních technologií v této studii je fakt, že byl zvolen rozdělovací mikrokanál (*manifold microchannel*) s rozměry v řádech desítek μm , který díky tomuto procesu výroby lze vyrábět jako jeden kus a není potřeba následná montáž žebor a potrubí jako při výrobě konvenční cestou, což ostatně velmi omezovalo jeho využití v technické praxi. Dalším problémem byly vzniklé tepelné odpory kvůli přidanému spojovacímu materiálu. Výrobní technologií v této studii byla zvolena DMLS, kterou byly vyrobeny tři testovací prototypy z 17-4PH, $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ a Ti-6Al-4V s tloušťkou žebra 0,27 mm a šířkou mikrokanálu 0,15 mm. Samotné mikrokanály byla natočeny o 45° , aby se dosáhlo lepšího tepelného výkonu (viz obrázek 3.19). Z výsledků experimentálního a ověřovacího výpočetního modelu vyplynulo, že pro vzduch o $\text{Re} = 30\text{--}100$ jsou výsledky všech tří materiálů stejné, zatímco pro rostoucí Re vzduchu až do poslední zjišťované hodnoty $\text{Re} = 400$ má výrazně nejlepší výsledky výměník z hliníkové slitiny pro konstantní celkový průtok vody 0,1 l/s. Zjišťované veličiny v oblasti výkonu přenosu tepla byly rychlost tepelného toku výměníkem, koeficient prostupu tepla, koeficient přenosu tepla vzduchu a tepelná vodivost vzduchu. I při nastavení experimentu, kdy se udržoval konstantní průtok vzduchu a měnilo se Re proudění vody byl jako nejlepší vyhodnocen výměník z hliníkové slitiny. Dále byly provedeny testy s poklesem tlaku se stejným výsledkem jako testy na přenos tepla. Nejdůležitější pro tuto práci byl ale test konvenčních suchých chladících zařízení za stejných podmínek jako těch aditivně vyrobených. Bylo zjištěno, že aditivně vyrobené mikrokanálové výměníky mají lepší tepelné vlastnosti než konvenční suché výměníky, bohužel jsou omezeny velkou výrobní nepřesností (hliníkový až o 36 %). Nejpřesněji byl vyroben titanový mikrokanál, a proto vykazoval až o 27 % vyšší hustotu tepelného toku než konvenčně vyrobené soustavy s vlnitými žebry nebo hladkými žebry. [72]



Obrázek 3.19 Nákres konfigurace mikrokanálového výměníku tepla pro chlazení elektrárny – upraveno dle [72]

3.4 Membránová destilace

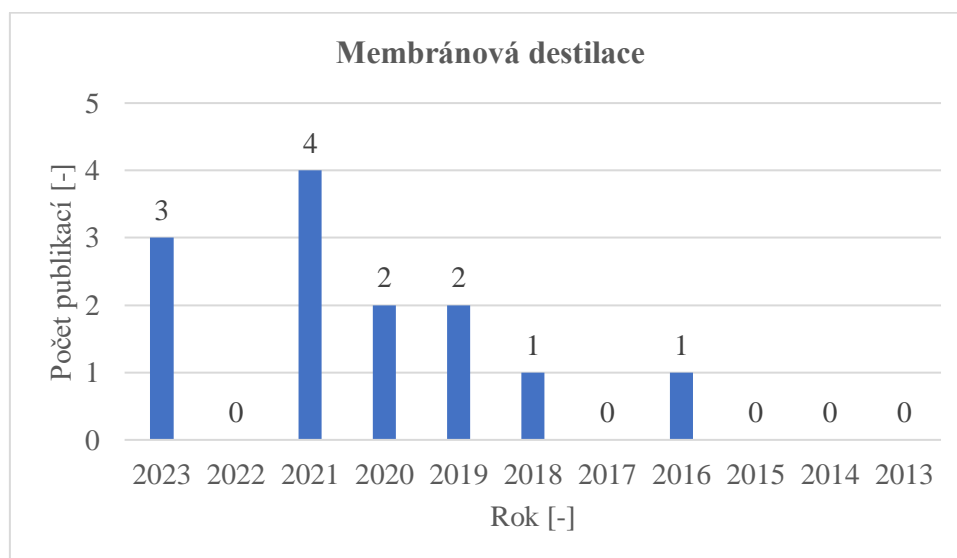
Membránová destilace (MD) je technologie procesního průmyslu, která se zabývá separací určitých sloučenin nebo prvků ze směsice látek přes hydrofobní membránu s rozdílem teplot, jedná se tedy o děj s přenosem tepla i hmoty.

Mezi nejčastější využití MD patří čištění komunálních odpadních vod, odsolování, nebo čištění farmaceutických a textilních odpadních proudů. S rozvojem aditivních technologií lze pozorovat použití distančních vložek kanálů MD, jejichž hlavní výhodou je ovlivnění mezimembránových rozestupů a generace vírů, což zlepšuje přenos tepla a hmoty a snižuje adhezi nečistot. Nevýhodou použití distančních prvků je nárůst tlakové ztráty. Mezi nejvíce užívané konfigurace MD patří se vzduchovou mezerou (*air gap membrane distillation*, AGMD) a s přímým kontaktem (*direct contact membrane distillation*, DCMD). [76]

Tabulka 3.4 poskytuje přehled rešeršovaných zdrojů v této oblasti problematiky. Obrázek 3.20 ukazuje rostoucí trend zájmu o problematiku 3D tisku membránových destilačních kolon v rámci odborných publikací. Rok 2023 je zkrácen faktem, že graf je zpracován ke dni 15. 4. 2023.

Tabulka 3.4 Přehled rešeršovaných zdrojů v oblasti membránové destilace

Autor	Rok vydání	Technologie tisku	Materiál	Reference
Thomas a kol.	2021	SLS	PA2202	[76]
Thomas a kol.	2018	SLS	PA2202	[77]
Thomas a kol.	2019	SLS	PA2202	[78]
Tian a kol.	2021	SLS	PA12	[3]

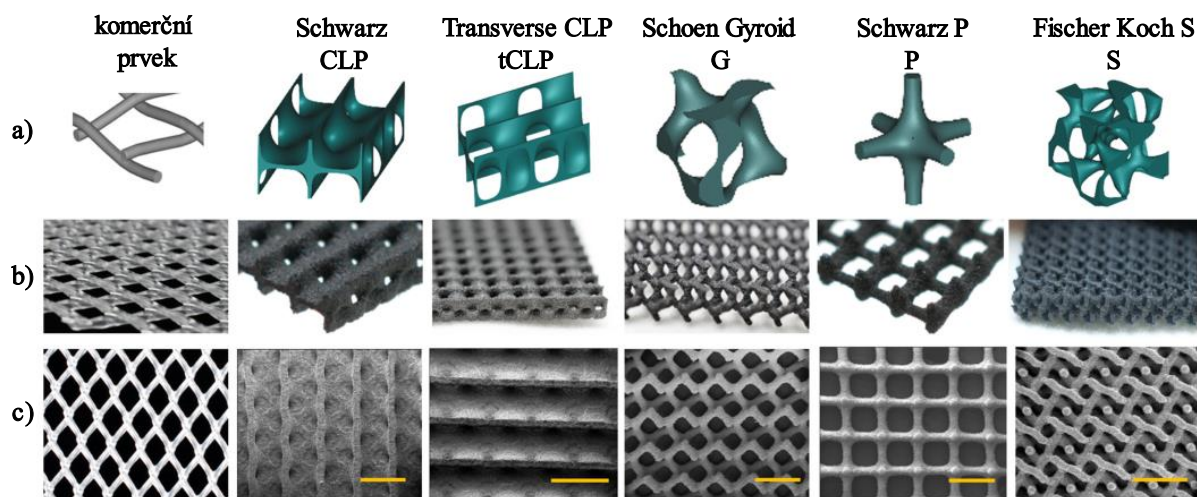


Obrázek 3.20 Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013—2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a „membrane distillation“

Ve studii Thomas a kol. [76] bylo diskutováno porovnání užití struktur TPMS jako distančních vložek MD pro variantu AGMD a DCMD oproti konvenční vložce. Studie zjistila, že pro konfiguraci AGMD byl největší výhodou snížení tlakové ztráty (o 50 %), ale zlepšení tepelného toku bylo jen minimální (o 17 %) [76]. Z dřívější studie stejných autorů [78] bylo zjištěno, že struktura DCMD poskytuje naopak daleko vyšší zlepšení toku a zvýšení tlakové ztráty prvku, což dokázala i následující studie [76], kdy pro testovací podmínky došlo ke zlepšení toku o 57 %. Obě konfigurace mohou mít

budoucnost pro využití aditivních technologií, konkrétně pro výrobu distančních vložek z TPMS struktur.

Ve studii stejného autorského kolektivu [77] bylo diskutováno prototypování a testování různých geometrií distančních prvků pro membránovou destilaci ve srovnání s konvenční geometrií. Konvenční prvek byl použit standardizovaný polypropylenový (*Naltex* N08006, tloušťka 2,03 mm, 60° úhel zkosení, 6 vláken na in² od firmy *Delstar*, USA) [77]. Distanční podložky využívaly různé druhy TPMS, čímž bylo podmíněno použití 3D tisku z důvodu nevyrobitelnosti struktury konvenční cestou. Struktury byly vytisknuty metodou SLS a materiálem PA 2202, podpory byly po tisku odstraněny, minimální tloušťka jedné vrstvy, kterou byla tiskárna schopna vytisknout, byla 350 μm a celková tloušťka distanční podložky byla 3 mm [77]. Celková objemová odchylka od CAD návrhu byla u všech vytisknutých struktur poměrně velká (největší u typu tCLP 24 %), což naznačuje, že celý tisk je potřeba optimalizovat. Vliv TPMS podložek byl hodnocen na základě zlepšení U (součinitel prostupu tepla) a teplotního polarizačního koeficientu. Do U však nebyly zahrnuty tepelné ztráty vedením membránou, tzn. že u všech druhů struktur byl využit stejný předpoklad konstantních ztrát. Ve studii bylo zjištěno, že čím vyšší je U , tím výkonnější je i membránová destilace, kdy všechny tištěné vložky kromě CLP vedly ke zlepšení U oproti komerční vložce [77]. Zhoršení U pro CLP bylo zřejmě zapříčiněno tvarem podložky, která měla jako jediná u-profil nastavený ve směru toku. Nejvyšší nárůst hodnoty U poskytly tCLP, konkrétně 63% oproti konvenční podložce, dále *Schoen Gyroid* a *Schwarz P* o 33 %, resp. 26 %. Podložka *Fischer Koch S* poskytla nárůst o 12 % [77]. Podložky byly dále testovány v solném roztoku, kdy vykazovaly vysokou propustnost toku a stálý tok při zvyšující se koncentraci soli v roztoku v rozmezí 75000—100000 ppm [77]. Dalším problémem těchto struktur dle studie je vznik stagnačních zón, kdy nejvíce stagnačních zón vzniklo u vložky typu *Gyroid*, nejméně u CLP a tCLP, což si studie vysvětluje korelací mezi kontaktní plochou membrány a depozicí částic [77]. Výsledek ze studie ukázal pozitivní vliv TPMS struktur na parametry membránové destilace, a tak je tyto struktury vhodné dále zkoumat, protože mohou přinést výrazné zvýšení účinnosti membránové destilace. Obrázek 3.21 vyobrazuje všechny ve studiích použité podložky.



