

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Patrik Dobrovszký

Autoreferát dizertačnej práce

**Aplikácia aditívnych technológií vo výrobe komponentov nástrojov na
vstrekovanie plastov**

na získanie akademického titulu: doktor („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, dňa 26.5.2024

Dizertačná práca bola vypracovaná na

Ústave výrobných technológií, Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave,
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ:

Ing. Patrik Dobrovszký

Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ulica Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ:

doc. Ing. Jozef Bílik, PhD.

Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ulica Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Oponenti:

.....
.....
.....

.....
.....
.....

(meno a priezvisko školiteľa a oponentov s uvedením ich titulov a názov ustanovizne,
s ktorou je školiteľ, resp. oponent v pracovnom pomere)

Autoreferát bol rozoslaný:
(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňao h.

na Ústav výrobných technológií
MTF STU
Pavilón T
Ulica Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan Materiálovotechnologickej fakulty STU

Obsah

ÚVOD	4
1 APLIKÁCIA ADITÍVNYCH TECHNOLOGIÍ DO PROCESOV NÁVRHU A VÝROBY VSTREKOVACÍCH FORIEM	5
1.1 Návrh foriem s konformným chladením.....	5
1.2 TPMS Štruktúry.....	6
1.2.1 Mechanické vlastnosti TPMS štruktúr	7
1.2.2 Využitie TPMS štruktúr v chladiacich aplikáciách	8
1.2.3 Profilované chladiace kanály	9
1.2.4 Generatívny dizajn v procese návrhu foriem	9
2 STANOVENIE CIEĽOV DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	10
2.1 Porovnanie chladiaceho výkonu konvenčných konformných a profilovaných konformných chladiacich kanálov	10
2.2 Aplikácia TPMS štruktúr pri chladení vstrekovacej formy.....	10
2.3 Aplikácia TPMS štruktúr a Generatívneho dizajnu pri navrhovaní vstrekovacej formy ..	11
2.4 Zistiť vhodnosť technológie Binder Jetting pri výrobe vstrekovacích nástrojov	13
3. NÁVRH EXPERIMENTOV	14
3.1 Návrh vstrekovacích foriem s profilovanými konformnými kanálmi	14
3.2 Návrh vstrekovacích foriem s TPMS štruktúrami.....	14
3.3 Návrh vstrekovacej formy generatívnym dizajnom.....	15
3.4 Simulácia procesu chladenia.....	16
3.5 Výroba foriem.....	17
3.6 Zhodnotenie a experimentálne skúšanie vyrobených foriem	17
4. VÝSLEDKY A DISKUSIA.....	19
4.1 Výsledky simulácií chladenia.....	19
4.2 Vybrané výsledky skúšania foriem	20
4.3 Vlastnosti vyrobených foriem.....	23
4.4 Zhrnutie	25
PRÍNOSY PRÁCE	27
Možné pokračovanie výskumu v budúcnosti	28
ZÁVER.....	29
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	30

ÚVOD

Plastové výrobky sú neodmysliteľnou súčasťou sveta okolo nás. Prvé termoplasty boli vyvinuté už v druhej polovici 19. storočia a spolu s nimi boli vyvinuté prvé stroje na vstrekovanie plastov. Bratia Isaiah a John Hyatt v roku 1872 patentovali prvý stroj na vstrekovanie celulóznych materiálov. 20. storočie zažilo veľký rozmach v odvetví vývoja a výroby polymérov. Leo Baekeland vyvinul Bakelit v roku 1907. Následne v 1927 bol vyvinutý Polyvinyl chlorid (PVC). V rokoch 1930 – 1940 boli vyvinuté Nylon (PA) a Polystyrén (PS). Počas druhej svetovej vojny a v povojnovom období, bola vyvinutá väčšina dnes najpoužívanejších polymérnych materiálov ako Polyetylén (PE), Akrylonitril - butadiénstyrén (ABS), Polypropylén (PP), Polyetylén tereftalát (PET), Polykarbonát (PC) a veľa iných [1].

Vývoj a výroba nových polymérnych materiálov je stále náročnejšia a vývoj sa uberať najmä smerom kombinácie už existujúcich polymérov popr. vmiešavaním rôznych prísad. Najrozšírenejšia technológia na spracovanie a výrobu plastových výrobkov je momentálne technológia vstrekovania plastov. Princíp technológie spočíva vo vstrekaní roztaveného plastu do uzatvorenej formy pod vysokým tlakom a následným vychladnutím plastu v dutine formy. Na formy využívané pri vstrekaní plastov sa kladú vysoké nároky. Dutiny foriem musia byť vyhotovené s vysokou presnosťou. Formy musia mať chladiace kanály a vo veľa prípadoch aj pohyblivé a zasúvacie sa prvky ako posuvné jadrá. Formy musia byť vyrobené z kvalitných materiálov aby vydržali tisíce a niekedy až milióny cyklov. Všetky tieto požiadavky na vstrekovacie formy majú za následok to, že formy sú vo veľa prípadoch drahšie ako samotné stroje do ktorých sú usadené. Ďalšou nevýhodou je doba výroby formy. Čím sú prísnejšie požiadavky, tým trvá výroba formy dlhšie. V neposlednom rade netreba zabudnúť ani na to, že rovnako ako vývoj súčiastky, tak aj vývoj formy nie je priamy proces. V štádiu vývoja sa väčšinou najprv vyvinie viacero prototypov než sa dá dopracovať k vyhovujúcej forme.

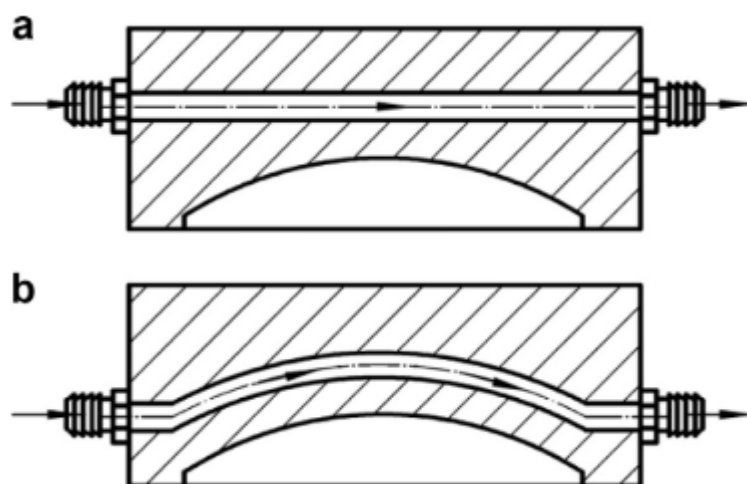
Zapracovaním aditívnej výroby do procesu návrhu a výroby foriem na vstrekovanie by sa dal proces urýchliť a spraviť aj ekonomicky atraktívnejším. Taktiež je možné využiť metódy kovovej aditívnej výroby na priamu výrobu vstrekovacích foriem. Vytváranie formy vrstvením materiálu umožňuje výrobu konvenčne nevyrobitelných prvkov, ktoré majú potenciál zlepšiť vlastnosti vyrobených foriem.

1 APLIKÁCIA ADITÍVNYCH TECHNOLOGIÍ DO PROCESOV NÁVRHU A VÝROBY VSTREKOVACÍCH FORIEM

1.1 Návrh foriem s konformným chladením

Aditívna výroba ponúka širokú škálu možností jej aplikácie do procesu návrhu a výroby foriem a plastových výrobkov. Ako jedno z možných využití aditívnej výroby je priama výroba nástrojov na vstrekovanie. Aditívna výroba vďaka princípu výroby po vrstvách umožňuje výrobu tvarových prvkov, ktoré by boli konvenčnými technológiami nevyrobitelné, alebo vyrobitelné len veľmi náročne. Ako príklad takýchto prvkov sa dá uviesť konformný chladiaci kanál.

Uvažujme rovný vrtný kanál, ktorý je určený na chladenie zakrivenej dutiny, ako je znázornené na obrázku č. 1 [2]. Vzďialenosť medzi rovným kanálom a zakriveným povrchom dutiny sa pozdĺž kanála mení, čo vyvoláva rozdielnu rýchlosť chladenia na povrchu dutiny, a tým aj teplotnú nerovnomernosť, ktorá následne vedie k rozdielnemu zmršťovaniu a deformácii vyrobeného dielu [3].



Obrázok 1 Rovný a konformný kanál [2]

Na zmiernenie deformácií a skrátenie času chladenia boli v 90. rokoch 20. storočia navrhnuté konformné chladiace kanály (CC). Kanál CC je navrhnutý ako zakrivený kanál s konštantnou vzdialenosťou od povrchu dutiny [2]. To zabezpečuje rovnomernú rýchlosť chladenia pozdĺž kanála a skracuje vzdialenosť medzi kanálom a povrchom dutiny. Použitie kanálov CC tak môže výrazne zvýšiť chladiaci výkon formy tým, že sa znížia teplotné rozdiely a indukované deformácie [4] a výrazne sa zvýši účinnosť chladenia (skrátí sa čas nábehu aj chladenia) [5,6].

Ciele pri návrhu a optimalizácii kanálov CC sú zabezpečiť rovnomerné rozloženie teploty, skrátiť čas chladenia potrebný na dosiahnutie teploty vyhadzovania a minimalizovať zmršťovanie a deformácie dielov [7,8].

Výsledky simulácie metódou konečných prvkov (MKP) ukázali, že hoci prietok chladiacej kvapaliny v kanáloch CC je menej ako polovičný v porovnaní s priamymi chladiacimi kanálmi, čas cyklu dosiahnutý prvou metódou môže byť nižší ako dve tretiny druhej možnosti, pretože účinnosť chladenia je oveľa vyššia [9].

1.2 TPMS Štruktúry

Zníženie hmotnosti výrobkov a výrobných nákladov sú niektoré výhody aditívnej oproti konvenčnej výrobe [10-14]. Postupne sa do popredia dostávajú mriežkové štruktúry, ktoré sa využívajú na získanie lepších vlastností súčiastok v rôznych aplikáciách [10-14]. Podľa konštrukcie jednotkových buniek možno mriežkové štruktúry rozdeliť na štruktúry založené na vzperách a TPMS [15-18].

V prípade štruktúr založených na vzperách, konštruktéri používajú softvér na počítačom podporované navrhovanie (CAD) na vytvorenie rôznych geometrických štruktúr. Vlastnosti štruktúr na báze vzpier sa potom môžu analyzovať výpočtovými alebo experimentálnymi metódami.

Ďalším typom mriežkových štruktúr je trojperiodický minimálny povrch, ďalej len TPMS (Triply periodic minimal surface). TPMS sa skladá z nekonečných, seba nepretínajúcich sa periodických plôch v troch hlavných smeroch [19]. Prvým príkladom TPMS bola Diamantová plocha, ktorú objavil Schwarz [20] v roku 1865, a Neoviusova plocha, ktorú objavil Neovius v roku 1833 [21]. Ďalej objavili niekoľko minimálnych povrchov, napríklad Primitívny a Šesťuholníkový. Takmer o storočie neskôr, v roku 1970, Schoen predstavil mnoho typov minimálnych plôch spolu s asi najznámejšou Gyroidnou minimálnou plochou [22].

TPMS je charakterizovaný ako minimálny povrch, pretože zakrivenie pozdĺž hlavných krivostných rovin je v každom bode rovnaké a opačné, čím je stredná krivosť nulová ($H = 0$). Tu platí $H = (k_1 + k_2)/2$, kde k_1 a k_2 sú maximum a minimum normálovej krivosti v danom bode povrchu. Keď je minimálny povrch nekonečný a periodický v troch nezávislých smeroch, nazýva sa TPMS.

Matematické algoritmy sú presnou metódou na navrhovanie štruktúr založených na TPMS na základe definície minimálneho povrchu. TPMS možno navrhovať rôznymi metódami, avšak rovnica úrovne odvodená zo súčtu definovaného v termínoch Fourierovho radu [23] je najjednoduchším a najrozšírenejším prístupom na vytváranie štruktúr podobných minimálnemu povrchu [23,25]. Rovnice množiny úrovní sú skupinou trojrozmerných trigonometrických funkcií, ktoré spĺňajú kritérium rovnosti $\phi(x,y,z) = c$.

