



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE EXTRUDÉRU PRO 3D TISK NÍZKO-TAVITELNÝCH KOVOVÝCH SLITIN

DESIGN OF EXTRUDER FOR 3D PRINTING OF LOW-MELTING METAL ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Slezák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Tomáš Slezák**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

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

Konstrukce extrudéru pro 3D tisk nízko–tavitelných kovových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tisk kovových materiálů je v současné době možný pouze relativně drahými technologiemi z kovových prášků (SLM, EBM, DED...). Jako alternativní se začínají prosazovat technologie pracující s kovovými částicemi plněným filamentem, ovšem ty vyžadují náročné tepelné zpracování (sintering) pro dosažení mechanické pevnosti. Jedním z málo prozkoumaných způsobů je přímý tisk nízko–tavitelných materiálů využívajících extruze polotekutého kovu. Tento způsob má potenciál být skutečně nízkonákladovou variantou využívající cenově dostupný kovový drát a speciální extrudér.

Typ práce: vývojová – konstrukční

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

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je vyvinout extrudér pro 3D tisk nízko–tavitelných slitin na principu extruze polotekutého kovu s těmito parametry: vstupní materiál ve formě drátu, průměr drátu 1,6–2,0 mm, teplota vyhřívání 400–700 °C.

Díličí cíle diplomové práce:

- definovat klíčové parametry extrudéru zajišťující kontrolu extruze polotekutého kovu,
- navrhnout extruzní komoru s kontrolovaným vyhříváním,
- realizovat prototyp extrudéru,
- ověřit funkci na vybrané nízko–tavitelné slitině.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

JABBARI, Amin a ABRINIA, Karen. A metal additive manufacturing method: semi-solid metal extrusion and deposition. online. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, roč. 94, č. 9-12, s. 3819-3828. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1058-7>.

LIMA, Dalton Daniel; CAMPO, Kaio Niitsu; BUTTON, Sergio Tonini a CARAM, Rubens. 3D thixo-printing: A novel approach for additive manufacturing of biodegradable Mg-Zn alloys. online. Materials and Design. 2020, roč. 196. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109161>.

FEI, Yifan; XU, Jie; YAO, Donggang a ZHOU, Jack. From semisolid metal processing to thixotropic 3D printing of metallic alloys. online. Virtual and Physical Prototyping. 2022, roč. 17, č. 3, s. 489-507. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2045674>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom a konštrukciou extrudéra určeného pre 3D tlač nízko-tavitelných kovových zliatin v polotuhom stave. Cieľom práce bolo vyvinúť zariadenie schopné spracovávať materiál vo forme drôtu, ktorý sa za kontrolovaných podmienok zohreje do čiastočne nataveného stavu a následne je extrudovaný.

Navrhnutý extrudér bol realizovaný na základe systematickej rešerše, výpočtového modelovania a praktickej konštrukcie s dôrazom na presnú tepelnú reguláciu, bezpečnosť a modularitu zariadenia. Funkčný prototyp bol podrobený experimentálnym testom s použitím zliatiny AlSi5. Experimenty čiastočne potvrdili, že zariadenie umožňuje extrúziu pri teplote približne 630 °C, pričom riadiaci systém dosahoval regulačnú presnosť $\pm 0,85$ °C.

Výsledky práce potvrdzujú praktickú uskutočniteľnosť navrhnutého riešenia ako alternatívy ku konvenčným práškovým technológiám, čím sa otvárajú možnosti lacnejšej a bezpečnejšej aditívnej výroby kovových objektov.

KLÚČOVÉ SLOVA

Aditívna výroba, 3D tlač, polotuhý stav, extrúzia kovov, konštrukcia extrudéra

ABSTRACT

This thesis deals with the design and construction of an extruder intended for 3D printing of low-melting-point metal alloys in a semi-solid state. The aim of the work was to develop a device capable of processing wire feedstock, which is heated under controlled conditions into a partially molten state and subsequently extruded.

The proposed extruder was developed based on systematic research, computational modelling, and practical design, with an emphasis on precise thermal regulation, safety, and modularity of the system. A functional prototype was experimentally tested using the AlSi5 alloy. The experiments partially confirmed that the device enables extrusion at approximately 630 °C, with the control system achieving a regulation accuracy of ± 0.85 °C.

The results confirm the practical feasibility of the proposed solution as an alternative to conventional powder-based technologies, thus opening the possibility of more affordable and safer additive manufacturing of metal objects.

KEYWORDS

Additive manufacturing, 3D printing, semi-solid state, metal extrusion, extruder design

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

Slezák, Tomáš. *Konstrukce extrudéru pro 3D tisk nízko-tavitelných kovových slitin*. Brno, 2025, 160s. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166228>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcemu mojej diplomovej práce, doc. Ing. Danielovi Koutnému, Ph.D., za odborné vedenie, cenné rady a podporu počas celého riešenia témy. Jeho prístup a ochota konzultovať každú fázu práce výrazne prispeli k jej úspešnému dokončeniu.

Ďalej by som chcel poďakovať všetkým, ktorí mi poskytli technickú, odbornú alebo materiálnu pomoc pri návrhu, konštrukcii a testovaní zariadenia – najmä pracovníkom Ústavu konštruovania a Ústavu materiálových vied a inžinierstva za poskytnutie zázemia a konzultácií pri experimentoch.

Osobitná vďaka patrí mojej rodine a blízkym za ich trpezlivosť, podporu a povzbudenie počas celého štúdia. Bez ich porozumenia a motivácie by táto práca nevznikla.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu *Konstrukce extrudéru pro 3D tisk nízko-tavitelných kovových slitin* som vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrázkových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

V Brne, dňa 23. mája 2025

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	15
2.1	Rešeršné metódy	15
2.2	Aditívna výroba kovových objektov	17
2.3	Aditívna výroba extrúziou materiálu	18
2.3.1	Návrh filamentového systému pre 3D tlač technológiu FDM/FFF	20
2.4	Spracovanie kovov v polotuhom stave	24
2.4.1	Reológia kovových zliatin v polotuhom stave	27
2.4.2	Mikroštruktúra zliatin spracovaných v polotuhom stave	29
2.4.3	Termo-fyzikálna analýza	30
2.4.4	Požiadavky na materiály	30
2.4.5	Materiály vhodné pre spracovanie v polotuhom stave	31
2.5	Prehľad experimentálnych zariadení	32
2.5.1	Extrudéry s odporovým ohrevom - thixoforming	34
2.5.2	Extrudéry s priamym indukčným ohrevom - thixoforming	36
2.5.3	Extrudéry s nepriamym indukčným ohrevom - thixoforming	38
2.5.4	Extrudéry s odporovým ohrevom - rheocasting	40
2.6	Patenty	44
2.6.1	Metóda a prístroj na výrobu kovových telies s využitím čiastočne stuhnutej kovovej suspenzie	44
2.6.2	Systém a metóda na vytváranie trojrozmerných objektov zo zliatin na báze kovov	46
2.6.3	Zariadenie na aditívnu výrobu pomocou vytlačania drôtu v polotuhom stave	48
2.6.4	Zariadenie na aditívnu výrobu pomocou priameho odporového ohrevu	49
2.7	Zhrnutie hlavných zistení	51
2.8	Identifikácia novosti a príležitosti	54
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	56
3.1	Analýza problému	56
3.2	Cieľ práce	59
4	KONCEPČNÉ RIEŠENIE	60
4.1	Analýza cieľov a špecifikácia obmedzení	60
4.2	Technická analýza funkcií	63
4.3	Návrh alternatívnych riešení	65
4.3.1	Kritéria pre hodnotenie alternatívnych riešení	65

4.3.2	Filamentový extrudér	66
4.3.3	Šnekový extrudér	68
4.3.4	Piestový extrudér	71
4.4	Analýza alternatívnych riešení, výber varianty pre ďalší vývoj	74
5	PREDBEŽNÝ NÁVRH	76
5.1	Určenie tvaru, rozmerov a materiálu	76
5.2	Matematický model	81
5.2.1	Predikcia výkonu potrebného na ohrev a tavenie	82
5.2.2	Analýza teplotného poľa v predohrievacom a tavnom telese	88
5.2.3	Analýza vplyvu tepelnej rozťažnosti	94
5.2.4	Predikcia tlakových strát	96
5.2.5	Voľba pohonu podávacieho mechanizmu	98
5.2.6	Napät'ovo-deformačná analýza	100
5.3	Odhad výrobných nákladov a objemu výroby rovni	103
6	DETAILNÝ NÁVRH	104
6.1	Návrh extrudéra	104
6.1.1	Podávací mechanizmus a hlavný chladič	105
6.1.2	Zostava predohrevu	107
6.1.3	Zostava pre tavenie	109
6.1.4	Chladenie a prívod ochrannej atmosféry	110
6.2	Výroba a nákup komponentov	112
6.2.1	Výroba	112
6.2.2	Výrobné náklady	114
6.3	Montáž	115
6.3.1	Mechanická časť	115
6.3.2	Zapojenie elektroinštalácie	117
6.3.3	Riadenie a ovládanie	118
6.4	Validačné experimenty	119
6.4.1	Výber materiálu	120
6.4.2	Ladenie regulácie teplôt	120
6.4.3	Meranie teplotného profilu	124
6.4.4	Skúšobná extrúzia nízko-taviteľnej zliatiny	126
6.5	Hodnotenie kľúčových parametrov	130
6.5.1	Definovanie kľúčových parametrov extrudéra	130
6.5.2	Návrh vyhrievacej komory	131
6.5.3	Realizácia prototypu extrudéra	133

6.5.4	Overenie funkcie na vybranej nízko-taviteľnej zliatine	134
7	ZÁVER	137
8	VÝSLEDKY PODĽA RIV	138
9	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	140
10	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	147
11	ZOZNAM OBRÁZKOV	152
12	ZOZNAM TABULIEK	156
13	ZOZNAM PRÍLOH	157

1 ÚVOD

Aditívne technológie pre spracovanie kovových materiálov sa za posledné desaťročia výrazne rozvinuli a našli si uplatnenie v mnohých odvetviach priemyslu, od letectva a automobilového priemyslu až po medicínu a výskum. Napriek týmto pokrokom zostáva 3D tlač kovov technologicky a ekonomicky náročnou oblasťou, predovšetkým kvôli nákladným vstupom, špecifickým požiadavkám na pracovné prostredie a zložitosti zariadení.

Tradičné metódy, ako je Selective Laser Melting (SLM) alebo Electron Beam Melting (EBM), vyžadujú použitie kovových práškov. Tieto sú nielen výrazne drahšie v porovnaní s hutnými polotovarmi, ale aj náročné na skladovanie, manipuláciu a bezpečnosť. To obmedzuje širšie uplatnenie týchto technológií v priemyselnej praxi i mimo nej.

Ako perspektívna alternatíva sa javí 3D tlač kovových zliatin v polotuhom stave, ktorá spája výhody konvenčných aditívnych technológií s nižšími nárokmi na materiál a vybavenie. V tomto stave sa kov správa ako tixotropná suspenzia, čo umožňuje jeho kontrolované nanášanie vo vrstvách bez potreby úplného tavenia.

Motiváciou pre túto prácu je potreba vytvoriť cenovo dostupné, bezpečné a spoľahlivé zariadenie pre spracovanie kovov v polotuhom stave, ktoré by umožnilo vývoj alternatív k tradičným metódam. Cieľom práce je preto návrh, konštrukcia a experimentálne overenie extrudéra pracujúceho s kovovým drôtom, ktorého ohrev je riadený tak, aby materiál dosahoval požadovaný stav.

Práca má za cieľ nielen vytvoriť funkčný prototyp, ale aj overiť jeho schopnosti v rámci experimentov s reálnou kovovou zliatinou. Týmto spôsobom prispieva k rozšíreniu poznatkov v oblasti aditívnej výroby v polotuhom stave a ponúka potenciálny základ pre ďalší vývoj a aplikácie.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Cieľom tejto kapitoly je poskytnúť odborný rámec a prehľad poznatkov nevyhnutných pre návrh a realizáciu extrudéra určeného na spracovanie kovových zliatin v polotuhom stave. V úvode je predstavená metodika rešeršného postupu, po ktorej nasleduje súhrn poznatkov z oblasti aditívnej výroby kovových materiálov, najmä technológií využívajúcich extrúziu. Osobitná pozornosť je venovaná správaniu kovových zliatin v oblasti medzi teplotou solidus a likvidus, ich reologickým vlastnostiam a vhodnosti na spracovanie v polotuhom stave. V závere kapitoly sú zhrnuté doteraz známe konštrukcie experimentálnych zariadení a súvisiace patentové riešenia, ktoré slúžia ako východiská pre návrh vlastného zariadenia.

2.1 Rešeršné metódy

Návrh extrudéra pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin v polotuhom stave predstavuje komplexný problém, ktorého riešenie vyžaduje znalosti nielen z oblasti konštrukcie, ale aj z materiálových vied. Väčšina vedeckých prác sa zameriava na procesy prebiehajúce počas prevádzky týchto zariadení alebo na prípravu spracovávaného materiálu. Len zriedkavo sa výskum venuje samotnému návrhu či optimalizácii extrudérov. Navyše, 3D tlač kovových zliatin v polotuhom stave patrí medzi menej preskúmané oblasti.

Relevantné informácie o konštrukcii extrudérov určených na 3D tlač kovových zliatin boli získané systematickou rešeršou. Na jej začiatku bol formulovaný problém. Následne boli zostavené rešeršné dotazy pokrývajúce nielen samotnú konštrukciu extrudéra, ale aj súvisiace oblasti. Nižšie sú uvedené štyri dotazy spolu s krátkym komentárom o ich význame a dôležitosti pre túto diplomovú prácu.

1. Aký je súčasný stav vývoju extrudérov pre 3D tlač kovových zliatin v polotuhom stave?

Na základe dostupných informácií bolo za posledných približne 30 rokov publikovaných niekoľko prác so spoločnou tematikou venujúcou sa extrúzii polotuhých zliatin. Je teda vysoko pravdepodobné, že niektoré z nich obsahujú informácie poukazujúce na konštrukčné nedostatky, ktorým výskumníci čelili počas experimentov, ako aj spôsoby, akými ich riešili. Tieto poznatky môžu byť následne implementované do návrhu zariadenia alebo môžu slúžiť ako inšpirácia.

2. Aké existujú spôsoby nanášania zliatin v polotuhom stave v oblasti aditívnych technológií?

Spôsob nanášania materiálu výrazne ovplyvňuje komplexnosť konštrukcie extrudéra. Každý prístup má svoje výhody a nevýhody, ktoré môžu predstavovať limitujúce faktory pri návrhu a optimalizácii zariadenia.

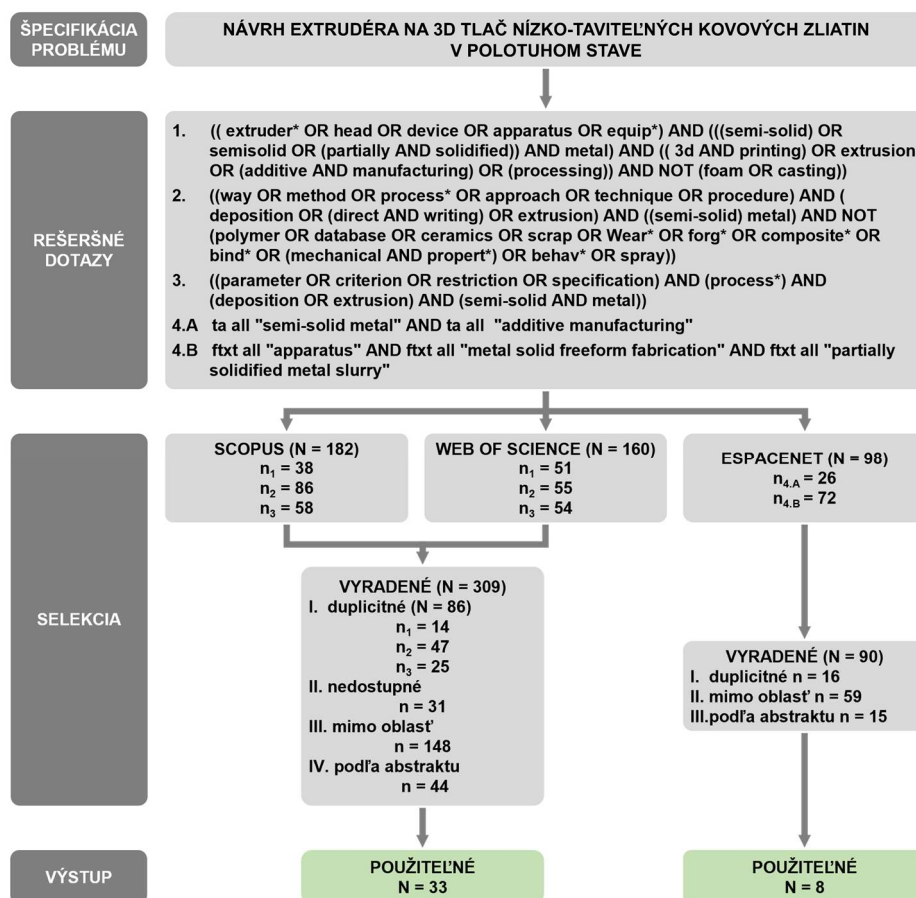
3. Aké sú kľúčové parametre procesu nanášania materiálu v polotuhom stave?

Parametre procesu nanášania materiálu predstavujú hlavné limitujúce faktory pri návrhu extrudéra. S rastúcou požiadavkou na ich presnosť narastá aj technická zložitosť zariadenia. Preto je nevyhnutné tieto parametre identifikovať, určiť ich vzťah k procesu a ďalším výstupným premenným, ako aj zvážiť možnosti ich regulácie.

4. Aké patenty existujú na proces 3D tlač polotuhého kovu alebo na zariadenia, ktorého ho umožňujú?

Ak existuje patent na zariadenie umožňujúce 3D tlač kovov v požadovanom stave, možno predpokladať, že dané riešenie už dosiahlo určitý stupeň technickej pripravenosti. Identifikácia relevantných patentov môže poskytnúť cenné informácie o existujúcich riešeniach a inšpiráciu pre návrh vlastného extrudéra.

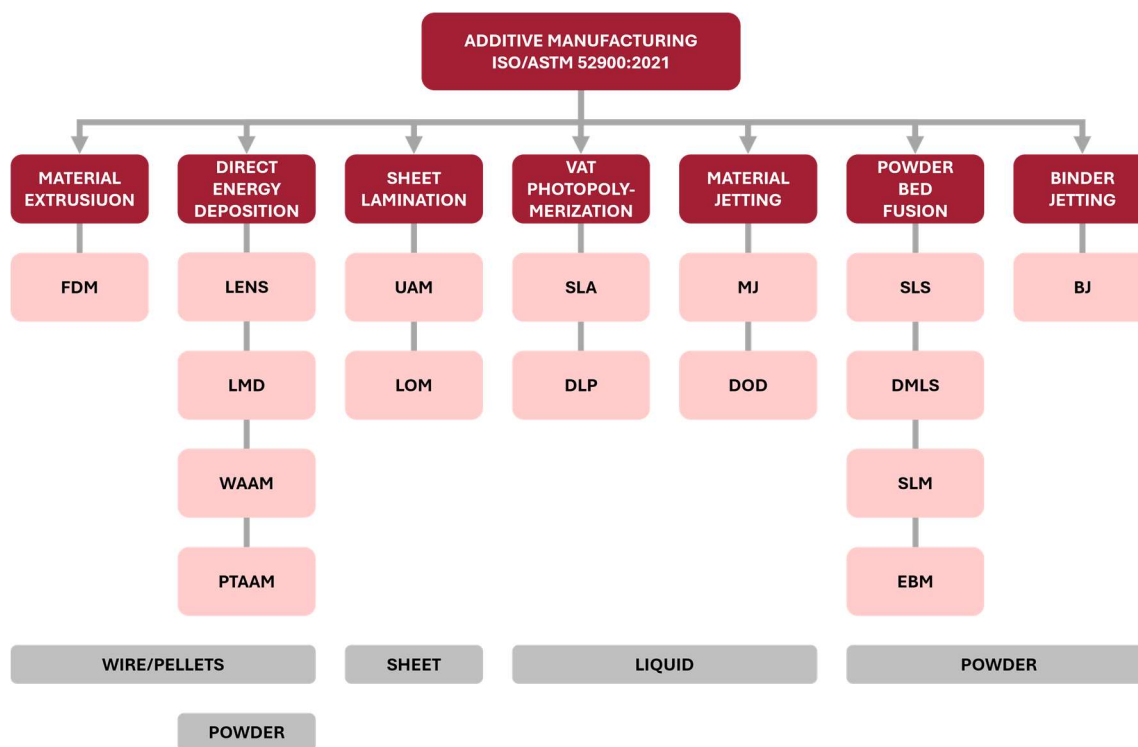
Na základe vyššie uvedených rešeršných dotazov boli vybrané kľúčové slová, ktoré boli doplnené o synonymá. Tieto výrazy boli použité pri vyhľadávaní vo vedeckých databázach (Scopus, Web of Science) a v prípade patentov, v patentových databázach (Espacenet). Z nájdených dokumentov boli najskôr odstránené duplicitné záznamy a aj tie, ktorých názov a abstrakt nezodpovedali skúmanej problematike. Výhľadné dokumenty boli ďalej podrobne analyzované. Postup spracovania získaných dokumentov znázorňuje PRISMA diagram (viď Obr. 2-1).