Obrázek 3.21 Zobrazení podložek použitých ve studiích, a) reprezentativní objemové prvky komerčních a TPMS podložek, b) fotografie komerční a TPMS podložek tloušťky 2,3 mm c) fotografie shora komerční a TPMS podložky (délka měřítka 3 mm) – upraveno dle [77]

V oblasti membránové destilace probíhá i vývoj vlastních metod 3D tisku, případně následného *postprocessingu*. Příkladem je studie Tian a kol. [3], která zkoumala výrobu DCMD membrán pro MD metodou SLS za použití materiálu PA12, které byly následně namáčeny do PVDF (*polyvinylidenfluorid*) roztoků s různou koncentrací PVDF (5 %, 7 %, 10 % obj.) a po různou dobu máčení (15 s, 30 s, 60 s a 120 s). Účelem bylo zmenšení velikosti pórů membrány, jelikož ideální velikosti pórů membrány 0,1—1 μm nebylo možné touto technologií 3D tisku dosáhnout. V konečném důsledku bylo zjištěno, že nižší koncentrace PVDF roztoku vytvoří výšky pórů okolo 2 μm s vysokým kontaktním úhlem 130°, zatímco

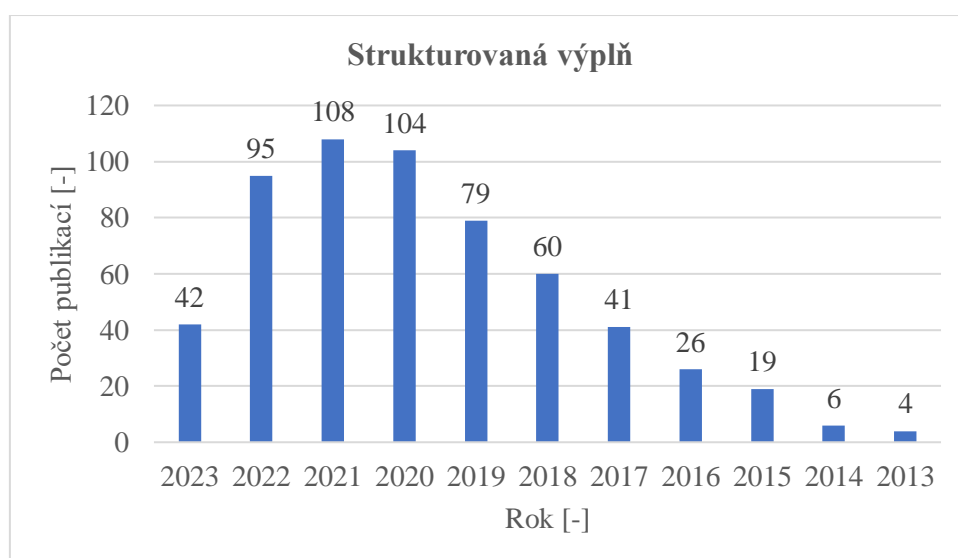
vyšší koncentrace vede k výšce pórů okolo 1 μm a kontaktnímu úhlu 100°, kdy čím blíže je kontaktní úhel 90°, tím více je membrána hydrofilní [3] [79]. Teplota tisku byla 173 °C, tloušťka vrstvy 0,59 μm , odstranění podpor proběhlo v deionizované vodě [3]. Očekávaným výsledkem byly pravidelné struktury pórů po samotném tisku ještě před máčením v roztoku PVDF, čehož však nebylo dosaženo pro požadované rozměry pórů v desítkách μm . Z toho lze usuzovat, že na výrobu takto malých rozměrů, právě kvůli opakovatelnosti konkrétní geometrie pro nejlepší výkon, není ještě tato forma 3D tisku připravena. V budoucnosti autoři studie Tian a kol. [3] zvažují ověřit aplikační potenciál rozvíjející se technologie TPP, která je schopna tisknout struktury o rozlišení pod 100 nm.

3.5 Strukturovaná výplň

Strukturované výplně se v oblasti procesního průmyslu využívají pro kolonová zařízení, kde dochází ke styku plynné a kapalně fáze [80]. Vhodným návrhem lze využít pro intenzifikaci procesu separace fází díky vytvořené velké ploše pro styk fází [80]. Hlavními procesy pro výrobu kolon je výroba z kovových pásků nebo vstřikování plastů, které jsou značně omezeny výrobitelnou geometrií [80]. Výroba aditivní cestou je v literatuře zastoupena často v laboratorním měřítku, avšak aplikace do praxe je zatím velice omezená. Obrázek 3.22 prezentuje rostoucí trend zájmu o problematiku 3D tisku strukturované výplně v rámci odborných publikací. Rok 2023 je zkrácen faktem, že se graf je zpracován ke dni 15. 4. 2023, avšak z počtu publikací pro rok 2023 lze usuzovat, že konečný počet publikací překoná rok 2022. Tabulka 3.5 poskytuje přehled rešeršovaných zdrojů v této oblasti problematiky.

Tabulka 3.5 Přehled rešeršovaných zdrojů v oblasti strukturované výplně

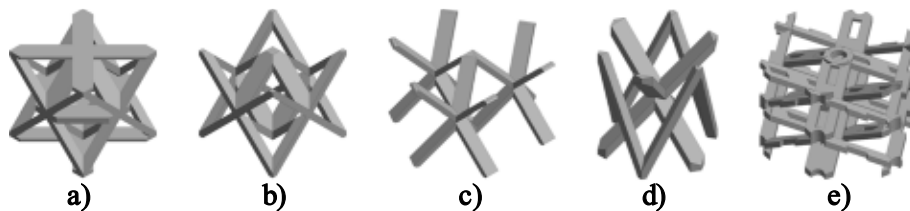
Autor	Rok vydání	Podkapitola	Metoda tisku	Materiál	Reference
Gladyszewski, Skiborowski	2018	Strukturovaná výplň	SLA	epoxidová pryskyřice	[81]
Neukäuffer a kol.	2021	Strukturovaná výplň	SLS	PA12	[80]
Miramontes a kol.	2020	Záchyt uhlíku	DMLS	hliník	[82]
Tang a kol.	2022	Záchyt uhlíku	neuveдено	neuveдено	[83]
Lee a kol.	2022	Záchyt uhlíku	DIW	PPO	[84]
Sluijter a kol.	2021	Záchyt uhlíku	DLP	SiO ₂	[85]



Obrázek 3.22 Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013–2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a „structured packing“

Studie Gładyszewski, Skiborowski [81] porovnávala použití konvenční kovové výplně (chrom-nikl) s polymerní AM (*additive manufacturing*) pěnou (studii přesněji nezveřejněná epoxidová pryskyřice od firmy KUDO 3D SPOT-A), tedy položila základ pro použití aditivní výroby v tomto odvětví. Ideální metodou výroby byla ve studii nakonec pro svou dostatečnou přesnost, chemickou a mechanickou odolnost i nízkou cenu zvolena metoda SLA s tloušťkou vrstvy 0,05–0,2 mm [81]. Podstatným zjištěním byl fakt, že s rostoucími otáčkami u konvenční výplně absorberu rostl i pokles tlaku, ale u tištěné výplně to bylo naopak. To bylo přisuzováno rozdílným materiálům. Posledním zjišťovaným aspektem byla efektivní plocha rozhraní, která ukázala, že oba materiály byly naprosto srovnatelné. Závěrem studie byl fakt, že AM lze využít pro rychlou a levnou tvorbu prototypů strukturovaných výplní, které lze jednoduše a levně testovat při velice podobných hydromechanických vlastnostech. Největším pozitivem zjištěným ze studie je, že cena polymerní pěny je 57-krát nižší než kovové pěny, a to z důvodu nutnosti kovovou pěnu vyřezávat z polotovaru, zatímco polymerní pěna lze vytisknout s téměř nulovým zbytkovým materiálem [81].

Požadavkem na výrobu strukturovaných výplní mohou být malé rozměry strukturované výplně (resp. průměry menší než 200 mm). Problémem pro tuto sféru je zajištění těsnění kolony, jelikož standardně vyráběná těsnění nestačí a při zmenšujících průměrech se stále více objevuje nerovnoměrná distribuce toku hmoty. Řešení tohoto problému může přinést právě aditivní technologie. Studie Neukäuffer a kol. [80] popsala výrobu a testování takovéto strukturované výplně. Kvůli požadavkům na použití v rektifikačním zařízení s médiem cyklohexanu/n-heptynu byl na tiskový materiál kladen důraz na odolnost proti organickým rozpouštědlům a odolnost vůči teplotám do 100 °C, zvolen byl materiál PA12 a technologie SLS s minimální tloušťkou stěny 0,3 mm [80]. Tato studie prvně navrhla pět možností jednotky strukturované výplně ((a), (b), (c) vycházející z krystalových mřížek), varianta (d) a (e) byla nakonec zvolena pro výrobu díky nejmenší tlakové ztrátě a velkému měrnému povrchu (viz obrázek 3.23). Bipyramidální charakter (pootočený o 60°) varianty (d) napomohl kontinuálnějšímu průtoku média. Řešení (e) bylo zvláštní svým vybráním v jednotlivých prutech a vlastně vychází z řešení (d). Díky vybrání mohla kapalina snáze procházet přes mezery a zlepšil se tím přenos hmoty a po vytisknutí a nasunutí strukturované výplně do požadovaného zařízení bylo dosaženo výrazného snížení nerovnoměrného rozložení toku hmoty [80].



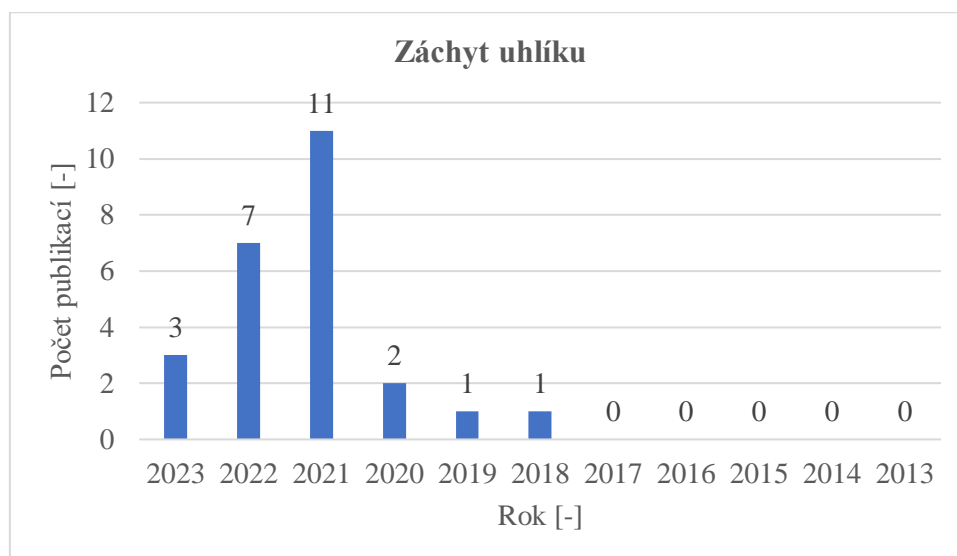
Obrázek 3.23 Schéma jednotek strukturované výplně a) *KdP*, b) *KdP#noHorizon*, c) *HdP*, d) *APT Twist-450*, e) *Artist-550* – upraveno dle [80]

3.5.1 Záchyt uhlíku

Společnost čelí v posledních dekádách otázce skleníkového efektu, ke kterému významně přispívá světový průmysl vysokou produkcí antropogenního CO₂. Jedna z možných cest jsou technologie záchytu a skladování CO₂ (*carbon capture and storage, CCS*). Před výraznějším nasazením CCS technologií je však potřeba vyřešit řadu technických a ekonomických aspektů. Mezi udržitelné technologie záchytu i nízko-koncentrovaného CO₂ s možnou aplikací ve velkoobjemových průmyslových zdrojích patří absorpce, adsorpce a kryogenní destilace [86]. V oblasti kryogenní destilace nebyla nalezena žádná dostupná studie, která by prokazovala využití aditivních technologií pro zefektivnění záchytu CO₂. Nasazení aditivních technologií ve vývoji CCS probíhá především v oblasti tvorby laboratorních modelů a prototypů s vysokou přidanou hodnotou, např. dílů kombinujících několik funkcí nebo významně zlepšujících přenos tepla a hmoty, kdy důvodem je časová úspora výroby, případně nevyrobitelnost geometrií tradičními výrobními technologiemi. V této části práce je

kladen důraz na inovace, které 3D tisk přináší aplikacím využívajícím metody zachytu CO₂, které byly kvůli své významnosti vyčleněny jako podkapitola strukturovaných výplní.

Níže je prezentován jasně patrný skokový zájem o problematiku 3D tisku v oblasti zachytu uhlíku v rámci odborných publikací (viz obrázek 3.24). Rok 2023 je zkrácen faktem, že se graf je zpracován ke dni 15. 4. 2023, avšak z počtu publikací pro rok 2023 lze usuzovat, že konečný počet publikací překoná rok 2022.



Obrázek 3.24 Počet odborných článků v oblasti procesního průmyslu publikovaných mezi lety 2013–2023 dle databáze Scopus. Výsledky byly omezeny na kombinaci klíčových slov „3D printing“ a „carbone capture“

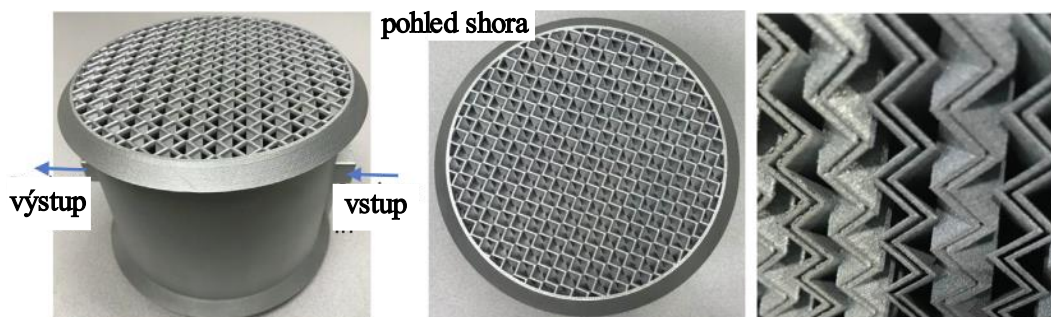
Absorpce

Záchyt uhlíku se nejčastěji provádí metodou chemické absorpce díky své vysoké účinnosti přenosu hmoty a široké využitelnosti (např. pro různé koncentrace nebo různé složení plynů). V procesu chemické absorpce je přítomno chemické rozpouštědlo (absorbent), nejčastěji amoniak, monoethanolamin, roztok NaOH nebo iontové kapaliny [83].