Rovnice množiny úrovní Schwarz-Primitive (Primitív), Schwarz-Diamond (Diamant) a Schoen-Gyroid (Gyroid) ktoré sa zvyčajne nachádzajú v literatúre, sú opísané v rovniciach (1 - 3). Príslušné povrchy sú znázornené na obrázku 2a [24].

$$\text{Primitív: } \cos(2\alpha\pi x) + \cos(2\beta\pi y) + \cos(2\gamma\pi z) = c \quad (1)$$

$$\text{Diamant: } \cos(2\alpha\pi x)\cos(2\beta\pi y)\cos(2\gamma\pi z) - \sin(2\alpha\pi x)\sin(2\beta\pi y)\sin(2\gamma\pi z) = c \quad (2)$$

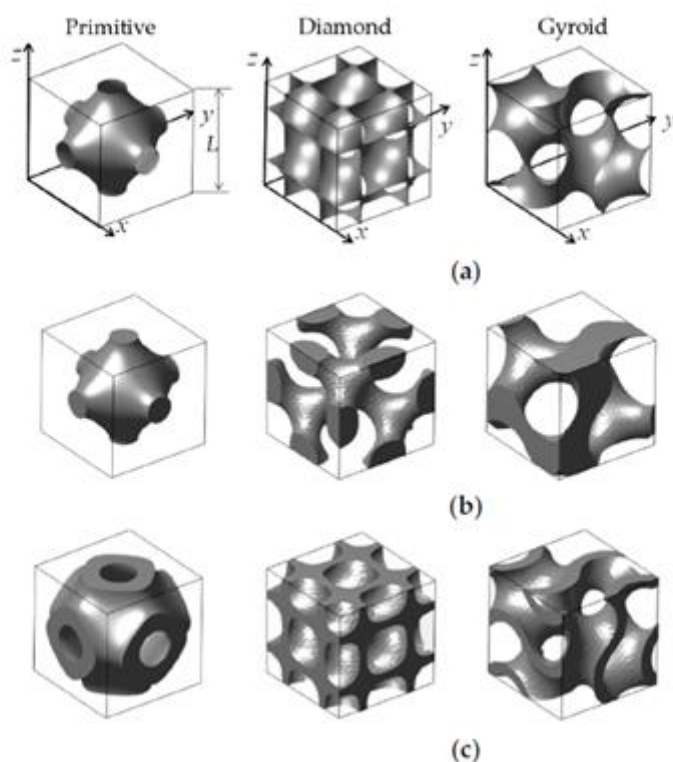
$$\text{Gyroid: } \sin(2\alpha\pi x)\cos(2\beta\pi y) + \sin(2\beta\pi y)\cos(2\alpha\pi x) + \sin(2\gamma\pi z)\cos(2\alpha\pi x) = c \quad (3)$$

[24]

Kde α , β a γ označujú konštanty súvisiace s veľkosťou jednotkovej bunky (L) v x , y a z ; c je parameter posunu, ktorý sa rovná nule pre jednu jednotkovú bunku TPMS, ako je znázornené na obrázku 2a [24][25].

Izoplochy rozdeľujú priestor na dve podoblasti s rovnakým objemom, keď sa rovnica úrovňovej sústavy počíta pri $c = 0$. V tomto prípade možno na základe týchto minimálnych plôch generovať mriežky TPMS dvoma prístupmi. Prvý spôsob sa dosiahne tak, že sa uvažuje objem ohraničený minimálnou plochou na vytvorenie štruktúry pevného telesa-TPMS, nazývanej aj štruktúra solidu - TPMS, ako je to znázornené na obrázku 2b. [24][25].

Druhá sa vytvára posunutím minimálneho povrchu pozdĺž jeho normálového smeru na vytvorenie dvojitého povrchu. Tento povrch sa označuje ako štruktúra doska - TPMS, ako je znázornené na obrázku 2c. [24][25].



Obrázok 2 Príklady TPMS jednotkových buniek s rovnakou pórovitosťou a ich delenie a) Minimálne povrchy b) Solidné TPMS štruktúry c) Doskové TPMS štruktúry [25]

1.2.1 Mechanické vlastnosti TPMS štruktúr

Vďaka hladkým zakriveniam môžu štruktúry TPMS eliminovať koncentrácie napätia, ktoré sa bežne vyskytujú v štruktúrach založených na vzperách. Vo všeobecnosti sa na ilustráciu výhod mriežkových štruktúr analyzujú výkony štruktúr TPMS a porovnávajú sa s inými štruktúrami [26,27]. Spomedzi výkonov v rôznych disciplínach sa väčšina výskumu zamerala na mechanické vlastnosti.

Je možné konštatovať, že štruktúry založené na TPMS poskytujú lepšie mechanické vlastnosti ako štruktúry založené na mriežkach resp. vzperách. Preto sa štruktúry TPMS, najmä

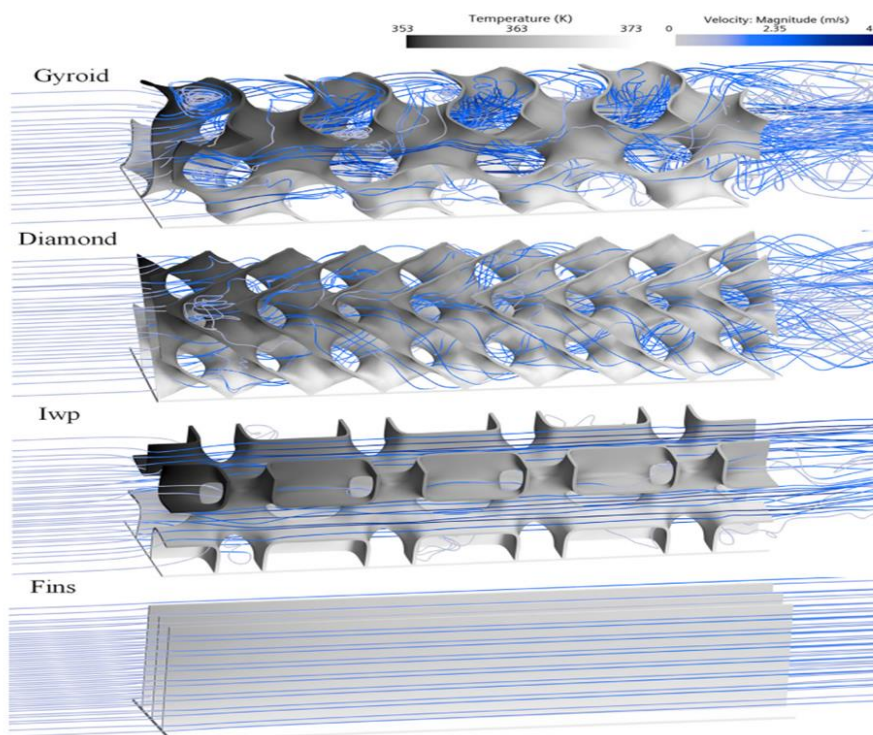
štruktúry na báze dosiek, môžu použiť v rôznych aplikáciách vyžadujúcich odľahčenie daného dielu, a zároveň zachovanie mechanickej pevnosti [28].

1.2.2 Využitie TPMS štruktúr v chladiacich aplikáciách

TPMS vykazujú dobré termofyzikálne vlastnosti a očakáva sa, že poskytnú lepšie riešenia odvodu tepla pre zariadenia vyžadujúce vysoký odvod tepla. Tang a kolektív vo svojej štúdii vyhodnotili konvekčné vlastnosti niekoľkých štruktúr TPMS a objasnenie mechanizmu ich zvýšeného prenosu tepla. TPMS skúmané v tomto článku sú Gyroid, Diamond a Iwp a ich konvekčný výkon prestupu tepla sa porovnáva s výkonom rebrovej štruktúry. Okrem toho sa uskutočnil experiment na overenie presnosti simulácie [29].

Výsledky ukázali, že výsledky numerickej simulácie sú v dobrej zhode s experimentom s odchýlkou menšou ako 6 %. Pri numerickej simulácii je veľkosť mriežky troch TPMS $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$, tekutinou je vzduch, vykurovací povrch je ohrievaný pri konštantnej teplote steny 373,15 K a Reynoldsovo číslo je v rozsahu 166 - 940. V porovnaní s modelom štruktúry Fins sa Nusseltovo číslo štruktúry Diamond zvýšilo o 9 - 196 %, Gyroid sa zvýšilo o 5,8 - 149 % a IWP sa zvýšilo o 6,8 - 43,5 % [29].

Tri modely TPMS dosiahli lepší výkon konvekčného prenosu tepla ako rebrový model aj napriek vyššiemu odporu prúdenia. Keď je vstupný prietok 0,288 - 2,016 m³/h, spomedzi troch modelov TPMS má najlepší konvekčný výkon prestupu tepla Diamond, po ňom nasleduje Gyroid a najhorší je Iwp. Spriemerované koeficienty konvekčného prestupu tepla modelov Diamond, Gyroid a Iwp sú o 85 - 207 %, 55 - 137 % a 16 - 55 % vyššie ako koeficienty modelu Fins. Prúdenie chladiaceho média cez tieto tri TPMS štruktúry je znázornené na obrázku č. 3. [29]



Obrázok 31 Prúdenie chladiaceho média cez tri TPMS štruktúry [29]

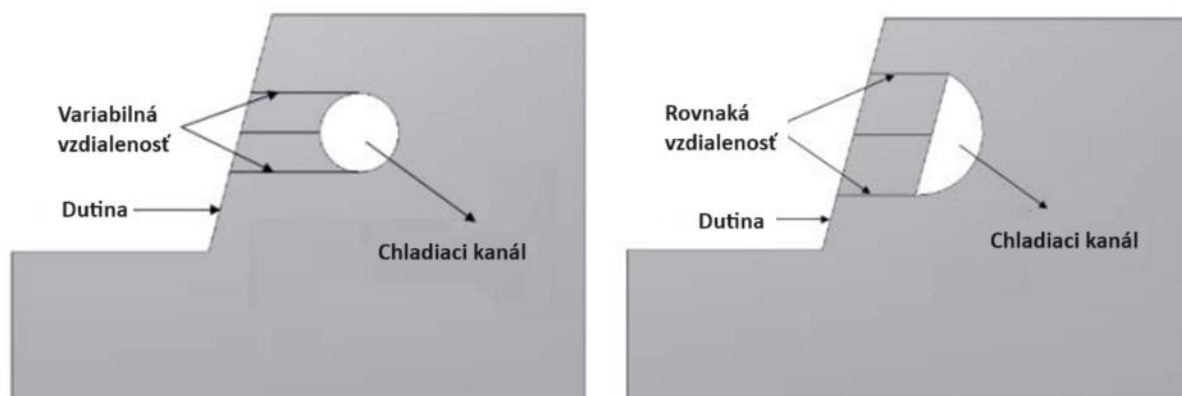
Vplyvy rôznych hrúbok steny štruktúry Doska Diamond na prúdenie, prenos tepla a výkon chladiča skúmali Attarzadeh a kolektív [30]. Zistili, že väčšia hrúbka steny zabezpečuje vyšší konvekčný koeficient prestupu tepla; veľmi veľká hrúbka steny však negatívne ovplyvňuje prúdenie, čím sa znižuje tepelný výkon chladiaceho kanála.

1.2.3 Profilované chladiace kanály

Bežné chladiace kanály sa zvyčajne vyrábajú priamym vyvrtaným dier vo forme, ktoré môžu spôsobiť geometrické obmedzenia a obmedzenia týkajúce sa prúdenia chladiacej kvapaliny. Ako účinná alternatíva ku konvenčnému chladeniu bolo zavedené konformné chladenie.

Jedným z obmedzení chladiacich kanálov s kruhovým prierezom je, že vzdialenosť medzi okrajmi kanála a okrajmi dutiny vo forme nemôže byť konštantná z dôvodu geometrických obmedzení. Táto vzdialenosť je variabilná aj v prípade konformných kanálov, ktoré sa prispôbujú tvaru dutiny, ale majú kruhový prierez.

Ak je prierez chladiaceho kanála navrhnutý tak, že nielenže sa prispôbuje dutine, ale strana kanála smerujúca do dutiny tiež kopíruje profil strany dutiny. Túto koncepciu možno nazvať profilovaný konformný chladiaci kanál (PKCC), ktorý je znázornený na Obrázku č.4 [31].



Obrázok 42 Princíp Profilovaného konformného chladiaceho kanálu [31]

1.2.4 Generatívny dizajn v procese návrhu foriem

Zatiaľ čo pri optimalizácii topológie sa upravuje už existujúci model súčiastky, alebo zostavy. Generatívny dizajn sa využíva pri prvotných dizajnových návrhoch. Všeobecne sa tieto dve metódy v praxi často zamieňajú. Metódy optimalizácie topológie riešia problém distribúcie materiálu dielu s cieľom vytvoriť optimálnu topológiu, ktorá bude spĺňať zadané okrajové podmienky. Metódy optimalizácie topológie sa zvyčajne používajú na riešenie praktických problémov navrhovania dielov s ohľadom na použité výrobné procesy, ako je odlievanie, obrábanie, tvárnenie, alebo aditívna výroba. Rôzne výrobné procesy majú rôzne výrobné obmedzenia, ktoré sa musia zohľadniť vo fáze návrhu, aby sa zabezpečila realizovateľnosť návrhu. Napríklad potreba prístupu nástroju v prípade obrábania alebo potreba vybratia dielu z formy v prípade odlievania alebo tvarovania. Tieto obmedzenia sťažujú realizáciu optimalizácie topológie a je potrebné nájsť kompromis medzi optimálnosťou a jednoduchosťou výroby.