Obr. 2-1 PRISMA diagram

2.2 Aditívna výroba kovových objektov

Aditívne technológie umožňujú vytvárať objekty na základe 3D CAD dát postupným pridávaním materiálu. Na rozdiel od tradičných subtraktívnych metód výroby ponúkajú možnosť tvorby objektov s komplexnou geometriou, ktorú by inými technológiami bolo ťažké alebo nemožné vyrobiť. Norma ISO/ASTM 52900:2021 [1] rozdeľuje aditívne technológie podľa princípu spracovania materiálu do siedmich kategórií (viď Obr. 2-2).



Obr. 2-2 Rozdelenie aditívnych technológií podľa normy ISO/ASTM 52900:2021 s uvedenými príkladmi konkrétnych aditívnych technológií a formy vstupného materiálu

Existuje viacero aditívnych technológií schopných spracúvať kovové materiály. Medzi najrozšírenejšie, ktoré pracujú priamo s nimi a ich zliatinami patria Direct Energy Deposition (DED) a Powder Bed Fusion (PBF) [2]. Tieto technológie využívajú laser, elektrónový lúč alebo elektrický oblúk na zahriatie materiálu vysoko nad teplotu tavenia, čím dochádza k spájaniu nanášaných vrstiev. Výsledné komponenty sa vyznačujú vysokou relatívnou hustotou, rozmerovou presnosťou a dobrými mechanickými vlastnosťami [3], čo umožňuje ich priame použitie.

Na druhej strane, zahrievanie na vysoké teploty vedie k vzniku teplotných gradientov, ktoré spôsobujú zvyškové vnútorné napätia. Tie môžu dosahovať hodnôt, pri ktorých vznikajú praskliny. Samotný proces 3D tlače pri oboch uvedených technológiách závisí od množstva parametrov, ktorých vplyv je predmetom mnohých štúdií [4]. Medzi ďalšie obmedzenia týchto technológií patrí vysoká cena, nízka rýchlosť nanášania materiálu,

vysoká energetická spotreba, horšia kvalita povrchu, obmedzené rozmery výrobkov a riziko kontaminácie spôsobené vysokým pomerom povrchu k objemu¹ kovového prášku [3; 5].

Popri aditívnych technológiách využívajúcich práškové materiály sa čoraz viac pozornosti venuje metódam pracujúcim s materiálom v podobe drôtu [6]. Medzi ich hlavné výhody patrí dostupnosť materiálu, jednoduchšia konštrukcia zariadení, ľahšie ovládanie a vyššia rýchlosť nanášania [5]. Konkrétne sa jedná o technológiu extrúzie materiálov v polotuhom stave (Semi Solid Metal Extrusion and Deposition, SSMED), ktorá funguje na podobnom princípe ako FDM 3D tlačiarne [6]. Takéto zariadenie používa namiesto polymérov kovové zliatiny, ktoré v polotuhom stave vykazujú podobné reologické vlastnosti [7].

Polyméry i kovy v polotuhom stave vykazujú šmykovo rednúce správanie typické pre ne-Newtonske kvapaliny s rozdielnym správaním v detailoch. Nízka teplota skleného prechodu a nízka hodnota teploty kryštalizácie napomáha polymérom plastizovať v širokom rozsahu prevádzkových teplôt, vďaka čomu sa ľahko extrúdujú. Čo sa týka kovov, tie musia byť spracované v relatívne úzkom teplotnom pásme, kedy majú vhodnú morfológiu a podiel tuhej fázy [5]. Úplne roztavený kov má nízku viskozitu vedúcu k turbulentnému prúdeniu majúcemu za následok nekontrolovateľné tečenie materiálu a vznikajúcu mikroštruktúru. Samotný proces 3D tlače polotuhého materiálu umožňuje riadenie vznikajúcej mikroštruktúry, ako preukázala i práca W. Chen et al. [8].

2.3 Aditívna výroba extrúziou materiálu

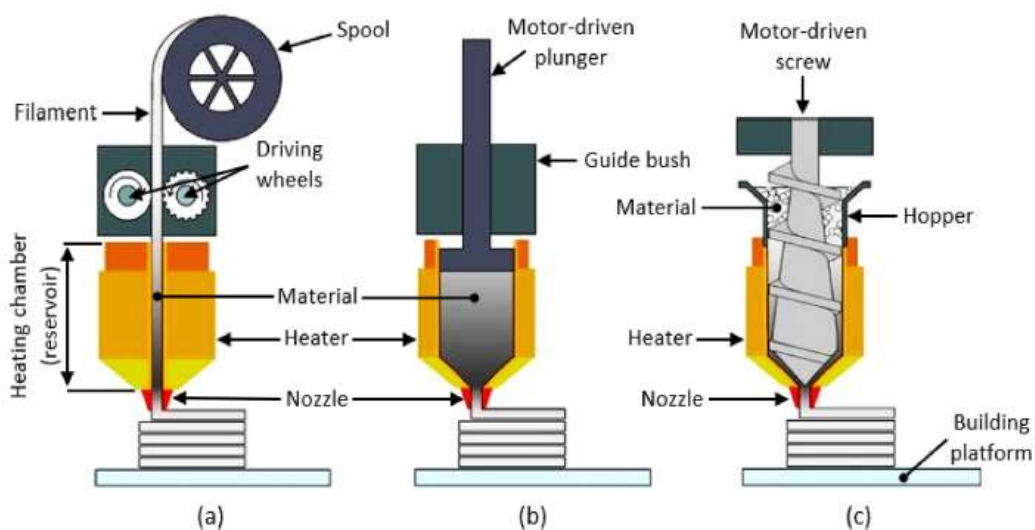
Prvou aditívnou technológiou založenou na extrúzii materiálu bola Fused Deposition Modelling (FDM), ktorú v roku 1989 vyvinul S. S. Crump, spoluzakladateľ spoločnosti Stratasys Ltd. (Rehovot, Izrael). Tá si o dva roky neskôr nechala túto technológiu patentovať [9] a podieľala sa na jej komercializácii. Obdobnou metódou je Fused Filament Fabrication (FFF), pričom rozdiel oproti FDM spočíva v prostredí tlače. FDM sa realizuje v uzavretej, tepelne izolovanej komore. Naopak, FFF prebieha pri izbových podmienkach, čo obmedzuje použitie materiálov citlivých na termo-mechanické javy. Pri oboch technológiách dochádza k extrúzii roztaveného materiálu cez trysku hlavy tlačiarne. Roztavený materiál je nanášaný na predošlé vrstvy, čím dochádza k tvorbe požadovaného objektu. [10]

Mechanizmy extrúzie materiálu môžu byť rozdelené do troch skupín: na báze filamentu, piestu a šneku (viď Obr. 2-3). Pri filamentovom systéme (viď Obr. 2-3a) je materiál v podobe drôtu s priemerom 1,75 mm alebo 2,85 mm privádzaný podávacím mechanizmom do hlavy tlačiarne. V nej je tavený odporovými vyhrievacími telesami. Tie môžu byť priamo

¹ Objekty s vysokým pomerom povrchu k objemu majú väčšiu kontaktnú plochu, vďaka čomu sú priľnavejšie a náchylnejšie na reakciu s okolitým prostredím (vzdušná vlhkosť, vzdušný kyslík). Navyše, zložité geometrie s úzkymi kanálmi či vnútornými dutinami sťažujú úplné odstránenie zvyškového prášku.

zasunuté alebo ovinuté okolo tlačovej hlavy. Kontinuálne privádzaný filament zabezpečuje potrebný tlak na vytlačenie roztaveného materiálu cez trysku na stavebnú platformu. Jej priemer významným spôsobom ovplyvňuje presnosť a rýchlosť výroby. [10]

V prípade piestového mechanizmu (viď Obr. 2-3b) je materiál vytláčaný z komory pomocou motorom riadeného piestu, pričom nie je nutné jeho úplné roztavenie. Vysoký tlak umožňuje výrobu aj pri teplotách nižších, než je teplota tavenia. Tretí typ využíva šnekový extrudér (viď Obr. 2-3c), podobný tým v plastikárskom priemysle. Vstupný materiál je vo forme granúl. Samotný šnek pozostáva z troch zón. V prvej zóne sú granule transportované do tavnej časti, kde vplyvom tepla a trenia zmäknú a roztavia sa. Následne sú v poslednej zóne vystavené vysokému tlaku, čím je materiál extrudovaný na stavebnú platformu. [10]



Obr. 2-3 Klasifikácia aditívnych technológií extrúzie materiálu podľa spôsobu extrúzie: a) Na báze filamentu; b) Na báze piestu; c) Na báze šneku [10].

Hoci bola extrúzia materiálov pôvodne vyvinutá pre polyméry, postupne sa rozširuje aj na ďalšie materiály, ako sú kovy, keramika, kompozity, sklo, jedlé materiály, smart materiály, celulóza či drevo. Niektoré z nich, ako keramika a kovy, majú však vysokú teplotu tavenia, čo sťažuje ich spracovanie. Preto bol vyvinutý špeciálny filament obsahujúci keramický alebo kovový prášok viazaný polymérnymi spojivami. Tie sú po vytlačení odstránené oplachovacím a sintrovacím procesom, čím sa dosiahne finálna podoba 3D tlačeného objektu. [10]

Adaptácia extrúzie kovových zliatin v polotuhom stave

Použitie zmesi spojív a kovového prášku však nie je jediný spôsob pre extrúziu týchto materiálov. V roku 1995 bola zverejnená záverečná práca vytvorená Ch. S. Riceom [11] pod vedením S. B. Browna, ktorá sa zaoberala extrúziou kovovej zliatiny v polotuhom stave. Jej výsledky boli o pár rokov neskôr publikované v článku [12]. Práca sa zaoberala návrhom a testovaním niekoľkých generácií extrudérov pracujúcich na princípe rheocastingu. Ten predstavuje jeden z dvoch spôsobov, akým môžu byť zliatiny extrudované v polotuhom

stave. Na vyvinuté zariadenie bol podaný a neskôr i prijatý patent [13]. V rovnakom období boli zverejnené ďalšie dva články [14; 15], v ktorých S. Finke et al. predstavili i druhú možnosť 3D tlače nízko-taviteľných kovových zliatin v polotuhom stave, ktorou bol thixoforming. Použitá metóda nanášania materiálu bola v tomto prípade veľmi podobná už známemu princípu činnosti FDM tlačiarne pracujúcej s filamentom. Hlavným dôvodom, prečo je polotuhý stav dôležitý, sú jeho reologické vlastnosti, konkrétne tixotropia. Tá bola prvý krát spozorovaná pri kovových zliatinách počas experimentov záverečnej práce realizovanej D. B. Spencerom pod vedením M. C. Flemingsa. Výsledky reologického správania zliatiny pri kryštalizácii boli zverejnené v článku [16] v roku 1972.

2.3.1 Návrh filamentového systému pre 3D tlač technológiu FDM/FFF

Kľúčovými prvkami filamentového systému pre 3D tlač technológiou FDM/FFF, či už ide o polyméry alebo kovové zliatiny, sú: podávací mechanizmus, tavné teleso, pohybová sústava zabezpečujúca pohyb tlačovej hlavy v osiach x , y a z , stavebná platforma a okolité prostredie. Najdôležitejšiu úlohu však zohrávajú práve tavné teleso a podávací mechanizmus, ktoré sú priamo zodpovedné za kontinuálne nanášanie roztaveného (resp. parciálne nataveného) materiálu. Detailný opis postupu návrhu systému je uvedený v práci B. N. Turner et al. [17]. Tento postup je obecné platný aj pre návrh systémov pracujúcich s kovovými materiálmi, ako dokazujú práce A. Jabbari et al. [5] či práca S. Finke [14], v ktorých boli použité podobné návrhové výpočty. Ako bude neskôr ukázané, zariadenia pracujúce na princípe thixoformingu sú v mnohých ohľadoch inšpirované práve systémami vyvinutými pre spracovanie polymérov. Nasledujúca časť sa venuje popisu a zároveň návrhu tavného telesa a podávacieho mechanizmu.

Tavné teleso (Tlačová hlava)

Tavné teleso predstavuje hlavnú súčasť zariadení na aditívnu výrobu pomocou extrúzie, pričom práve v ňom dochádza k taveniu materiálu. Zvyčajne ide o blok s vnútorným kanálom, cez ktorý preteká roztavený filament. Tento blok je umiestnený na tlačovej hlave, ktorá sa relatívne pohybuje voči stavebnej platforme. Zdrojom tepelnej energie sú najčastejšie odporové vyhrievacie telesá. Na reguláciu teploty sa v bloku nachádza termistor, pri vyšších teplotách sa používa termočlánok typu K. [17]

Množstvo roztaveného materiálu závisí od dodávaného tepelného výkonu a rýchlosti, akou je materiál extrudovaný. Dynamiku tohto procesu je pomerne náročné modelovať, keďže vlastnosti taveniny sú nelineárne závislé od teploty a šmykovej rýchlosti. Maximálna rýchlosť podávania filamentu je pritom limitovaná tlakovými stratami v kanáli tavného bloku a zároveň úzko súvisí s rýchlosťou relatívneho pohybu tlačovej hlavy voči platforme. [17]

Kritickým faktorom ovplyvňujúcim tlakové straty v tavnom kanáli je popri jeho geometrických parametroch aj viskozita. Bežne spracovávané materiály vykazujú šmykovo rednúce správanie, ktoré je pomerne reprezentuje model mocninového zákona² [18]:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (Pa \cdot s) \quad (1)$$

kde:

$\dot{\gamma}$	(s^{-1})	šmyková rýchlosť,
n	$(-)$	index toku,
K	$(Pa \cdot s^n)$	koeficient konzistencie.

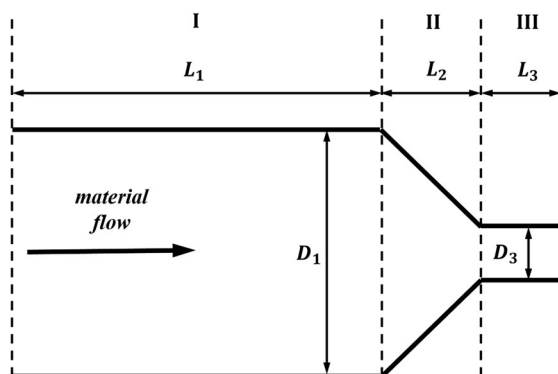
Teplotná závislosť viskozity musí byť tiež zohľadnená, pretože materiál pretekajúci tavným kanálom nie je vystavený izotermickým podmienkam. Tento vplyv možno zohľadniť rozdelením viskozity na dve zložky – jednu závislú od teploty a druhú od šmykovej rýchlosti. Takýmto spôsobom sa získa nasledujúci vzťah [18]:

$$\eta = H(T) \cdot \eta_{T0}(\dot{\gamma}) \quad (Pa \cdot s) \quad (2)$$

kde:

$H(T)$	$(-)$	teplotná závislosť viskozity,
$\eta_{T0}(\dot{\gamma})$	$(Pa \cdot s)$	viskozita pri referenčnej teplote T_0 .

Teplotná závislosť $H(T)$ je odvodená z Arrheniovej rovnice, ktorej parametre je možné stanoviť experimentálne. Ako bolo uvedené skôr, tlakové straty závisia od viskozity extrudovaného materiálu a geometrie tavného kanálu. Ten sa skladá z troch častí – dvoch valcových a jednej kónickej sa zužujúcej (vid' Obr. 2-4).



Obr. 2-4 Geometria tavného kanálu , upravené podľa [17].

² Model mocninového zákona je často využívaný pri modelovaní reologických vlastností polymérov spracovávaných technológiou FDM. Dôvodom jeho použitia je predovšetkým jednoduchosť tohto modelu. Samotný model však nezohľadňuje napríklad medzu klzu, ktorá je typická pre mnohé polymérne taveniny. Na jej zahrnutie sa preto používajú pokročilejšie modely, ako napríklad model typu Carreau. [17]

Vo všeobecnosti sa predpokladá, že vstupný priemer tavného kanálu je rovný priemeru filamentu. Je však zrejmé, že vstup musí mať mierne väčší priemer, aby sa uľahčilo zavádzanie filamentu. Zároveň možno predpokladať, že akákoľvek medzera medzi filamentom a stenou kanálu vedie k vzniku tepelného odporu, ktorý bráni efektívnemu vedeniu tepla z povrchu kanálu. Tento jav sa prejavuje najmä vo vstupnej časti kanálu, kde je filament ešte tuhý. Smerom k ústiu sa filament zahrieva, postupne mäkne a vplyvom tlaku privádzaného materiálu sa pritláča k stenám kanálu.

Tlakové straty v jednotlivých častiach tavného kanálu sú vypočítané aplikáciou mocninového zákona na momentovú rovnováhu toku [19]. Medzi kľúčové predpoklady tohto modelu patrí, že tavenina je nestlačiteľná, na stenách tavného kanálu nedochádza k sklzu, prúdenie je plne rozvinuté, ustálené a laminárne, tavenina má konštantnú teplotu [17]. Tlakové straty sa následne určujú podľa nasledujúcich vzťahov:

$$\Delta P_1 = 2 \cdot L_1 \cdot \left(\frac{v_1}{\emptyset}\right)^{1/m} \cdot \left(\frac{m+3}{\left(\frac{D_1}{2}\right)^{m+1}}\right)^{1/m} \quad (Pa) \quad (3)$$

$$\Delta P_2 = \frac{\left(\frac{D_1^2}{4} \cdot v_1\right)^{1/m}}{\left(\left(\frac{1}{2^m \cdot (m+3)}\right) \cdot \left(\frac{3 \cdot \left(\frac{D_1}{D_3} - 1\right)}{m \cdot L_2 \cdot \left(1 - \left(\frac{D_3}{D_1}\right)^{3/m}\right)}\right) \cdot \left(\frac{D_3}{2}\right)^{m+3} \cdot \emptyset\right)^{1/m}} \quad (Pa) \quad (4)$$

$$\Delta P_3 = 2 \cdot L_3 \cdot \left(\frac{v_3}{\emptyset}\right)^{1/m} \cdot \left(\frac{m+3}{\left(\frac{D_3}{2}\right)^{m+1}}\right)^{1/m} \quad (Pa) \quad (5)$$

kde:

L_1, L_2, L_3	(m)	dĺžka časti tavného kanálu,
v_1, v_3	(m · s ⁻¹)	rýchlosť na vstupe do časti tavného kanálu,
D_1, D_3	(m)	priemer časti tavného kanálu,
m	(-)	tokový exponent,
$\emptyset$	(XX) ³	koefficient konzistencie.

³ Jednotka koeficientu konzistencie závisí na aktuálnom prepočte z mocninového modelu viskozity.

Hodnoty tokového exponentu a koeficientu konzistencie sú vypočítané na základe mocninového modelu [19]:

$$m = \frac{1}{n} \quad (-) \quad (6)$$

$$\phi = {}^{-1/m}\sqrt{K} \quad (XX)^4 \quad (7)$$

Celkové tlakové straty ΔP sú dané súčtom tlakových strát v jednotlivých častiach tavného kanálu [18]:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (Pa) \quad (8)$$

Analytické modely na odhad dodávaného tepelného výkonu v tavnom telese predpokladajú okrajové podmienky vo forme konštantnej teploty steny kanálu alebo konštantného tepelného toku. V prípade konštantnej teploty steny je aproximácia potrebného tepelného výkonu určená nasledujúcim vzťahom [17]:

$$q = \dot{m}c_p(T - T_i) \quad (W) \quad (9)$$

kde:

$\dot{m}$	$(kg \cdot s^{-1})$	hmotnostný tok,
c_p	$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	hmotnostná tepelná kapacita,
T	$(^{\circ}C)$	teplota materiálu na výstupe z kanálu,
T_i	$(^{\circ}C)$	teplota materiálu na vstupe do kanálu.

Za účelom zabezpečenia konštantnej teploty na stenách kanálu v tavnom telese sa na jeho výrobu často používajú materiály s vysokou tepelnou vodivosťou, ako napríklad hliník, oceľ alebo mosadz. Hodnoty tepelného výkonu a rýchlosti podávania filamentu je potrebné nastaviť tak, aby sa miesto vzniku taveniny nachádzalo približne v strede dĺžky prvej časti tavného kanálu [17].

Podávací mechanizmus filamentu

Podávací mechanizmus zabezpečuje kontinuálny prívod materiálu pomocou hnacej a prítlačnej kladky. Na minimalizáciu sklzu a maximalizáciu trenia medzi nimi a filamentom môžu byť ich povrchy opatrené drážkami. Tlak medzi kladkami je obvykle postačujúci na miernu deformáciu filamentu, pričom sú po prechode mechanizmom viditeľné otlaky drážok.