K záchytu CO₂ chemickou absorpcí se nejčastěji používá rozpouštědlo, které protiproudě teče ve spalínovém systému a sytí se CO₂, konkrétně váže uhlík [83]. Pro zvýšení interakce tekutin (plyn-plyn, kapalina-plyn, kapalina-kapalina) se používá strukturovaná výplň, která zvětší kontaktní plochu, je vyrobena z materiálu s velkou tepelnou kapacitou a vykazuje nízkou tlakovou ztrátu. Spaliny vycházející z kotle mají vysokou teplotu v řádech stovek nebo nižších tisíců °C. Snížení teploty spalín je nezbytné pro vyšší záchyt CO₂, při které navíc dojde ke snížení degradace absorbentu teplem, resp. zvýší se schopnost zachytu uhlíku [83]. Řešením tohoto problému může v technické praxi být spojení samotného kontaktu fází s výměnou tepla do jednoho aparátu, kdy jsou jednotlivé procesní proudy odděleny. Motivací aditivní výroby je hlavně řešení zmenšení zástavbového prostoru výměníku tepla a absorpční kolony a snazší integrace zařízení do provozované linky. Při využití procesní výměny tepla pak může být získané (odpadní) teplo využito jinde v provozu včetně např. regenerace rozpouštědla.

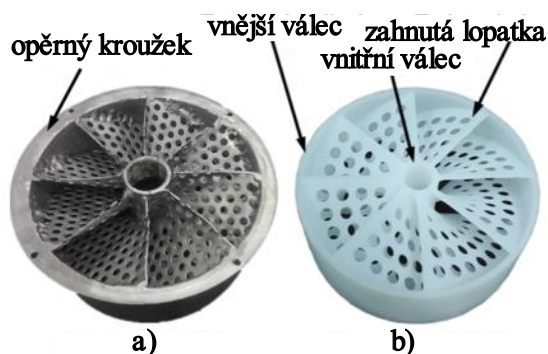
Koncepce integrace několika funkcí do jednoho zařízení je v procesním průmyslu aplikována u řady aparátů – např. skupina vědců Guo a kol. [87] zkombinovala výměník tepla a chemický reaktor pro zefektivnění odvodu tepla při exotermické reakci. Na tuto práci navázala studie Miramontes a kol. [82], která koncept integrovaného zařízení využila pro zlepšení zachytu CO₂ snížením výstupní teploty spalín. Kombinace tepelného výměníku a zachytu CO₂ byla konstrukčně řešena teplosměnnými plochami napodobujícími standardní výplně složené z profilovaných plechů, čímž se značně zmenšil prostor pro rozpouštědlo. Tento problém byl vyřešen použitím aditivních technologií, které integrovaly chladicí kanály mezi kanály strukturované výplně. Tiskovým materiálem byl zvolen hliník, který vykazuje velkou tepelnou vodivost a poměrně dobrou smáčivost, která nebyla ovlivněna procesem tisku [82].

Přesné nastavení tiskárny nebylo zveřejněno, tisková technologie byla zvolena DMLS [82]. Tlaková ztráta byla naměřena vyšší než u polymerního modelu. Ve studii se podařilo dokázat, že aditivní výroba snížila teplotu spalin ze vstupních 100 °C na výstupních 61,7 °C při průtoku vzduchu 520 l/min, čímž došlo ke zlepšení zachytu CO₂, protože nižší teplota způsobí vyšší zachycování CO₂ na jednotku energie [82]. Obrázek 3.25 prezentuje fotografie výsledného výrobku společně s pohledem na jeho strukturu.



Obrázek 3.25 Fotografie výsledného výrobku s detailem výsledné struktury kolony – upraveno dle [82]

V otázce zachytu uhlíku v absorbentu na bázi NaOH byl hebeiskou univerzitou v Tianjinu v Číně vynalezen nový typ vnitřní kolony nazvaný trojrozměrné rotační průtokové síto (*tridimensional rotational flow sieve tray*, TRST). TRST spojuje výhody účinků lopatek (odstředivý efekt) a jejich perforace (dělení proudů) pro lepší promíchání tekutiny a zároveň snížení odporu proudění v koloně. Aditivní výroba přinesla výhodu v absenci opěrného kroužku a v plynulejších přechodech mezi lopatkami, které také snižují odpor proudění. Další výhodou výroby TRST 3D tiskem je jednoduché testování různých konfigurací. Ve studii bylo testováno 9 konfigurací s různým úhlem natočení lopatek, počtu lopatek, poměru volné plochy lopatek a průměru otvorů v lopatkách. Z výsledků pokusů vyplývá, že tisknutý TRST vykazuje menší pokles tlaku než obráběný díl. Dále bylo dokázáno, že s rostoucím úhlem natočení lopatek vůči směru toku se zvyšují tlakové ztráty, ale klesají se zvyšující se výškou lopatky. Největší vliv na přenos hmoty má počet lopatkových struktur a nejmenší vliv měl úhel natočení lopatky. Na základě těchto poznatků a díky možnostem rychlého prototypování 3D tiskem byla stanovena optimální geometrie TRST. Obrázek 3.26 porovnává konvenčně vyrobené a tisknuté struktury. [83]



Obrázek 3.26 Fotografie a) konvenčně vyrobené TRST b) aditivně vyrobené TRST – upraveno dle [83]

Adsorpce

Mezi možnosti zachytu uhlíku patří metoda adsorpce, jejíž účinnost závisí na volbě vhodného adsorbentu pro konkrétní užití. Nejčastěji je užíváno aktivní uhlí, zeolity, mezoporézní SiO₂, kovoorganické struktury (*metal-organic structures*, MOFs) nebo adsorbenty na bázi draslíku [84].

Problémem adsorpčních zařízení je používání pojiva (např bentonitový jíl, polyvinylalkohol), které nevykazuje adsorpční schopnosti. Adsorpční kolona nelze konvenčními metodami vyrobit bez použití

pojiv, což prostřednictvím technologie 3D tisku naopak lze. Studie Lee a kol. [84] navrhla adsorpční zařízení bez použití pojiva technologií tlakově řízené extruze DIW s průměrem trysky 410 μm při tlaku 400 kPa za použití materiálu PPO. Samotný materiál byl bromován, a to kvůli zlepšení tisknutelnosti. Rychlost posuvu trysky byla 6 mm/s s pauzou 30 s mezi vrstvami kvůli dostatečnému ztuhnutí materiálu [84]. Testováním bylo dokázáno, že struktura má dobrou schopnost adsorpce CO_2 díky *postprocessingovým* operacím. Návrh dokáže zachycovat CO_2 i při nízkém průtoku, čehož lze využít u soustav v nízkokapacitních provozech, navíc se vyznačuje poměrně dobrou regenerací [84].

Studie Sluijter a kol. [85] zkoumala 2 přístupy k adsorpci pro záchyt CO_2 pomocí keramických strukturovaných adsorbentů v porovnání s balenými ložemi pomocí experimentu i CFD simulací. Jednalo se o aminem podpořený SiO_2 a draslík s hydrotalcitem (K-HTC), oba vytištěné metodou DLP. Při tisku K-HTC se skupina potýkala s problémy se sníženou viskozitou a fotoreaktivitou, které byly úpravou tiskárny vyřešeny, avšak problémy s výskytem trhlin a reprodukovatelností se vyřešit nepodařilo [85]. Tisk SiO_2 provázel iterační proces, kdy se při slinování podařilo zjistit teplotu (950 $^\circ\text{C}$), při které se dosáhlo požadované pevnosti a zároveň plochou povrchu výsledných struktur [85]. Výsledky studie dokázaly zvýšení účinnosti přenosu hmoty pro K-HTC a čtyřnásobně vyšší produktivitu (čistota, výtěžnost a spotřeba energie) systému s SiO_2 než referenční systém [85]. Studie bude nadále proces optimalizovat s cílem převést ho do velkoobjemového 3D tisku.

4 3D tisk v českých projektech VaVal

V rámci této práce byla prozkoumána státní podpora projektů spojených s procesním průmyslem a 3D tiskem, konkrétně Národní výzkumná a inovační strategie pro inteligentní specializaci České republiky 2021 – 2027 (tzv. RIS3). V dokumentaci vyhlášených výzev je téma 3D tisku zmíněno v doméně „Pokročilé stroje a technologie“. Podpora výzkumů, experimentálního vývoje a inovací 3D tisku v oblastech procesního průmyslu lze ve veřejných dokumentech nalézt především v oblasti „Průmyslové chemii“. Nejvíce podniků podpořených projekty VaVal (aplikace pro vyhledávání podpořených projektů) v této oblasti lze nalézt v Zlínském a Pardubickém kraji. Celková výše veřejné podpory VaVal v odvětví Průmyslové chemie v oblasti zkoumání pokročilých materiálů a technologií byla přibližně 659 mil. Kč s celkovým počtem 5432 publikací (za období 2015—2018) a 423 patentovými přihláškami (za období 2015—2017). Data jsou uvedena k 28.11.2022, kdy došlo k poslední zveřejněné aktualizaci projektů. [88]

Je nutné dodat, že projekty jsou také podporovány jinými zdroji, např. prostřednictvím agentury API a programu OP PIK bylo podpořeno 22 projektů v oblasti 3D tisku k roku 2022. Detailnější informace (cíle projektu, výše podpory, výstupy projektu apod.) agentura nezveřejnila. [89]

Nejvíce zastoupenými konkrétními tématy procesního průmyslu je odpadové hospodářství a čištění odpadových vod. S výše uvedenými segmenty procesního průmyslu je spojen 3D tisk, který je často používán pro tvorbu filtračních membrán. Dále je zaměřena pozornost na výzkum nových polymerů a kompozitních materiálů, které lze využít pro aditivní výrobu. [88]

4.1 Projekty státní podpory VaVal

Při vyhledávání klíčového slova „3D printing“ v portálu Isvavai.cz bylo nalezeno 70 výsledků, ze kterých byly vybrány tři, které nejvíce zasahovaly do oblasti procesního průmyslu. Data jsou platná k 16. 4. 2023.

Mezi podpořené projekty patří projekt s názvem: „Konformní tepelné výměníky za použití ADM (*additive manufacturing*) a plazmatických povlakování“ (TK01020187), který měl za cíl zlepšit pomocí 3D tisku vlastnosti konformního tepelného výměníku v tepelně náročných podmínkách slévárenského průmyslu. Výhodou projektu je rozšíření získaných poznatků o tepelných výměnících mimo oblast slévárenského průmyslu. Poskytovatel byla Technologická agentura ČR (TA ČR), projekt probíhal od roku 2018 do roku 2022 a jedním z řešitelů byl Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i. [90]

Další projekt „Filtrace nanočástic z 3D tisku pomocí membrány z dutých vláken“ (TJ02000170) se zabýval filtrací nanočástic z 3D tisku pomocí membrán z dutých vláken, kdy byl řešen problém expozice obsluhy 3D tiskáren nanočásticemi. Cílem bylo vytvořit kryt tiskárny, který by byl vybaven recirkulační jednotkou s membránou z dutých vláken a uhlíkovým filtrem. Výsledek práce bude využit i pro filtraci aerosolů, u nichž je možné membrány z dutých vláken využít k filtraci opakovaně na rozdíl od jiných filtračních metod. Poskytovatel byla TA ČR, projekt probíhal od roku 2019 do roku 2021 a příjemcem bylo Vysoké učení technické v Brně / Fakulta strojního inženýrství. [91]

Projekt s názvem: „Progresivní řešení hydraulického designu čerpadel extrémních výkonů pro voda-sucho“ (FV10302) měl za cíl zvýšit hydraulickou účinnost čerpadel pomocí počítačové optimalizace topologie a následného kovového 3D tisku oběžného kola a rozvaděče. Následně byl zkoumán nejlepší možný nástřik pro zlepšení obtékání kontaktních ploch a zvýšení odolnosti proti korozi. Projekt vypsal Ministerstvo průmyslu a obchodu, probíhal od roku 2016 do roku 2020 a hlavním řešitelem byla SIGMA Výzkumný a vývojový ústav, s. r. o společně s Centrem hydraulického výzkumu spol, s. r. o a Univerzitou Palackého v Olomouci / Přírodovědeckou fakultou. [92]

Při vyhledávání fulltextového vyhledávání při zadání hesla „3D tisk“ v portálu Isvavai.cz bylo nalezeno 149 výsledků, z kterých bylo vybráno pět nejvíce zasahujících do oblasti zájmu procesního průmyslu, při čemž projekty zmíněné v předchozím hledání nebyly do rešerše uvažovány. Data jsou platná k 16. 4. 2023.