Aditívna výroba umožňuje výrobu bez ohľadu na tvarovú zložitosť a náklady na výrobu sa zvyčajne nezvyšujú so zložitosťou. V skutočnosti sa niekedy náklady môžu so zvyšujúcou sa zložitosťou znižovať v dôsledku zníženia požiadaviek na podpornú štruktúru [32]. Súčiastka bola vyrobená technológiou SLM z kovového prášku. Táto technológia je zvlášť vhodná na využitie v tandeme s optimalizáciou topológie, pretože pri jej použití nie sú potrebné podporné štruktúry. Samotný nespečený prášok slúži ako podporná štruktúra. [32]

2 STANOVENIE CIEĽOV DIZERTAČNEJ PRÁCE

Jednoznačný predpoklad je, že aditívna výroba je relevantná v procese návrhu a výroby komponentov nástrojov na vstrekovanie plastov. Výskum v oblasti aplikácie technológií aditívnej výroby do procesov vstrekovania plastov je obširny a zahŕňa veľa oblastí. V analýze literatúry a vykonaného výskumu sa podarili nájsť príležitosti a nedostatky, ktoré je potrebné adresovať, to dopomohlo ku stanoveniu cieľov a predpokladov a práca bude preto zameraná na 4 štúdie.

2.1 Porovnanie chladiaceho výkonu konvenčných konformných a profilovaných konformných chladiacich kanálov

V oblasti chladenia vstrekovacích foriem sa predpokladá, že profilované kanály, ak sú navrhnuté tak, aby udržiavali konštantnú vzdialenosť od steny kanála k stene súčiastky, vykazujú v porovnaní s bežnými kanálmi lepší chladiaci výkon.

Okrem toho sa predpokladá, že geometrické charakteristiky týchto profilov, môžu vnášať rozdiely do účinnosti chladenia.

Predpokladá sa, že najúčinnnejšie budú profily, ktoré umožnia najväčší prietok chladiacej kvapaliny.

Na overenie tohto predpokladu sa vykonajú kontrolované experimenty, pri ktorých sa bude meniť geometria profilu kanála, pričom sa zabezpečí jednotná vzdialenosť od steny kanála k stene súčiastky. Skúmanie bude zahŕňať simulácie v CFD softvéry, s cieľom presne posúdiť a porovnať chladiaci výkon profilovaných kanálov v porovnaní s ich bežnými náprotivkami. Po simuláciách sa vykonajú experimentálne merania na formách vyrobených technológiou Binder Jetting. Očakáva sa, že výsledky prispedia k cenným poznatkom pri optimalizácii chladiacich systémov na zlepšenie tepelného manažmentu v rôznych aplikáciách.

2.2 Aplikácia TPMS štruktúr pri chladení vstrekovacej formy

TPMS štruktúry sa dajú najjednoduchšie rozdeliť na dva druhy – solídne a doskové. Solídne TPMS štruktúry majú dobré turbulentné vlastnosti a mnohokrát menia trajektóriu chladiacej

kvapaliny, čím sa zvyšuje prenos tepla. Z toho dôvodu je ich tepelná výkonnosť lepšia ako pri rôznych mriežkových prvkoch a holých kanáloch. Rovnako ako solídne tak aj doskové TPMS menia trajektóriu kvapaliny, avšak navyše vytvárajú dve navzájom neprepojené zóny. Výrazný vplyv na tepelný výkon doskových TPMS má hrúbka steny, čím bola hrúbka steny vyššia, tým bol aj lepší odvod tepla, avšak pri prílišných hrúbkach stien nastávali nadmerné tlakové straty, ktoré zhoršovali prúdenie kvapaliny a tým aj prenos tepla.

Taktiež treba poznamenať, že v porovnaní s holými chladiacimi kanálmi bez štruktúr, aj napriek vyšším tlakovým stratám, dosahovali kanáli s TPMS štruktúrami lepšie hodnoty odvodu tepla.

Na základe dostupných poznatkov z prehľadu literatúry a už vykonaného výskumu o využití TPMS štruktúr v chladiacich aplikáciách, bude táto štúdia zameraná na CFD simuláciu a následný praktický experiment. Simulácia a experiment budú vykonané na vstrekovacej forme, ktorá bude vyrobená technológiou Binder Jetting. Táto forma bude obsahovať konformný chladiaci kanál, v ktorom bude vygenerovaná TPMS štruktúra Split P. Táto štruktúra doteraz nebola výrazne analyzovaná v už vykonanom výskume.

Na základe vyššie spomenutých skutočností sa dá predpokladať, že chladiaci výkon formy chladenej konformným kanálom obsahujúcim TPMS štruktúru bude lepší ako v prípade rovnakej formy bez tejto štruktúry v chladiacom kanáli.

Predpokladá sa, že Split P štruktúra bude možné vyrobiť pomocou metódy binder jetingu s dostatočnou presnosťou a kvalitou. Overí sa možnosť výroby tejto štruktúry v reálnych podmienkach.

Predpokladá sa, že aplikácia Split P štruktúry v reálnom chladiacom okruhu bude mať pozitívny vplyv na tepelný výkon. Experiment na chladiacom okruhu overí skutočnú účinnosť tejto štruktúry v praktických aplikáciách.

Cieľom je vykonať simulácie prúdenia kvapaliny cez túto štruktúru a porovnať s prúdením cez konformný kanál rovnakého vonkajšieho profilu bez štruktúry a následne vykonať porovnanie praktickým experimentom, čo je v už vykonanom výskume často opomenutý aspekt.

Pri experimente sa zahreje vstrekovacia forma na určitú teplotu a po dosiahnutí požadovanej teploty sa spustí chladiaci okruh a pomocou termočlánkov sa odsleduje chladiaci výkon oboch foriem. Očakáva sa, že výsledky prispedia k cenným poznatkom zameraným na TPMS štruktúry a ich výrobu a využitie v chladiacich aplikáciách nie len v oblasti vstrekovacích foriem.

2.3 Aplikácia TPMS štruktúr a Generatívneho dizajnu pri navrhovaní vstrekovacej formy

Existuje viacero dôvodov, prečo zníženie hmotnosti vstrekovacích foriem vie byť prospešné. Jedným z dôvodov pre zníženie hmotnosti foriem je snaha o zníženie nákladov na výrobu. V kontexte práškovej aditívnej výroby, technológie ako SLM alebo Binder Jetting umožňujú vytváranie komplexných štruktúr s minimálnym odpadom materiálu a zároveň zložitosť formy

nijako neovplyvňuje náročnosť výrobného procesu. Menej materiálu použitého na výrobu foriem znamená nielen nižšie náklady na materiál, ale tiež môže mať pozitívny dosah na celkové náklady na výrobu. Nevyužitý prášok z tlačovej komory sa dá použiť na výrobu ďalších súčiastok, čím sa minimalizuje množstvo odpadu a zvyšuje efektivita využitia materiálu.

Ľahšie formy sú často jednoduchšie na údržbu a opravy, čo znižuje časovú neefektívnosť spojenú s výpadkami výroby. Nižšia hmotnosť týchto foriem tiež znamená menšie namáhanie hydraulických a mechanických častí vstrekolisu, čo prispieva k zvýšenej spoľahlivosti a trvanlivosti celého vstrekovacieho systému. To znamená, že prevádzka a údržba takýchto foriem môže byť efektívnejšia a lacnejšia, čo v konečnom dôsledku prispieva k celkovému zníženiu výrobných nákladov.

Zníženie hmotnosti foriem taktiež umožňuje využitie menších vstrekolisov, resp. vstrekolisov s nižšou nosnosťou. Menšie stroje sú nielen lacnejšie v nákupe a prevádzke, ale aj menej náročné na údržbu a servis. Okrem toho ich nižší výkon znamená aj nižšiu spotrebu energie, čo prispieva k znižovaniu prevádzkových nákladov a environmentálnej udržateľnosti výrobného procesu.

S úbytkom hmotnosti foriem sa znižujú aj náklady na ich prepravu. Tento faktor je významný najmä pri medzinárodnej alebo dlhodobej doprave. Nižšie náklady na dopravu môžu prispieť k celkovému zníženiu nákladov.

Zníženie spotreby materiálu, energie pri výrobe a nákladov na prepravu ľahších foriem môže mať pozitívny vplyv na životné prostredie. Menšia spotreba materiálu vedie k nižšej produkcii odpadu a nižšia energetická spotreba znižuje emisie skleníkových plynov a iných škodlivých látok spojených s výrobou a dopravou.

Všetky tieto faktory ukazujú, že zníženie váhy foriem na vstrekovanie plastov môže priniesť významné výhody z hľadiska ekonomických, technických a environmentálnych aspektov výrobného procesu. Týmto spôsobom zníženie hmotnosti foriem vytvára synergický efekt, ktorý zvyšuje celkovú konkurencieschopnosť a efektivitu výroby.

Využitie TPMS štruktúr a generatívneho dizajnu, resp. optimalizácie topológie sú spôsoby, ktorých použitím je možné znížiť hmotnosť foriem a zároveň zachovať požadované štrukturálne vlastnosti.

Z výskumu na danú tému sa dá zhrnúť, že štruktúry založené na TPMS poskytujú lepšie mechanické vlastnosti ako štruktúry založené na mriežkach resp. vzperách. Preto sú štruktúry TPMS, vhodné na použitie v aplikáciách vyžadujúcich odľahčenie daného dielu, a zároveň zachovanie mechanickej pevnosti.

Taktiež je možné konštatovať, že autorom sa podarilo vyrobiť a aj úspešne otestovať vstrekovaciu formu technológiou SLM, ktorá bola odľahčená pomocou mriežkovej štruktúry. Preto by bolo zaujímavé sa pokúsiť dosiahnuť podobný výsledok pomocou technológie Binder Jetting a TPMS štruktúry a otestovať, či tak vyrobená forma bude schopná vydržať procesné parametre a či bude možné ju vyrobiť dostatočne presne.

Problematika generatívneho navrhovania vstrekovacích foriem nie je obsérne preskúmaná. Z toho mála výskumov čo je dostupných sa dá predpokladať, že je možné generatívne navrhnuť aj vyrobiť vstrekovaciu formu, avšak zatiaľ to bolo skúšané len v simulačnej rovine. Taktiež dané simulácie neboli podrobne opísané, chýbali dôležité informácie.

Z vyššie napísaného zhrnutia sa dá zhodnotiť, že by bolo vhodné generatívne navrhnuť formu, následne navrhnutú formu vyrobiť a reálne otestovať či vydrží podmienky vstrekovacieho procesu, najmä uzatváraciu silu, ktorá pri vstrekovacom procese najviac zaťažuje formu.

Predpoklady zo zhrnutia sú nasledovné.

Odl'ahčená forma navrhnutá pomocou generatívneho dizajnu a vyrobená technológiou Binder Jetting bude mať mechanické vlastnosti dostačujúce pre jej použitie v procese vstrekovania plastov.

Forma odl'ahčená použitím TPMS štruktúry a vyrobená technológiou Binder Jetting bude mať mechanické vlastnosti dostačujúce pre jej použitie v procese vstrekovania plastov.

2.4 Zistiť vhodnosť technológie Binder Jetting pri výrobe vstrekovacích nástrojov

Po vyrobení vstrekovacích foriem technológiou Binder Jetting sa naskytá príležitosť analýzy samotnej vhodnosti tejto technológie. Vo vykonanom výskume totiž bola používaná primárne technológia SLM resp. spekanie práškoveho lôžka. Binder Jetting ako technológia prišla skôr ako SLM avšak nie je až tak rozšírená.

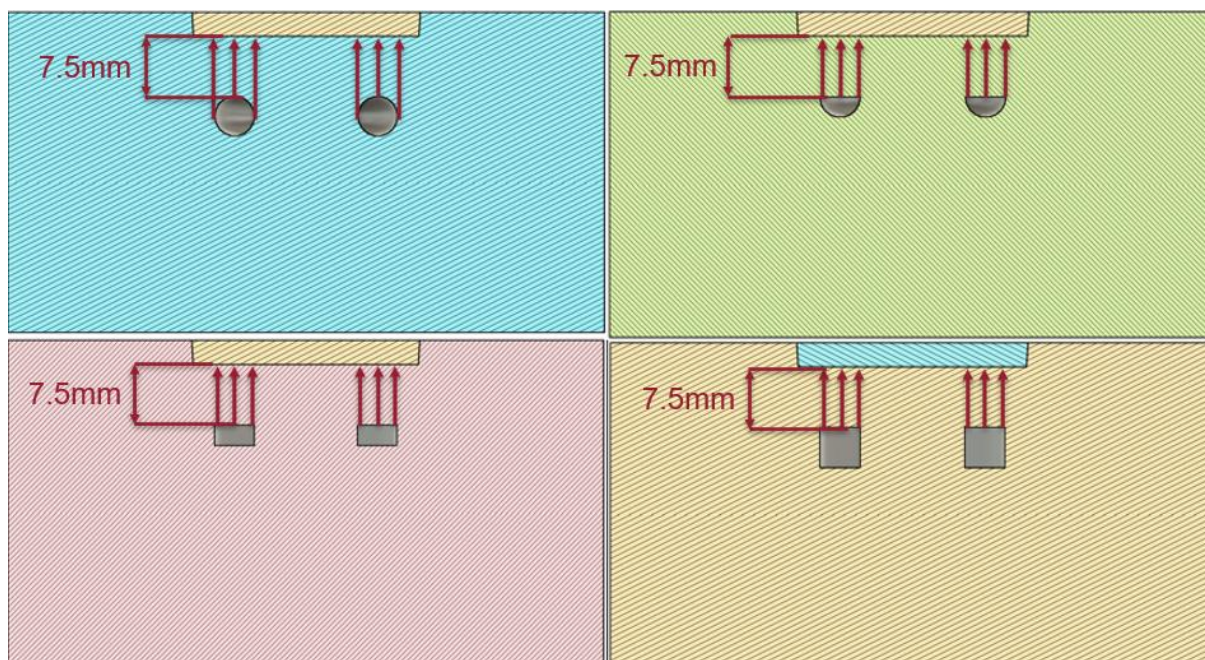
Faktor ktorý treba odsledovať je rozmerová presnosť, ktorá je kľúčová pre dosiahnutie správnej geometrie foriem. Treba skúmať, či je technológia schopná vytvoriť formy s dostatočnou presnosťou, aby bolo možné formy upnúť do vstrekovacieho stroja a zároveň boli formy kompatibilné s vstrekovacími procesmi a zaručili požadovanú kvalitu dielov. Dôvod na obavy vzniká z dôvodu nutnosti spekania foriem ako nutného kroku technológie Binder Jetting. Spekanie v metóde totiž môže spôsobiť zmenšenie a rozmerovú redukciu prípadne deformáciu. Preto je potrebné formy vyrobené technológiou Binder Jetting podrobiť rozmerovej analýze, pri ktorej sa budú porovnávať vyrobené formy s nominálnymi modelmi poslanými do výroby.