⁴ Jednotka koeficientu konzistencie závisí na aktuálnom prepočte z mocninového modelu viskozity.

Pred podávacím mechanizmom je filament vystavený ťahovému namáhaniu v dôsledku odvíjania z cievky. Naopak, na výstupe z podávacieho mechanizmu je filament vystavený tlakovému namáhaniu. To je spôsobené tuhým segmentom filamentu, ktorý v tavnom telese plní úlohu piestu, pretláčajúceho roztavený materiál smerom na platformu. Silu potrebnú na extrúziu taveniny je možné vypočítať na základe tlakových strát uvedených v predchádzajúcej časti [17]:

$$F = \Delta P \cdot S \quad (N) \quad (10)$$

kde:

ΔP	(MPa)	tlakové straty v tavnom kanáli,
S	(mm ²)	plocha prierezu filamentu.

Vypočítaná sila umožňuje zistiť krútiaci moment pohonu podávacieho mechanizmu [17]:

$$M = F \cdot \frac{R}{2} \quad (Nm) \quad (11)$$

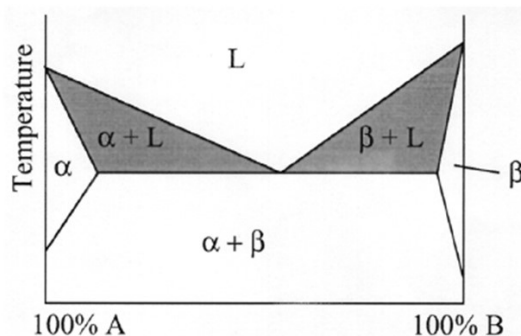
kde:

F	(N)	sila potrebná na extrúziu materiálu,
R	(m)	polomer hnacej kladky.

Tlakové namáhanie predstavuje na jednej strane určitý limit, pretože pri príliš vysokej rýchlosti extrúzie sa materiál nestíha dostatočne taviť. Súčasne narastá veľkosť potrebnej pretláčacej sily. V dôsledku toho môže dôjsť k strate vzpernej stability filamentu, jeho deformácii a následnému prerušeniu prívodu do tavného telesa. Kritickú hodnotu pretláčacej sily je možné určiť pomocou Eulerovho vzťahu pre výpočet vzpernej stability. [17]

2.4 Spracovanie kovov v polotuhom stave

Polotuhý (resp. polotekutý) stav materiálu sa vyznačuje koexistenciou tuhej a kvapalnej fázy. Ich podiel závisí od chemického zloženia zliatiny a aktuálnej teploty. Konkrétnu hodnotu je možné stanoviť pomocou pákového pravidla, v prípade potreby presnejšieho výpočtu aj pomocou Scheilovho vzťahu. S rastúcou teplotou klesá množstvo tuhej fázy, zatiaľ čo pri ochladzovaní sa opäť zvyšuje. Pre kvapalnú fázu platí tento vzťah opačne. Polotuhý stav je možné identifikovať na rovnovážnych fázových diagramoch v oblasti medzi čiarou solidus a likvidus (viď Obr. 2-5).



Obr. 2-5 Príklad rovnovážneho binárneho fázového diagramu [11]

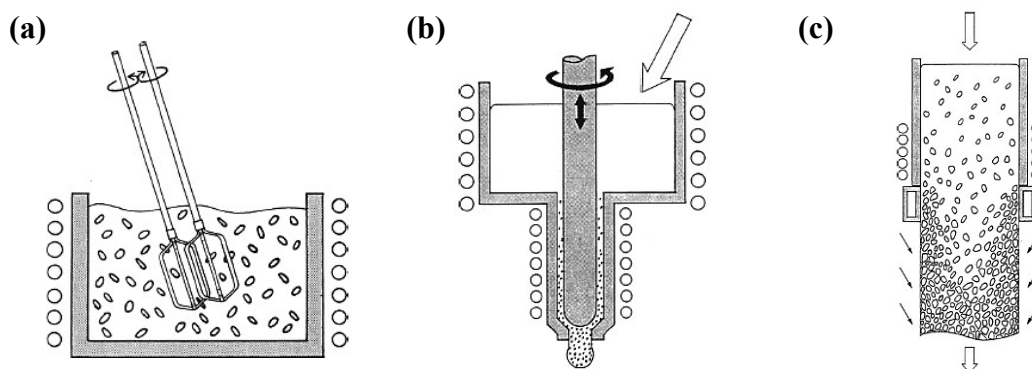
Jedinečnosť tohto stavu spočíva v tom, že ak je tavenina počas postupného ochladzovania vystavená šmykovému napätiu, dochádza k porušovaniu dendritickej mikroštruktúry. V dôsledku vynúteného toku materiálu sa formujú globulárne zrná, ktoré kladú menší hydrodynamický odpor než bežne vznikajúce dendritické kryštály. V praxi sa to prejavuje len pozvoľným nárastom šmykového napätia pri ochladzovaní taveniny pod čiaru likvidus. Hodnota tohto napätia je nižšia, než by bola v prípade, že by zliatina najprv ochladla a až následne bola vystavená šmykovému pôsobeniu.

K tomuto objavu došiel v roku 1971 D. B. Spencer počas experimentov skúmajúcich reologické správanie zliatiny Pb85Sn15 (hm.%) miešanej počas ochladzovania [20]. Pri dendritickej mikroštruktúre s obsahom tuhej fázy $f_S = 0,4$ bolo na iniciáciu toku potrebné šmykové napätie 200 kPa, no pri nedendritickej mikroštruktúre postačovalo iba 0,2 kPa. Pokles šmykového napätia bol spôsobený znížením viskozity taveniny, ktoré bolo dôsledkom tixotropného správania typického pre mnohé ne-Newtonske kvapaliny.

Na základe uvedeného objavu, ktorý bol neskôr potvrdený aj pri mnohých ďalších kovových zliatinách vrátane hliníkových a horčíkových, vznikli nové technológie spracovania kovov v polotuhom stave [20]. Hlavnou požiadavkou týchto technológií je globulárna (resp. sféroidická) mikroštruktúra. Tú možno zabezpečiť buď priamo počas spracovania taveniny, alebo ešte pred samotným procesom. Z tohto hľadiska sú technológie spracovania zliatin v polotuhom stave rozdelené na rheocasting a thixoforming⁵ [21].

Pri rheocastingu sa požadovaná mikroštruktúra vytvára priamo počas odlievania, napríklad mechanickým miešaním chladnúcej dávky taveniny, kontinuálnym mechanickým miešaním alebo elektromagnetickým miešaním (viď Obr. 2-6) [20]. Okrem uvedených metód bolo postupom času vyvinuté množstvo ďalších spôsobov, ako zabezpečiť požadovanú mikroštruktúru. Patrí medzi ne napríklad vibračné miešanie či metódy založené na kontrole teplotného profilu [22].

⁵ Thixoforming môže označovať technológie spracovania materiálov v polotuhom stave s podielom kvapalnej fázy f_L v rozmedzí od 0,3 do 0,4, alebo súhrnne zahŕňa technológie thixocasting ($f_L = 0,5$ až 0,6) a thixofoging ($f_L = 0,2$ až 0,3). [24]



Obr. 2-6 Schémy metód na získanie nedendritickej mikroštruktúry: a) Miešanie dávky materiálu; b) Kontinuálne miešanie; c) Elektromagnetické miešanie. [20]

Druhou možnosťou spracovania kovových zliatin v polotuhom stave je thixoforming, pri ktorom materiál už na začiatku obsahuje globulárnu mikroštruktúru. Počas spracovania sa materiál zahreje na teplotu, pri ktorej sa nachádza v polotuhom stave, a tým sa zabezpečí požadovaný podiel kvapalnej fázy. Materiál teda nie je potrebné úplne roztaviť. Medzi zástupcov metód prípravy takéhoto materiálu patria procesy SIMA (Strain Induced Melt Activated) a RAP (Recrystallization and Partial Melting) [22]. Tieto technológie sa vyznačujú cenovou efektívnosťou, jednoduchými operačnými krokmi a možnosťou prípravy zliatin s vysokou teplotou tavenia. Všeobecne sú vhodnejšie pre polotovary s menším priemerom.

Výhody a nevýhody spracovania materiálu v polotuhom stave

Spracovanie materiálov v polotuhom stave si našlo uplatnenie najmä v oblasti zlievarenstva, kde sa kladie dôraz na vysoké mechanické vlastnosti a komplexnú geometriu súčiastok [22]. Ide predovšetkým o sektor automobilového priemyslu (napr. závesy kolies, kĺby riadenia) a spotrebnej elektroniky (komponenty pre mobilné telefóny a laptopy) [23; 24].

Výhody [21; 25]:

- **Energetická efektívnosť.** Materiál sa neudržiava v úplne tekutom stave po dlhý čas, ako je to bežné pri tradičnom odlievaní.
- **Výborné plnenie formy** bez zachytávania vzduchu a s nízkou pórovitosťou pri zmršťovaní umožňuje výrobu dielov s vysokou integritou (vrátane tenkostenných častí). Proces je vhodný aj pre zliatiny s vyššou pevnosťou, ktoré možno následne tepelne spracovať.
- **Nížšie teploty spracovania** znižujú tepelný šok na zápustku, čo umožňuje použitie netradičných lisovacích materiálov – napríklad zliatin s vysokou teplotou tavenia, ako sú nástrojové ocele alebo stelity, ktoré sú inými spôsobmi ťažko spracovateľné.
- **Jemná a rovnomerná mikroštruktúra** zaisťuje lepšie mechanické vlastnosti výrobkov.
- **Znížená zmrštitosť pri tuhnutí** vedie k rozmerom bližším k takmer čistému tvaru, čo môže eliminovať potrebu dodatočného obrábania. Schopnosť dosiahnuť takmer finálny tvar znižuje náklady na obrábanie aj materiálové straty.

Nevýhody [25]:

- **Náklady na suroviny** môžu byť vysoké a počet dodávateľov malý.
- **Znalosti o procese a skúsenosti** sa musia neustále budovať, aby sa uľahčilo použitie procesu na nové komponenty. To vedie k potenciálne vyšším nákladom na vývoj matrice.
- **Kontrola teploty.** Podiel tuhej látky a viskozita v polotuhom stave sú veľmi závislé od teploty. Zliatiny s úzkym teplotným rozsahom v polotuhom stave si vyžaduje presnú kontrolu teploty.
- **Segregácia tavenina** v dôsledku nerovnomerného zahrievania môže mať za následok nerovnomernému chemickému zloženiu súčiastky.

2.4.1 Reológia kovových zliatin v polotuhom stave

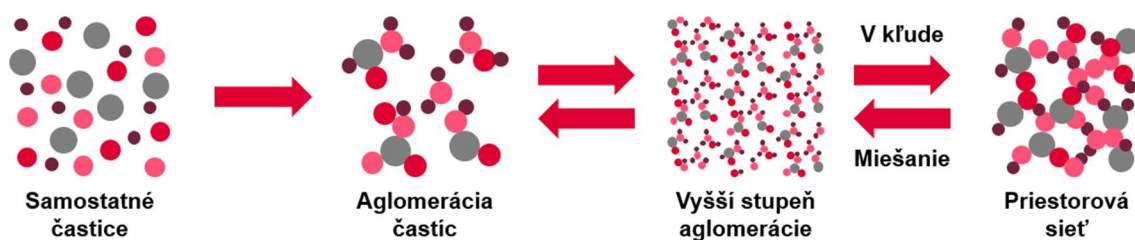
Zliatiny v polotuhom stave vykazujú tixotropické ne-Newtonske správanie. V tomto prípade nie je šmykové napätie priamo úmerné rýchlosti šmyku – konštanta úmernosti (t. j. viskozita) sa mení v závislosti od šmykovej rýchlosti, tlaku, teploty a času. Takto sa meniaci viskozita sa bežne označuje pojmom zjavná viskozita [25].

Tixotropia

Tixotropia je jav, ktorý je pozorovateľný pri mnohých ne-Newtonske kvapalinách ako sú koloidné suspenzie (farby, atramenty), polyméry, suspenzie s nanočasticami, vláknité suspenzie či kryštalické systémy, medzi ktoré patria aj polotuhé kovy. Je ju možné definovať ako: *„spojitý pokles viskozity s časom za prítomnosti prúdenia, pričom bola táto látka predtým v pokoji, a následné obnovenie pôvodnej hodnoty viskozity, keď sa prúdenie preruší“* [26]. Obnova pôvodnej hodnoty viskozity prebieha pomalšie, čo potvrdzujú mnohé experimenty. Tento jav je spôsobený pomalou intermolekulárnou difúziou [21].

Pôvod tixotropie

Z práce H. V. Atkinson [25], ktorá sa venuje modelovaniu spracovania polotuhých kovových zliatin, sa je možné dozvedieť, aký je mikroštruktúrny pôvod tixotropného správania. V polotuhom stave dochádza k aglomerácii tuhých častíc v dôsledku ich zrážok spôsobených poklesom rýchlosti šmyku. Jednotlivé častice sa zrážajú, aglomerujú až do vzniku stabilných zhlukov odpovedajúcich nižšej rýchlosti šmyku. Kľúčovým faktorom aglomerácie je vhodná orientácia častíc, ktorá umožňuje vznik rozhrania s nízkou energiou (nadväznosť kryštalických mriežok). Z termodynamického hľadiska ide o výhodnejší stav než v prípade rozhraní s vysokou energiou. Výsledkom aglomerácie je vznik priestorovej siete tuhých fáz, ktorá je schopná niesť vlastnú váhu materiálu, čím sa zabraňuje samovoľnému roztečeniu taveniny. Vďaka tomu je možné s materiálom zaobchádzať, akoby bol v tuhom stave. Pri zvýšení šmykovej rýchlosti dochádza k porušeniu väzieb medzi časticami, čo vedie k zmenšeniu zhlukov tuhej fázy (viď Obr. 2-7).



Obr. 2-7 Príklad formovania tixotropie, upravené podľa [21]

Viskozita v rovnovážnom stave závisí od bilancie medzi rýchlosťou tvorby priestorovej siete a rýchlosťou porušovania väzieb. Zároveň je ovplyvnená morfológiou tuhých častíc – čím viac sa ich tvar približuje ideálnej guli, tým je výsledná viskozita nižšia. Navyše, ak je časť taveniny uväznená medzi časticami, nepodieľa sa na toku. Dôsledkom toho je, že efektívny podiel kvapalnej fázy je nižší než podiel, ktorý by zodpovedal danej teplote. [25]

Modelovanie reologických vlastností

Modelovanie reologických vlastností polotuhých kovových materiálov je kľúčové pre optimalizáciu procesov ich spracovania [15]. Tieto materiály vykazujú tixotropné správanie v dôsledku prítomnosti dispergovaných tuhých častíc v kvapalnej matici, čo vedie k nelineárnej závislosti viskozity od šmykového napätia, teploty a času [25]. Na popis tohto správania sa najčastejšie používajú modely Ostwald-de Waeleho (10) a Herschel-Bulkleyho (11) [32], ktoré umožňujú vyjadriť šmykové napätie ako funkciu šmykovej rýchlosti:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (Pa) \quad (10)$$

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (Pa) \quad (11)$$

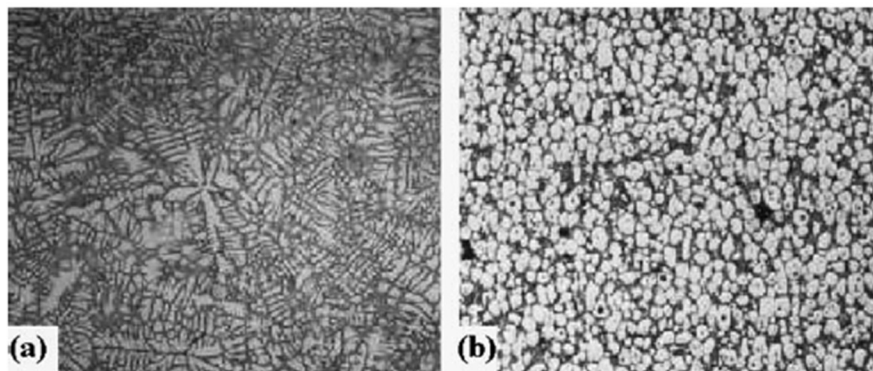
kde:

$\dot{\gamma}$	(s^{-1})	šmyková rýchlosť,
n	$(-)$	index toku,
K	$(Pa \cdot s^n)$	koeficient konzistencie,
τ_y	(Pa)	minimálne napätie potrebné na to, aby začala látka tečť.

Ostwald-de Waeleho model je pomerne jednoduchý a používa sa pre látky, ktoré nevykazujú medzu sklzu. V opačnom prípade sa uplatňuje Herschel-Bulkleyho model. Výskumy ukazujú, že pri dostatočnej globularizácii tuhých častíc a vhodne zvolenom podiele tuhej fázy dochádza k vzniku homogénneho toku bez segregácie, čo je predpokladom pre spoľahlivé reologické merania [15]. Experimentálne dáta na overenie týchto modelov sa získavajú pomocou kapilárnych alebo rotačných viskozimetrov upravených na merania pri vysokých teplotách [27], pričom je potrebné zabezpečiť homogénne zahrievanie a dostatočný rozsah šmykových rýchlostí. Bežne dosahované hodnoty šmykovej rýchlosti v tryske FDM/FFF tlačiarne sú v rozmedzí 100–200 s^{-1} [17].

2.4.2 Mikroštruktúra zliatin spracovaných v polotuhom stave

Zliatiny spracovávané v polotuhom stave vykazujú špecifickú mikroštruktúru, ktorá sa výrazne líši od klasickej dendritickej štruktúry vznikajúcej pri konvenčnom tuhnutí (vid' Obr. 2-8). Vhodná mikroštruktúra pre spracovanie v polotuhom stave pozostáva z globulárnych (resp. sféroidických) častíc rozptýlených v kvapalnej matrici. Ideálna veľkosť zŕn býva spravidla menšia ako 100 μm a tvarový faktor by sa mal pohybovať v rozmedzí 0,6 až 1,0 [6; 24]. Takáto štruktúra znižuje vnútorné trenie počas toku, podporuje tixotropné správanie a zlepšuje formovateľnosť materiálu [27].



Obr. 2-8 Mikroštruktúra: a) Dendritická mikroštruktúra odlievanej vzorky; b) Globulárna mikroštruktúra v polotuhej vzorke zliatiny. [25]

Kľúčovým predpokladom je zamedzenie rastu zŕn, ku ktorému môže dôjsť pri príliš dlhom zotrvaní materiálu v polotuhom stave, najmä pri nízkych šmykových rýchlostiach [8]. Procesy ako Ostwaldovo zrenie⁶, koalescencia⁷ a aglomerácia⁸ síce znižujú celkovú plochu rozhrania a energeticky stabilizujú mikroštruktúru, no zároveň vedú k jej hrubnutiu [14].

Okrem morfológických parametrov je významný aj podiel tuhých častíc, ktorý priamo ovplyvňuje tokové a reologické vlastnosti zliatiny. Optimálny interval pre extrúziu sa zvyčajne pohybuje v rozmedzí 0,3 až 0,5 [4; 6]. Príliš nízky podiel vedie k nekontrolovateľnému toku, zatiaľ čo príliš vysoký môže spôsobiť upchatie trysky a vyžaduje vyššiu extrúznú silu [4]. Udržiavanie stabilnej globulárnej mikroštruktúry počas tlače je preto jedným z kľúčových aspektov úspešného spracovania kovových materiálov v polotuhom stave.