Výzkum „3D tisk funkčních dílů vyrobených technologií DMLS z materiálu Inconel 718 pro energetický průmysl a výzkum jejich konečných vlastností“ (TH02010303) pojednával o zvládnutí 3D tisku topologicky složitých dílů a jejich následného *postprocessingu* zvláště v oblasti energetiky

technologií DMLS za použití materiálu Inconel 718. Poskytovatelem byla TA ČR, projekt probíhal od roku 2017 do roku 2020 a jedním z příjemců byla Západočeská univerzita v Plzni. [93]

„Výzkum množství aditivní výroby (3D tisku) pro expandéry do nízkoteplotních aplikací v decentralizované energetice“ (TJ01000090) měl za cíl navrhnout a realizovat expandéry (mikroturbíny) nízkých výkonů, které budou ekonomicky i technologicky konkurenceschopné konvenčním mikroturbínám. Poskytovatelem byla TA ČR, projekt probíhal od roku 2017 do roku 2019 a jedním z příjemců bylo České vysoké učení technické v Praze / Univerzitní centrum energeticky efektivních budov. [94]

Výzkum s názvem „Vysokoteplotní odolné materiály pro komponenty tepelných okruhů“ (TK04020056) vyvíjí a testuje nové výrobní postupy pro zlepšení účinnosti a spolehlivosti tepelných procesů, zvláště výroby tepla a elektřiny, za pomoci 3D tisku a plazmového slinování kovů. Poskytovatel je TA ČR, projekt probíhá od roku 2022 do roku 2025 a jedním z příjemců je Západočeská univerzita v Plzni / Fakulta strojní. [95]

Výzkum „3D tisk keramických komponent pro pokročilé aplikace v energetice“ (TK05020070) zkoumá využití 3D tisku keramiky z Al_2O_3 a SiO_2 metodou DIW. Dalším zájmem je možnost tisknout nízko rozměrové komponenty v energetice. Projekt poskytuje TA ČR, probíhá od roku 2023 do roku 2025 a jedním z příjemců je Centrum výzkumu Řež s.r.o. [96]

„Výzkum vlivu opětovného využití kovového odpadu generovaného při aditivní výrobě na spolehlivost a funkčnost vyráběných dílů a možnost eliminace ekologické zátěže snížením množství likvidovaného nebezpečného odpadu a emisí CO_2 “ (EG20_321/0024981) zkoumá proces zpracování odpadů 3D tisku na znovupoužitelný materiál, který bude následně vytisknut a porovnáván z nerecyklovaným práškem. Poskytovatelem projektu je Ministerstvo průmyslu a obchodu, projekt probíhá od roku 2021 do dubna 2023, jedním z příjemců je Západočeská univerzita v Plzni. [97]

5 Situace v průmyslovém sektoru v České republice

Na českém trhu aditivní výroby převažuje plastový tisk, který nabízí desítky firem. Převažují technologie FDM, SLA a SLS s materiály typu PLA nebo PA. Všechny firmy na svých internetových stránkách uvádějí, že jsou schopny tisknout i z jiných materiálů než z uvedených, vše závisí na domluvě a možnostech při konzultaci až konkrétních poptávek. Minimální tloušťky vrstev se pohybují od 100 μm s neomezenou velikostí dílů, jelikož firmy nabízejí tisk na části s následným lepením. Mnoho firem, které se primárně nevěnují 3D tisku, navíc vlastní tiskárny technologie FDM, které využívají na vizualizaci dílů nebo prototypování.

V některých tuzemských firmách lze také tisknout kovové díly a díly z kovových slitin, případně kompozity. Převažující nabízená technologie je DMLS a ADAM (*Atomic Diffusion Additive Manufacturing*) a minimální tloušťkou vrstev od 30 μm . Největšími firmami je firma ONE3D s. r. o. a Innomia a. s., které navíc k samotné kovové výrobě přidružili *postprocessingové* operace. Zakázkový 3D tisk kovů a kompozitů nabízí i veřejné vysoké školy včetně Vysoké školy báňské Technická univerzita Ostrava nebo FSI VUT v Brně. [98; 99; 100]

Omezenou nabídku prezentují české firmy v oblasti keramického 3D tisku, kterou nabízí např. firma 3R Systems s. r. o. Technologií tisku je LCM a minimální tloušťka vrstvy 10 μm . [101]

5.1 České firmy zabývající se aditivní výrobou

V rámci práce bylo poptáno několik českých firem zabývajících se výhradně aditivní výrobou, které si přály zůstat v anonymitě. Na základě telefonických konzultací s obchodními řediteli bylo zjištěno, že na českém trhu se z konkrétních zařízení zmíněných v této práci nejvíce tisknou pasivní chladiče, konkrétně třeba pro neutronové mikroskopy. Např. ve zmiňované oblasti TPMS struktur, kterou lze označit jako aktuální trend ve výzkumu a vývoji aplikací vyrobených aditivně, jsou tisknuty pouze větší díly, které nejsou přímo používány pro tepelné výměníky. Dle informací o českém trhu se stále běžně tepelné výměníky pro procesní použití vyrábějí technologiemi s přidáním materiálu, přestože by rozměrově zařízení bylo možné vyrobit aditivní technologií. Výrobě distančních prvků pro membránovou destilaci, výplní destilačních kolon, komponentů do palivových článků nebo struktur na záchyt CO_2 se firmy ani český trh dle získaného vyjádření nevěnují (ani na úrovni prototypů). Problematika mini a mikrokanálových tepelných výměníků byla poptávána jen formou prototypů, ovšem ve velmi omezené míře, která tvořila zanedbatelnou část produkce.

Jedinou technologií kovového tisku, kterou poptávané firmy nabízí, je technologie DMLS. Technologie DMLS podle uvedení jednoho z obchodních ředitelů není připravena na tisk v tomto odvětví průmyslu, které vyžaduje malé tloušťky stěn, protože tloušťka stěn tenčí než 0,7 mm je touto metodou nerealizovatelná. Dle zkušeností největší problémy a kolize v projektech způsobují právě požadované tloušťky stěn, kterých technologie DMLS není schopna. Mezi nejsložitější zakázky v předmětné oblasti se řadí strukturované chladiče nebo topologicky optimalizované díly pro výměnu tepla. Obvyklé poptávky po službách těchto firem přichází ve formě výkresové dokumentace s požadavkem na samotný tisk.

Firmy v této oblasti neprovádí vlastní výzkum, i když vývoji v jiných odvětvích se věnují. Důvodem absence vývoje celků do procesního průmyslu je fakt, že za ním stojí pokročilá znalost termomechaniky, proudění tekutin a matematiky, přičemž firmám většinou chybí kvalifikovaní zaměstnanci s touhle expertízou.

6 Výstup rešerše použití 3D tisku v procesních aplikacích

V současné době jsou na aditivní výrobu kladeny vysoké nároky a očekávání, avšak je nutné poznamenat, že metodou 3D tisku není možné vytvářet naprosto neomezené struktury a geometrie. Rešerše také upozornila na různá omezení rozličných metod aditivní výroby u konkrétních aplikací spadajících do oblasti zájmu procesního inženýrství. V následující části práce jsou shrnuty poznatky z analyzovaných odborných článků uvedených v kapitole 3 Přenos tepla a hmoty, příklady „dobré praxe“, vytvořeno doporučení budoucího vývoje a uvedeny nejvíce používané materiály a technologie v jednotlivých procesních aplikacích. Výroba aditivní technologií není omezena volbou materiálu, jelikož je v současné době možné tisknout z velkého množství materiálů, a tak je pro jednotlivé aplikace materiál uváděn s ohledem na jeho vlastnosti podstatné pro přenos tepla, tokové vlastnosti, styk s procesní tekutinou apod.

6.1 Výměník tepla

V kapitole 3.1 Výměník tepla byly zkoumány TPMS struktury slibující zvětšení teplosměnné plochy při zachování zástavbových rozměrů, a proto se navýší přenášený tepelný výkon. Pro tisk je podstatnou výhodou samonosnost konstrukce, která nevyžaduje podpory při tisku. Problémem je modelování TPMS struktur, kdy se výzkumné skupiny nejvíce potýkají s nemožností modelovat struktury přímo v běžných CAD systémech, ale je potřeba využívat speciální programy (s poměrně vysokými licenčními poplatky), ze kterých je nutné modely převádět do STL formátu. Další výzkum by zasluhovala tloušťka stěn, kdy se minimální tloušťka pohybuje okolo 300 μm . Nejvíce je tisknuto metodou DMLS téměř jakýkoliv kovový materiál. Pro budoucí uplatnění TPMS struktur v procesním průmyslu je třeba vyřešit možnosti napojení či jiného zvětšení konstrukčního řešení, které by umožnilo dosáhnout běžně požadovaných výkonů zařízení na přenos tepla.

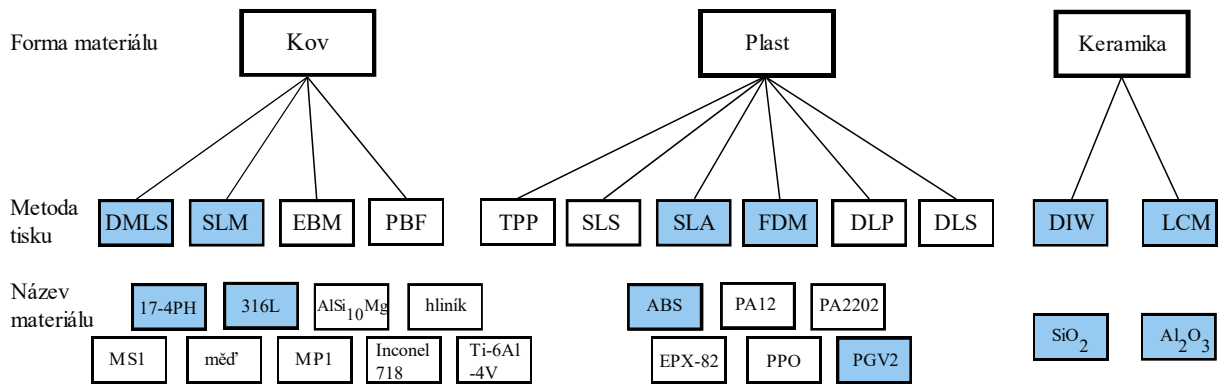
Fractal-tree heat exchangers jsou používány především při optimalizaci geometrie za účelem nízké tlakové ztráty. Největší výhodou je možnost přímo tisknout topologicky optimalizovanou geometrii, která je přizpůsobena požadavkům aditivní výroby a kromě nízké tlakové ztráty může nabídnout také absenci kontaktních odporů. V běžném provozu takto generované výměníky téměř nenajdeme, i když je technologie tisku kovů na tuto výrobu připravena.

V oblasti intenzifikace přenosu tepla pomocí zvětšení teplosměnné plochy výměníků bylo dokázáno násobné zlepšení přenosu tepla, kdy tisková metoda (nejčastěji SLM) nevykazovala žádné nedostatky pro tuto aplikaci, a naopak umožnila tvorbu velmi složitých intenzifikačních prvků. Slibné výsledky je potřeba nyní ověřit v průmyslové praxi, případně i ve větších měřítcích. V oblasti kompaktních výměníků je největší výhodou aditivní výroby absence kontaktních odporů vzniklých vinou konvenčních výrobních postupů, kvůli kterým se zvyšuje tlaková ztráta, a které jsou rizikovými prvky při nerovnoměrném tepelném zatížení (např. praskání svarů při nerovnoměrné dilataci trubek ve výměňkovém svazku). Při tisku je důležitá orientace vrstev, aby byl co nejvíce zmírněn schodovitý efekt uvnitř kanálu a zhoršení tokových vlastností. Nejvíce je tisknuto z ocelí metodou SLM. Dále bylo zjištěno, že v oblasti prototypování tepelných výměníků převažuje technologie FDM díky své dostupnosti a jednoduchosti. Velmi často je experimentováno s navrženými intenzifikačními prvky, např. žebry.

Keramika je nejčastěji tisknuta metodou DIW, avšak v porovnání s výrobou kovových dílů je stále relativně nepřesná a potýká se s vysokou minimální tloušťkou stěn. Přestože se patrně bude vždy jednat o okrajovou aplikaci v problematice přenosu tepla, pro širší uplatnění aditivní výroby keramiky je nutné upřít pozornost na vývoj vlastní metody tisku, protože současně dosažitelné výsledky metody DIW nedostačují zvyšujícím se požadavkům na tepelný výkon.

Co se týče aktuální situace v prostředí ČR, jedním z dohledaných podpořených projektů VaVaI byl i tepelný výměník vytisknutý pomocí AM (TK01020187). V rámci průzkumu trhu však nebyla zjištěna přímá výroba tepelných výměníků pomocí 3D tisku hlavně z důvodu problému s technologií DMLS, kdy jejím největším omezením je minimální tloušťka stěn. Nabízí se možnost využít jiné technologie kovového tisku jako je SLM, avšak těmi většinou české firmy nedisponují.