Predpokladom je, že Binder Jetting ako technológia je vhodná na výrobu vstrekovacích foriem, avšak ako následok spekania je potrebná dodatočná povrchová a rozmerová úprava vyrobených foriem.

3. NÁVRH EXPERIMENTOV

3.1 Návrh vstrekovacích foriem s profilovanými konformnými kanálmi

Pre úspešné porovnanie výkonu profilovaných konformných chladiacich kanálov je ako prvé potrebné navrhnuť formy, ktoré budú tieto kanály obsahovať. Formy sú navrhnuté pre vstrekovací stroj Babyplast 6/10P. Formy navrhnuté a vyrobené pre túto štúdiu sú medzi sebou prakticky identické, s jediným rozdielom v chladiacich kanáloch. Pre simulačné overenie a experimenty boli navrhnuté 4 prierezy kanálu. Boli vybrané jednoduché prierezy – štvorec, obdĺžnik, polkruh a kruh. Aditívnou výrobou je možné vyrobiť aj kanály zložitejších tvarov, ako napríklad rôzne polygóny, avšak v už vykonanom výskume boli prípady, kde vznikali v rohoch takýchto kanálov praskliny a netesnosti. Preto bolo rozhodnuté vyrobiť kanály jednoduchších tvarov. Na obrázku č.5. je možné vidieť navrhnuté chladiace kanály, v smere hodinových ručičiek kruhový, polkruhový, štvorcový a obdĺžnikový.



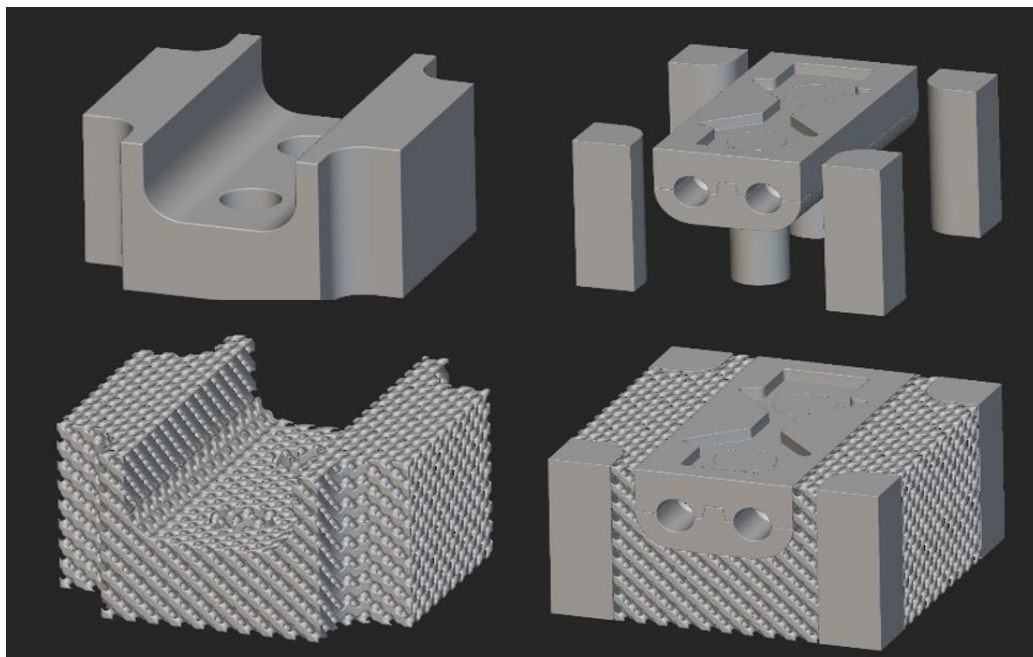
Obrázok 53 Navrhnuté profilované konformné chladiace kanály

3.2 Návrh vstrekovacích foriem s TPMS štruktúrami

Pre úspešnú analýzu prúdenia tekutiny a chladenia formy s chladiacim kanálom obsahujúcim TPMS štruktúru je potrebné túto formu navrhnuť a namodelovať. Z praktického hľadiska bude ako základ použitá forma z predchádzajúcej štúdie s štvorcovým profilom chladiaceho kanálu. Na návrh TPMS štruktúry je potrebné použiť špecializovaný program. Niektoré CAD softvéry obsahujú moduly a rozšírenia umožňujúce navrhovanie TPMS štruktúr, ideálne je ale použiť softvér na implicitné modelovanie. Takým softvérom je nTopology, po novom nTop, ktorý je použitý v týchto štúdiách. Dosková štruktúra Split P s rozmermi 5x5x5mm a hrúbkou steny 1mm bola vybraná. Split P štruktúra bola vybraná z dôvodu jej nedostatočného zastúpenia v už vykonanej literatúre a taktiež z dôvodu, že je jednou z TPMS

štruktúr bez tzv. priechodnej diery, ktorá sa vo veľa iných TPMS štruktúrach vyskytuje a zhoršuje výkon chladenia.

Forma určená na štúdiu zameranú na odľahčenie vstrekovacích foriem bola navrhnutá so solídnu TPMS Diamond štruktúrou. Táto štruktúra bola vybraná po analýze vykonaného výskumu, v ktorom bola často použitá pri študovaní mechanických vlastností a dosahovala dostatočné mechanické vlastnosti na dané aplikácie. Postup návrhu je možné vidieť na obrázku č. 6.

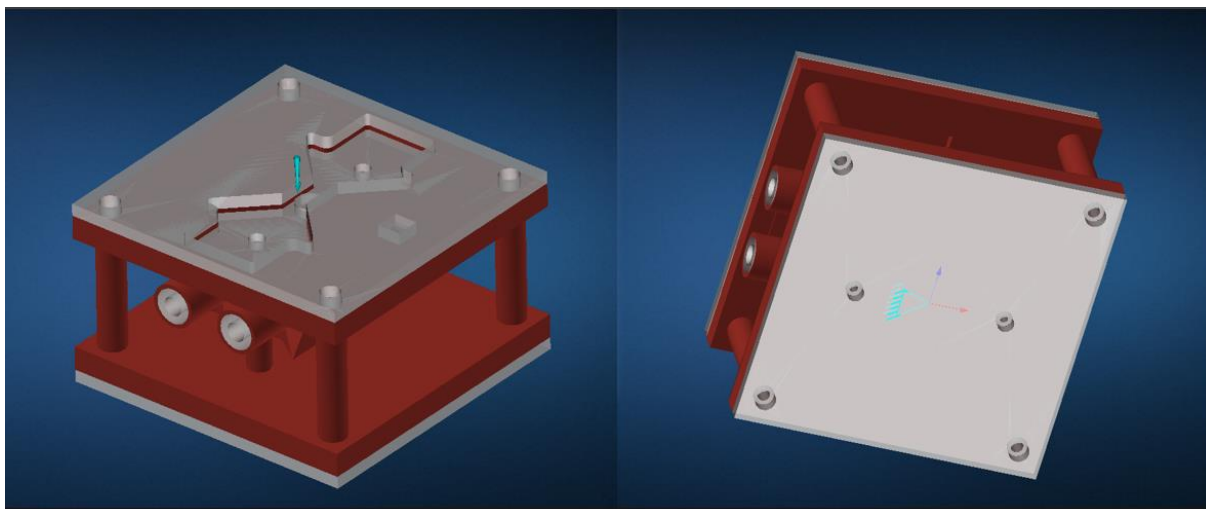


Obrázok 6 Postup návrhu formy odľahčenej TPMS štruktúrou

3.3 Návrh vstrekovacej formy generatívnym dizajnom

Na návrh vstrekovacej formy pomocou generatívneho dizajnu bol použitý softvér MSC Apex Generative Design od firmy Hexagon. V tomto softvéri je návrh generatívnej štúdie priamočiary avšak vyžaduje znalosti generatívneho procesu pre správne nastavenie. V softvéri je potrebné zdefinovať dizajnové rozhrania modelu aby softvér vedel správne vykonať simulačnú analýzu. Tieto rozhrania reprezentujú prvky ako napríklad nenávrhový priestor, ktorý reprezentuje oblasť modelu, ktorú je potrebné zachovať, alebo prídavky na obrábanie, ktoré reprezentujú oblasť, kde je potrebné k vygenerovanému výsledku pridať dodatočný materiál. Okrem dizajnových rozhraní je pre správny priebeh generatívnej štúdie potrebné zdefinovať obmedzenia a zaťaženia. V tomto prípade sa ako obmedzenie nastavila pevná podmienka, ktorou sa odobrali všetky stupne voľnosti spodnej časti formy tak, aby to reprezentovalo uchytenie formy vo vstrekovacom stroji. Zaťaženie sa definovalo ako sila 60kN pôsobiaca na hornú plochu formy, kde sa nachádza tvarová dutina a tým sa reprezentovala uzatváracia sila stroja. Hodnota 60 kN bola určená z dôvodu, že to je limit vstrekovacieho

stroja, pre ktorý sa dané formy navrhujú. Na obrázku č.7 je možné vidieť model pripravený na generatívnu štúdiu.



Obrázok 7 Model pripravený na generatívnu štúdiu

3.4 Simulácia procesu chladenia

Prvým krokom v simulácii je definovanie materiálov jednotlivých komponentov. V tomto prípade bol ako materiál foriem zadefinovaná korózii vzdorná oceľ 316L, ako materiál plastového dielu bolo zadefinované ABS a ako chladiace médium bola zadefinovaná voda. Oceľ 316L sa všeobecne v praxi nevyužíva na výrobu foriem, avšak pre tieto štúdie bola vybraná z viacerých dôvodov. V prvom rade bola ekonomicky dostupná a firma Printy.me bola ochotná vyrobiť z nej pre autora viacero foriem. Ďalej vo všetkých simulačných softvéroch bol dostupný jej materiálový model, tým pádom odpadla nutnosť skúšania materiálu a následná nutnosť vytvorenia si vlastného materiálového modelu. Taktiež sa v štúdiách v práci sledovali najmä vplyvy zmeny geometrie na chladenie a tým pádom sa očakáva, že výsledky budú aplikovateľné aj na formy vyrobené z nástrojových ocelí. Po zadefinovaní materiálov je potrebné zadefinovať okrajové podmienky a začiatočné podmienky simulácie. Okrajové podmienky a začiatočné podmienky simulácie je možné vidieť v tabuľke č. 1.

Tabuľka 1 Okrajové a začiatočné podmienky CFD simulácie

Okrajové podmienky	
Podmienka	Hodnota
Teplota vody	20 °C
Prietok vody na vstupe	5 l / min
Tlak vody na výstupe	0 Pa
Teplota okolia	25 °C

Začiatkové podmienky	
Podmienka	Hodnota
Teplota plastu	220 °C
Teplota formy	70 °C

Principiálne sa jedná o jednoduchú simuláciu, ktorá však pomôže objasniť účinnosť chladenia foriem. Nastavenie Solveru je možné vidieť v tabuľke č.2. Nastavenie simulácie je identické pre všetkých 5 skúšaných foriem.

Tabuľka 2 Nastavenia Solveru

Nastavenia simulácie	
Typ simulácie	Priebehová (transient)
Čas priebehu simulácie	60 s
Krok	1s
Počet medzi krokov	10
Fyzikálne analýzy	Prechod tepla, Prúdenie, Hydrostatický tlak

3.5 Výroba foriem

Na výrobu vstrekovacích foriem v tejto práci je použitá technológia Binder Jetting. Všetky potrebné úkony pre výrobu ako predvýrobnú prípravu v softvéri, výrobu zelených telies, povýrobné odprášenie a sintráciu sprostredkovala externá firma Printy.me so sídlom v Lučenci. Použitý materiál vo výrobe bola korózii vzdorná oceľ 316l v práškovej forme od firmy ExOne. Po vyrobení zelených telies bolo potrebné ich zbaviť zvyškov nevytvrdeného prášku a následne bolo potrebné telesá spieť v sintrovacej peci. Sintrácia prebehla pri teplotách do 1380 °C.