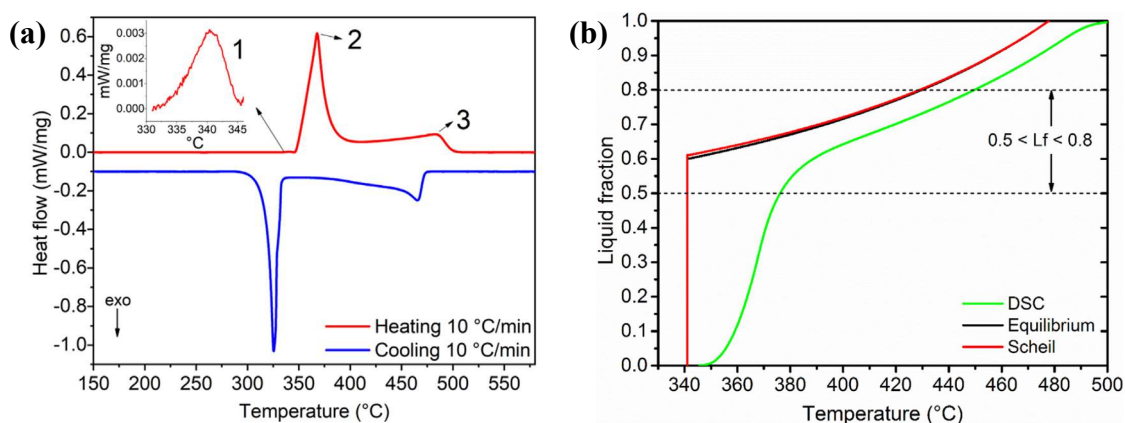
⁶ Ostwaldovo zrenie je difúziou riadený proces, pri ktorom dochádza k rastu väčších častíc na úkor menších. Menšie častice sa rozpúšťajú a ich atómy difundujú na povrch väčších častíc, kde sa usádzajú [14]

⁷ Koalescencia označuje proces, pri ktorom sa dve alebo viac tuhých častíc spoja a vytvoria jednu väčšiu časticu bez rozpustenia, ale prostredníctvom priameho kontaktu a splynutia rozhrania. [21]

⁸ Aglomerácia je proces zhlukovania častíc do väčších celkov, často bez úplného splynutia ich rozhraní. Môže byť spôsobená adhéznymi silami, snahou o zníženie povrchovej energie alebo vonkajším pôsobením napríklad miešaním [25]

2.4.3 Termo-fyzikálna analýza

Termo-fyzikálna analýza predstavuje nevyhnutný krok pri návrhu procesu spracovania zliatin v polotuhom stave, keďže práve teplota a teplotný profil majú zásadný vplyv na podiel tuhých častíc, viskozitu taveniny a výslednú mikroštruktúru [15]. Kľúčovými veličinami sú teploty solidus a likvidus, ktoré definujú pracovný rozmedzie oblasti koexistencie tuhej a kvapalnej fázy. V ideálnom prípade sa spracovanie realizuje v teplotnom rozsahu, kde sa podiel tuhej fázy pohybuje medzi 0,3 až 0,5. Tento rozsah zabezpečuje stabilitu toku a zároveň dostatočnú kohéziu pre tvorbu vrstiev [4]. Na presné určenie tohto rozmedzia sa využíva diferenčná skenovacia kalorimetria (DSC), ktorá umožňuje stanoviť entalpiu tavenia a z nej odvodiť závislosť podielu tuhej (resp. kvapalnej) fázy od teploty (vid' Obr. 2-9) [28; 29].



Obr. 2-9 Výsledok DSC analýzy zliatiny Mg₆₂Zn₃₈ (hm.%): a) DSC krivky ohrevu a chladnutia; b) Závislosť podielu kvapalnej fázy od teploty získaná integráciou DSC kriviek a porovnanie voči simuláciám [7].

2.4.4 Požiadavky na materiály

Spracovanie kovových materiálov v polotuhom stave kladie špecifické nároky na ich chemické zloženie, mikroštruktúru a termo-fyzikálne vlastnosti. V prvom rade musí materiál disponovať širokým intervalom tavenia, výrazným rozdielom medzi teplotou solidus a likvidus, ktorý zabezpečuje dostatočný rozsah pre reguláciu podielu tuhých častíc [23]. Zliatiny s eutektickým zložením a čisté kovy, ktoré tuhnú pri konštantnej teplote, sú pre tieto aplikácie nevhodné, keďže nevytvárajú polotuhý stav bez intenzívneho miešania [30]. Vlastnosti, ktoré by mali zliatiny pre spracovanie v polotuhom stave vykazovať, sú nasledovné [6]:

- Rozsah teplôt tuhnutia, definovaný ako rozdiel medzi teplotou solidus a likvidus, by mal byť čo najširší. Odporúčaná hodnota sa pohybuje v rozmedzí od 20 do 130 °C.
- Citlivosť podielu tuhej fázy, ktorá vyjadruje zmenu v podiele tuhých častíc na jednotku teploty pre dané zloženie zliatiny, by nemala presiahnuť hodnotu 0,015. Vo všeobecnosti je prijateľná zmena podielu tuhej fázy o 1,5 % na 1 °C.

- Prevádzková teplota definuje teplotný interval, v ktorom by sa mal nachádzať požadovaný podiel tuhej fázy. Ten by mal byť v rozmedzí od 0,4 do 0,7.
- Globulárna mikroštruktúra vedúca k šmykovo rednúcemu správaniu s tvarovým faktorom väčším ako 0,6. Globulárne častice by mali byť rovnomerne rozptýlené v matici.

Dôležitá je aj tendencia materiálu k vytvoreniu globulárnej mikroštruktúry počas predohrevu a jeho odolnosť voči hrubnutiu zŕn [5]. Materiály by zároveň mali mať nízku reaktivitu s komponentmi extrudéra, vysokú odolnosť voči oxidácii a dostatočnú viskozitu v polotuhom stave, ktorá zabezpečí tixotropné správanie pri minimálnych extrúzných silách [4; 23].

2.4.5 Materiály vhodné pre spracovanie v polotuhom stave

Vhodnosť materiálu na spracovanie v polotuhom stave závisí predovšetkým od jeho schopnosti vytvárať globulárnu mikroštruktúru a od jeho termálnych vlastností. Medzi najčastejšie používané materiály patria horčíkové zliatiny (napr. AZ91D, AM50A, AM60B), ktoré sa vyznačujú nízkou hustotou, dobrými mechanickými vlastnosťami a tixotropným správaním [24]. V porovnaní s bežným spôsobom odlievania je ich mikroštruktúra jemnejšia, čo vedie k lepším deformačným a pevnostným charakteristikám – a to aj napriek prítomnosti hexagonálnej kryštalickej mriežky (HCP).

Väčšina hliníkových zliatin spracovávaných v polotuhom stave pochádza z konvenčných odlievacích systémov, ako sú A356 a A357. Ich spracovanie je však limitované vysokou citlivosťou na teplotné fluktuácie a tendenciou k hrubnutiu zŕn. Výskum sa zároveň zameriava na vysokopevnostné zliatiny radov 2000, 6000 a 7000, ktoré sa bežne používajú na tvárnenie [24].

Niektoré štúdie naznačujú potenciál pre spracovanie aj v prípade nerezových ocelí, zliatin na báze medi, niklu a kobaltu či kompozitných materiálov [16]. Ich využitie je však podmienené vývojom vysoko odolných extrúzných zariadení, schopných pracovať pri vysokých teplotách a odolávať chemickej agresivite taveniny [23; 24]. Mnohé zliatiny, ktoré sa dnes používajú na spracovanie v polotuhom stave, boli pôvodne vyvinuté pre technológiu odlievania alebo tvárnenia (viď Tab. 2-1) [23].

Tab. 2-1 Príklady kovových zliatin používaných na thixoforming [23]

HLINÍKOVÉ ZLIATINY	HORČÍKOVÉ ZLIATINY	OCELE
2014	AZ91D	X210CzW12
6061	AZ70	H18
6082	AZ61	100Cr6
7010	AZ80	43CrMo4
7075	AZ31	M2
A356	AS41	C38LLT
A319	MgZnRE	X210CRW12-B
TX630		Hadfield-B
7075ScZr		H18-B

2.5 Prehľad experimentálnych zariadení

Táto kapitola sa venuje prehľadu a analýze experimentálnych zariadení navrhnutých pre 3D tlač kovových zliatin v polotuhom stave. Pozornosť je zameraná na spôsob ohrevu, konštrukciu taviaceho systému, realizované experimenty, ich podmienky a získané výsledky. Zariadenia sú systematicky rozdelené do dvoch hlavných skupín podľa princípu spracovania zliatiny – thixoforming a rheocasting. V rámci týchto dvoch skupín sú ďalej rozčlenené podľa spôsobu ohrevu: s odporovým ohrevom, s priamym a nepriamym indukčným ohrevom.

Extrudér pracujúci na princípe thixoformingu

Extrudéry pracujúce na princípe thixoformingu sú principiálne najbližšie ku konštrukcii extrudérov bežných FDM/FFF 3D tlačiarňí. Obsahujú podávací mechanizmus filamentu (v tomto prípade drôtu s globulárnou mikroštruktúrou), tavné teleso a príslušný systém regulácie teploty. Počas samotného procesu 3D tlače je materiál zahrievaný odporovými telesami alebo indukčne, čím sa zabezpečuje potrebný podiel kvapalnej fázy. Podávací mechanizmus zabezpečuje prívod filamentu, pričom jeho tuhá časť plní úlohu piestu.

Jedno z prvých zariadení tohto typu bolo postavené a otestované na nízko-taviteľnej kovovej zliatine S. Finke et al. [14; 15]. Extrudér bol inšpirovaný kapilárnym viskozimetrom. Ďalšie experimentálne zariadenia, ktoré boli testované v rokoch 2018 až 2023 sa držali bežnej koncepcie FDM extrudérov [4; 5; 6; 7; 28; 29]. Od roku 2018 začína byť venovaná pozornosť extrudérom s indukčným ohrevom [2; 3; 31; 32; 33]. Pri uvedených zariadeniach boli použité rôzne typy zliatin od nízko-taviteľných zliatin na báze cínu (Sn), olova (Pb) a bizmutu (Bi) až po zliatiny s vyššou teplotou tavenia na báze hliníku (Al).

Príprava materiálu procesom SIMA

Vo väčšine prípadov je materiál v podobe drôtu predpripravený procesom SIMA [5; 6; 28], ktorého východiskovým bodom je ingot s požadovaným chemickým zložením. Tento ingot je následne pretlačený na lise. Počas pretláčania dochádza k rozsiahlej plastickej deformácii, čo sa prejavuje vytvorením deformovaných, v jednom smere pretiahnutých zŕn.

V ďalšom kroku je drôt tepelne spracovaný – zahriaty a udržiavaný na teplote, pri ktorej sa materiál začína taviť. Kvapalná fáza vzniká prednostne na hraniciach zŕn, čím sa formuje požadovaná globulárna mikroštruktúra. S narastajúcou teplotou sa postupne taví väčší objem materiálu. Keďže úplné roztavenie je nežiaduce, proces sa ukončí rýchlym schladením drôtu. Výsledkom je štruktúra tvorená relatívne veľkými globulárnymi zrnami obklopenými jemnou matricou s množstvom malých kryštálov. Táto jemná mikroštruktúra zohráva zásadnú úlohu v procese tlače. Pri ohreve vzniká kvapalná fáza práve na hraniciach zŕn. Vzhľadom na prítomnosť veľkého množstva jemných zŕn obklopujúcich väčšie dochádza k ich skoršiemu roztaveniu. [5; 22]

Extrudér pracujúci na princípe rheocastingu

Extrudér pracujúci na princípe rheocastingu nevyžaduje na vstupný materiál s globulárnou mikroštruktúrou, postačuje vhodné chemické zloženie. Globulárna mikroštruktúra vzniká priamo počas 3D tlače. Na začiatku tohto procesu je materiál v podobe granúl alebo nerezaného ingotu narezaného vložený do rezervoáru. Vplyvom dodávanej tepelnej energie sa začne roztápať a postupne steká do predĺženej časti extrúzneho komory, zakončenej tryskou. V tejto oblasti je chladnúca tavenina vystavená intenzívnemu miešaniu. Znižujúci sa teplotný profil smerom k tryske podporuje kryštalizáciu tuhých fáz, zatiaľ čo miešanie napomáha formovaniu globulárnej mikroštruktúry.

Prvé zariadenie pracujúce na tomto princípe bolo predstavené v roku 1995 v rámci záverečnej práce Ch. S. Rice [11]. Autor sa v nej podrobne venoval postupnému vývoju extrudéra naprieč tromi generáciami, pričom každá nová generácia reagovala na nedostatky tej predchádzajúcej. Pri experimentoch bola použitá zliatina Sn85Pb15 (hm.%). Podobné zariadenie bolo skonštruované a testované aj neskôr v roku 2017, keď W. Chen et al. [8] preukázali možnosť efektívneho riadenia vznikajúcej mikroštruktúry na zliatin Bi84Sn16 (hm.%).

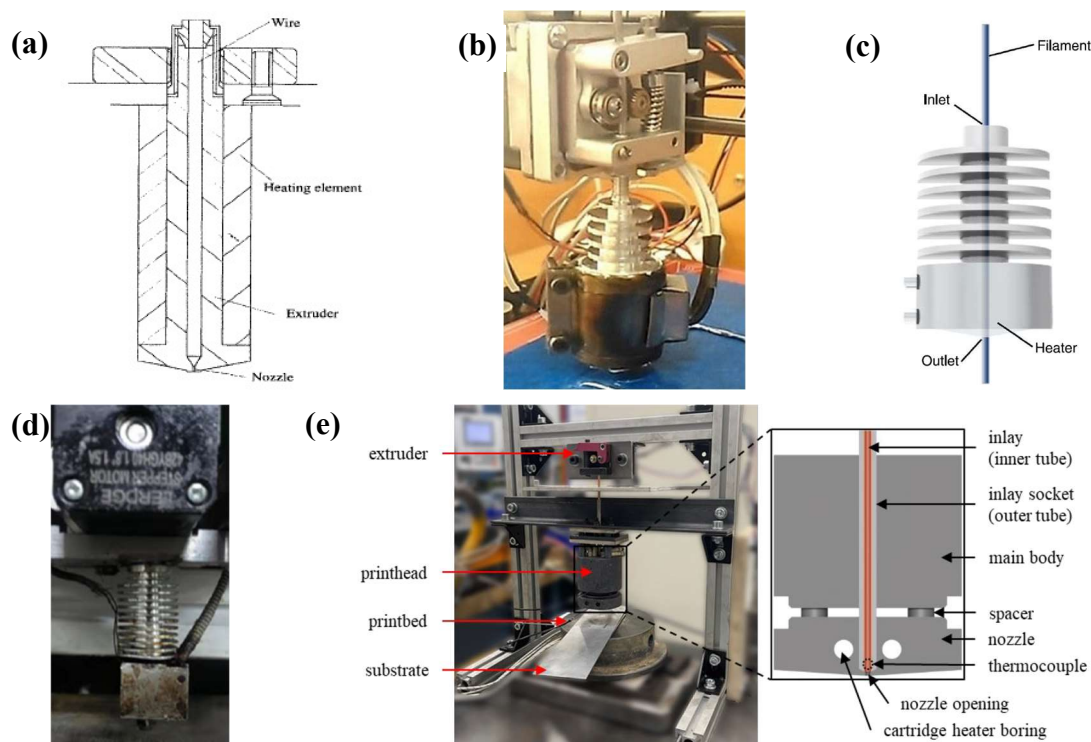
2.5.1 Extrudéry s odporovým ohrevom - thixoforming

Popis zariadení

Okolo roku 2000 predstavili S. Finke et al. vo svojich prácach [14; 15] jeden z prvých extrudérov (viď Obr. 2-10a) pracujúcich na princípe thixoformingu. Koncepcia extrudéra bola inšpirovaná kapilárnym viskozimetrom, pričom rozdiely spočívali v použitých materiáloch, zdroji tlaku a veľkosti trysky. Filament bol privádzaný dvojicou trecích súkolesí. Samotný extrudér bol statický a stavebná platforma sa polohovala manuálne v osiach x , y a z . Dĺžka tavného kanálu bola navrhnutá pomocou softvéru Ansys Fluent, pričom cieľom bolo určiť potrebnú dĺžku na ohriatie filamentu do polotuhého stavu [14].

V rámci prác A. Jabbariho et al. bola [5; 4] bola snaha vyvinúť extrudér (viď Obr. 2-10b), ktorý by mohol byť implementovaný na 3D tlačiareň Prusa i3. Spomedzi všetkých analyzovaných konceptov sa ukázal byť najvhodnejší extrudér s valcovým tavným blokom s dĺžkou kanálu 30 mm vyrobený z hliníka. Ohrev extrudéra zabezpečovalo pásové odporové teleso s výkonom 60 W. Podobný prístup zvolili i D. D. Lima et al. v prácach [7; 29], kde vyvinuli zariadenie imitujúce 3D tlačiareň Prusa, no s extrudérom (viď Obr. 2-10c), ktorý bol schopný dosahovať teplotu až 700 °C. Tryska mala priemer 1 mm. V roku 2022 Q. Zhang et al. [28] úspešne otestovali extrudér (viď Obr. 2-10d), ktorý sa svojou geometriou a konštrukčnými prvkami prakticky nelíšil od komerčných extrudérov používaných na FFF 3D tlačiarňach. Priemer trysky bol 1,2 mm.

Posledným extrudérom tejto skupiny, ktorému bola venovaná pozornosť, je zariadenie vyvinuté N. Nezicom et al. v roku 2023 (viď Obr. 2.10e) [6]. Tento extrudér bol navrhnutý ako modulárny systém pozostávajúci z dvoch častí – hlavného tela a trysky, ktoré boli oddelené dištančnými prvkami. Toto riešenie umožňovalo samostatnú reguláciu teploty v každej časti samostatne. Tavný kanál bol navrhnutý ako vymeniteľná vložka, čo umožňovalo testovať interakciu rôznych materiálov so spracovávanými zliatinami. Tryska bola vyhrievaná dvomi vyhrievacími patrónami s výkonom 200 W. Podávací mechanizmus bol rovnakého typu ako v predchádzajúcich prípadoch.



Obr. 2-10 Extrúder s priamym odporovým ohrevom: a) Extrúder inšpirovaní kapilárnym viskozimetrom [15]; b) Thixoextruder [5]; c) Vysokoteplotný extrudér (700 °C) [29]; d) Konvenčný typ extrudéra [28]; e) Extrúder s predohrevom [6].

Experimenty a zistenia

V práci zrealizovanej A. Jabbarim at al. [4] bolo analyzovaných množstvo parametrov týkajúcich sa samotného extrudéra i jeho prevádzky. Na overovanie funkčnosti extrudéra použité dve zliatiny: Sn85Pb15 a Pb60Sn40 (hm.%). Realizované analýzy viedli k viacerým nižšie uvedeným záverom.

So zmenšujúcim sa priemerom trysky bolo potrebné zvyšovať podiel kvapalnej fázy v opačnom prípade dochádzalo k nahromadeniu tuhých častíc a jej upchatiu [4]. Trysky s priemerom 1 a 2 mm bolo možné prevádzkovať v relatívne širokom rozmedzí podielu tuhej fázy [4]. K rovnakému záveru dospeli i D. D. Lima et al. pri testovaní 3D tlače so zliatinou Mg62Zn38 (hm.%) a 1mm tryskou. Extrúzia zliatiny bola možná iba pri vyšších teplotách (420 °C) [7].

Ďalším dôležitým faktorom bol priemer a dĺžka tavného kanálu, ktoré ovplyvňujú čas zotrvania zliatiny v kanáli a teda aj to, či dosiahne požadovanú teplotu pre polotuhý stav. Empiricky bola testovaná dĺžka v rozmedzí 10 až 40 mm s rôznymi priermi a rýchlosťami extrúzie materiálu. Výsledkom bola optimálna dĺžka 30 mm. K obdobným výsledkom dospeli aj i S. Finke et al. za použitia simulačného softwaru Fluent [14]. Priemer tavného kanálu, by nemal byť výrazne väčší než priemer filamentu. Príliš veľká vzduchová medzera vytvára odpor voči prenosu tepelnej energie zo stien kanálu a môže brániť roztaveniu materiálu. Optimálna medzera bola určená na približne 0,1 mm, ako uvádzajú výsledky práce N. Nezic et al. [6].

A. Jabbari et al. testovali rôzne materiály pre výrobu tavného kanálu (hliník, nerezová oceľ, mosadz). Nakoniec bola zvolená hliníková zliatina pre jej dobrú tepelnú vodivosť a dostatočnú povrchovú energiu. N. Nezic et al. okrem uvedených materiálov testovali aj meď, keďže cieľili na spracovanie hliníkovej zliatiny Al4018. V tomto prípade hliník nebol vhodný kvôli chemickej príbuznosti a riziku difúzie. Mosadz bola vylúčená pre migráciu atómov zo spracovávanej zliatiny do stien kanálu. Nakoniec boli použité tavné kanály z nerezovej ocele a medi. Hlavným rozdielom medzi nimi bola tepelná vodivosť – pri medi bola oblasť natavovania materiálu výrazne menšia. [4; 6]

Ako alternatívu pre zamedzenie chemickej interakcie, zvýšenie odolnosti voči abrazívnemu opotrebeniu, zachovanie dobrej tepelnej vodivosti a odolnosti voči tepelným šokom možno použiť keramické materiály ako oxid hlinitý (Al_2O_3), oxid zirkoničitý (ZrO_2), karbid kremíka (SiC) alebo nitrid hlinitý (AlN) [34].

V tryske dochádza iba k pasívnemu miešaniu v dôsledku zmeny priemeru tavného kanálu [22]. Pri testovaných rýchlostiach podávania materiálu 2, 5, 10 a 20 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ zodpovedali šmykové rýchlosti hodnotám 25, 62, 125 a 250 s^{-1} [4]. Vyššie hodnoty šmykovej rýchlosti umožnili extrúziu materiálu až s podielom 0,5 tuhej fázy [4].