Obrázek 6.1 prezentuje technologie a materiály nejčastěji využívané v této oblasti procesního průmyslu.



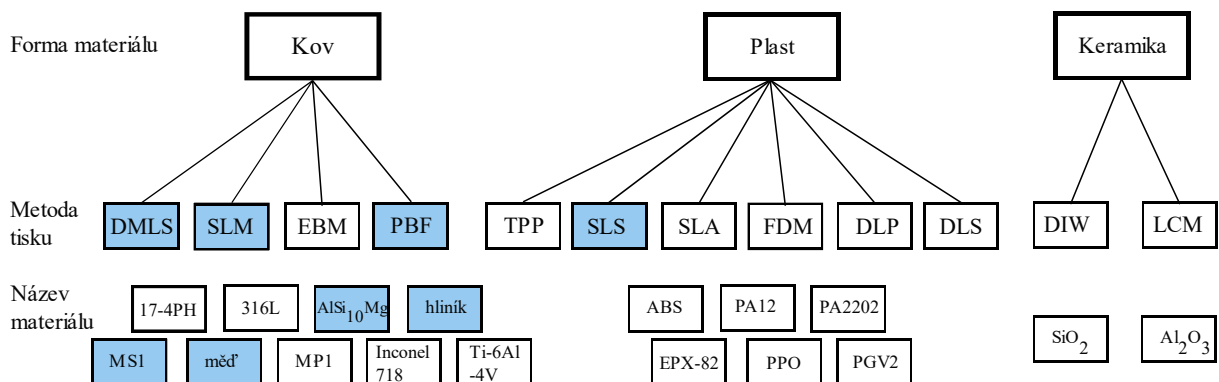
Obrázek 6.1 Schéma využití 3D tisku v oblasti výměníků tepla

6.2 Pasivní chladiče

V kapitole 3.2 Pasivní chladiče byly zkoumány hlavně takové geometrie, u kterých je aditivní výroba v podstatě jedinou možností výroby ať už kvůli tvaru či rozměru chladiče. Jmenovitě se jedná např. o chladiče využívající Pitotovy trubice, NURBS plochy, TPMS struktury, evoluční geometrii, šroubovice, ohnuté trubky apod. Všechny tyto struktury vykazovaly větší teplosměnnou plochu při zachování stejných zástavbových rozměrů, ale zvyšovala se tlaková ztráta chladičů, čemuž je nutné se věnovat v jejich dalším výzkumu. Zajímavým zjištěním byl fakt, že vysoké drsnosti povrchu, které nejčastěji používaná metoda DMLS z procesních důvodů dosahuje, lze využít pro zlepšení tepelného výkonu. Přesto by se další výzkum měl věnovat i způsobům navýšení kvality povrchu vhodnými metodami *postprocessingu*. Oblastí zájmu by měl být výzkum tisku z materiálů, které jsou přirozeně vhodnější pro zařízení na přenos tepla a v procesním průmyslu se běžně používají, typicky např. měď a její slitiny tisknuté metodou SLM. Dalším směrem je možnost tisku z materiálů s fázovou přeměnou, které mají díky využití latentního tepla potenciál i pro zdroje relativně velkého tepla.

V oblasti podpořených projektů VaVaI nejsou pasivní chladiče zastoupeny, avšak na českém trhu jsou tisknuty pasivní chladiče, např. do neutronových mikroskopů.

Obrázek 6.2 prezentuje technologie a materiály nejčastěji využívané v této oblasti procesního průmyslu.



Obrázek 6.2 Schéma využití 3D tisku v oblasti pasivních chladičů

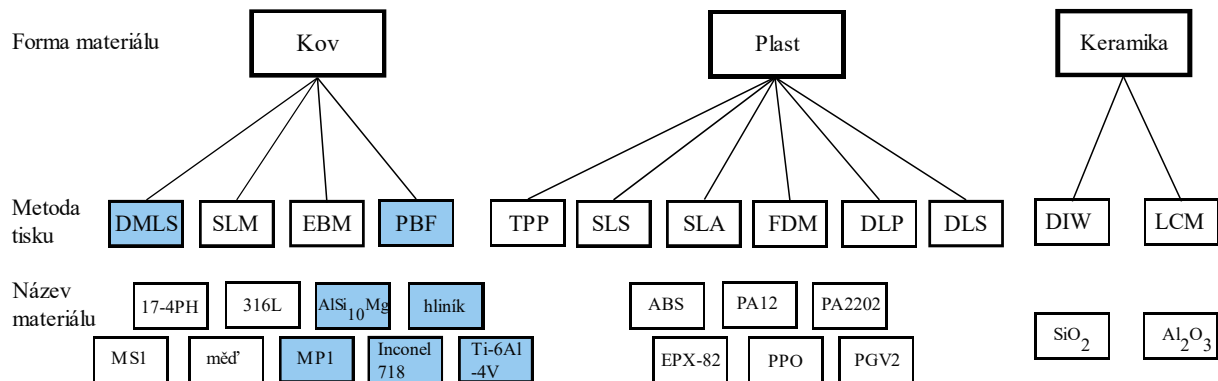
6.3 Minikanály

V kapitole 3.3.1 Minikanály bylo nejvíce diskutováno o úpravách toku pomocí FGE, konkrétně GV, díky kterým je možné zmenšit rozměry celého zařízení při zachování stejného tepelného výkonu. Další oblastí zájmu světového výzkumu bylo testování OHP, kdy bylo při použití metody PBF-L zjištěno, že natavený prášek přichytávající se na vytisknutý povrch (což je běžně vnímáno jako nedostatek této

výrobní metody) dokonce zlepšuje čerpání tekutiny v kapilárách, a tedy účinnost procesu. I v oblasti minikanálů bylo za použití metody DMLS možno intenzifikovat proces díky zvýšení drsnosti povrchu, nicméně v dalším vývoji je nezbytné se zabývat i zkvalitněním povrchu trubek, případně možnostmi, jak docílit předem definovaných ploch a tvarů. S rostoucí drsností povrchu je spojena problematika zvýšení tlakové ztráty, které je nutné věnovat pozornost.

Projekty VaVaI podpořené českými institucemi se nezabývají problematikou minikanálů, avšak na českém trhu je běžně poptáván tisk prototypů minikanálových výměníků tepla. Následná produkce však zatím tvoří jen zanedbatelnou část výroby.

Obrázek 6.3 prezentuje technologie a materiály nejčastěji využívané v této oblasti procesního průmyslu.



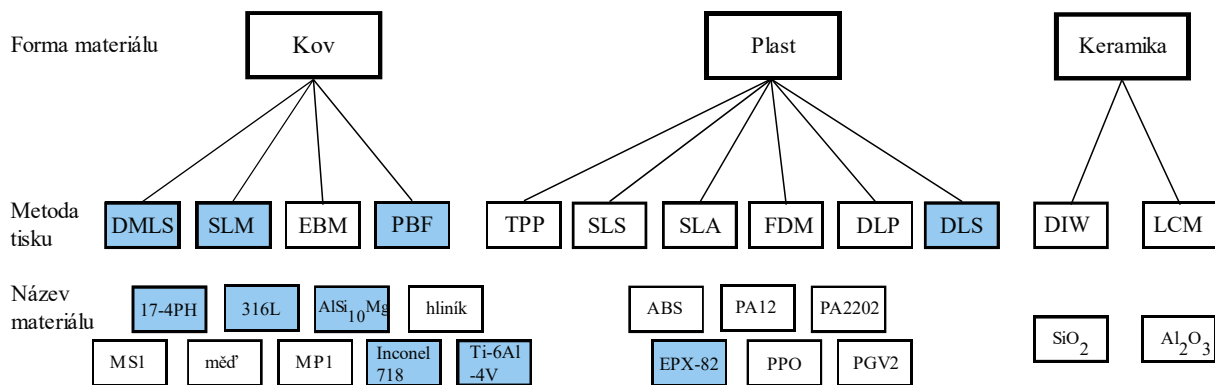
Obrázek 6.3 Schéma využití 3D tisku v oblasti minikanálů

6.4 Mikrokanály

V kapitole 3.3.2 Mikrokanály bylo diskutováno hlavně o mísení toku pomocí deflektorů, jejichž výroba byla díky aditivní technologii umožněna. Využití tisku plastů je limitováno jejich schopnostmi zvládnout provozní teploty, což je splněno např. u aplikací odvádějících teplo z klimatizací. Ve světové literatuře se objevují experimenty s mikro žebry na povrchu kanálů pro zvětšení teplosměnné plochy při chlazení parních turbín, kdy bylo např. zjištěno, že množství mikro žeber přímo nesouvisí s množstvím přeneseného tepla, přestože implementace žeber lze označit již za tradiční způsob intenzifikace tepla. Toto zjištění vyžaduje další zkoumání a optimalizaci jak této úpravy, tak obecně geometrie mikrokanálů. Coby tisková metoda v mikro aplikacích převažuje DMLS, která se však potýká s velkou výrobní nepřesností, a proto by měla být zvážena náhrada za jinou metodu PBF.

V českém rejstříku podpořených projektů VaVaI nebyla nalezena žádná zmínka o projektu zabývajícím se mikrokanálovými tepelnými výměníky. Na českém trhu tvoří tisk prototypů mikrokanálových tepelných výměníků pouze zanedbatelnou část aditivní výroby.

Obrázek 6.4 prezentuje technologie a materiály nejčastěji využívané v této oblasti procesního průmyslu.



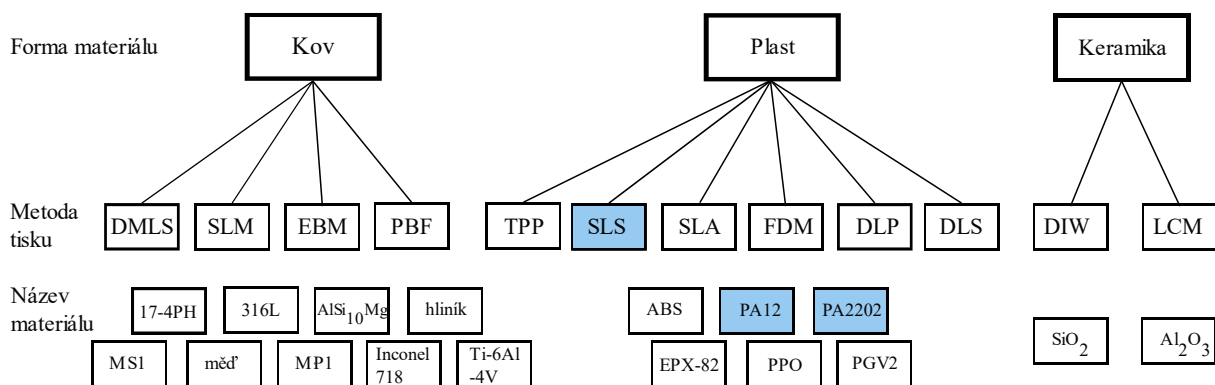
Obrázek 6.4 Schéma využití 3D tisku v oblasti mikrokanálů

6.5 Membránová destilace

V kapitole 3.4 Membránová destilace bylo zjištěno, že struktury TPMS výrazně zlepšují účinnost membránové destilace. Největším problémem byl vznik stagnačních zón v těchto strukturách, které se nedařilo odstranit. Prototypy a funkční celky byly nejčastěji tisknuty z plastových materiálů metodou SLS, potýkaly se však s velkou objemovou odchylkou, z čehož lze usoudit, že technologie SLS není vhodná pro přesnou výrobu struktur s takto malým rozlišením. Tento nedostatek by v budoucnu mohla pomoci odstranit metoda TPP, která by měla být schopna tisknout s rozlišením ve stovkách nm, což se jeví pro aplikace membránové destilace jako dostačující.

Podpořené projekty VaVaI se membránové destilaci věnují v oblasti filtrace nanočástic při samotném procesu 3D tisku, které jsou vyvíjeny za účelem ochrany obsluhy tiskáren. Na českém trhu se však dosud tisk kolon membránové destilace nevyskytuje.

Obrázek 6.5 prezentuje technologie a materiály nejčastěji využívané v této oblasti procesního průmyslu.