3.6 Zhodnotenie a experimentálne skúšanie vyrobených foriem

Nevýhodou technológie Binder Jetting v porovnaní s technológiou SLM je pevnosť tzv. zelených telies. Ide o telesá, ktoré sú výsledkom prvého výrobného kroku, čiže prášok spojený lepidlom (binderom) ešte pred spekaním. Zatiaľ čo pri SLM nie je žiadny krok spekania a súčiastku stačí jednoducho odprášiť stlačeným vzduchom, prípadne dutiny vyčistiť prúdom kvapaliny, pri Binder Jettingu treba byť opatrnejší. Taktiež sa používa stlačený vzduch, ale dutiny s vnútornými zaobleniami, ako napríklad konformné kanály je ťažšie vyčistiť a pri použití nadmernej sily hrozí poškodenie steny súčiastky.

Formy boli skenované na optickom skenery GOM ATOS a boli vyhodnotené v programe ZEISS Inspect.

Po vykonaní simulačných analýz prichádza na rad experimentálna analýza. Zatiaľ čo simulačné analýzy nastaveniami reprodukovali vstrekovací cyklus, pri experimentálnej analýze je potrebné proces modifikovať aby bol presný a realizovateľný. Namiesto sledovania vstrekovania plastového dielu do formy a jeho následné chladnutie sa použitím termočlánku sleduje zahrievanie samotnej formy a jej chladnutie pomocou profilovaných konformných kanálov. Formy použité v tomto výskume neboli vyrobené dostatočne presne na to aby boli upnuté do stroja a zároveň je jednoduchšie a presnejšie sledovať teplotu statickej formy ktorá sa nehýbe a nie je v stroji, len je zahrievaná a pripojená na chladiaci okruh.

. Priebeh experimentu bol nasledovný. Najprv sa forma položila na odporové výhrevné teleso. Zapol sa výhrev a pomocou termočlánku sa sledovala povrchová teplota na vstrekovacej dutine. Týmto spôsobom sa nahriala celá forma a vyhrievala sa až kým nedosiahla teplotu približne 120°C. Následne sa vyplo výhrevné teleso a forma sa pripojila na chladiaci okruh. Chladiaci okruh mal konštantný prietok vody, tlak na vstupe a teplotu chladiacej vody. Následne sa sledovalo chladenie formy až pokiaľ forma nedosiahla teplotu 22 °C.

Okrem experimentu zameraného na porovnanie chladiaceho výkonu konvenčných konformných a profilovaných konformných chladiacich kanálov a aplikácie TPMS štruktúr v chladiacich kanáloch vstrekovacích foriem. Bolo taktiež uskutočnené odskúšanie foriem odľahčených pomocou generatívneho dizajnu a TPMS štruktúrami. V prípade generatívne navrhnutej formy bola simulačná analýza vykonaná už ako súčasť návrhu. Generatívny dizajn je principiálne zároveň aj simulačná analýza, keďže súčasťou návrhu sú určité okrajové, procesné a rozmerové podmienky. Softvér následne generuje a navrhuje výsledky tak, aby spĺňali zadané podmienky.

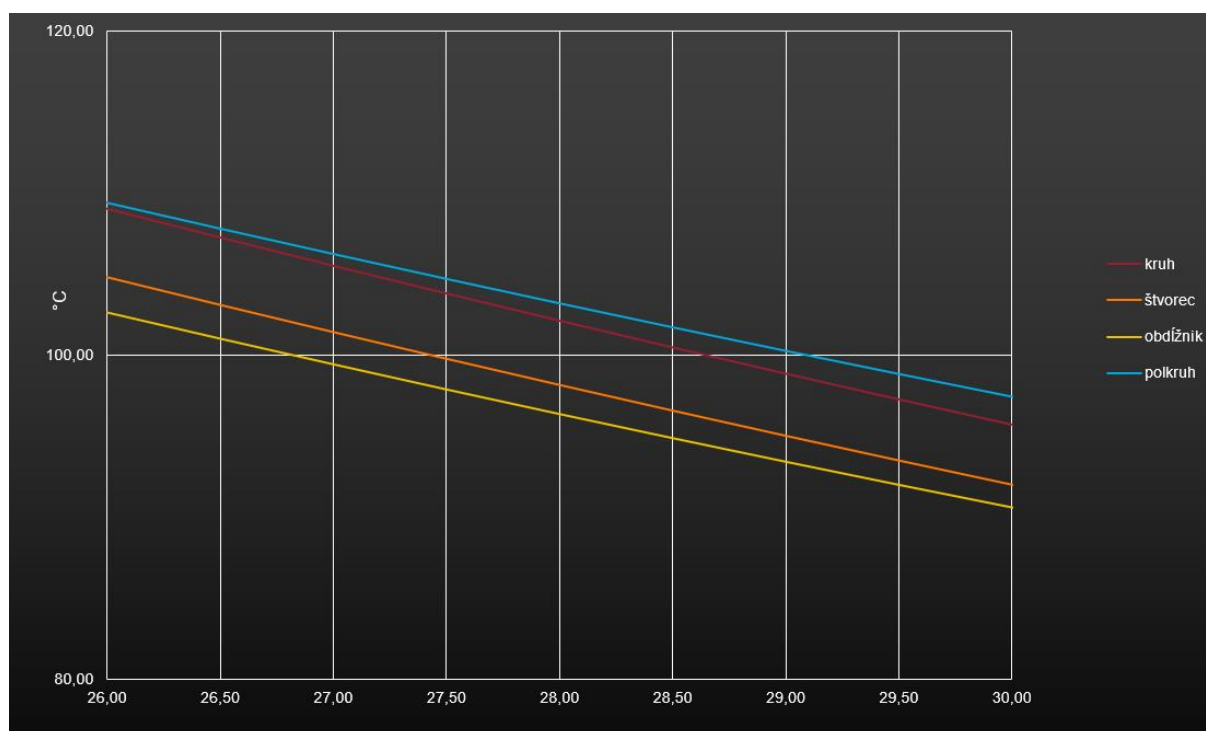
Simulačné zaťaženie formy odľahčenej pomocou TPMS štruktúr bolo vykonané v softvéri nTop. Je to rovnaký softvér, v ktorom bola aj samotná forma navrhnutá. Pôvodný vyrobený model prvej série nebolo možné odsimulovať. Model mal rozmer jednotkovej bunky 5x5x5mm a výsledná sieť bola príliš hustá. Taktiež vyrobenú formu nebolo možné dostatočne dobre odprášiť z dôvodu príliš malých dutín. Preto bol model upravený a jednotková bunka sa zväčšila na rozmery 20x20x20mm. Takto upravená forma bola v simulácii zaťažená uzatváracou silou 60kN, ktorá reprezentovala maximálnu uzatváraciu silu vstrekovacieho stroju Babyplast.

Po výrobe TPMS odľahčenej formy boli formy s oboma rozmermi jednotkovej bunky zaťažené tlakovou skúškou. Formy boli zaťažené silou 65 kN rovnako ako v simuláciách a pri generatívnom navrhovaní. Po výrobe generatívne navrhnutej formy bol zámer rovnaký, avšak nebolo možné formu odskúšať z dôvodu nedostatočnej kvality výrobku. Forma bola rozdelená na dve časti z dôvodu lepšieho odprášenia chladiaceho obvodu a po následnom spojení sa v sintrovacej peci forma zdeformovala.

4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

4.1 Výsledky simulácií chladenia

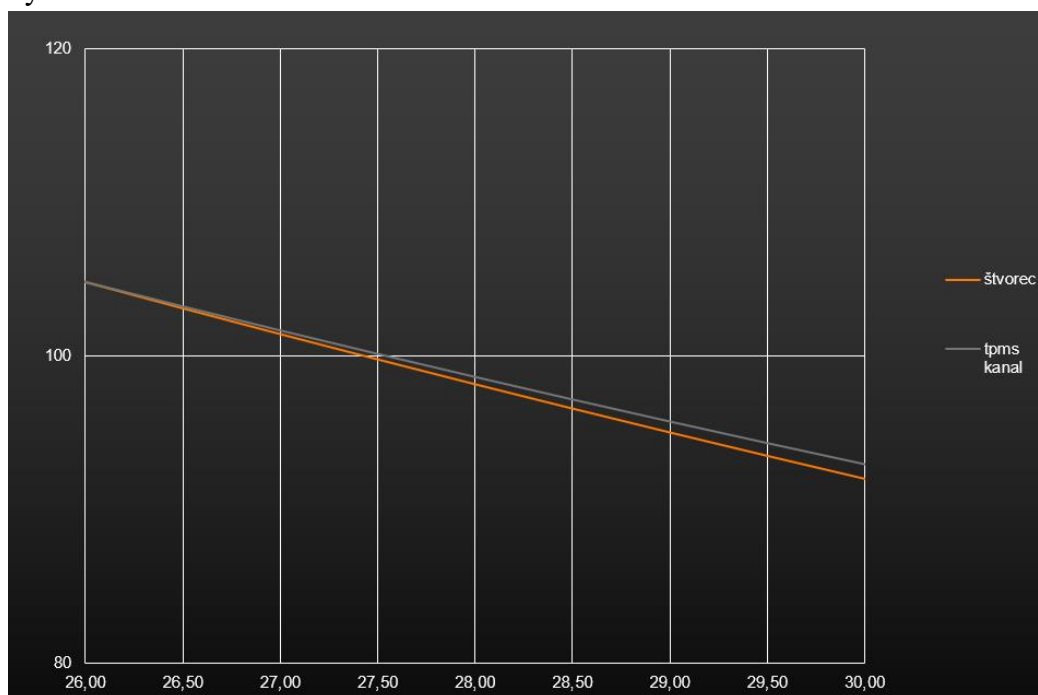
Simulácia chladenia formy a vstrekovanej súčiastky bola vykonaná v softvéri Autodesk CFD. Na obrázku č.8 je možné vidieť grafické znázornenie výsledkov chladenia súčiastky z prvej štúdie, pri ktorej boli porovnávané chladiace kanály s rôznymi profilmi. Graf je zameraný na oblasť prechodu teploty súčiastky pod hranicu 100 °C , čo je približná teplota, pri ktorej sa v procese vstrekovania súčiastky z ABS vyhadzujú z formy. Na grafe je vidieť, že forma s chladiacim kanálom obdĺžnikového profilu dosiahla najrýchlejšie ochladenie vstreknutej súčiastky. V porovnaní s konvenčným chladiacim kanálom kruhového profilu bola súčiastka schladená na vyhadzovaciu teplotu približne o 2 sekundy skôr. Môže za to zdať ako malý rozdiel, avšak v procese vstrekovania plastov skrátenie cyklu o 2 sekundy je z dlhodobého hľadiska prospešné.



Obrázok 8 Výsledky CFD simulácie chladenia súčiastky pod 100°C

Rovnaká simulácia sa vykonala aj pre porovnanie chladiaceho výkonu formy s chladiacim kanálom obsahujúcim TPMS štruktúru. Vzhľadom na zložitosť pôvodnej TPMS štruktúry, nebolo možné simulovať pôvodnú štruktúru z prvej série, kde bola veľkosť jednotkovej bunky 5x5x5mm. Preto bolo potrebné danú štruktúru upraviť zväčšením jednotkovej bunky. V tomto prípade sa porovnával výkon kanála s štvorcovým profilom a kanála s štvorcovým profilom obsahujúcim TPMS štruktúru. Predpoklad bol, že kanál s TPMS štruktúrou bude efektívnejší. Na obrázku č. 9 je graficky zobrazený výsledok simulácie. Z grafu je zrejmé, že výkon chladenia chladiaceho kanálu s TPMS Split P štruktúrou

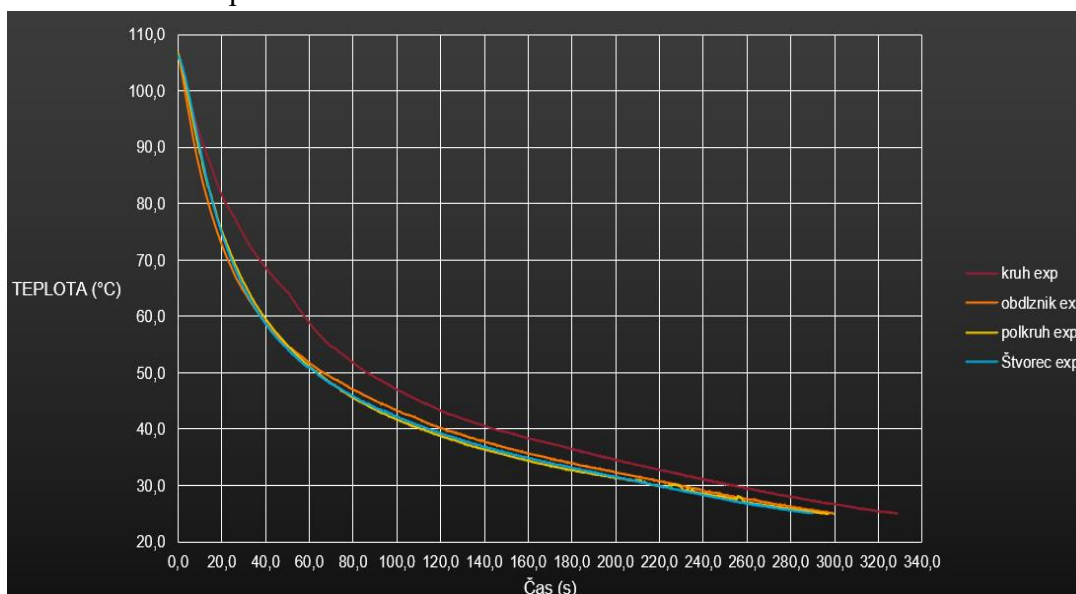
bol porovnateľný s kanálom s štvorcovým profilom a nedosahoval o nič lepšie ani o nič horšie výsledky.