Keďže mnohé zliatiny sú vysoko citlivé na teplotu, systém musí byť schopný udržiavať požadovanú teplotu v rozmedzí ± 1 °C [4]. S. Finke et al. pri experimentoch zistili, že ak je zliatina ponechaná niekoľko minút v teplotnom pásme medzi solidusom a likvidusom, dochádza k hrubnutiu zŕn, čo môže viesť k upchatiu trysky – najmä pri prerušení tláče. Na rovnaký problém narazili aj A. Jabbari et al., ktorým sa ho podarilo vyriešiť krátkodobým zvýšením teploty. Tak dosiahli podiel tuhých častíc 0,25, pri ktorom bol materiál opäť dobre extrudovateľný.

Pokiaľ ide o závislosť medzi rýchlosťou extrúzie a lineárnym pohybom platformy, ich pomer by sa mal pohybovať v rozsahu 0,8 až 1,3 [4]. Pri experimentoch sa zistilo, že tento pomer je kľúčový pre geometrickú presnosť a správne spájanie vrstiev. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri pomere 1:1 [15], čo zodpovedá uvedenému optimálnemu rozsahu.

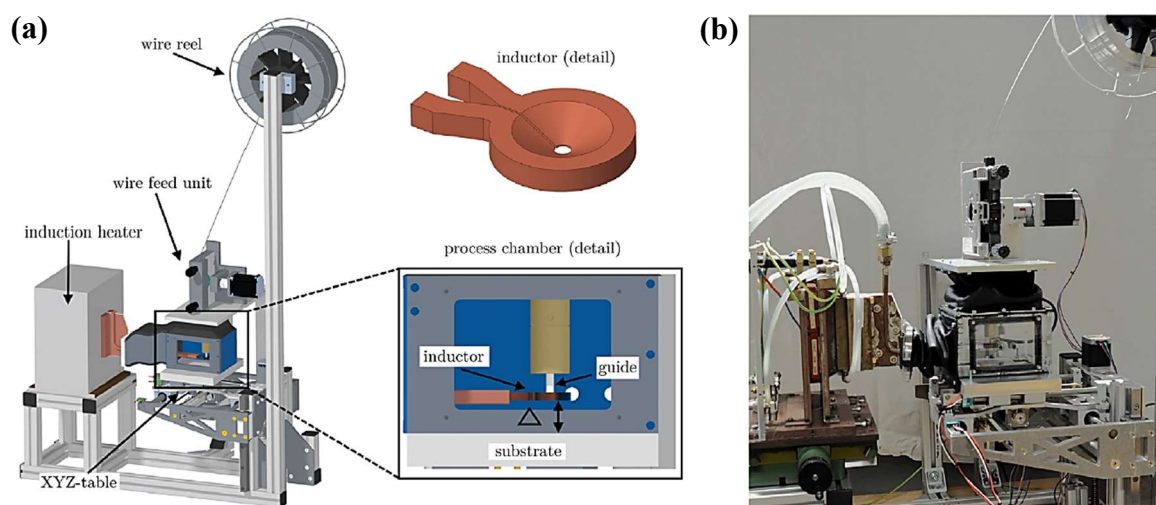
2.5.2 Extrudéry s priamym indukčným ohrevom - thixoforming

Popis zariadenia

V roku 2022 L. Englert et al. predstavili v práci [32] experimentálne zariadenie (vid' Obr. 2-11) na aditívnu výrobu v polotuhom stave, pričom potrebný stav materiálu bol dosahovaný pomocou priameho indukčného ohrevu. Jednou z hlavných častí 3D tlačiarne bola pracovná komora s inertnou atmosférou (argón), ktorá tesne priliehala k stavebnej platforme pohybujúcej sa vo všetkých troch osiach. Vo vnútri komory sa nachádzal extrudér.

Materiál privádzaný podávacou jednotkou prechádzal najprv mosadzným vedením, následne keramickým vedením až k medenému, aditívne vyrobenému induktoru, ktorý zabezpečoval

jeho natavovanie. Induktor bol pripojený k indukčnému zdroju s maximálnym výkonom 25kW a frekvenciou 1 až 2 MHz. Okrem ohrevu samotného filamentu zabezpečoval induktor aj ohrev substrátu. V extrudéri sa nenachádzala žiadna tryska, cez ktorú by bol materiál pretláčaný – materiál bol voľne vedený medzi induktorom a podložkou. [32]

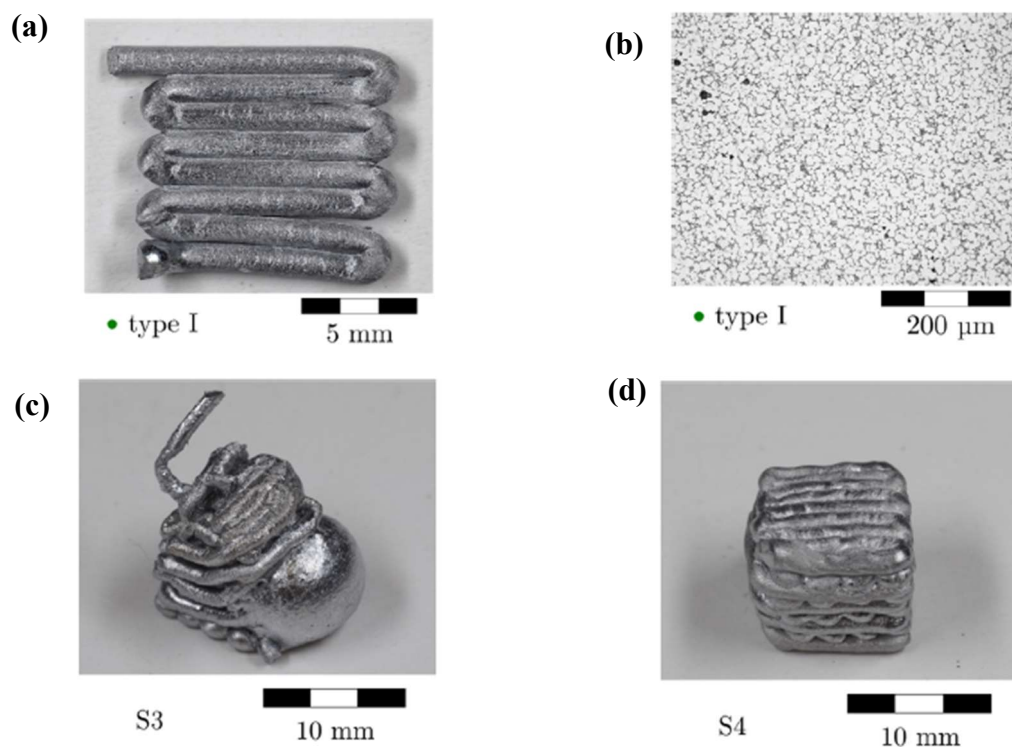


Obr. 2-11 Zariadenie na aditívnu výrobu pomocou priameho indukčného ohrevu: a) CAD model; b) Experimentálne zariadenie. [32]

Experimenty a zistenia

Pri experimentoch bola použitá zliatina AlSi7Mg vo forme drôtu s priemerom 1,2 mm. Prvé experimenty sa zameriavali na optimalizáciu parametrov, ako boli výkon, rýchlosť nanášania a vzdialenosť medzi induktorom a platformou, za účelom úspešného vytvorenia prvej vrstvy. Pri všetkých experimentoch bol pomer medzi rýchlosťou privádzania filamentu a pohybom platformy rovný 1. Najlepších výsledkov dosiahli pri výkone 10 kW, rýchlosti nanášania $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a vzdialenosti induktora 5 mm (viď Obr. 2-12a). Za týchto podmienok sa dosiahla dobrá adhézia medzi jednotlivými nanášanými dráhami materiálu. Analýza mikroštruktúry potvrdila vznik globulárnych zŕn fázy bohatej na hliník (viď Obr. 2-12b). [32]

Pri ďalších experimentoch sa však ukázalo, že optimalizované parametre vhodné pre nanášanie prvej vrstvy nie sú vhodné na tvorbu viacvrstvových objektov. Neustála generácia tepla induktorom spôsobovala zahrievanie a následné tavenie už vytlačených vrstiev (viď Obr. 2-12c). Na dosiahnutie optimálnych výsledkov bola preto zavedená stratégia redukovaného výkonu, založená na postupnom znižovaní výkonu induktora pri nanášaní každej ďalšej vrstvy. Cieľom bolo predísť úplnému roztaveniu už vytlačeného materiálu. Pomocou tejto stratégie sa podarilo vytvoriť kocku s rozmermi $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ (viď Obr. 2-12d). Kocka však nevykazovala vysokú geometrickú ani rozmerovú presnosť, čo súviselo najmä s absenciou trysky.



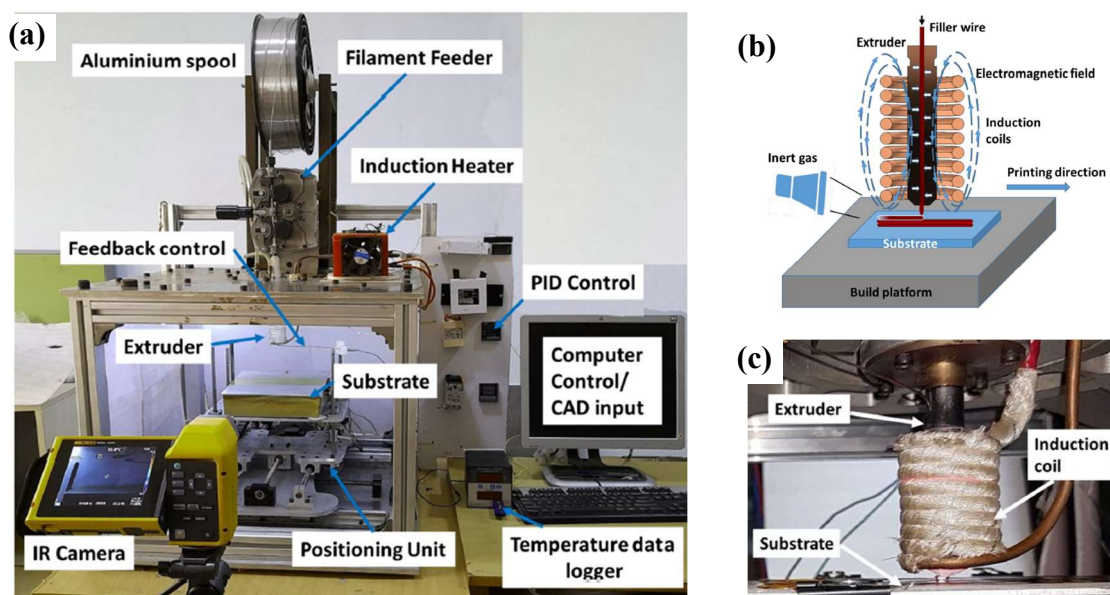
Obr. 2-12 Výsledky testovania 3D tlače: a) 3D Tlač jednej vrstvy pri výkone 10 kW, rýchlosti nanášania materiálu $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; b) Mikroštruktúra vzorky a); c) 3D Tlač s parametrami optimalizovanými pre tvorbu jednej vrstvy; d) 3D Tlač s redukovaným výkonom. [32]

2.5.3 Extrudéry s nepriamym indukčným ohrevom - thixoforming

Popis zariadenia

G. K. Sharma et al. publikovali viacero štúdií [2] a [3] zaoberajúcich sa aplikáciou indukčného ohrevu v aditívnej výrobe kovových dielov. Navrhnuté zariadenie (viď Obr. 2-13a) obsahovalo všetky základné prvky bežne používané v komerčných FDM 3D tlačiarňach. Jediným rozdielom bol zdroj tepla potrebný na zahriatie materiálu na teplotu vhodnú pre nanášanie v polotuhom stave. Zdrojom tepla bola indukčná cievka s polomerom 15 mm a dĺžkou 50 mm, ktorá bola navinutá okolo extrudéra z liatiny⁹ s priemerom 12 mm a dĺžkou 55 mm. Vzduchová medzera medzi cievkou a extrudérom bola 12 mm. Na rozdiel od práce L. Englerta et al. [32] je zahrievané teleso extrudéra, z ktorého je tepelná energia dodávaná filamentu. Tieto vlastnosti sú v tejto konfigurácii stabilné a predvídateľné. Prebytočná tepelná energia bola na vstupe filamentu odvádzaná vodným chladením. Teplota bola regulovaná pomocou PID regulátora, ktorý na základe údajov z termočlánku ovládal relé napájajúce cievku. Regulácia umožňovala udržať teplotu extrudéra s odchýlkou $\pm 10^\circ \text{C}$.

⁹ Liatina bola ako materiál extrudéra zvolená na základe experimentálneho pozorovania jej schopnosti odolávať vysokým teplotám a efektívne prenášať teplo na filament. Pri experimentoch bol extrudér vystavený teplote 600°C , pri ktorej dochádzalo k tvorbe oxidov. Tieto oxidy výrazne ovplyvňujú vznik vírivých prúdov a hysteréziu pri indukčnom ohreve. V porovnaní s oceľou vykazovala liatina nižší elektrický odpor, vyššiu tepelnú vodivosť a pomalšiu tvorbu oxidov, čo ju predurčilo ako vhodnejší materiál pre túto aplikáciu. [3]



Obr. 2-13 3D tlačiareň s nepriamym indukčným ohrevom: a) Popis časti zariadenia; b) Schéma extrudéra; c) Fyzická podoba extrudéra. [2]

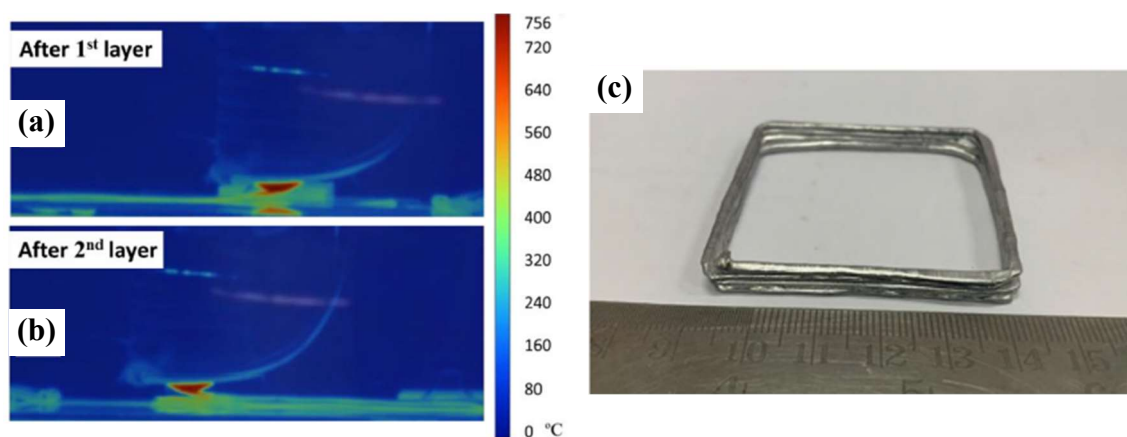
Experimenty a zistenia

Pri úvodných experimentoch bola použitá hliníková zliatina ER4043 (teplota tavenia $632\text{ }^{\circ}\text{C}$) vo forme drôtu s priemerom $1,6\text{ mm}$. Zliatina bola extrudovaná pri teplote $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rýchlosti $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Počas extrúzie dochádzalo k tvorbe kvapiek, čo naznačovalo príliš vysoký podiel kvapalnej fázy, pravdepodobne v dôsledku nedostatočne presnej regulácie teploty. [2; 3]

V ďalšej fáze experimentov bola použitá zliatina AL-5356 s ideálnou teplotou spracovania $575\text{ až }585\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na lepšie sledovanie vplyvu procesných parametrov bola použitá IR termografia, ktorá slúžila na vizualizáciu teplotného poľa. Ukázalo sa, že so zmenšujúcou sa vzdialenosťou medzi tryskou a platformou dochádza k poklesu teploty trysky. [2; 3]

Nasledujúce experimenty sa zameriavali na vyšetrovanie teplotného poľa pri nanášaní jednej a viacerých vrstiev. Pre prvú vrstvu, pri parametroch tlače (rýchlosť tlače a posuvu vlákna $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, teplota extrudéra $595\text{ }^{\circ}\text{C}$ a odstup $1,8\text{ mm}$), bola zaznamenaná maximálna teplota $615\text{ }^{\circ}\text{C}$ v momente dokončenia vrstvy, pričom priemerná teplota extrudéra dosahovala $656\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viď Obr. 2-14a). Teplota následne postupne klesala a vrstva sa dostávala do tepelnej rovnováhy. [2; 3]

Po nanesení druhej vrstvy sa teplo udržalo v predchádzajúcej vrstve, následne bol opäť pozorovaný pozvoľný pokles teploty (viď Obr. 2-14b). Po dokončení štyroch vrstiev sa zistilo, že sa teplota vrstiev pohybovala od $551\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $308\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ten obmedzoval tepelný tok do platformy, čo súviselo s ohrevom substrátu udržiavaným na $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, čím sa obmedzoval tepelný tok do platformy. Vďaka tomu sa na spodných vrstvách udržiavala teplota nad $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Záverečné vizualizácie (viď Obr. 2-14c) zachytávajú 3D tlač štvorvrstvého dielu realizovanú pomocou nového AM systému s indukčným ohrevom. [2; 3]



Obr. 2-14 Výsledky experimentov: a) IR Tomografia nanášania prvej vrstvy; b) IR Termografia nanášania druhej vrstvy; c) Objekt vytvorený počas experimentov. [2]

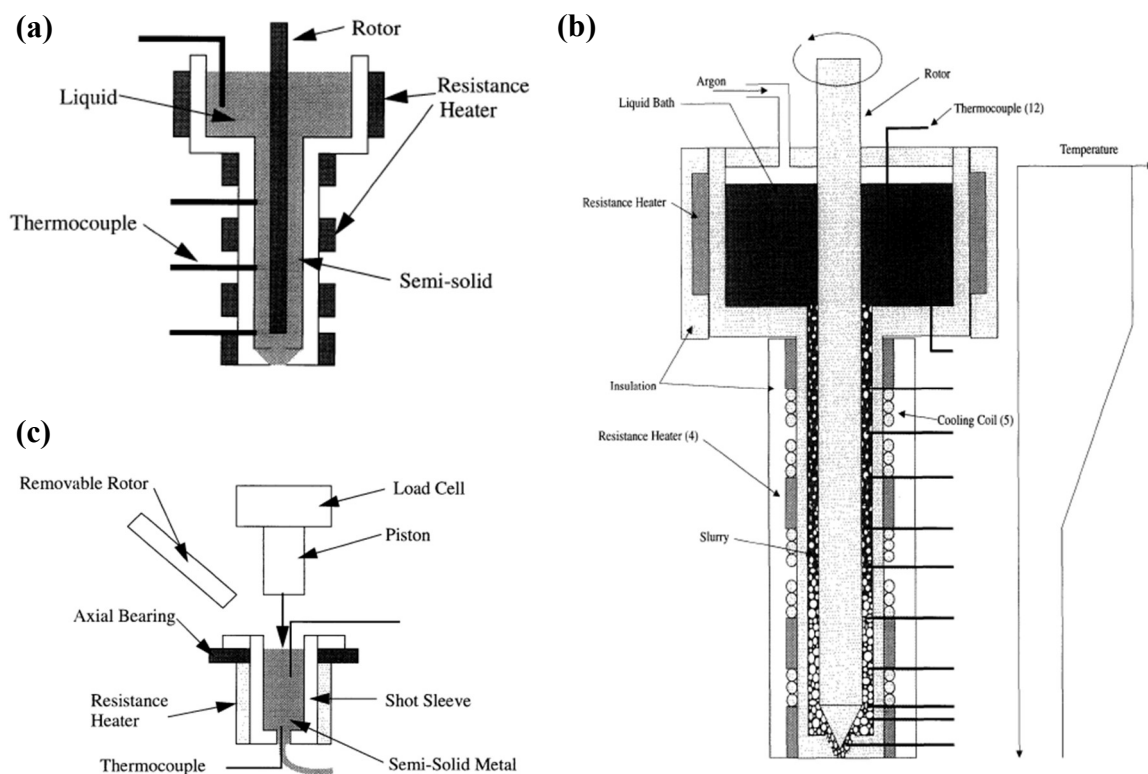
2.5.4 Extrudéry s odporovým ohrevom - rheocasting

Extrudér I., II. a III. generácie (Popis zariadení)

Extrudér I. generácie (viď Obr. 2-15a) pozostával z dvoch častí, vrchného rezervoáru a dolnej miešacej komory. Vrchná časť bola vyrobená z ocelej (1024) rúry zahrievanej 850W odporovým telesom. Dodávaný výkon mal zabezpečiť úplné roztavenie 3D tlačenej zliatiny. Spodná časť bola vyrobená z rovnakého materiálu, pričom tepelný výkon jej dodávalo niekoľko menších odporových telies. Teplota v tejto časti bola zaznamenávaná tromi termočlánkami typu K. Celá miešacia komora bola izolovaná keramickou tkaninou. Na jej konci sa nachádzala tryska s vnútorným 45° kuželom a otvorom s priemerom 3,64 mm, cez ktorý vytekala polotuhá tavenina na platformu pohybujúcu sa v troch osiach. Všetky časti miešacieho rotoru boli vyrobené z nerezovej ocele (304). [11]