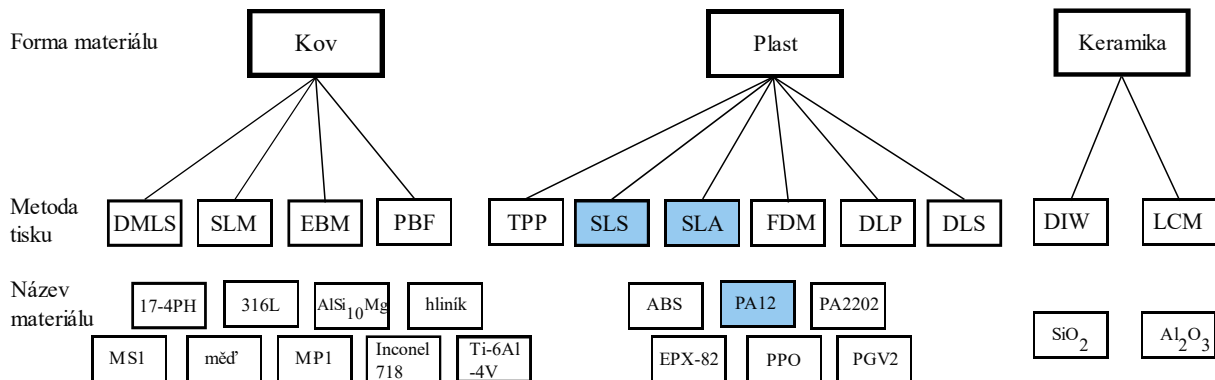
Obrázek 6.5 Schéma využití 3D tisku v oblasti membránové destilace

6.6 Strukturovaná výplň

V kapitole 3.5 Strukturovaná výplň bylo zjištěno, že aditivní výroba je zastoupena hlavně při tvorbě prototypů, a to z důvodu ideální tiskové metody (SLS), která dle dostupných informací poskytuje dostatečnou přesnost a chemickou odolnost. Díky tomu je možné simulovat podmínky skutečného provozu kovových součástí na plastových výplních. Pro aplikace tisku kovu zatím nebyla představena ideální metoda tisku, která by splňovala rozměrové požadavky. Pro aplikace, kde díky nízkým teplotám stačí použití plastové struktury, je často používána již zmíněná metoda SLS. Další výzkum by měl být zaměřen na tisk kovů a integraci těchto dílů do zkušebního či běžného provozu.

V podpořených projektech VaVaI nebyl nalezen žádný projekt, který by podporoval aditivní výrobu strukturovaných výplní. Na českém trhu toto odvětví také není zastoupeno.

Obrázek 6.6 prezentuje technologie a materiály nejčastěji využívané v této oblasti procesního průmyslu.



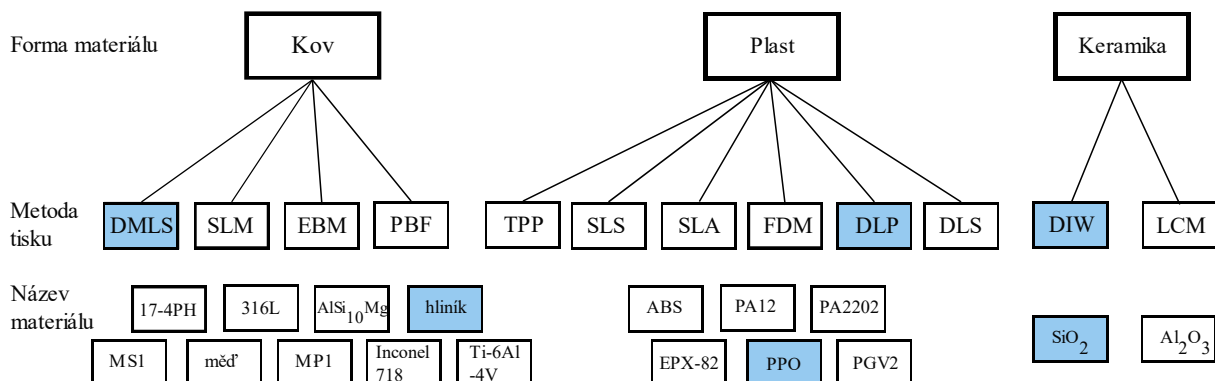
Obrázek 6.6 Schéma využití 3D tisku v oblasti strukturované výplně

6.7 Záchyt uhlíku

V kapitole 3.5.1 Záchyt uhlíku bylo zjištěno, že díky aditivním technologiím je možné integrovat několik funkcí kolon pro záchyt antropogenního CO₂ do jednoho zařízení (hlavně výměna tepla a samotnou strukturu pro záchyt). Integrace chladicích kanálů mezi kanály strukturované výplně, a tím zefektivnění procesu absorpce, by mělo být na prvním místě ve světovém vývoji v tomto oboru, jelikož technologie DMLS má poměrně vysokou úroveň připravenosti. Velkou výhodou aditivní výroby při tisku metodou adsorpce je možnost tisknout struktury, které neobsahují pojiva nutná při výrobě konvenční cestou. Pojiva nejsou schopny procesu adsorpce, a tak snižují účinnost kolony. Dalším směrem vývoje by mohl být tisk keramických výplní, zároveň však (nejčastěji používaná) technologie DIW stále vyžaduje vlastní optimalizaci a vývoj.

Na světovém trhu jsou obě výše zmíněné metody hojně zastoupeny, avšak na českém trhu dle zjištěných informací nejsou tisknuty výplně. Mezi podpořenými projekty VaVaI nebyl nalezen žádný týkající se této problematiky.

Obrázek 6.7 prezentuje technologie a materiály nejčastěji využívané v této oblasti procesního průmyslu.



Obrázek 6.7 Schéma využití 3D tisku v oblasti záchytu uhlíku

7 Závěr

V této bakalářské práci je pojednáno o problematice aditivní výroby v oblasti procesního průmyslu. Cílem práce bylo poskytnout přehled o dostupných aditivních technologiích a materiálech a porovnat příklady „dobré praxe“ aditivní výroby v tomto odvětví s konvenčními výrobními postupy.

V kapitole 2 Materiály a technologie byly uvedeny všechny materiály a technologie zjištěné jako používané v řešené oblasti. U všech těchto materiálů a technologií byly uvedeny pozitiva, negativa a limity použití.

V praktické části práce (kapitola 3 Přenos tepla a hmoty, příklady „dobré praxe“) byly prostřednictvím databáze Scopus a Google Scholar diskutovány příklady „dobré praxe“ použití 3D tištěných struktur v oblasti procesního inženýrství ve světě. Mezi řešené procesní celky byly zařazeny výměníky tepla (samostatné vyčleněnými kapitolami pasivní chladiče, mikrokanálové a makrokanálové výměníky tepla) a dále prvky pro membránovou destilaci a strukturované výplně (s opět vyčleněnou kapitolou záchytu antropenního CO₂).

V kapitole 4 3D tisk v českých projektech VaVaI byly uvedeny projekty státní podpory VaVaI zabývající se aditivní výrobou v oblasti procesního průmyslu, kde bylo zjištěno, že VaVaI se věnuje spíše samotnému vývoji materiálů než konkrétním metodám výroby nebo jejich výběru pro tištěné zařízení. Jediný dohledaný projekt, který se věnoval vývoji provedení konkrétního zařízení, se zabýval výměníkem tepla a jeho výrobou pomocí 3D tisku.

Kapitola 5 Situace v průmyslovém sektoru v České republice pojednávala o zastoupení aditivní výroby struktur procesního průmyslu na českém trhu. Bylo zjištěno, že na tuzemském trhu jsou tisknuty převážně pasivní chladiče. V oblasti mikrokanálů a minikanálů jsou poptávány prototypy, které ale netvoří významnou část produkce. Jediným z aktuálních trendů v oblasti aditivní výroby jsou díly využívající TPMS struktury, které jsou českými firmami tisknuty pouze jako větší díly nepoužívané pro oblasti řešené v této práci. Ostatním procesním aparátům a aplikacím se český trh nevěnuje, a to hlavně kvůli možnosti tisknout kovové materiály většinou jen technologií DMLS, která pro mnohé aplikace není dostačující.

V diskuzi (kapitola 6 Výstup rešerše použití 3D tisku v procesních aplikacích) byly nastíněny možné směry budoucího vývoje jednotlivých procesních celků. Z rešerše vyplynulo, že největší rozvoj zájmu výzkumníků zažívají TPMS struktury, jejichž aplikace na jednotlivé procesní celky je zatím často omezena možnostmi aditivní výroby kovů. Výroba keramických struktur také vyžaduje pozornost, přestože nejpoužívanější metoda tisku DIW vykazuje velké objemové odchylky od požadovaných rozměrů, které zvláště v aplikacích záchytu CO₂ nebo tepelných výměníků nyní omezují použití tištěných keramických dílů v praxi. Dalším směrem vývoje by měla být i nadále úprava povrchu pasivních chladičů, minikanálů a mikrokanálů, jelikož metody tisku v některých případech produkují povrch s vysokou drsností, která může společně s vhodným *postprocessingem* zlepšovat tepelné vlastnosti díky zvětšení teplosměnné plochy, avšak doposud chybí posun ke konvenčním rozměrům zařízení (např. vhodným napojením mini a mikro jednotek) a běžně požadovaným výkonům v procesním průmyslu. Jako slibná pro aplikace v oblasti membránové destilace se jeví technologie TPP, která je schopna tisknout řádově s větším rozlišením než ostatní metody tisku plastů. Aditivní výrobu plastů není nutné z hlediska procesního průmyslu dále rozvíjet, jelikož dostupné metody poskytují dostatečnou přesnost, kvalitu povrchu a jiné důležité vlastnosti. Stejně tak aditivní technologie v současné době poskytují dostatečně široké spektrum materiálů používaných v procesním průmyslu, a tak možné aplikace kvůli němu nejsou omezeny.

Seznam použité literatury

- [1] CHUA, Chee a Kah LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fifth edition. New Jersey: World Scientific, 2017. ISBN 978-981-3146-76-1.
- [2] AHMADI, Behzad, Joseph CESARANO, Kashif NAWAZ, Nikolas NINOS a Sajjad BIGHAM. A high-performance lung-inspired ceramic 3D-printed heat exchanger for high-temperature energy-efficient systems. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2023, **219**, 119378 [cit. 2023-05-19]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.119378
- [3] TIAN, Miaomiao, Hellen DE CONINCK, Junyong ZHU, Yatao ZHANG, Shushan YUAN, Brecht VAN HOOREWEDER, Peter VAN PUYVELDE a Bart VAN DER BRUGGEN. Exploring the potential usage of 3D printed membranes combined with PVDF coating in direct contact membrane distillation. *Desalination* [online]. 2021, **513**, 115134 [cit. 2023-05-21]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.115134
- [4] DEBROY, T., H.L. WEI, J.S. ZUBACK et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science* [online]. 2018, **92**, 201-204 [cit. 2023-05-25]. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
- [5] *ZPRACOVÁNÍ SLITINY 2618 POMOCÍ TECHNOLOGIE SELECTIVE LASER MELTING* [online]. Brno, 2015 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30309498.pdf>. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. DAVID PALOUŠEK, Ph.D.
- [6] SCHWENTENWEIN, Martin a Johannes HOMA. Additive Manufacturing of Dense Alumina Ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology* [online]. 2015, **12**(1), 1-7 [cit. 2023-05-19]. ISSN 1546542X. Dostupné z: doi:10.1111/ijac.12319
- [7] Materiálový slovník: ABS. In: *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno: Materialpro3D.cz, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [8] Prusa Tabulka Materiálů. In: *Prusa3d* [online]. Praha: Prusa research, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/materials?_gl=1*1m35hc5*_ga*MTk1MjA5Mjc1MC4xNjg0OTE5Njg2*_ga_3HK7B7RT5V*MTY4NDkyNzUwOS4yLjEuMTY4NDkyNzcwMy4wLjAuMA..
- [9] Materiálový slovník: Nylon (PA). In: *MATERIALPRO 3D* [online]. Brno: Materialpro3D.cz, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>
- [10] Know your plastic materials: PA 12 (Nylon 12). In: *Fast Radius* [online]. Michigan: Fast Radius, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.fastradius.com/resources/polyamide-12/>
- [11] Thermoplastic: PA 2202 Black. In: *3DCompare.com* [online]. USA, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://3dcompare.com/materials/product/pa-2202-black/>
- [12] Technipol: PA2202. In: *Material Data Center* [online]. Michigan: Altair, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Technipol/SIPOL+SPA/Technipol%C2%AE+PA+2202/3da37b1d/6808>
- [13] Materials: EPX 82. In: *Carbon3D* [online]. Redwood City: Carbon, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/materials/epx-82>
- [14] Carbon nabízí nové materiály pro 3D tisk. In: *CAD.cz* [online]. Brno: CAD, 2018 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/aktuality/77-aktuality/8802-carbon-nabizi-nove-materialy-pro-3d-tisk.html>
- [15] Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide). In: *MercK* [online]. Darmstadt: Merck KGaA, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/product/aldrich/181781>