Obrázok 9 Výsledok CFD Simulácie, porovnanie výkonu chladenia kanála s štvorcovým prierezom a rovnakého kanála obsahujúceho TPMS štruktúru

4.2 Vybrané výsledky skúšania foriem

Po simulačných analýzach sa na niektorých formách vykonalo aj experimentálne skúšanie. Na viacerých formách však nebolo možné experimenty vykonať z rôznych dôvodov. Výsledky experimentálneho skúšania chladenia foriem, sú zobrazené vo forme grafu na obrázku č.10. Z grafu je na prvý pohľad zrejmé, že najslabší chladiaci výkon mal chladiaci kanál kruhového profilu.

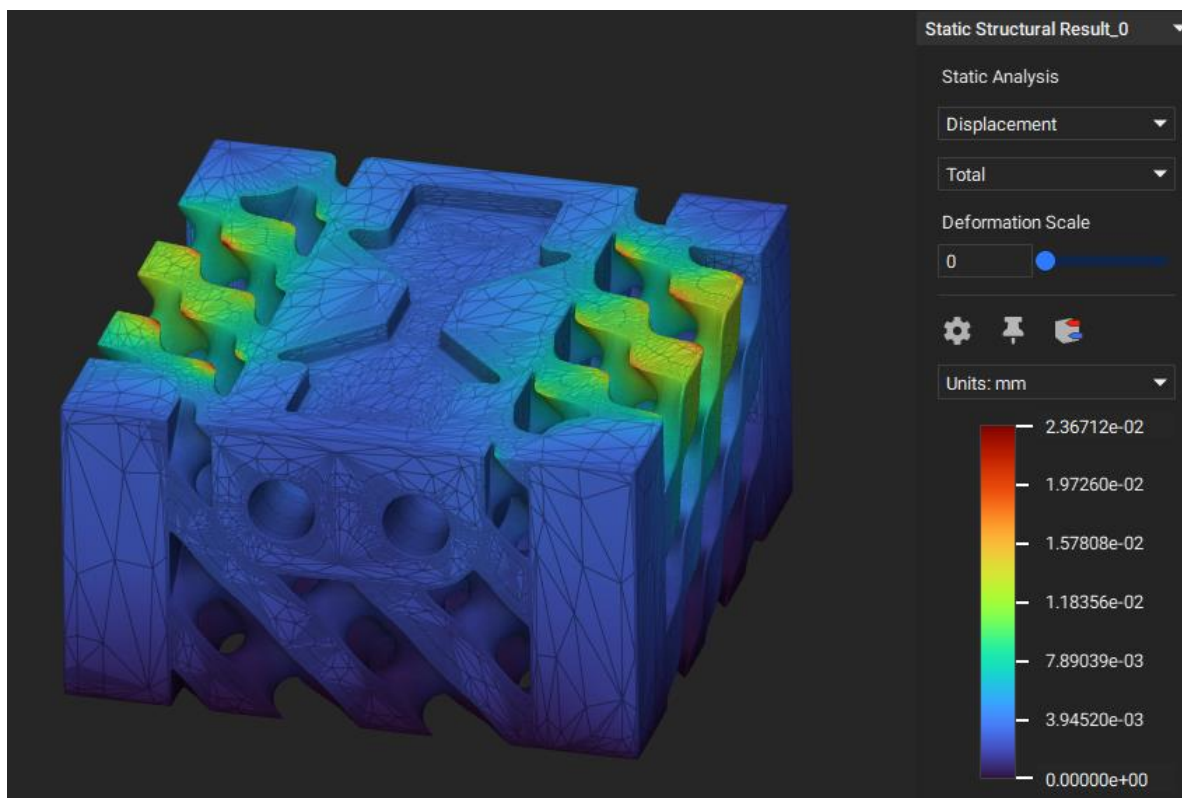


Obrázok 10 Výsledky experimentálneho skúšania foriem

Experimentálne skúšanie formy s chladiacim kanálom obsahujúci TPMS štruktúru bolo problémavejšie ako skúšanie foriem s chladiacimi kanálmi bez TPMS štruktúry. Veľkosť jednotkovej bunky v kanály 5x5x5mm bola príliš malá. Bolo možné získať sieť prvkov, takže bolo možné formu vyrobiť, avšak nebolo možné ju odsimulovať ako bolo už spomenuté v predchádzajúcej kapitole a taktiež nebolo možné TPMS štruktúru v chladiacom kanále dostatočne odprášiť ešte pred procesom sintrovania. Pevnosť zelených telies neumožňuje hrubšiu manipuláciu s nevysintrovanými súčiastkami, tým pádom sa dostatočne neodprášili. Takto vyrobený chladiaci kanál nie je priechodný a teda nebolo možné túto formu použiť na experimentálne skúšanie. Z toho dôvodu bola veľkosť jednotkovej bunky v kanály zväčšená z hodnoty 5x5x5mm na 10x10x10mm. V konečnom dôsledku boli vyrobené tri série foriem, v ani jednej z týchto sérií nebolo možné dosiahnuť požadované rozmerové vlastnosti formy, nebolo možné vyrobiť TPMS štruktúru v chladiacom kanály, alebo štruktúru bolo možné vyrobiť, ale forma následne nebola utesniteľná, alebo bola štruktúra poškodená. Z týchto dôvodov bolo usúdené, že nemá zmysel skúšať formu experimentálne, keďže aj výsledné hodnoty chladenia by boli skreslené a nereprezentovali by navrhnutú metodiku resp. nominálne modely.

Odľahčenie vstrekovacích foriem bolo vykonané dvomi metódami. Využitím TPMS Diamond štruktúry a generatívnym navrhnutím formy pomocou softvéru Hexagon Apex Generative Design.

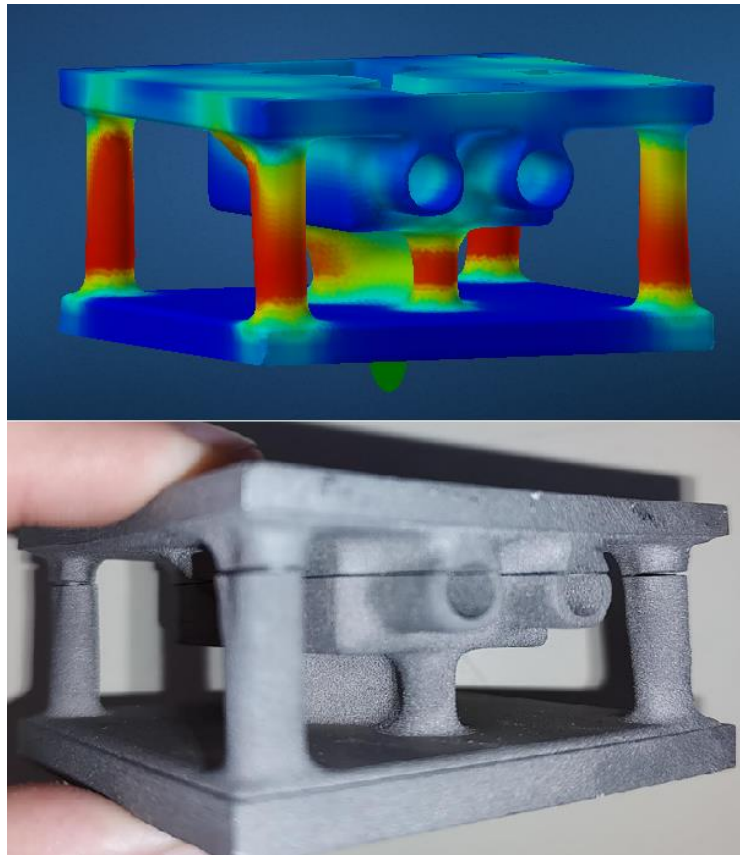
V prvom prípade bola pôvodne vyrobená forma s rozmerom jednotkovej bunky 5x5x5mm. Táto forma bola vyrobená úspešne, avšak nebolo možné ju dobre odprášiť, chladiaci kanál nebol priechodný a aj jednotlivé dutiny v TPMS štruktúre nebolo možné dostatočne odprášiť. Taktiež bola sieť prvkov príliš zložitá na simuláciu. Z toho dôvodu sa do druhej výrobnej série zmenil rozmer jednotkovej bunky z 5x5x5mm na 20x20x20mm. Takto upravenú formu bolo možné aj vyrobiť aj odsimulovať jej zaťaženie. Forma sa zaťažila silou 65kN, čo reprezentovalo maximálnu uzatváraciu silu, ktorú dokáže vynaložiť stroj, pre ktorý bola forma navrhnutá. Výsledok zo simulácie je možné vidieť na obrázku č.11. Zo simulácie vyplýva, že forma vydrží bez problémov maximálnu uzatváraciu silu stroja a najvyššia deformácia bude 0,02mm a aj tá bude mimo tvarovej dutiny formy.



Obrázok 11 Výsledok zo simulácie v programe nTop

Formy boli vložené do skúšacieho stroja a tlaková skúška bola vykonaná. Formy boli zaťažené silou 65kN. Formy bezproblémovo zaťaženie vydržali a na grafe sa nedosiahla ani medza klzu.

Generatívne navrhnutá forma bola vyrobená v druhej výrobnej sérii. Rovnako ako predchádzajúce formy, aj táto forma musela byť rozdelená na dve časti z dôvodu riadneho odprášenia chladiaceho kanálu. Následkom toho boli viaceré nedostatky. Okrem problémov so spojením jednotlivých komponentov vznikli aj praskliny a časti formy odpadli ešte pred spojením. Vzhľadom na výsledky z generatívneho navrhovania je potrebné usúdiť, že vyrobené formy neboli vhodné na skúšanie a nevydržali by zaťaženie, respektíve je možné, že by zaťaženie vydržali, ale nedá sa to zaručiť. Skúšanie nebolo vykonané z dôvodu hrozby poškodenia foriem, ktoré je potrebné zachovať ako výučbovú pomôcku. Na obrázku č.12 je možné vidieť generatívne navrhnutú formu v priamom porovnaní s vyrobenou formou.

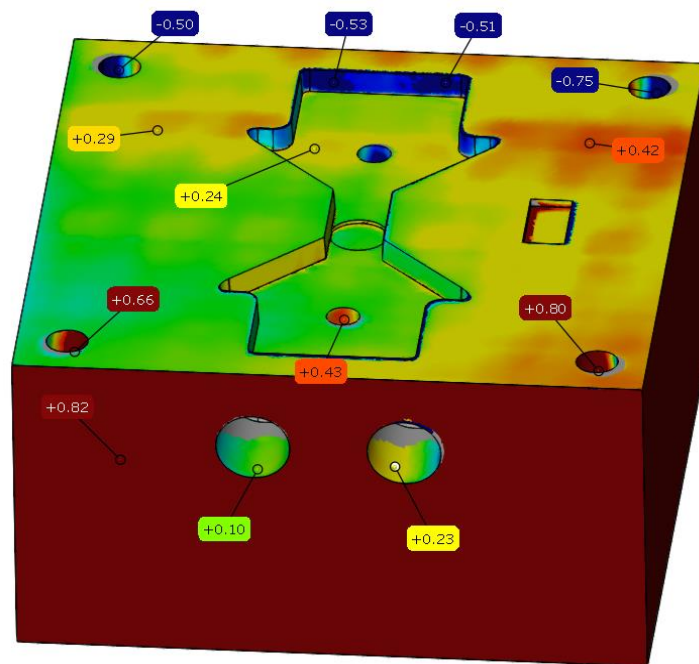


Obrázok 124 Porovnanie generatívne navrhnutého modelu s reálne vyrobenou formou

4.3 Vlastnosti vyrobených foriem

Formy vyrobené v prvej sérii boli odmerané na optickom 3D skenery Gom ATOS Triple Scan a tvarové odchýlky boli zadokumentované. Taktiež sa odskúšalo skenovanie na CT zariadení Zeiss Metrotom avšak neúspešne, pretože žiarenie z CT zariadenia sa odrážalo a teda nebolo možné formy presvietiť.

Výsledky merania vo forme farebnej mapy odchýlok sú zobrazené na obrázku č.13. Z tejto farebnej mapy odchýlok je možné vidieť odchýlky v rozmedzí ± 1 mm. Z tohto dôvodu je potrebné pri navrhovaní súčiastok pre technológiu Binder Jetting pri dizajnovaní rátať s prídavkom na obrábanie, vďaka ktorému by sa dokončovacími obrábacími operáciami dala dosiahnuť požadovaná rozmerová presnosť.