Napriek úspešnému nanášaniu polotuhého materiálu mal tento koncept niekoľko zásadných nedostatkov. Roztavený materiál bol v rezervoári vystavený okolitej atmosfére, čo viedlo k jeho oxidácii. Hlavný rezervoár mal zároveň malú kapacitu a chladenie spodnej časti extrudéra záviselo od prirodzenej konvekcie, čo spôsobovalo pomalý chladiaci cyklus. [11]

V návrhu II. generácie (viď Obr. 2-15b) bol použitý väčší, uzavretý rezervoár s prívodom argónu. Všetky komponenty boli v tomto prípade vyrobené z nerezovej ocele (304). Problém nedostatočného odvodu tepla bol vyriešený vzduchovým chladením pomocou medenej trubice ovinutej okolo miešacej komory, do ktorej bol privádzaný vzduch. Vďaka tomu bolo možné nastavovať požadovaný teplotný profil. Nevýhodou tohto návrhu bola závislosť rýchlosti toku materiálu cez trysku na teplote, šmykovej rýchlosti a výške zostávajúceho materiálu v systéme. Tento problém sa vývojári pokúsili vyriešiť pri extrudéri III. generácie (viď Obr. 2-15c), kde bol zásadne zmenený koncept a systém prešiel na piestový extrudér. Pri testovaní sa však ukázalo, že sila potrebná na extrúziu zliatiny dosahovala pevnostné limity konštrukcie zariadenia. [11]

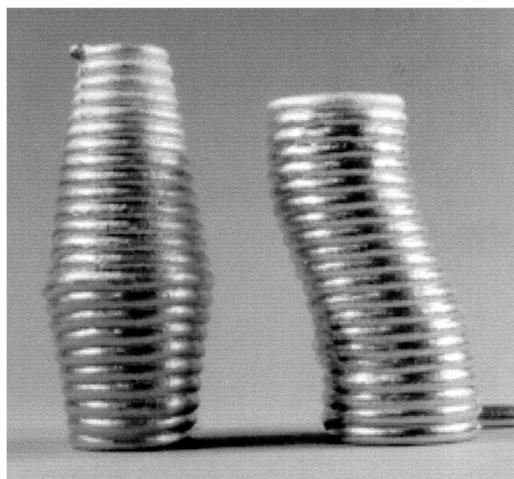


Obr. 2-15 Tri generácie extrudérov: a) Extrudér I. generácie; b) Extrudér II. Generácie; c) Extrudér III. generácie. [11]

Extrudér I., II. a III. generácie (Experimenty a zistenia)

Bežný experiment s extrudérmi prvej a druhej generácie prebiehal nasledovne: na začiatku bola tryska utesnená a rezervoár naplnený 1 až 1,5 kg malých kúskov zliatiny. Zariadenie sa následne zohrialo na teplotu 211 °C, mierne nad teplotu likvidus (209 °C). Po úplnom prehriatí systému bol spustený rotor s otáčkami 70 ot·min⁻¹. V ďalšom kroku sa miešacia komora ochladzovala – prirodzene pri prvej generácii, chladiacimi trubicami pri druhej. Po dosiahnutí teploty približne 190 °C bola tryska uvoľnená a začala extrúzia. V prvých sekundách vytekala prevažne kvapalná fáza. Pri tretej generácii extrudéra bola zliatina najprv roztavená, schladená a súčasne miešaná rotorom. Po dosiahnutí požadovanej teploty bol rotor odstránený a na jeho miesto bol zasunutý piest pre extrúziu. [11]

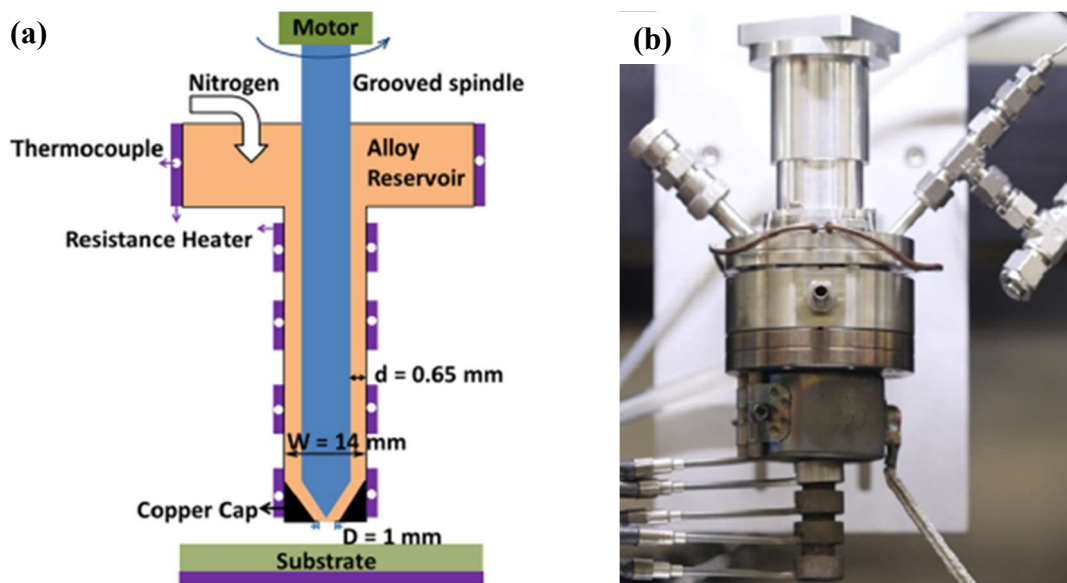
Zistilo sa, že najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri postupne klesajúcom teplotnom profile. S extrudérom druhej generácie bolo realizovaných až 50 experimentov, počas ktorých vznikli prvé výtlačky s výškou 82 mm (viď Obr. 2-16). Ukázalo sa však, že v tomto extrudéri dochádzalo k segregácii kvapalnej fázy bohatej na cín, zatiaľ čo pri tretej generácii nebola segregácia pozorovaná. Extrudér druhej generácie dosahoval rýchlosť extrúzie až 20 mm·s⁻¹, ktorá však závisela od podielu tuhej fázy. Tento parameter bolo problematické dynamicky meniť kvôli pomalému ohrevu. Ako riešenie sa zvažovala implementácia indukčného ohrevu, ktorý by mohol priniesť vyššiu flexibilitu systému. [11]



Obr. 2-16 Prvé testovacie objekty [12]

DMW Extrudér (Popis zariadenia)

V práci z roku 2017 [8] si je možné povšimnúť obdobnú konštrukciu extrudéra (vid' Obr. 2-17a) ako v práci [11] z roku 1995. Zariadenie pozostávalo z rezervoára, predĺženej trysky, drážkovaného miešacieho hriadeľa a dusíkového zdroja tlaku. Ako zdroj tepelnej energie boli opäť použité odporové vyhrievacie telesá. Teplota v jednotlivých častiach zariadenia bola regulovaná PID jednotkou s presnosťou ± 2 °C. Na rozdiel od staršej konštrukcie tu chýbal chladiaci okruh na predĺženej tryske (vid' Obr. 2-17b), ktorá bola zakončená otvorom s priemerom 1 mm.



Obr. 2-17 DMW Systém: a) Schematický nákres; b) Skutočný vzhľad DMW systému. [8]

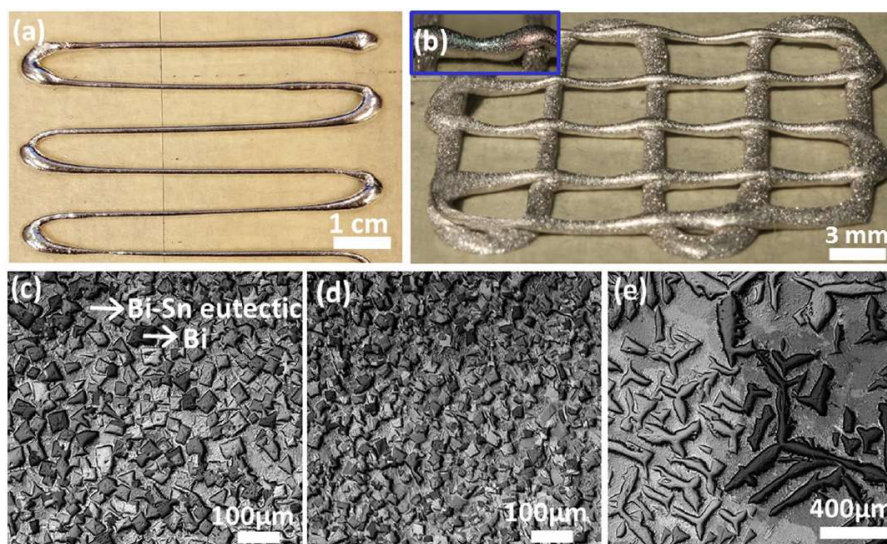
DMW Extrudér (Experimenty a zistenia)

Pri experimentoch bola použitá binárna zliatina Bi₈₄Sn₁₆ (hm.%) s teplotou solidus 139 °C a likvidus 225 °C. Jej reologické vlastnosti boli získané pomocou oscilačného reometru. Výsledky potvrdili, že zliatina vykazuje požadované tixotropné vlastnosti. Tlač prebiehala pri teplote 190–200 °C. Zmenou otáčok rotujúceho hriadeľa bolo možné regulovať viskozitu. Tlak potrebný pre extrúziu závisel od šmykového odporu toku taveniny a trenia na stenách. Maximálny tlak pri ustálených podmienkach dosiahol 0,6 MPa, čo zodpovedalo rýchlosti extrúzie približne 5 mm·s⁻¹ pri otáčkach 50 ot·min⁻¹. [8]

„Zig-Zag“ štruktúra (Obr. 2-18a) bola tlačaná pri teplote 200 °C a šmykovej rýchlosti 50 s⁻¹, čomu zodpovedal podiel tuhej fázy 0,28. Pri znížení teploty na 190 °C podiel stúpol na 0,33 a šmyková rýchlosť bola nastavená na 100 s⁻¹. Pri týchto parametroch bolo možné tlačiť aj premostenia medzi prvkami štruktúry (viď Obr. 2-18b). [8]

Analýza mikroštruktúry ukázala zmeny vo veľkosti a morfológii tuhej fázy. Pri vyššej šmykovej rýchlosti sa dosiahla jemnejšia mikroštruktúra (viď Obr. 2-18c až e). Namiesto typických ihlicových dendritických útvarov (viď Obr. 2-18e), ktoré sú bežné pre väčšinu Bi-Sn zliatin, mala primárna fáza bizmutu formu rovnomerne rozptýlených polygonálnych blokov. Táto zmena mikroštruktúry poukazuje na schopnosť systému DMW efektívne riadiť mikroštruktúru pomocou nastavenia procesných parametrov. [8]

Počas experimentov bolo zároveň zistené, že pre dosiahnutie pevného spoja medzi vrstvami je potrebné zahriať povrch predchádzajúcej vrstvy do polotuhého stavu. Určenie minimálnej požadovanej teploty, pri ktorej k tomuto spojeniu dochádza, sa však ukázalo ako náročné. Na podporu vzniku spoja je preto potrebné predohriať substrát, na ktorý je materiál extrudovaný. [8]



Obr. 2-18 Vzorky vyrobené DMW systémom a ich mikroštruktúry: a) „Zig-Zag“ štruktúra 200 °C; b) „Zig-Zag“ štruktúra s premostením 190 °C; c) Mikroštruktúra vzorky a); d) Mikroštruktúra vzorky b); e) Mikroštruktúra bez šmyku. [8]

2.6 Patenty

Táto kapitola sa zameriava na analýzu súčasného stavu patentovej ochrany v oblasti 3D tlače kovových zliatin v polotuhom stave. Vzhľadom na rastúci význam aditívnych technológií v priemyselnej výrobe je dôležité identifikovať existujúce technické riešenia a ich ochranu formou patentov. Rešerš poskytuje prehľad o niektorých patentovaných zariadeniach, ktoré umožňujú spracovanie kovových materiálov v polotuhom skupenstve.

2.6.1 Metóda a prístroj na výrobu kovových telies s využitím čiastočne stuhnutej kovovej suspenzie

Názov patentu: Methode and Apparatus for Metal Solid Freeform Fabrication Utilizing Partially Solidified Metal Slurry

Číslo patentu: US5622216A

Vlastník patentu: S. B. Brown

Dátum zverejnenia: 22.04.1997

Stav: 2009 ZANIKOL Z DÔVODU NEZAPLATENIA
UDRŽIAVACIEHO POPLATKU

Popis patentu

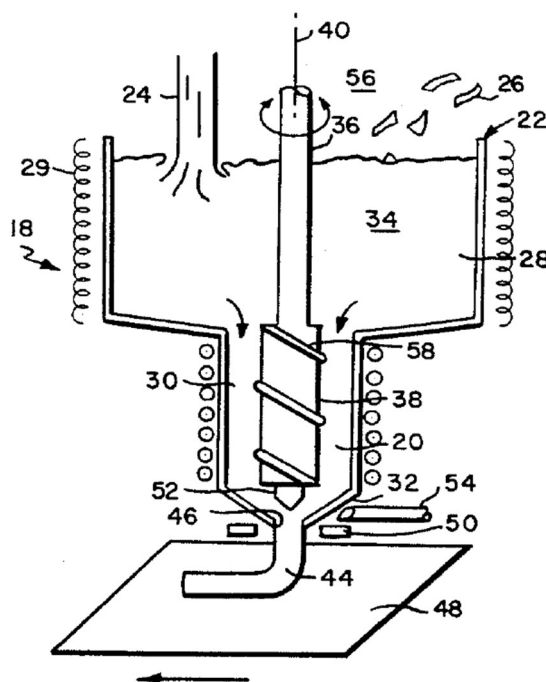
Patent US5622216A [13] predstavuje zariadenie (vid' Obr. 2-19) a metódu pre aditívnu výrobu kovových komponentov z polotuhého kovového materiálu, so zameraním na presné riadenie teploty, dávkovania, pohybu a mikroštruktúry materiálu. Zariadenie je navrhnuté tak, aby umožňovalo flexibilnú výrobu komponentov blízkyh finálnemu tvaru (near-net-shape) s vysokou kontrolou nad fyzikálnymi vlastnosťami materiálu.

Patent chráni nasledujúce riešenia:

- Zariadenie na dávkovanie kovového kalu, ktoré môže byť buď kontinuálne (s tepelne regulovanou nádobou a miešadlom), alebo dávkové (s vopred ohriatym zliatinovým ingotom),
- Tryska pre presné nanášanie polotuhého materiálu, ktorá umožňuje tvarovanie komponentov vrstvením, pričom viskozita kalu je riadená v reálnom čase,
- Systém riadeného pohybu trysky/substrátu, umožňujúci 2D alebo 3D pohyb na vytváranie zložitých tvarov,
- Možnosť riadenia prostredia depozície, vrátane zloženia atmosféry, tlaku a teploty, na optimalizáciu mikroštruktúry výsledného dielu.

Popis zariadenia

Patent popisuje zariadenie na tvorbu kovových komponentov prostredníctvom kontrolovanej depozície čiastočne nataveného materiálu. Materiál v podobe peliet alebo taveniny je dopravený do hlavného rezervoáru (22), tavnej zóny (28). Teplota v nej je udržiavaná nad teplotou likvidus. Z tejto oblasti prechádza tavenina do transformačnej zóny (20), v ktorej dochádza ku kryštalizácii. K zníženiu teploty na hodnotu, kedy tavenine dochádza k tvorbe tuhých fáz je dosiahnuté pomocou chladiaceho okruhu. V tejto zóne je materiál intenzívne miešaný pomocou rotoru (38), čím dochádza k zníženiu zjavnej viskozity suspenzie. Súčasne dochádza k porušeniu dendritov plávajúcich v tavenine a tvorbe globulárnych útvarov tuhej fázy. Polotuhý materiál je následne vytlačávaný cez otvor v tryske (32) na substrát (48). Rýchlosť akou je materiál nanášaný je možné riadiť absolútnym tlakom inertnej atmosféry (56) alebo otáčkami rotoru v prípade, že rotor obsahuje drážky podobné závit. Toto zariadenie umožňuje spracovávať ako rôzne kovové zliatiny, tak aj čisté kovy, zliatiny s eutektickým zložením a kompozitné materiály.



Obr. 2-19 Zariadenia na výrobu kovových dielov. Hlavné časti: 18 - Zdroj parciálne nataveného materiálu; 20 - Čiastočne stuhnutá suspenzia; 22 - Nádoba s úplne roztaveným materiálom; 24 - Predtavená zliatina; 26 - Kúsky stuhnutej zliatiny; 28 - Zóna roztaveného materiálu; 29 - Vyhrievací systém; 30 - Zóna transformácie; 32 - Tryska; 34 - Roztavená zliatina; 36 - Rotor; 38 - Miešacia časť rotoru; 40 - Centrálna osa rotácie rotoru; 44 - Dávkovaná suspenzia; 46 - Ústie trysky; 48 - Substrát; 50 - Indukčný ohrev; 54 - Prívod stlačeného vzduchu; 56 - Absolútny tlak atmosféry; 58 - Vonkajší závit. [13]

2.6.2 Systém a metóda na vytváranie trojrozmerných objektov zo zliatin na báze kovov

Názov patentu: System and Method for Building Three-Dimensional Objects with Metal-Based Alloys

Číslo patentu: US2009314391A1

Vlastník patentu: Stratasy, Inc.

Dátum zverejnenia: 24.12.2009

Stav: PLATNÝ PATENT (20.10.2022 ZAPLATENÝ UDRŽIAVACÍ
POPLATOK 12. ROK)

Popis patentu

Patent US20090314391A1 [35] predstavuje vysokoteplotný výrobný systém (vid' Obr. 2-20) na tvorbu trojrozmerných objektov z kovových zliatin, ktoré sa spracovávajú v polotuhom stave. Riešenie využíva extrúzne hlavy, ktoré umožňujú nanášanie predohriateho kovového materiálu na stavebnú podložku v definovanom vzore. Systém je vybavený pohybovým mechanizmom os s pohonom umiestneným mimo vyhrievanej komory a tiež chladiacimi a riadiacimi prvkami, ktoré umožňujú presné dávkovanie a manipuláciu s materiálom.

Patent chráni kľúčové technické riešenia, ako sú:

- Vyhrievaná komora (200–800 °C) s riadenou atmosférou (inertný plyn alebo vákuum),
- Extrúzne zariadenia schopné pracovať s materiálmi v polotuhom stave,
- Riadiaci softvér a hardvér, ktorý umožňuje vrstvené nanášanie,
- Chladenie a tepelné riadenie materiálu počas 3D tlače,
- Mechanizmus pohybu tlačovej hlavy a podložky s motorom mimo tepelnej zóny.

Popis zariadenia

Patentované zariadenie systém (10) je vysokoteplotný výrobný systém určený na 3D tlač objektov z kovových zliatin. Skladá sa z obalu (12), riadiacej jednotky (13), tlačovej komory (14), platformy (16), extrúznej hlavy (18) a ochladzovacej nádrže (20). Riadiaca jednotka (13) spracováva digitálne modely a riadi pohyb komponentov systému. Tlačová komora (14) funguje ako pec, kde sa počas procesu udržiava teplota v rozsahu približne 200 - 800 °C, v inertnej atmosfére alebo vákuu. Tieto podmienky minimalizujú deformácie, oxidáciu a zabezpečujú rovnomerné chladenie objektu.