- [16] ABS / PP resin voor DLP printers, PlasGRAY V2. In: *Schouten Group: Forming materials and systems* [online]. Syntecshop, 2022 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://syntecshop.com/abs-pp-resin-voor-dlp-printers-plasgray>
- [17] Asiga PlasGRAY V2 1L. In: *IMark.com* [online]. New York: iMark, 2021 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.imakr.com/asiga-resins/1444-asiga-plasclear-500ml-1444>
- [18] 17-4PH Stainless Steel. In: *Markforged* [online]. Markforged, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://markforged.com/materials/metals/17-4-ph-stainless-steel>
- [19] EN 1.4542 / 17-4 PH. In: *Sverdrup steel* [online]. Stavanger: Sverdrup Steel [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.sverdrupsteel.com/products/martensitic-alloys/alloy-1-4542-17-4-ph>
- [20] Nerezová ocel 1.4404 / AISI 316L. In: *AGST* [online]. Engelskirchen: AGST Draht & Biegetechnik GmbH [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.agst.de/4404?lang=cs>
- [21] Stainless Steel 316L 3D printing material. In: *Sculpteo* [online]. Villejuif: Sculpteo, c2009-2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/materials/dmls-material/dmls-stainless-steel-material/>
- [22] Aluminum (AlSi10Mg). In: *Materialise* [online]. Materialise, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/industrial/3d-printing-materials/aluminum>
- [23] About Aluminum (AlSi10Mg) – 3D Printing Material. In: *ShapeWays* [online]. Atlanta: Shapeways, c2008-2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.shapeways.com/materials/aluminum>
- [24] EOS Aluminum Powders for 3D Printing Applications. In: *EOS* [online]. EOS, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/3d-printing-materials/metals/aluminum-al>
- [25] Mechanické vlastnosti podle EN 573 – 3 (DIN 1725). In: *Hliník a jeho slitiny* [online]. Žatec: ALUMINIUM CENTRUM [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://www.aluminiumcentrum.com/index.php/mechanicke-vlastnosti-al-slitin/>
- [26] Maraging Steel (MS1). In: *Proto3000* [online]. Proto3000, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://proto3000.com/materials/dmls-maraging-steel-ms1/>
- [27] Material data sheet: EOS MaragingSteel MS1. In: *EOS* [online]. EOS, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/werkzeugstahl_ms1_cx/ms1/ms-ms1-m290_material_data_sheet_06-22_en.pdf
- [28] Introducing 3D Printed Copper. In: *Markforged* [online]. Markforged, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/blog/3d-printed-copper>
- [29] 3D Printing with Copper Cu, CuCP, CuCrZr. In: *EOS* [online]. EOS, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/3d-printing-materials/metals/copper>
- [30] 3D printing in Copper. In: *Beamlar* [online]. Beamlar (Netherlands): Beamlar, 2021 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.beamlar.com/3d-printing-capabilities/materials/copper/>
- [31] CONSTANTIN, Loic, Zhipeng WU, Nan LI, Lisha FAN, Jean-François SILVAIN a Yong LU. Laser 3D printing of complex copper structures. *Additive Manufacturing* [online]. 2020, **35**, 101268 [cit. 2023-05-21]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101268
- [32] ZHANG, Shasha, Haihong ZHU, Luo ZHANG, Wenqi ZHANG, Huanqing YANG a Xiaoyan ZENG. Microstructure and properties of high strength and high conductivity Cu-Cr alloy components fabricated by high power selective laser melting. *Materials Letters* [online]. 2019, **237**, 306-309 [cit. 2023-05-25]. ISSN 0167577X. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2018.11.118
- [33] Co-Cr Alloy (MP1). In: *ZRapid Tech* [online]. Suzhou (Jiangsu Province): ZRapid, c2011-2019 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: http://www.zero-tek.com/en/material_slm.html

- [34] EOS CobaltChrome MP1. In: *EOS* [online]. EOS, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://store.eos.info/products/eos-cobaltchrome-mp1>
- [35] EOS CobaltChrome MP1 for EOSINT M 270. In: *EOS* [online]. EOS, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.prodways.com/wp-content/uploads/2020/07/CoCr_MP1.pdf
- [36] Inconel (IN718). In: *Materialise* [online]. Materialise, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/industrial/3d-printing-materials/inconel-718>
- [37] Titanium (Ti₆Al₄V). In: *Materialise* [online]. Materialise, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/industrial/3d-printing-materials/titanium>
- [38] Ti 6Al 4V (Grade 5) Titanium Alloy Data Sheet. In: *Kyocera SGS Europe* [online]. Wokingham: KYOCERA SGS Precision Tools Europe, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://kyocera-sgstool.co.uk/titanium-resources/titanium-information-everything-you-need-to-know/ti-6al-4v-grade-5-titanium-alloy-data-sheet/>
- [39] Is 3D printing with Alumina possible?. In: *Beamlar* [online]. Beamlar (Netherlands): Beamlar, 2021 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.beamlar.com/is-3d-printing-with-alumina-possible/>
- [40] Oxid hlinitý. In: *3R Systems* [online]. Jaroměř: 3R Systems, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.3rsystems.cz/oxid-hlinity>
- [41] Is 3D printing with Silica possible?. In: *Beamlar* [online]. Beamlar (Netherlands): Beamlar, 2021 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.beamlar.com/is-3d-printing-with-silica-possible/>
- [42] 3D-printed silica with nanoscale resolution. In: *Nature Materials* [online]. California: Springer Nature, 2021 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41563-021-01111-2>
- [43] WICHTERLE, Kamil a Marek VEČEŘ. *Základy procesního inženýrství: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2580-9.
- [44] DUTKOWSKI, Krzysztof, Marcin KRUZEL a Krzysztof ROKOSZ. Review of the State-of-the-Art Uses of Minimal Surfaces in Heat Transfer. *Energies* [online]. 2022, **15**(21), 7994 [cit. 2023-05-20]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15217994
- [45] PENG, , Feng GAO a Wenjing HU. Design, Modeling and Characterization on Triply Periodic Minimal Surface Heat Exchangers with Additive Manufacturing. *2019 International Solid Freeform Fabrication Symposium* [online]. University of Texas at Austin, 2019, 1-13 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:10.26153/tsw/17483
- [46] DIXIT, Tisha, Ebrahim AL-HAJRI, Manosh PAUL, Perumal NITHIARASU a S. KUMAR. High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2022, **210**, 1-9 [cit. 2023-05-20]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118339
- [47] WANG, Gang, Yu GU, Luhaibo ZHAO, Jin XUAN, Gaofeng ZENG, Zhiyong TANG a Yuhan SUN. Experimental and numerical investigation of fractal-tree-like heat exchanger manufactured by 3D printing. *Chemical Engineering Science* [online]. 2019, **195**, 250-261 [cit. 2023-05-20]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2018.07.021
- [48] ZILIO, G., M.J. TEIXEIRA, M.V.V. MORTEAN, F.G. BRANDÃO, T.T. PONTIN, J.L.G. OLIVEIRA a K.V. PAIVA. Structural analysis of compact heat exchanger samples fabricated by additive manufacturing. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2022, **199**, 104714 [cit. 2023-05-20]. ISSN 03080161. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpvp.2022.104714
- [49] HANSJOSTEN, Edgar, Achim WENKA, Andreas HENSEL, Walther BENZINGER, Michael KLUMPP a Roland DITTMAYER. Custom-designed 3D-printed metallic fluid guiding elements for enhanced heat transfer at low pressure drop. *Chemical Engineering and Processing - Process*

- Intensification* [online]. 2018, **130**, 119-126 [cit. 2023-05-20]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2018.05.022
- [50] WANG, Chun-Sheng, En-Shuo WANG, Yu-Jie HUANG a Tong-Miin LIOU. PIV and IRT measurements of hydrothermal performance in a U-shaped heat exchanger with 3D printed detached curved ribs. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2023, **201**, 123562 [cit. 2023-05-20]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123562
- [51] SCHEITHAUER, Uwe, Eric SCHWARZER, Tassilo MORITZ a Alexander MICHAELIS. Additive Manufacturing of Ceramic Heat Exchanger: Opportunities and Limits of the Lithography-Based Ceramic Manufacturing (LCM). *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2018, **27**(1), 14-20 [cit. 2023-05-20]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-017-2843-z
- [52] REYNOLDS, Benjamin. *Simulation of flow and heat transfer in 3D printable triply periodic minimal surface heat exchangers* [online]. Christchurch, 2020 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/102500>. Disertace. University of Canterbury.
- [53] GHADYANLOU, Farhad, Ahmad AZARI a Ali VATANI. A Review of Modeling Rotating Packed Beds and Improving Their Parameters: Gas–Liquid Contact. *Sustainability* [online]. 2021, **13**(14), 8046 [cit. 2023-05-22]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su13148046
- [54] LIU, S. a M. SAKR. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **19**, 64-81 [cit. 2023-05-20]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.11.021
- [55] ALSALLA, Hamza, Christopher SMITH a Liang HAO. Effect of build orientation on the surface quality, microstructure and mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2018, **24**(1), 9-17 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-04-2016-0068
- [56] FASANO, Matteo, Luigi VENTOLA, Flaviana CALIGNANO, Diego MANFREDI, Elisa AMBROSIO, Eliodoro CHIAVAZZO a Pietro ASINARI. Passive heat transfer enhancement by 3D printed Pitot tube based heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer* [online]. 2016, **74**, 36-39 [cit. 2023-05-21]. ISSN 07351933. Dostupné z: doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.012
- [57] BORNOFF, Robin a John PARRY. *An additive design heatsink geometry topology identification and optimisation algorithm* [online]. IEEE, 2015, 303-308 [cit. 2023-05-21]. ISBN 978-1-4799-8600-2. Dostupné z: doi:10.1109/SEMI-THERM.2015.7100177
- [58] WU, Tong, Burak OZPINECI, Madhu CHINTHAVALI, ZHIQIANG WANG, Suman DEBNATH a Steven CAMPBELL. Design and optimization of 3D printed air-cooled heat sinks based on genetic algorithms. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* [online]. IEEE, 2017, 650-655 [cit. 2023-05-21]. ISBN 978-1-5090-3953-1. Dostupné z: doi:10.1109/ITEC.2017.7993346
- [59] IRADUKUNDA, Ange-Christian, Andres VARGAS, David HUITINK a Danny LOHAN. Transient thermal performance using phase change material integrated topology optimized heat sinks. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2020, **179**, 115723 [cit. 2023-05-21]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115723
- [60] SHAMVEDI, Deepak, Oliver MCCARTHY, Eoghan O'DONOGHUE, Cyril DANILENKOFF, Paul O'LEARY a Ramesh RAGHAVENDRA. 3D Metal printed heat sinks with longitudinally varying lattice structure sizes using direct metal laser sintering. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2018, **13**(4), 301-310 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2018.1479528
- [61] AL-KETAN, Oraib, Mohamed ALI, Mohamad KHALIL, Reza ROWSHAN, Kamran KHAN a Rashid ABU AL-RUB. Forced Convection Computational Fluid Dynamics Analysis of

- Architected and Three-Dimensional Printable Heat Sinks Based on Triply Periodic Minimal Surfaces. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* [online]. 2021, **13**(2), 021010 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1948-5085. Dostupné z: doi:10.1115/1.4047385
- [62] KANDLIKAR, Satish G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2002, **26**(2-4), 389-407 [cit. 2023-05-21]. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/S0894-1777(02)00150-4
- [63] COLLINS, Ivel, Justin WEIBEL, Liang PAN a Suresh GARIMELLA. Evaluation of Additively Manufactured Microchannel Heat Sinks. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* [online]. 2019, **9**(3), 446-457 [cit. 2023-05-21]. ISSN 2156-3950. Dostupné z: doi:10.1109/TCPMT.2018.2866972
- [64] RASTAN, Hamidreza, Amir ABDI, Bejan HAMAWANDI, Monika IGNATOWICZ, Josua MEYER a Björn PALM. Heat transfer study of enhanced additively manufactured minichannel heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2020, **161**, 120271 [cit. 2023-05-21]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120271
- [65] IBRAHIM, Omar, J. MONROE, Scott THOMPSON, Nima SHAMSAEI, Hassina BILHEUX, Alaa ELWANY a Linkan BIAN. An investigation of a multi-layered oscillating heat pipe additively manufactured from Ti-6Al-4V powder. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2017, **108**, 1036-1047 [cit. 2023-05-21]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.063
- [66] STIMPSON, Curtis, Jacob SNYDER, Karen THOLE a Dominic MONGILLO. Roughness Effects on Flow and Heat Transfer for Additively Manufactured Channels. *Journal of Turbomachinery* [online]. 2016, **138**(5), 051008 [cit. 2023-05-21]. ISSN 0889-504X. Dostupné z: doi:10.1115/1.4032167
- [67] KADIVAR, Mohammadreza, David TORMEY a Gerard MCGRANAGHAN. The impact of roughness parameters on laminar convective heat transfer applied to additive manufactured minichannels. *2022 28th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)* [online]. IEEE, 2022, 1-6 [cit. 2023-05-21]. ISBN 978-1-6654-9229-4. Dostupné z: doi:10.1109/THERMINIC57263.2022.9950602
- [68] SHEN, Han, Gongnan XIE, Chi-Chuan WANG a Huanling LIU. Experimental and numerical examinations of thermofluids characteristics of double-layer microchannel heat sinks with deflectors. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2022, **182**, 121961 [cit. 2023-05-21]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121961
- [69] RASOULI, Erfan, Emily FRICKE a Vinod NARAYANAN. High efficiency 3-D printed microchannel polymer heat exchangers for air conditioning applications. *Science and Technology for the Built Environment* [online]. 2022, **28**(3), 289-306 [cit. 2023-05-22]. ISSN 2374-4731. Dostupné z: doi:10.1080/23744731.2022.2026693
- [70] KIRSCH, Kathryn a Karen THOLE. Heat Transfer and Pressure Loss Measurements in Additively Manufactured Wavy Microchannels. *Journal of Turbomachinery* [online]. 2017, **139**(1), 011007 [cit. 2023-05-22]. ISSN 0889-504X. Dostupné z: doi:10.1115/1.4034342
- [71] KIRSCH, Kathryn a Karen THOLE. Pressure loss and heat transfer performance for additively and conventionally manufactured pin fin arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2017, **108**, 2502-2513 [cit. 2023-05-22]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.095
- [72] ARIE, Martinus, Amir SHOOSHARI a Michael OHADI. Experimental characterization of an additively manufactured heat exchanger for dry cooling of power plants. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2018, **129**, 187-198 [cit. 2023-05-22]. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.09.140
- [73] XIAN, Haizhen, Wenjin XU, Yuning ZHANG, Xiaoze DU a Yongping YANG. Thermal characteristics and flow patterns of oscillating heat pipe with pulse heating. *International Journal*