Obrázok 13 Farebná mapa odchýlok nameranej formy

Najväčšie zdroje problémov sú dva, predikcia deformácií v procese sintrovania a odprašovanie zelených telies. Odprašovanie je problémom najmä z dôvodu pevnosti zelených telies. V tomto smere majú výhodu metódy laserového natavovania práškov, kde sa dosahuje finálna pevnosť súčiastok hneď po výrobe a teda nehrozí ich poškodenie pri odprašovaní. Problémy s odprašovaním vznikajú najmä pri vnútorných dutinách a prvkoch so zaobleniami, ktoré je ťažké odprašiť prúdom stlačeného vzduchu, prípadne jemnými štetcami. Predikcia deformácií v procese sintrovania je problematika na ktorú by sa dala zamerať samostatná práca. Vplyv na deformáciu vie mať veľa vplyvov začínajúc teplotným profilom počas sintrovania cez veľkosť jednotlivých častíc prášku až po chemické zloženie práškového materiálu.

Možnosť výroby konformných kanálov a kanálov s rôznymi nekonvenčnými prvkami je jednou z výhod kovovej aditívnej výroby nad konvenčnými metódami výroby. Aby boli konformné kanály využiteľné a aby sa teda táto výhoda dala zužitkovať, je potrebné aby dané chladiace kanály boli vyrobené podľa presných požiadaviek. Jednou z týchto požiadaviek je tesnosť, tým sa chápe aby chladiaca kvapalina nezatekala do iných častí formy a tým pádom aby nevznikali problémy pri vstrekovacom procese a aby sa neznižovala životnosť formy. Ďalšou samozrejmovou podmienkou je priepustnosť daného kanála. Technológiou Binder Jetting bolo možné vyrobiť chladiace kanály, ktoré boli tesné, kvapalina sa nešírila do nežiaducich dutín, avšak neboli priepustné, pretože sa dutina kanála nedala v medzi kroku riadne odprašiť. Keď sa využila metóda rozdelenia formy na viacero častí vznikli kanály priepustné, avšak neboli tesné. Takto netesné formy sa museli utesniť vysokoteplotným silikónom aby boli použiteľné na experimentálne skúšanie. Na obrázku č.14 je vidieť formy pred a po utesnení pomocou vysokoteplotného silikónu.



Obrázok 14 Formy pred a po utesnení vysokoteplotným silikónom

Keď sa spomína tesnosť foriem, treba taktiež spomenúť aj praskliny, ktoré vznikli na formách. Praskliny vznikli pravdepodobne počas procesu sintrovania. Praskliny vznikli v tvarovej dutine, čím hrozí nie len netesnosť formy, ale aj zatekanie plastu do formy cez danú prasklinu.

4.4 Zhrnutie

Grafické výsledky prvotj štúdie ukázali, že chladiaci kanál obdĺžnikového profilu dosiahol najrýchlejšie ochladenie súčiastky, o 2 sekundy rýchlejšie než konvenčný kruhový kanál, čo je významné pre dlhodobú efektívnosť vstrekovania plastov.

Ďalšia simulácia porovnávala výkon kanála s TPMS štruktúrou, avšak kvôli zložitosti pôvodnej štruktúry (5x5x5 mm bunky) bolo potrebné zväčšiť jednotkovú bunku a rozdeliť formu na časti pre ľahšie čistenie. Simulácie porovnávali chladiaci kanál so štvorcovým profilom a s TPMS štruktúrou. Výsledky ukázali, že výkon TPMS kanála bol porovnateľný s kanálom bez TPMS, čo nezhodovalo s očakávaniami ani s literárnym prehľadom.

Prieskum prúdenia odhalil, že TPMS štruktúra spôsobovala premiešavanie prúdenia, čo viedlo k spätným prúdom a obmedzenému prietoku chladiacej kvapaliny, no dosiahnutý chladiaci výkon bol stále rovnaký. Tento výsledok naznačuje, že TPMS štruktúry môžu zlepšiť chladiaci výkon, avšak geometriu štruktúry je potrebné optimalizovať pre vyhovujúce prúdenie kvapaliny.

Chladiaci kanál kruhového profilu mal najslabší chladiaci výkon, s rozdielom takmer 20 sekúnd pri ochladení formy na 60 °C. Tieto hodnoty boli porovnávané s výsledkami CFD simulácie, avšak priame porovnanie nepreukázalo zhodu.

Rozdiely mohli byť spôsobené rozdielnymi začiatočnými teplotami formy: 70 °C pri CFD simulácii a približne 120 °C pri praktickom experimente. Napriek tomu sa očakával výraznejší rozdiel v chladiacich výkonoch jednotlivých kanálov, ako to ukázali výsledky simulácie.

Experimentálne skúšanie formy s chladiacim kanálom obsahujúcim TPMS štruktúru sa ukázalo byť komplikovanejšie než skúšanie foriem s bežnými chladiacimi kanálmi. Problémy začali už pri výrobe foriem, kde veľkosť jednotkovej bunky 5x5x5 mm bola príliš malá. Formu síce bolo možné vyrobiť, ale nie dostatočne odprášiť pred sintráciou, čo spôsobilo, že kanál nebol priechodný a nebolo ho možné použiť na experimenty. Preto bola veľkosť bunky zväčšená na 10x10x10mm.

Po ďalšej optimalizácii sa podarilo vyrobiť formu s TPMS štruktúrou, ale stále sa nepodarilo kompenzovať deformácie a zmraštenie zo sintrácie, čo spôsobilo netesnosti a nepresné priliehanie komponentov.

Celkovo boli vyrobené tri série foriem, ale ani jedna nespĺnila požadované rozmerové vlastnosti. TPMS štruktúra nebola vyrobiteľná, alebo bola poškodená, a formy neboli utesniteľné. Z tohto dôvodu sa usúdilo, že nemá zmysel formu experimentálne skúšať, pretože výsledné hodnoty chladenia by boli skreslené a nereprezentovali by navrhnutú metodiku ani nominálne modely.

Odl'ahčenie vstrekovacích foriem bolo realizované dvomi metódami: použitím TPMS Diamond štruktúry a generatívnym návrhom pomocou softvéru Hexagon Apex Generative Design.

Prvá forma s jednotkovou bunkou 5x5x5 mm bola úspešne vyrobená, ale nebolo možné ju dostatočne odprášiť, a chladiaci kanál nebol priechodný. Simulácia bola tiež zložitá kvôli zložitej sieti prvkov. Druhá forma s bunkou 20x20x20 mm bola úspešne vyrobená a simulovaná, pričom vydržala zaťaženie 65 kN s maximálnou neplastickou deformáciou 0,02 mm mimo tvarovej dutiny. Forma z druhej série bola presnejšia, ale potrebovala byť rozdelená na dve časti kvôli odprášeniu, čo spôsobilo problémy s presným spojením a tvarovou presnosťou.

Generatívne navrhnutá forma v musela byť rozdelená na dve časti, čo spôsobilo deformácie a praskliny počas sintrácie. Vyrobené formy mali nedostatočnú kvalitu, s výraznými deformáciami a prasklinami, čo znemožnilo ich použitie na testovanie. Napätia sa koncentrovali v nosníkoch, ktoré boli vyrobené v nedostatočnej kvalite a slúžili na upnutie formy do stroja. Napriek týmto problémom sa podarilo dosiahnuť odl'ahčenie vstrekovacích foriem pri zachovaní mechanických vlastností. Simulácie a experimenty s TPMS štruktúrami potvrdili účinnosť metód. Experimenty s generatívne navrhnutými formami sa nevykonali kvôli nedostatočnej kvalite výroby, ale po úprave modelu a výrobného procesu je predpoklad, že generatívne navrhnutá forma by splnila požiadavky.

Celkovo, technológia Binder Jetting má potenciál, ale je potrebná značná znalosť procesu a predikcia deformácií a zmraštenia, taktiež nie je technológia vhodná na výrobu príliš

komplikovaných dutín prípadne štruktúr v dutinách. Ak by sa použila technológia SLM, problémy s odprášením by sa znížili, pevnosť súčiastok by umožnila výrobu konformných kanálov bez potreby delenia formy, čím by sa dosiahla vyššia tvarová presnosť a životnosť formy.

Na základe týchto informácií, Binder Jetting technológia môže byť vhodná na výrobu aditívne navrhnutých foriem, avšak, je dôležité zohľadniť, že výsledné vlastnosti výrobku môžu byť ovplyvnené mnohými faktormi, vrátane charakteristík prášku (tvar a veľkosť), vlastností väziva (chémia väziva a mechanizmus tvorby kvapiek), parametrov tlačového procesu a parametrov tepelného spracovania, resp. sintrovania a samotnej geometrie súčiastky.

PRÍNOSY PRÁCE

Tvar profilu chladiacich kanálov ovplyvňuje účinnosť chladenia vstrekovacích foriem. Toto zistenie poukazuje na nutnosť overenia tohto vplyvu na väčších formách a v iných aplikáciách. Pre dosiahnutie optimálneho chladenia je potrebné experimentálne skúmať rôzne geometrie chladiacich kanálov v rozmerovo väčších formách, čo by mohlo priniesť významné zlepšenia v procese vstrekovania plastov a zvýšiť životnosť a efektivitu samotných foriem znížením cyklových časov..

Výroba TPMS prvkov s požadovanou rozmerovou presnosťou, tesnosťou a priepustnosťou predstavuje značnú výzvu. Napriek týmto ťažkostiam majú TPMS štruktúry potenciál významne prispieť k efektívnosti chladenia v aplikáciách vstrekovania plastov. Vzhľadom na veľký vplyv vlastností štruktúry na chladenie je potrebný dodatočný výskum, ktorý by sa zamerával na vplyv jednotlivých parametrov a typov štruktúr. Tento výskum by mohol objasniť, ako optimalizovať TPMS prvky pre ich efektívne využitie v chladiacich okruhoch.

Odlahčenie foriem pomocou TPMS štruktúr a Generatívneho dizajnu je účinné pri znižovaní hmotnosti foriem bez kompromisov na ich mechanických vlastnostiach. TPMS štruktúry umožňujú vytvorenie ľahkých, ale pevných štruktúr, zatiaľ čo generatívny dizajn optimalizuje materiálové rozloženie na základe simulačných analýz. Tieto technológie prinášajú nové možnosti pre návrh a výrobu odlahčených foriem, čo vedie k úsporám materiálu a energie pri zachovaní požadovanej funkčnosti a taktiež ku skráteniu cyklových časov.

Technológia Binder Jetting je použiteľná na výrobu vstrekovacích nástrojov s prihliadnutím na zásady navrhovania súčiastok pre aditívnu výrobu (DfAM). Avšak vlastnosti súčiastok medzi krokom výroby a sintrovania spôsobujú väčšinu problémov s finálnymi výrobkami, rovnako tak je zásadná aj predikcia deformácií počas sintrovania. Súčiastky však vyžadujú dodatočnú úpravu aj po sintrovaní.

Po výrobe viacerých vstrekovacích foriem sa tieto formy zachovali na fakulte a môžu byť použité ako názorné výučbové pomôcky pri predmetoch ako Ateliér počítačovej podpory, Výroba a renovácia nástrojov, Teoretické základy aditívnej výroby a Technológia aditívnej výroby. Taktiež postupy modelovania, príprava simulácií, vyhodnocovanie simulácií, meranie rozmerových presností a ich vyhodnocovanie v tejto práci môžu byť použité vo výučbovom

procesy pri výučbe princípov ako napríklad : Implicitné modelovanie, Generatívny dizajn, Optimalizácia topológie, Výpočtová dynamika kvapalín a Navrhovanie pre aditívnu výrobu.

Možné pokračovanie výskumu v budúcnosti

Vplyv jednotlivých parametrov návrhu TPMS štruktúr pre ich využitie v chladiacich aplikáciách už bol obšírne skúmaný v literárnom prehľade v tejto práci, avšak stále je veľa premenných parametrov ktorých vplyv je potrebné preskúmať. Hrúbky stien doskových TPMS štruktúr, vplyv typu generovania TPMS štruktúr, prípadne rôzne rozmery jednotkovej bunky a ich vplyv na vlastnosti prenosu tepla. Taktiež rôzne výrobné metódy TPMS štruktúr a ich vplyv na vyrobené štruktúry.

Väčšina výskumu v literatúre bola vykonaná len simulačne bez dodatočného experimentálneho skúšania, ktoré ako je možné vidieť aj v tejto práci môže mať v realite iné výsledky aké sa očakávajú na základe simulačných analýz.

Priame porovnanie výrobkov prípadne foriem vyrobených metódami SLM a Binder Jetting by mohlo objasniť vplyv výrobných technológií na vlastnosti výrobkov.

Veľmi dôležité smerovania ďalšieho výskumu by mohlo byť zamerané na výskum a vývoj predikčných modelov rôznych práškových materiálov pre proces sintrovania po výrobe metódou Binder jetting, vzhľadom na to, že dané deformácie a zmraštenia boli dôvodom väčšiny vzniknutých problémov v tejto práci.