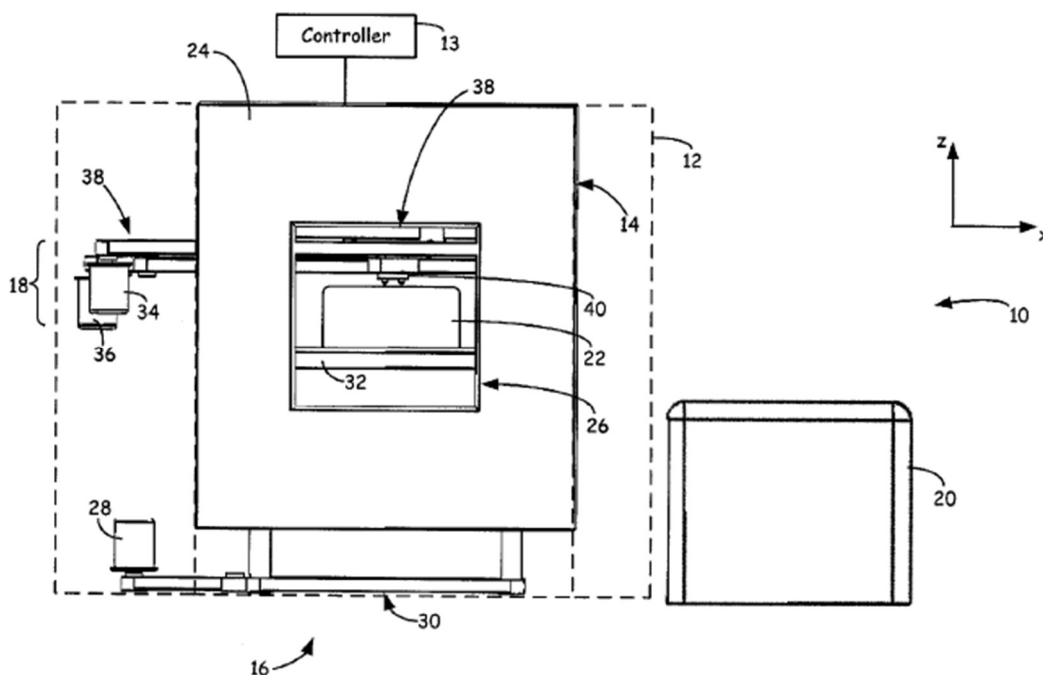
Platforma (16) s podložkou (32) sa pohybuje vo vertikálnej osi (Z) pomocou pohonu (28) a zostavy osi z (30). Extrúzna hlava (40) je uchytená na zostave osi x a y (38) poháňanej dvojicou motorov (34, 36), čím je zabezpečený pohyb v horizontálnej rovine. Kovový materiál je počas nanášania zahrievaný na polotuhý stav (medzi teplotou solidus a likvidus),

čím si zachováva vhodnú viskozitu a zároveň pôvodnú mikroštruktúru. Po nanesení každej vrstvy sa platforma zníži o výšku vrstvy, a proces sa opakuje.

Po dokončení objektu sa stabilizuje a následne zakalí v kvapaline v nádrži (20), ktorá môže byť tiež v inertnej atmosfére. Tento krok zamedzuje degradácii štruktúry a zabezpečuje zachovanie požadovaných vlastností kovovej zliatiny.

Materiál vo forme kovového drôtu je do extrúznei hlavy (40) privádzaný cez tepelne izolovaný umbilikálny kábel, ktorý zároveň slúži na vedenie chladiaceho plynu a elektrického napájania. Drôt prechádza cez chladiacu zónu, kde sa pomocou toku inertného plynu (napr. argónu) znižuje jeho teplota pred vstupom do podávacieho mechanizmu. Ten zabezpečuje rovnomerný posuv drôtu do tavnej časti extrudéra, kde sa materiál zahrieva na teplotu v polotuhom stave – medzi teplotou solidus a likvidus.

Systém môže byť vybavený freeze ventilom, ktorý umožňuje okamžité zastavenie alebo spustenie toku kovového materiálu bez mechanického uzáveru. Ventil pracuje na princípe lokálneho chladenia výstupného kanála, čo spôsobí stuhnutie materiálu a tým prerušenie toku. Pri vypnutí prívodu chladiaceho plynu sa kanál opätovne ohreje a extrúzia pokračuje. Tento systém má extrémne krátku odozvu (pod 1 ms) a zvyšuje presnosť dávkovania vrstiev pri aditívnej výrobe.



Obr. 2-20 Zariadenia na výrobu kovových dielov. Hlavné časti: 10 - Čelný pohľad na zariadenie; 12 - Obal; 13 - Riadiaca jednotka; 14 - Stavebná komora; 16 - Platforma; 18 - Zostava tlačovej hlavy; 20 - Chladiaca nádrž; 22 - Vyrábaný objekt; 24 - Steny komory; 26 - Prístupový otvor; 28 - Motor osi z; 30 - Zostava pohybovej osi z; 32 - Podložka; 34 a 36 - Motory pre pohyb v rovine xy; 38 - Zostava os x a y; 40 - Extrúzna hlava.[35]

2.6.3 Zariadenie na aditívnu výrobu pomocou vytlačania drôtu v polotuhom stave

Názov patentu: Additive Manufacturing Apparatus Using a Semi-Solid Extrusion of Wire

Číslo patentu: US20180290194 A1

Vlastník patentu: A. Jabbari, K. Abrinia

Dátum zverejnenia: 11.10.2018

Stav: 2021 INFORMÁCIA O STAVE: ZRUŠENIE PODÁVANIA ŽIADOSTI

Popis patentu

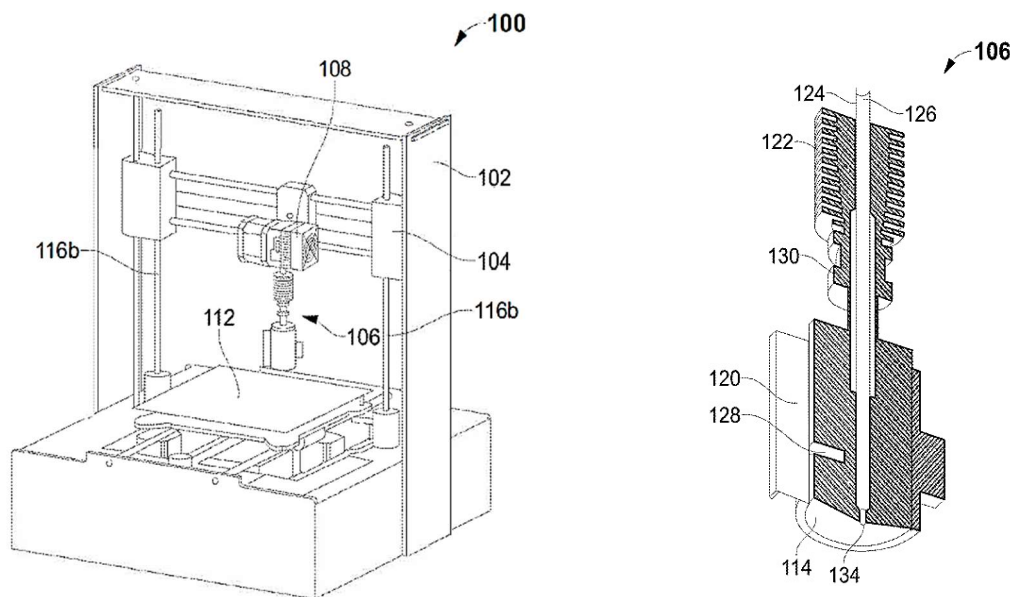
Patent US2018290194A1 [36] predstavuje zariadenie (viď Obr. 2-21) na aditívnu výrobu kovových objektov pomocou polo-tuhého extrúzného procesu, známeho ako thixo-extrúzia. Systém je schopný vytvárať trojrozmerné objekty z kovových zliatin vo forme drôtového filamentu, ktorý je predtým termo-mechanicky upravený, aby mal vhodné reologické vlastnosti na tlač. Thixo-extrúzia prebieha pri teplotách pod bodom likvidus zliatiny, čím sa znižujú energetické náklady a eliminujú problémy spojené s vysokými teplotnými gradientmi typickými pre iné AM metódy.

Patent chráni kľúčové technické riešenia, ako sú:

- Polo-tuhý extrúzný proces (thixo-extrúzia) s kontrolovanou viskozitou a štruktúrou,
- Drôtový prívod kovového materiálu s predúpravou na globulárnu mikroštruktúru,
- Extrúzna hlava s tepelnou bariérou, chladiacim blokom a presným riadením teploty,
- Pohybový systém s možnosťou presného navádzania v 3 osiach (x , y , z),
- Riadiaca elektronika a softvér pre spracovanie *.stl dát a generovanie dráhy tlače.

Popis zariadenia

Uvedený patent popisuje zariadenie veľmi podobné komerčne dostupným FDM 3D tlačiarňam. Základný rozdiel je v materiáli, ktorý je schopný spracovávať a tomu prispôbený extrudér. Materiál v podobe drôtu z kovovej zliatiny musí mať predpripravenú mikroštruktúru pomocou mechanicko-tepelného pracovania. Takýto drôt je následne odvíjaný pomocou podávacie mechanizmu (108) a dopravovaný cez chladič (122) do telesa (114), v ktorom je prevedený do polotuhého stavu. Zdrojom tepelnej energie v tejto časti je odporové vyhrievacie teleso (120). Nenatavený materiál v chladiči (122) plní úlohu piestu, čím je zabezpečené vtlačanie suspenzie na tlačovú podložku (112). Tlačová hlava sa pohybuje v osách x a z , zatiaľ čo tlačová podložka v ose y .



Obr. 2-21 Zariadenia na výrobu kovových dielov vytláčaním drôtu v polotuhom stave. Hlavné časti:
 100 - Výrobné zariadenie; 102 - Rám; 104 - Vedenie v ose x; 106 - Hlava extrudéra; 108 - Podávací
 mechanizmus; 112 - Tlačová podložka; 114 - Tryska; 116b - Vedenie v osi z; 120 - Vyhrievacie teleso;
 122 - Chladič; 124 - Trubica; 126 - Vodiaci kanál; 128 - Uloženie teploty mariaceho senzoru; 130 - Tepelná
 bariéra; 134 - Ústie trysky.

2.6.4 Zariadenie na aditívnu výrobu pomocou priameho odporového ohrevu

Názov patentu: Semisolid Metal Additive Manufacturing Equipment and Process Based on Direct Resistance Heating Technology

Číslo patentu: CN110202139A

Vlastník patentu: UNIV XI AN JIAOTONG

Dátum zverejnenia: 09.06.2019

Stav: 2020 UDELENIE PATENTU

Popis patentu

Patent CN110202139A [37] predstavuje zariadenie na aditívnu výrobu z polotuhých kovových materiálov, ktoré využíva priamy odporový ohrev kovového drôtu (lineárneho polotovaru) v oblasti tlačovej hlavy (viď Obr. 2-22). Proces prebieha v ochrannnej plynovej atmosfére a zabezpečuje presné riadenie teploty a tvarovanie dielcov s požadovanou mikroštruktúrou. Patent zároveň opisuje technologický postup vrátane prípravy polotovaru, odstraňovania oxidovej vrstvy a riadenia teploty počas procesu.

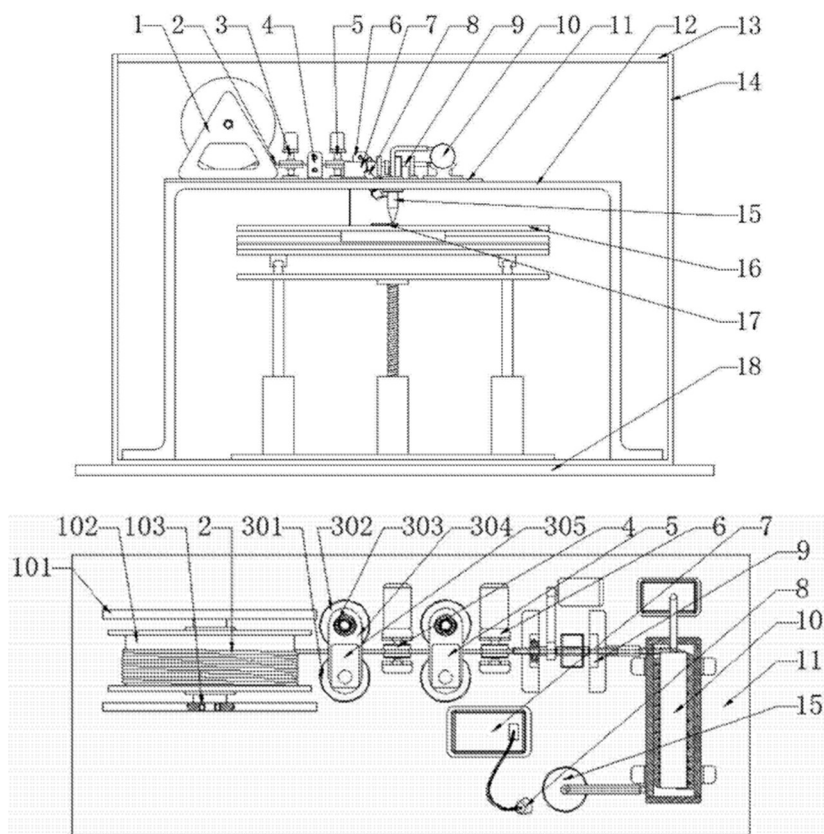
Patent chráni nasledovné technické riešenia:

- Zariadenie na prípravu polotovaru, ktoré umožňuje preddeformáciu, odstraňovanie oxidovej vrstvy a ohrev na polotuhý stav,
- Prietok polotovaru cez špirálovitý ohrievací kanál s regulovaným časom prechodu (5 - 10 min) pri teplote 630 - 650 °C,
- Tlačová hlava s dutým kužeľovitým výstupom, cez ktorú prechádza polotuhý drôt, pričom sa lokálne zahrieva pomocou jednosmerného prúdu,
- Systém riadenia teploty s infračerveným senzorom a uzavretou regulačnou slučkou pre presné udržiavanie teploty polotovaru v tlačovej hlave,
- Mechanizmus posuvu materiálu s valčekomými jednotkami a trením poháňaným podávačom,
- Ochranná plynová komora, ktorá eliminuje oxidáciu a zvyšuje kvalitu mikroštruktúry výsledného dielca.

Popis zariadenia

Zariadenie pozostáva z rámu (12), ochrannej plynovej komory (14), trojosovej pracovnej platformy (16), základne (18) a komplexného systému na prípravu polotovaru. Materiál vo forme drôtu (2) je navinutý na cievku (102) a pomocou valčkového mechanizmu je vedený cez sústavu štyroch valcovacích stolíc, kde sa podrobí preddeformácii (predpätie 0,2–0,4). Následne je oxidová vrstva z povrchu drôtu odstránená rotačným nožovým mechanizmom (9), pričom je trieska zhromažďovaná v samostatnej nádobe.

Drôt potom vstupuje do špirálového ohrievacieho kanála (10), kde je ohriaty do polotuhého stavu (630–650 °C) a udržiavaný v tomto stave počas presne kontrolovanej doby (10 – 50 min). Cez pravouhlý adaptér vstupuje materiál do tlačovej hlavy (15), kde prebieha finálne lokálne zahrievanie pomocou odporového ohrevu – cez drôt je vedený jednosmerný elektrický prúd. Tým sa zabezpečí jeho prilnutie k formovanému objektu (17), ktorý je umiestnený na pohyblivej platforme (16). Teplota v mieste kontaktu je kontinuálne monitorovaná pomocou infračerveného senzora, pričom systém automaticky reguluje prúd z jednosmerného zdroja (7) pre zachovanie ideálneho polotuhého stavu. Výsledný diel je po ukončení procesu vyňatý z ochrannej komory. Celý proces prebieha v uzatvorenom priestore za prítomnosti ochrannej atmosféry.



Obr. 2-22 Zariadenia na výrobu kovových dielov vytláčaním drôtu v polotuhom stave. Hlavné časti:
 1 - Skladovací mechanizmus; 2 - Polotovár; 3 - Prvý valcovací mechanizmus; 4 - Druhý valcovací mechanizmus; 5 - Tretí valcovací mechanizmus; 6 - Štvrtý valcovací mechanizmus; 7 - DC vyhrievacie zariadenie; 8 - Infračervený teplotný senzor; 9 - Mechanizmus na odstraňovanie povrchovej vrstvy oxidov; 10 - Zariadenie na izotermické spracovanie v polotuhom stave; 11 - Základová platňa; 12 - Rám; 13, 14 - Kryt ochranné atmosféry; 15 - Dutá kužeľová tlačová hlava; 16 - Platforma; 17 - Tlačený objekt; 18 - Základňa; 101 - Držiak spojovacieho valcu; 102 - Spojovací valec; 103 - Prvé valivé ložisko; 301 - Hnací valec; 302 - Hnaný valec; 303 - Valčkové ložisko; 304 - Spojovací rám valcov; 305 - Servomotor poháňací valce. [37]

2.7 Zhrnutie hlavných zistení

Súčasný stav vývoju extrudérov pre 3D tlač v polotuhom stave

Vývoj extrudérov pre 3D tlač kovových zliatin v polotuhom stave sa aktuálne nachádza vo fáze aktívneho experimentovania. Väčšina publikovaných prác sa zameriava skôr na optimalizáciu procesných parametrov než na analýzu vplyvu samotnej konštrukcie zariadenia. Iba výnimočne sa v literatúre objavujú informácie o iteratívnom vývoji extrudéra a úpravách realizovaných na základe experimentálnych výsledkov. Prehľad analyzovaných zariadení je uvedený v tabuľke (viď Tab. 2-2).

Vo všeobecnosti možno pozorovať prevládajúci trend vývoja extrudérov určených pre spracovanie materiálu vo forme drôtu. Viacerí autori vychádzajú z konštrukčných princípov bežne používaných v FDM/FFF technológii, čo predstavuje výhodu v podobe osvedčených a funkčných dizajnov. Použitie drôtu ako vstupného materiálu je praktické

najmä z hľadiska dostupnosti a jednoduchej manipulácie. V týchto prácach sa najčastejšie používajú nízko-taviteľné zliatiny na báze cínu, olova alebo bizmutu. Zvolený materiál extrudéra, často hliník, je z hľadiska teplotnej odolnosti postačujúci pre tieto aplikácie. Pri spracovaní zliatin s vyššou teplotou tavenia sa navrhuje použitie odolnejších materiálov ako nerezová oceľ, meď, mosadz, prípadne keramika.

Na základe dostupných údajov je možné predpokladať, že počas spracovania dochádza k vzájomnému chemickému ovplyvňovaniu medzi spracovávaným materiálom a materiálom komponentov extrudéra. Napriek tomu sú v tejto súvislosti dostupné len obmedzené informácie. Rovnako absentujú údaje o miere opotrebenia funkčných častí extrudéra, ktoré sú vystavené polotuhému kovu, a o ich životnosti, čo je kľúčové z hľadiska dlhodobej a spoľahlivej prevádzky zariadenia. Tieto poznatky by pravdepodobne bolo možné získať analýzou publikácií z oblasti zlievarenstva, kde sa spracovanie kovov v polotuhom stave rieši dlhobojšie a na väčších objemoch materiálu.

Za jeden z inovatívnych smerov možno považovať vývoj extrudérov s indukčným ohrevom. Perspektívnym sa javí najmä nepriamy indukčný ohrev, kde vznikajúca tepelná energia nie je priamo viazaná na fyzikálne vlastnosti spracovávanej zliatiny. Ďalším odlišným prístupom je použitie reotlače, ktorá umožňuje do určitej miery nezávislé riadenie šmykového napätia a rýchlosti nanášania materiálu. Tento fakt otvára možnosti pre ciele ovplyvňovanie mikroštruktúry počas tlače bez nutnosti meniť rýchlosť depozície. Ako potenciálny smer vývoja sa javí aj úvaha nad tým, ako by mohol byť systém upravený tak, aby umožňoval plynulú zmenu chemického zloženia počas procesu tlače.

Spôsoby nanášania zliatin v polotuhom stave v oblasti aditívnych technológií

Zariadenia pre 3D tlač kovov v polotuhom stave možno rozdeliť podľa spôsobu spracovania zliatiny na dve hlavné skupiny:

- **Thixoforming** – nanášanie vopred upraveného drôtu s globulárnou mikroštruktúrou.
- **Rheocasting** – zliatina sa privádza v roztavenom stave a počas tlače prechádza do polotuhého stavu, pričom sa globulárna mikroštruktúra formuje priamo v zariadení. Tento spôsob umožňuje väčšiu mieru kontroly nad jej vývojom.

Rozdiely medzi týmito prístupmi sa odrážajú v konštrukčnej náročnosti, požiadavkách na presnosť regulácie teploty a type zliatin, ktoré je možné spracovať. Zariadenia pracujúce na princípe thixoformingu sú zvyčajne jednoduchšie, majú menej funkčných častí a pracujú pri nižších teplotách. Naopak, systémy na báze rheocastingu sú konštrukčne zložitejšie, vyžadujú vyššie prevádzkové teploty, no umožňujú nezávisle riadiť šmykovú rýchlosť miešania a rýchlosť nanášania materiálu.

Tab. 2-2 Zhrnutie analyzovaných experimentálnych zariadení

AUTORI	ROK	ZARIADENIE	TYP OHREVU	PRINCÍP	MATERIÁL KOMORY	ZLIATINA	TEPLOTA TLAČE (°C)
S. Finke et al. [14; 15]	1999	Inšpirované viskozimetrom	-	Thixo	-	Pb60Sn40 ¹	190 (235 ²)
A. Jabbari et al. [4; 5]	2018	Kompatibilné s Prusa i3	Odporový	Thixo	Hliník	Sn85Pb15 ¹ Sn60Pb40 ¹	185 (206 ²) 185 (206 ²)
D. D. Lima et al. [7; 29]	2020	Vysokoteplotný extrudér	Odporový	Thixo	-	Mg62Zn38 ¹ Sn62Bi38 ¹	420 (500 ²) 170 (190 ²)
N. Nezic et al. [6]	2023	Extrudér s predohrevom	Odporový	Thixo	-	Al4018	565-630(- ²)
L. Englert et al. [32]	2022	Extrudér s priamym indukčným ohrevom	Indukčný	Thixo	Bez	AlSi7Mg ¹	- (- ²)
G. K Sharma et al. [2; 3]	2021	Extrudér s nepriamym indukčným ohrevom	Indukčný	Thixo	Liatina	ER4023 (AlSi5) Al-5356	- (623 ²) 595 (- ²)
Ch. S. Rice [11]	1995	Rheoextruder Gen. I., II., III.	Odporový	Rheo	Nerezová ocel ¹	Sn85Pb15 ¹	190 (211 ²)
W. Chen et al. [8]	2017	Rheocaster	Odporový	Rheo	-	Bi84Sn16 ¹	200 (225 ²)

¹Chemické zloženie vyjadrené hmotnostným podielom (hm. %).²Teplota tavenia danej zliatiny.