- of Heat and Mass Transfer* [online]. 2014, **79**, 332-341 [cit. 2023-05-21]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.002
- [74] KADIVAR, Mohammadreza, David TORMEY a Gerard MCGRANAGHAN. CFD of roughness effects on laminar heat transfer applied to additive manufactured minichannels. *Heat and Mass Transfer* [online]. 2022, 1470 [cit. 2023-05-21]. ISSN 0947-7411. Dostupné z: doi:10.1007/s00231-022-03268-1
- [75] VAFAI, Kambiz a Lu ZHU. Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1999, **42**(12), 2287-2297 [cit. 2023-05-21]. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/S0017-9310(98)00017-9
- [76] THOMAS, Navya, Jaichander SWAMINATHAN, Guillermo ZARAGOZA, Rashid ABU AL-RUB, John LIENHARD V a Hassan ARAFAT. Comparative assessment of the effects of 3D printed feed spacers on process performance in MD systems. *Desalination* [online]. 2021, **503**, 114940 [cit. 2023-05-20]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.114940
- [77] THOMAS, Navya, Nurshaun SREEDHAR, Oraib AL-KETAN, Reza ROWSHAN, Rashid ABU AL-RUB a Hassan ARAFAT. 3D printed triply periodic minimal surfaces as spacers for enhanced heat and mass transfer in membrane distillation. *Desalination* [online]. 2018, **443**, 256-271 [cit. 2023-05-20]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2018.06.009
- [78] THOMAS, Navya, Nurshaun SREEDHAR, Oraib AL-KETAN, Reza ROWSHAN, Rashid ABU AL-RUB a Hassan ARAFAT. 3D printed spacers based on TPMS architectures for scaling control in membrane distillation. *Journal of Membrane Science* [online]. 2019, **581**, 38-49 [cit. 2023-05-20]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2019.03.039
- [79] JASTŘEMBSKÁ, Karolína. *Separace organických látek s využitím reverzní osmózy a diafiltrace* [online]. Pardubice, 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/80455/09_08_2022_disertacni_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Disertace. Univerzita Pardubice.
- [80] NEUKÄUFER, Johannes, Florian HANUSCH, Martin KUTSCHERAUER, Sebastian REHFELDT, Harald KLEIN a Thomas GRÜTZNER. Methodology for the Development of Additively Manufactured Packings in Thermal Separation Technology. *Chemical Engineering Technology* [online]. 2019, **42**(9), 1970-1977 [cit. 2023-05-22]. ISSN 0930-7516. Dostupné z: doi:10.1002/ceat.201900220
- [81] GŁADYSZEWSKI, Konrad a Mirko SKIBOROWSKI. Additive manufacturing of packings for rotating packed beds. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* [online]. 2018, **127**, 1-9 [cit. 2023-05-22]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2018.02.024
- [82] MIRAMONTES, Eduardo, Lonnie LOVE, Canhai LAI, Xin SUN a Costas TSOURIS. Additively manufactured packed bed device for process intensification of CO₂ absorption and other chemical processes. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2020, **388**, 124092 [cit. 2023-05-22]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.124092
- [83] TANG, Meng, Shaofeng ZHANG, Shijie DAI, Hongkai WANG a Bingfang LIU. Pressure drops and mass transfer of a 3D printed tridimensional rotational flow sieve tray in a concurrent gas-liquid column. *Separation and Purification Technology* [online]. 2022, **287**, 120549 [cit. 2023-05-22]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2022.120549
- [84] LEE, Junghyun, Chong CHUAH, Wen TAN, Juha SONG a Tae-Hyun BAE. 3D-printed monolithic porous adsorbents from a solution-processible, hypercrosslinkable, functionalizable polymer. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2022, **427**, 130883 [cit. 2023-05-22]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2021.130883
- [85] SLUIJTER, S.N., J. BOON, J. JAMES et al. 3D-printing of adsorbents for increased productivity in carbon capture applications (3D-CAPS). *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2021, **112**, 103512 [cit. 2023-05-22]. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2021.103512

- [86] OLAJIRE, Abass A. CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review. *Energy* [online]. 2010, **35**(6), 2610-2628 [cit. 2023-05-22]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2010.02.030
- [87] GUO, Xiaofeng, Yilin FAN a Lingai LUO. Multi-channel heat exchanger-reactor using arborescent distributors: A characterization study of fluid distribution, heat exchange performance and exothermic reaction. *Energy* [online]. 2014, **69**, 728-741 [cit. 2023-05-22]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2014.03.069
- [88] Národní výzkumná a inovační strategie pro inteligentní specializaci České republiky 2021 – 2027: Příloha 1. Karty tematických oblastí. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha: MPO ČR, c2006-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/podnikani/ris3-strategie/dokumenty/2021/1/B_Priloha-1-Karty-tematickych-oblasti.pdf
- [89] Statistiky OP PIK. In: *Agentura pro podnikání a inovace* [online]. Praha: Agentura pro podnikání a inovace, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.agentura-api.org/cs/op-pik-obecne/statistiky/>
- [90] TK01020187 - KONFORMNÍ TEPELNÉ VÝMĚNÍKY ZA POUŽITÍ ADM A PLAZMATICKÝCH POVLAKOVÁNÍ (2018-2022, TA0/TK). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, c2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=2&h=TK01020187>
- [91] TJ02000170 - FILTRACE NANOČÁSTIC Z 3D TISKU POMOCÍ MEMBRÁN Z DUTÝCH VLÁKEN (2019-2021, TA0/TJ). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, c2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=2&h=TJ02000170>
- [92] FV10302 - PROGRESIVNÍ ŘEŠENÍ HYDRAULICKÉHO DESIGNU ČERPACEL EXTREMNÍCH VÝKONŮ PRO 'VODA-SUCHO' (2016-2020, MPO/FV). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, c2016-2026 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=0&h=FV10302>
- [93] TH02010303 - 3D TISK FUNKČNÍCH DÍLŮ VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ DMLS Z MATERIÁLU INCONEL 718 PRO ENERGETICKÝ PRŮMYSL A VÝZKUM JEJICH KONEČNÝCH VLASTNOSTÍ (2017-2020, TA0/TH). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, c2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=3&h=TH02010303>
- [94] TJ01000090 - VÝZKUM MOŽNOSTÍ ADITIVNÍ VÝROBY (3D TISKU) PRO EXPANDÉRY DO NÍZKOTEPLNÍCH APLIKACÍ V DECENTRALIZOVANÉ ENERGETICE (2017-2019, TA0/TJ). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, c2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=4&h=TJ01000090>
- [95] TK04020056 - VYSOKOTEPLNÍ ODOLNÉ MATERIÁLY PRO KOMPONENTY TEPELNÝCH OKRUHŮ (2022-2025, TA0/TK). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, 2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=4&h=TK04020056>
- [96] TK05020070 - 3D TISK KERAMICKÝCH KOMPONENT PRO POKROČILÉ APLIKACE V ENERGETICE (2023-2025, TA0/TK). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, c2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=4&h=TK05020070>

- [97] EG20_321/0024981 - VÝZKUM VLIVU OPĚTOVNÉHO VYUŽITÍ KOVOVÉHO ODPADU GENEROVANÉHO PŘI ADITIVNÍ VÝROBĚ NA SPOLEHLIVOST A FUNKČNOST VYRÁBĚNÝCH DÍLŮ A MOŽNOST ELIMINACE EKOLOGICKÉ ZÁTĚŽE SNÍŽENÍM MNOŽSTVÍ LIKVIDOVANÉHO NEBEZPEČNÉHO ODPADU A EMISÍ CO₂ (2021-2023, MPO/EG). In: *INFORMAČNÍ SYSTÉM VÝZKUMU, VÝVOJE A INOVACÍ* [online]. Praha: Úřad vlády České republiky, 2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: https://www.isvavai.cz/cep?s=rozsirene-vyhledavani&ss=detail&n=1&h=EG20_321%2F0024981
- [98] *ONE3D* [online]. Mohelnice: ONE3D, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/>
- [99] *Innomia* [online]. Jaroměř: Innomia, 2015 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.innomia.cz/>
- [100] Protolab: Služby. In: *TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://protolab.vsb.cz/cs/sluzby/>
- [101] *3R Systems* [online]. Jaroměř: 3R Systems, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.3rsystems.cz/>

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
°C	stupeň Celsia
μm	mikrometr
3D	trojrozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ADAM	<i>Atomic Diffusion Additive Manufacturing</i>
AM	<i>additive manufacturing</i>
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
atp.	a tak podobně
CAD	<i>computer-aided design</i>
CCS	<i>carbone capture and storage</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CT	<i>Computer Tomography</i>
ČR	Česká republika
DIW	<i>Direct Ink Writting</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DLS	<i>Digital Light Synthesis</i>
DMD	<i>digital micromirror device</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
FGE	<i>fluid flow guiding elements</i>
FGU	<i>fluid flow guiding unit</i>
FTHX	<i>finned tube heat exchanger</i>
GA	<i>genetic algorithm</i>
GV	generátor virů
h	hodina
HRC	měření tvrdosti dle Rockwella
HV	měření tvrdosti dle Vickerse
in	palec
K	kelvin
Kč	Česká koruna
kg	kilogram
kol.	kolektiv
kPa	kilopascal
l/s	litr za sekundu
LCM	<i>Lithography-based Ceramics Manufacturing</i>
m	metr
m/s	metr za sekundu
MD	membránová destilace
mil.	milión
min	minuta
ml	mililitr
ml/min	mililitr za minutu
mm	milimetr
mm/s	milimetr za sekundu
mm/s	milimetr za sekundu
MOFs	<i>metal-organic structures</i>
MPa	megapascal
MPHX	<i>micro-pin heat exchanger</i>

např.	například
nm	nanometr
NURBS	<i>non-uniform rational basic spline</i>
obj. %	objemové procento
OHP	<i>oscillation heat pipes</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PBF-EB	<i>Powder Bed Fusion-Electron Beam</i>
PBF-L	<i>Powder Bed Fusion-Laser</i>
PCM	<i>phase exchange material</i>
PCHE	<i>printed circuit heat exchanger</i>
ppm	<i>parts per milion</i>
resp.	respektive
s	sekunda
SD	<i>Schwarz Diamond</i>
SG	<i>Schwarz Gyroid</i>
SLA	<i>Stereolitography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
STL	<i>Standart Triangle Language</i>
tj.	to je
TPF	<i>thermal power factor</i>
TPMS	<i>triple periodic minimal surfaces</i>
TPP	<i>Two-Photon Polymerisation</i>
TRST	<i>tridimensional rotational flow sieve tray</i>
tzv.	takzvaný
UV	ultrafialové
W	watt
W/(m ² K)	watt na metr krychlový a kelvin
W/mK	watt na metr a kelvin
α	úhlem konvergence žebor
β	úhel divergence žebor
γ	gama záření

Symbol	Jednotka	Význam
D_h	[mm]	hydraulický průměr
h	[W/(m ² .K)]	součinitel přestupu tepla
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
Q	[J]	tepelný tok přenášený v mikrokanálovém výměníku tepla
Ra	[μ m]	průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	plocha tepelného výměníku
T_r	[W/K]	tepelná propustnost
U	[W/(m ² .K)]	součinitel prostupu tepla
α	[°]	úhlem konvergence žebor
β	[°]	úhel divergence žebor
ΔT	[K]	střední teplotní spád