ZÁVER

Prípadové štúdie v tejto práci preukázali, že využitie kovovej aditívnej výroby má široké využitie v procesoch návrhu a výroby vstrekovacích nástrojov. Metódou Binder jetting je možné vyrobiť nástroje na vstrekovanie plastov avšak je potrebné aby výrobný proces bol optimalizovaný. Využitie metódy rozdelenia súčiastok je nutné pri návrhu vnútorných prvkov ako napr. konformné kanály. Využitie tejto metódy prináša nevýhody vo forme možného rozdielneho zmrašťovania a deformácií jednotlivých súčiastok a tým pádom hrozí aj netesnosť prípadných vnútorných dutín. Na podporu používania tejto metódy je potrebné starostlivé plánovanie procesu. Štúdie taktiež ukázali, že metódy ako Generatívny dizajn, prípadne využitie TPMS štruktúr je perspektívna metóda na dosiahnutie úspory materiálu a odľahčenie vstrekovacích nástrojov. Kovová aditívna výroba však nie je samostatne dostačujúca metóda na vyrobenie finálnych foriem. Formy vyrobené kovovou aditívnou výrobou si vyžadujú dodatočné úpravy a treba s tým rátať už v procese návrhu.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] T. A. Osswald, Polymer processing fundamentals. Hanser, 1998.
- [2] H.S. Park, X.P. Dang, Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 11 (2010) 879– 890, doi: 10.1007/s12541-010-0107-z .
- [3] M. Mazur, P. Brincat, M. Leary, M. Brandt, Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 93 (2017) 881–900, doi: 10.1007/s00170-017-0426-7 .
- [4] K. Eiamsa-Ard, K. Wannissorn, Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process, *Comput.-Aided Des.* 69 (2015) 126–133, doi: 10.1016/j.cad.2015.04.004 .
- [5] T. Evens, W. Six, J. De Keyzer, F. Desplentere, A. Van Bael, Experimental analysis of conformal cooling in SLM produced injection moulds: effects on process and product quality, *AIP Conf. Proc.* 2055 (2019) 070017, , doi: 10.1063/1.5084861 .
- [6] A.J. Norwood, P.M. Dickens, R.C. Soar, R. Harris, G. Gibbons, R. Hansell, Analysis of cooling channels performance, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 17 (2004) 669–678, doi: 10.1080/09511920420000237528 .
- [7] O.A. Mohamed, S.H. Masood, A. Saifullah, A simulation study of conformal cooling channels in Plastic injection molding, *Int. J. Eng. Res.* 2 (2013) 344– 348, doi: 10.1017/S1355617704105109 .
- [8] M. Khan, S.K. Afaq, N.U. Khan, S. Ahmad, Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design, *ISRN Mech. Eng.* 2014 (2014) 968484, , doi: 10.1155/2014/968484 .
- [9] Y.F. Sun, K.S. Lee, A.Y.C. Nee, Design and FEM analysis of the milled groove insert method for cooling of plastic injection moulds, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 24 (2004) 715–726, doi: 10.1007/s00170-003-1755-2 .

- [10] Pan,C. ;Han,Y. ;Lu,J. Design and optimization of lattice structures :A review. Appl. Sci.2020,10,6374.
- [11] Kaur,I. ;Singh,P. State of the art in heat exchanger additive manufacturing. Int. J.HeatMassTransf.2021,178,121600.
- [12] Kaur,I .;Singh,P. Critical evaluation of additively manufactured metal lattices for viability in advanced heat exchangers. Int. J. HeatMassTransf.2021,168,120858.
- [13] Al-Ketan,O.;Al-Rub,R.K.A. Multifunctional Mechanical Meta materials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices. Adv. Eng.Mater.2019,21,1900524.
- [14] Voicu,A.D.;Hadăr,A.;Vlăsceanu,D.Benefits of 3D printing technologies for aerospace lattice structures .Sci.Bull.Nav.Acad. 2021,24,8–16.
- [15] Feng,J.;Fu,J.;Yao,X.;He,Y.Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures : From multi – scale design , precise additive manufacturing to multi disciplinary applications. Int. J.Extrem.Manuf.2022,4,022001.
- [16] Al-Ketan,O.;Rowshan,R.;Al-Rub,R.K.A.Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut , skeletal , and sheet based periodic metallic cellular materials. Addit.Manuf.2018,19,167–183.
- [17] Xiao,Z.;Yang,Y.;Xiao,R.;Bai,Y.;Song,C.;Wang,D.Evaluation of topology- optimized lattice structures manufactured via selective laser melting .Mater.Des.2018,143,27–37.
- [18] Kazemi,H.;Vaziri,A.;Norato,J.A.Multi Material topology optimization of lattice structures using geometry projection Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2020 ,363, 112895.
- [19] Han, L.; Che, S. An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems. Adv. Mater. 2018, 30, 705708.
- [20] Schwarz, H.A. Gesammelte Mathematische Abhandlungen; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1890.
- [21] Neovius, E.R. Bestimmung Zweier Spezieller Periodischer Minimalflächen, Akad; Abhandlungen: Helsinki, Finland, 1883.

- [22] Schoen, A.H. Infinite Periodic Minimal Surfaces without Self-Intersections; NASA: Washington, DC, USA, 1970.
- [23] Gandy, P.J.F.; Klinowski, J. Nodal surface approximations to the zero equipotential surfaces for cubic lattices. *J. Math. Chem.* 2002, 31, 1–16.
- [24] Al-Ketan, O.; Al-Rub, R.K.A. MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces. *Mater. Des. Process. Commun.* 2020, 3, 1–10.
- [25] Yeranee, K.; Rao, Y. A Review of Recent Investigations on Flow and Heat Transfer Enhancement in Cooling Channels Embedded with Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). *Energies* 2022, 15, 8994. <https://doi.org/10.3390/en15238994>
- [26] M.H. Elahinia, M. Hashemi, M. Tabesh, S.B. Bhaduri, *Progress in Materials Science* 57 911 (2012).
- [27] J.P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T.H.C. Childs, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 730 (2007).
- [28] Seong Je Park, Jun Hak Lee, Jeongho Yang, Woongbeom Heogh, Dongseok Kang, Si Mo Yeon, Sang Hoon Kim, Sukjoon Hong, Yong Son, Jiyong Park, Lightweight injection mold using additively manufactured Ti-6Al-4V lattice structures, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 79, 2022, Pages 759-766, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.022>.
- [29] Wei Tang, Hua Zhou, Yun Zeng, Minglei Yan, Chenglu Jiang, Ping Yang, Qing Li, Zhida Li, Junheng Fu, Yi Huang, Yang Zhao, Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 201, Part 1, 2023, 123642, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123642>.
- [30] Attarzadeh, R., Rovira, M., & Duwig, C. (2021). Design analysis of the ‘Schwartz D’ based heat exchanger : A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177. Published. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415>
- [31] Altaf, Khurram & Abdul-Rani, Ahmad-Majdi. (2015). Numerical study of profiled conformal cooling channels for cooling time reduction in injection mould tools.

International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation. 7. 230.
10.1504/IJESMS.2015.072508.

- [32] Brackett, D. & Ashcroft, Ian & Hague, Richard. (2011). Topology optimization for additive manufacturing. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011. 348-362.

Zoznam publikačnej činnosti

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 DOBROVSZKÝ, Patrik - BÍLIK, Jozef - MILDE, Ján - KRITIKOS, Michaela [Samardžiová, Michaela,] - ĎURIŠKA, Libor. Influence of iron-based powder additive on a shape accuracy of injection moulded parts. In *Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Vol. 30, no. 50 (2022), s. 30-36. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2022-0004.
Typ výstupu: článok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: ADF
- V3_02 MILDE, Ján - DOBROVSZKÝ, Patrik - VETEŠKA, Peter - HORVÁTH ORLOVSKÁ, Martina [Orlovská] - MACHÁČ, Tomáš - BITTER, Miloš - POKORNÝ, Peter. Research of properties of ceramic composite fiber printed using fused deposition modeling technology. In *MM Science Journal*. June (2023), s. 6512-6518. ISSN 1803-1269(P) (2022: 0.700 - IF, 0.239 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.17973/MMSJ.2023_06_2023045 ; SCOPUS: 2-s2.0-85175837871 ; WOS: 001006849500001.
Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM
- V3_03 DOBROVSZKÝ, Patrik - MACHÁČ, Tomáš - DUBNIČKA, Maroš - PAŠÁK, Matej - BÍLIK, Jozef - POKORNÝ, Peter. Impact of different tpms tessellation approaches on mechanical properties of parts. In *MM Science Journal*. June (2024), V databáze: DOI: 10.17973/MMSJ.2024_06_2024015; (ČLÁNOK V TLAČI)
Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 MILDE, Ján - JURINA, František - PETERKA, Jozef - DOBROVSZKÝ, Patrik - HRBÁL, Jakub - MARTINOVIČ, Jozef. Influence of Part Orientation on the Surface Roughness in the Process of Fused Deposition Modeling. In *Key Engineering Materials*. Vol. 896, International Conference on Building Materials and Construction (ICBMC 2021), Nanotechnology and Nanomaterials in Energy (ICNNE 2021), Energy Engineering and Smart Materials (ICEESM 2021), s. 29-37. ISSN 1013-9826 (2021: 0.200 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.896.29 ; SCOPUS: 2-s2.0-85120522850.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_02 MILDE, Ján - PETERKA, Jozef - JURINA, František - DOBROVSZKÝ, Patrik - HRBÁL, Jakub - PITEK, Peter - MARTINOVIČ, Jozef. Influence of selected photopolymers on the resulting accuracy and surface roughness of the component in digital light processing technology. In *Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation"*. 1. vyd. Vienna : DAAAM International Vienna, 2021, S. 235-245. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-902734-33-4. V databáze: DOI: 10.2507/32nd.daaam.proceedings.034 ; SCOPUS: 2-s2.0-85123951463.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_03 MILDE, Ján - PETERKA, Jozef - KURUC, Marcel - HRBÁL, Jakub - DOBROVSZKÝ, Patrik.
Influence of the Part Orientation and Type of Used Photopolymer Resin on Surface
Roughness in the Process of Digital Light Processing Technology. In *Proceedings of the
Green Materials and Electronic Packaging Interconnect Technology Symposium : EPITS
2022, 14-15 September, Langkawi, Malaysia*. 1. vyd. Singapore : Springer Nature, 2023, S.
783-794. ISSN 0930-8989. ISBN 978-981-19-9266-7. V databáze: DOI: 10.1007/978-981-19-
9267-4_77 ; SCOPUS: 2-s2.0-85168775718.
Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: AFC

Súhrn

DOBROVSZKÝ, Patrik: Aplikácia aditívnych technológií vo výrobe komponentov nástrojov na vstrekovanie plastov. [Dizertačná práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií – Školiteľ: doc. Ing. Jozef Bílik, PhD. – Trnava: MTF STU, 2024, 106s

Dizertačná práca autora. V prvej časti práce sa autor venuje úvodu, problematike vstrekovania plastov a aditívnej výroby. Vysvetľuje momentálny stav technológie vstrekovania termoplastov a rôznych typov technológií aditívnej výroby. Druhá časť práce je zameraná na literárny prehľad už vykonaného výskumu aplikácie aditívnej výroby do procesov vstrekovania plastov, vysvetlených je viacero štúdií a zameraní, ktorým sa dá v danej problematike venovať. Tretia časť práce je zameraná na zhrnutie literárneho prehľadu z druhej časti. Ďalej sú v tretej časti navrhnuté viaceré štúdie, ktoré sú v rámci práce vypracované. Taktiež sú v tretej časti stanovené ciele a sú vyvedené predpoklady. Štvrtá časť je zameraná na návrh experimentov, návrh simulačných riešení, návrh foriem, ich výrobu a zhrnutie postupov. Piata časť je zameraná na vyhodnotenie výsledkov zo simulácií a experimentov. Zhodnotenie vlastností vyrobených foriem a celkové zhrnutie práce. Možné budúce pokračovanie výskumu a prínosy práce sú objasnené.

Abstract

DOBROVSZKÝ, Patrik: Application of additive technologies in the production of injection moulding tool components. [Dissertation] - Slovak University of Technology in Bratislava. Faculty of Materials Technology based in Trnava; Department of Production Technologies - Supervisor. Ing. Jozef Bilik, PhD. – Trnava : MTF STU, 2024, 106s

Author's dissertation thesis. In the first part of the thesis the author deals with the introduction, the problems of injection moulding and additive manufacturing. He explains the current state of the art of thermoplastic injection moulding technology and different types of additive manufacturing technologies. The second part of the thesis focuses on the literature review of the research already carried out on the application of additive manufacturing to plastic injection moulding processes, several studies and focuses that can be addressed in the subject are explained. The third part of the thesis is aimed at summarizing the literature review from the second part. Furthermore, the third part proposes several studies that are conducted within the thesis. Also in the third section, the objectives are stated and assumptions are drawn. The fourth section focuses on the design of experiments, simulation design, mould design, mould fabrication and a summary of the procedures. The fifth section focuses on the evaluation of the results from the simulations and experiments. Evaluation of the properties of the produced moulds and overall summary of the work. Possible future research continuations and contributions of the thesis are explained.