Kľúčové parametre procesu nanášania materiálu v polotuhom stave

- **Teplota a jej regulácia:** Stabilné rozhranie medzi tuhhou a kvapalnou fázou je kritické pre správnu viskozitu a tixotropné správanie.
- **Rýchlosť extrúzie a podiel tuhej fázy:** Ovpływujú stabilitu toku, geometriu výtlaku a extrúznou silu. Optimálny podiel tuhej fázy je 0,3–0,5.
- **Dĺžka a priemer tavného kanála:** Musia zabezpečiť dostatočný čas na ohrev materiálu. Odporúčaná dĺžka je minimálne 30 mm, priemer čo najbližší k filamentu.
- **Pomer extrúznej rýchlosti a rýchlosti platformy:** Hodnota okolo 1:1 zabezpečuje najlepšie výsledky.
- **Materiál tavného telesa:** Musí byť chemicky stabilný, mať vysokú tepelnú vodivosť a odolnosť voči oxidácii – najčastejšie použitá nerezová oceľ, meď, prípadne keramika.

Existujú patenty na proces 3D tlače polotuhého kovu alebo na zariadenia

Rešerš odhalil viacero patentov, ktoré opisujú rôzne prístupy ku 3D tlači v polotuhom stave:

- **US5622216A (S. B. Brown, 1997):** Prvý patent s dôrazom na kontrolu viskozity a mikroštruktúry. Zanikol.
- **US2009314391A1 (Stratasys, Inc., 2009):** Aktívny patent pre zariadenie s vyhrievanou komorou, schopné tlačiť zliatiny v polotuhom stave.
- **US20180290194A1 (A. Jabbari, 2018):** Zariadenie podobné FDM 3D tlačiarňi, ktoré spracováva kovový filament thixo-extrúziou.
- **CN110202139A (UNIV XI AN JIAOTONG, 2019):** Patent využívajúci priamy odporový ohrev drôtu v ochrannnej atmosfére – udelený v roku 2020.

2.8 Identifikácia novosti a príležitosti

Technológia 3D tlače kovových zliatin v polotuhom stave je relatívne mladou oblasťou výskumu, ktorá spája princípy odlievania v polotuhom stave a aditívne technológie. Napriek tomu, že prvé koncepty boli publikované už v 90. rokoch, vývoj zostáva prevažne experimentálny, bez komerčne dostupného riešenia. V rámci rešeršnej časti bolo analyzovaných viacero prác, ktoré demonštrujú technickú uskutočniteľnosť extrúzie v polotuhom stave, no zároveň poukazujú na množstvo otvorených problémov, ktoré neboli vyriešené.

1. Chýba overené zariadenie pre dlhodobú prevádzku

Väčšina popísaných zariadení bola testovaná len krátkodobo – v rámci niekoľkých výtlakov alebo krátkych sérií. Nie sú dostupné údaje o stabilite procesu pri dlhšej tlači (napr. 1 hodina a viac), čo znamená, že neexistuje spoľahlivo overený extrúder pre kontinuálne aplikácie.

2. Absencia regulácie podielu tuhých a kvapalných fáz počas procesu

Hoci sa často uvádzajú teplotné rozsahy, nie je doložené, aký bol reálny podiel tuhých fáz počas tlače. Chýba priame meranie alebo výpočet na základe fázového diagramu, resp. DSC dát. Bez tejto informácie nie je možné overiť, či materiál bol v skutočnosti spracovaný v polotuhom stave.

3. Nedostatok systémov s presnou dynamickou reguláciou teploty

Väčšina zariadení používa jednoduché PID regulátory s presnosťou ± 5 až ± 10 °C, čo je pre spracovanie citlivých zliatin (napr. Mg, Zn) nedostatočné.

4. Chýba dokumentácia geometrických parametrov

V prácach sa zriedkavo uvádza konkrétna geometria tavného kanála, trysky, dĺžka ohrevnej zóny či extrúzna sila. Nie je teda možné porovnať efektivitu jednotlivých riešení alebo ich reprodukovat'. Tento nedostatok obmedzuje akumuláciu poznatkov.

5. Obmedzená materiálová variabilita a absencia zliatin s komplexným chemickým zložením

Väčšina experimentov pracuje s binárnymi zlatinami (Sn-Pb, Bi-Sn). Chýba overenie spracovateľnosti zliatin s viac ako dvoma zložkami (napr. AZ61, AZ91), ktoré sú relevantné pre technickú prax.

6. Riešenia s indukčným ohrevom trpia prehrevom

Experimenty s indukciou ukazujú problémy s akumuláciou tepla vo výtlaku a nedostatkom kontroly nad šírením tepla. Nie je známe riešenie, ktoré by kombinovalo indukčný ohrev s efektívnym tienením alebo rýchlym chladením.

Z uvedeného vyplýva, že oblasť 3D tlače kovových zliatin v polotuhom stave sa síce dynamicky rozvíja, no chýba v nej jednotné, stabilné a prakticky využiteľné riešenie. Zariadenie, ktoré by umožňovalo presné riadenie procesných podmienok, bolo konštrukčne jednoduché a pritom flexibilné v použití rôznych typov zliatin. Takéto zariadenie by predstavovalo významný prínos pre výskum aj prax. Potenciálne uplatnenie siaha od výroby prototypov, cez tlač komponentov so špecifickými vlastnosťami až po vývoj nových materiálov priamo počas procesu. Vývoj extrudéra schopného zabezpečiť stabilnú extrúziu v polotuhom stave by tak nepredstavoval len doplnenie existujúcich riešení, ale vytvorenie technologickej platformy s inovačným potenciálom.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3.1 Analýza problému

Aditívne technológie prekonali za posledné tri desaťročia množstvo prekážok, vďaka čomu sa s nim môžeme stretnúť v takej podobe, ako ich poznáme dnes. Aj napriek mnohým výhodám, ktoré so sebou prinášajú, nedochádza k ich širšiemu nasadeniu v praxi tak, ako by sa očakávalo. V tomto bode je potrebné povedať, že existuje veľa druhov 3D tlače, z ktorých sú len niektoré schopné pracovať s kovmi a ich zliatinami. Najrozšírenejšie technológie používané k výrobe kovových objektov sú založené na fúzií práškoveho lôžka. Tie používajú laser alebo elektrónový lúč na spájanie jemných zŕn prášku. Hlavným limitujúcim faktorom, ktorý bráni ich širšiemu výskytu v praxi je obstarávacía cena, ktorá nezahŕňa iba cenu samotnej 3D tlačiarne, ale aj náklady spojené s potrebným vybavením a zabezpečením pracoviska. Cena samotnej 3D tlačiarne sa pohybuje bežne v desiatkach tisícoch dolárov [38].

Používané prášky sú v porovnaní s bežnými polotovarmi výrazne drahšie. Ich cena sa môže vyšplhať až na päťnásobok ceny hutného polotovaru, ako tomu je v prípade nerezovej ocele 316L [39; 40]. Samotná podoba materiálu prináša so sebou vyššie požiadavky na skladovanie a manipuláciu. Niektoré prášky sú vysoko reaktívne so vzdušným kyslíkom, čím vzniká na ich povrchu tenká vrstva oxidov. Jej prítomnosť vedie k vzniku nehomogenít v 3D tlačenom objekte. Pri práci s kovovými práškami je potrebné navyše dodržiavať bezpečnostné opatrenia, aby sa predišlo potenciálnemu ohrozeniu zdravia.

V súčasnej dobe existuje iba obmedzené množstvo dostupných kovov a ich zliatin v práškovej podobe. Tie sú obvykle založené na báze hliníku, medi, titánu, niklu a rôznych druhov ocelí. Iba ojedinele je možné nájsť firmu ponúkajúcu horčíkové zliatiny. Jednou z hlavných príčin je schopnosť spontánneho vznietenia.

Jedným z možných riešení pre zníženie vplyvu vyššie uvedených obmedzení je použitie technológie 3D tlače pracujúcej s materiálom v polotuhom stave. Tento alternatívny prístup pracuje s parciálne natavenou kovovou zliatinou, ktorá je kontrolovane extrudovaná na platformu. Uvedená technológia by používala namiesto prášku, materiál v podobe drôtu či granúl. Tieto formy vstupných polotovarov majú jednu zásadnú výhodu, umožňujú pracovať s pomerne reaktívnymi zliatinami. Oproti práškom majú výrazne menší povrch, čím sa znižuje riziko samovznietenia. Zároveň je vznikom oxidov postihnutý výrazne menší objem. Túto vrstvu je možné pred natavením mechanicky odstrániť.

3D tlač v polotuhom stave by mohla potenciálne zmeniť spôsob, akým sú vyrábané niektoré kovové diely. Zároveň by mohla viesť k nižším finančným nárokom na aditívnu výrobu kovových komponentov. V súčasnej dobe existuje veľa otázok týkajúcich sa presnosti a spoľahlivosti tejto technológie, a preto je potrebný ďalší výskum a vývoj. Pre realizáciu

týchto činností je však nutné vyvinúť experimentálne zariadenie, na ktorom by mohli prebiehať potrebné experimenty a optimalizácia výrobného procesu. Konkrétne by mala byť pozornosť venovaná vývoju extrudéra 3D tlačiarne, ktorý by bolo možné implementovať na existujúce zariadenie.

Názov a klasifikácia produktu

Vyvíjaným produktom je experimentálny extrudér 3D tlačiarne, ktorá pracuje na alternatívnom prístupe k tvorbe aditívne vyrábaných kovových objektov. Ten je založený na parciálnom natavovaní zliatiny a jej následnom nanášaní na stavebnú podložku.

Zákazník

Funkčný vzorka je určená pre výskumné potreby pracovníkov RIAT a UMVI, ktorí sídlia na VUT v Brne. Výskumná skupina RIAT sa dlhodobo zaoberá vývojom aditívnych technológií a ich aplikáciou v rôznych oblastiach priemyslu. Zatiaľ čo pracovníci UMVI sa už dlhšiu dobu zaoberajú využitím polotuhého stavu kovových zliatin pre aditívnu výrobu objektov. Vyvíjané zariadenie by malo naplniť požiadavky obidvoch výskumných skupín.

Spotrebiteľ

V tomto prípade sú výskumné skupiny zákazníkom aj spotrebiteľom, čo znamená, že ich požiadavky na finálny produkt sú takmer zhodné. Vyvíjané zariadenie je prednostne určené ich pracovníkom, ktorí by mali pomocou neho realizovať potrebnú výskumnú činnosť. Na základe stručnej charakteristiky limitov kovových aditívnych technológií, predošlej systematickej rešerše a potrieb zákazníkov, resp. spotrebiteľov, je možné vyvodit' ciele, obmedzenia, funkcie a spôsoby ako atribúty, ktoré vstupujú do vývojového procesu experimentálneho zariadenia (viď Tab. 3-1).

Tab. 3-1 Prehľad atribútov (C - Cieľ, O - Obmedzenie, F - Funkcia, S - Spôsob)

ATRIBÚTY	C	O	F	S
Skonstruovať extrudér pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin	✓			
Extrudér by mal extrúdovať materiál v polotuhom stave	✓		✓	
Extrudér by mal pracovať s materiálom v podobe drôtu s priemerom 1,6 - 2 mm	✓	✓	✓	
Extrudér by mal byť kompatibilný s 3D tlačiarňou, ktorá bola vyvinutá v rámci predošlého výskumu na UMVI	✓		✓	
Pri tlači by mal byť vytvorený spoj medzi dvomi nanesenými vrstvami			✓	
Extrudér by mal byť schopný zahriať materiál najviac na teplotu 700 °C vo vyhrievanej komore	✓	✓	✓	
Vysoké prevádzkové teploty		✓		
Agresívne podmienky v mieste natavovaného materiálu		✓		
Difúzia, vznik difúzných spojov		✓		
Tepelná rozťažnosť		✓		
Jednotlivé diely by mali plniť iba jednu funkciu		✓	✓	
Navrhovaný extrudér by mal byť modulárny	✓		✓	
Kľúčové komponenty extrudéra by mali mať flexibilný návrh	✓		✓	
Zariadenie by malo byť bezpečné	✓	✓	✓	
Použitie technológie L-PBF pre výrobu jednotlivých dielov extrudéra		✓		✓
Aktívne a pasívne chladenie upínacích častí extrudéra				✓
Použitie materiálov s vyššou tepelnou odolnosťou (žiarupevné zliatiny)				✓
Použitie nástrojov MKP na predikciu rozloženia tepelného poľa a silového zaťaženia				✓
Dostupnosť náhradných dielov		✓		
Jednoduchá obsluha zariadenia			✓	
Extrudér by mal zabezpečovať možnosť testovania rôznych procesných parametrov 3D tlače (teplota komory, rýchlosť nanášania materiálu)			✓	
Riadiaci systém by mal umožňovať presnú reguláciu teploty taveného materiálu	✓		✓	
Použitie PID regulátoru teploty				✓
Oxidácia v priebehu tavenia a nanášania poloroztaveného materiálu		✓		
Použitie inertného plynu na vytvorenie ochrannej atmosféry				✓
Dostupnosť materiálu, ktorý má byť 3D tlačný		✓		

3.2 Cieľ práce

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce je navrhnúť extrudér pre 3D tlač nízko-taviteľných zliatin, ktorý pracuje na princípe extrúzie polotuhého kovu. Navrhnutý extrudér by mal spĺňať nasledujúce parametre:

- Vstupný materiál (filament) by mal byť vo forme drôtu s priemerom 1,6 - 2 mm,
- Teplota vo vyhrievacej komore by mal byť pomerne presne regulovateľná v rozmedzí teplôt 400 – 700 °C.

Okrem hlavného cieľa je vyžadované, aby boli dosiahnuté aj ďalšie parciálne ciele, ktoré sú:

- Definovať kľúčové parametre extrudéra zaistujúce kontrolu nanášania polotuhého kovu,
- Navrhnúť vyhrievaciu komoru extrudéra tak, aby umožňovala rýchlu a presnú reguláciu teploty,
- Realizovať prototyp extrudéra,
- Overiť funkciu na vybranej nízko-taviteľnej zliatine.

4 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

Táto kapitola sa zameriava na proces tvorby koncepčných návrhov extrudéra pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin. Je rozdelená do štyroch častí postupne prechádzajúcich od analýzy cieľov a funkcií až po výber optimálneho konceptu, ktorý bude v nasledujúcich kapitolách prevedený do podoby predbežného návrhu. Účelom tejto časti je porozumieť dôvodom, ktoré viedli k stanoveným cieľom a funkciám extrudéra. Z nich následne vyplývajú obmedzenia, ktoré je potrebné zohľadniť pri návrhu. Miera naplnenia uvedených cieľov by mala byť overovaná prostredníctvom uvedenej metriky. Analýza prebiehala v kontexte prehľadu atribútov, ktoré sú uvedené v Tab. 3-1, a cieľov vývoju produktu uvedených v kapitole 3.

4.1 Analýza cieľov a špecifikácia obmedzení

Definícia kľúčových parametrov umožňujúcich extrúziu polotuhého kovu

Polotuhý stav je špecifickým fázovým stavom zliatiny, ktorý vzniká pri teplotách nachádzajúcich sa medzi jej úplne tuhým a úplne tekutým skupenstvom. V tomto rozmedzí koexistujú kvapalná a tuhá fáza v rôznych pomeroch. Dosiahnutie požadovaných reologických vlastností si vyžaduje nielen presnú reguláciu teploty, ale aj aplikáciu šmykového napätia. To narúša priestorovú sieť tuhých fáz a podporuje vznik zmesi kvapalnej fázy s rovnomerne distribuovanými globulárnymi časticami tuhej fázy. Pre úspešnú extrúziu je potrebné:

- Zahriať zliatinu na teplotu, kedy sa nachádza v polotuhom stave,
- Zabezpečiť dostatočné šmykové napätia, ktoré poruší priestorovú sieť tuhých fáz,
- Pretlačenie polotuhej zliatiny cez natavovaciu časť a trysku extrudéra,
- Zabezpečiť stály prívod materiálu do extrúzneho komory.

Návrh extrúzneho komory

Návrh extrúzneho komory predstavuje komplexnú úlohu, ktorá zahŕňa nielen samotnú komoru, ale aj súvisiace podsystémy nevyhnutné pre jej prevádzku. Komora musí byť kompatibilná s existujúcou 3D tlačiarňou, pričom je nevyhnutné minimalizovať tepelné toky smerom do jej rámu. Zároveň musí byť zabezpečený stabilný prívod materiálu, ako aj integrácia senzoriky na reguláciu teploty. Na konštrukciu komory majú výrazný vplyv aj vnútorné prevádzkové podmienky, ktoré vznikajú počas ohrevu a spracovania kovovej zliatiny – najmä tepelné gradienty, expanzia a potenciálna chemická reaktivita. Vzhľadom na to, že ide o experimentálne zariadenie, je zároveň žiaduce navrhnuť systém ako modulárny a flexibilný, s možnosťou jednoduchšej výmeny jednotlivých komponentov v prípade ich zlyhania, opotrebenia alebo potreby úpravy.

Návrh extrúzneho komory by mal zohľadňovať:

- Vplyv vysokých prevádzkových teplôt,
- Vplyv abrazívneho pôsobenia tuhých fáz v polotuhej zliatine,
- Voľbu tepelne odolných materiálov,
- Vplyv difúzných dejov, ktoré môžu obmedziť rozobratelnosť zostáv,
- Možnosť výmeny komponentov v prípade poruchy,
- Potrebu chladenia častí, ktorá zamedzí šíreniu tepla do rámu 3D tlačiarne,
- Možnosť efektívneho odvodu prebytočnej tepelnej energie z vyhrievaných častí,
- Kompatibilita s existujúcou 3D tlačiarňou,
- Rozmer vstupného materiálu v podobe drôtu s priemerom 1,2 - 2,0 mm,
- Systém ohrevu komory pozostávajúci zo zdroju tepelnej energie, senzorov a regulátoru,
- Bezpečnostné prvky.

Realizácia prototypu

Realizácia prototypu by mala prebehnúť v čo najkratšom čase, pričom je potrebné počítať s tým, že vzhľadom na experimentálny charakter zariadenia nie je možné všetky konštrukčné nedostatky podchytiť už vo fáze návrhu. Mnohé z nich sa prejavujú až počas testovania. Samotná realizácia pozostáva z viacerých činností, ktoré môžu prebiehať paralelne – najmä výroba komponentov a príprava riadiaceho systému.

Extruder by mal byť zostavený z komponentov, ktoré sú relatívne dostupné a ľahko nahraditeľné. Vzhľadom na požiadavku použitia tepelne a chemicky odolných materiálov, ktoré sú zároveň ťažko obrábatelné tradičnými metódami, sa ako vhodná technológia výroby javí L-PBF. Táto aditívna technológia umožňuje vyrábať zložené tvary z kovových práškov. Hlavným cieľom návrhu je preto optimalizovať geometriu dielov tak, aby ich bolo možné vyrobiť bez nutnosti dodatočného obrábania. Funkčné plochy by mali byť navrhnuté tak, aby boli použiteľné v stave „as-built“, čím sa skráti čas výroby a eliminuje potreba dokončovacích operácií.

Realizácia prototypu zahŕňa:

- Prípravu podkladov pre výrobu (výkresy a CAD dáta pre aditívnu výrobu),
- Nákup komponentov, vrátane spojovacieho materiálu, prvkov elektroinštalácie a polotovarov,
- Výroba dielov,
- Montáž extrudéra,
- Programovanie riadiaceho firmwaru,
- Implementácia extrudéra do 3D tlačiarne,
- Oživenie a testovanie základných funkcií zariadenia (Ohrev, regulácia teploty, prívod materiálu).

Overenie návrhu

Overenie návrhu extrúzneho komory a pridružených častí by malo prebiehať experimentálne, postupne – od základných meraní až po testovanie v reálnej prevádzke. Prvým krokom je analýza rozloženia teplotného poľa v kritických oblastiach a určenie teplotného profilu v časti, kde dochádza k ohrevu a taveniu zliatiny. Nasleduje samotná extrúzia zvolenej nízko-taviteľnej zliatiny s cieľom overiť funkčnosť zariadenia.

Za predpokladu úspešnej extrúzie materiálu je kľúčovým aspektom výroba testovacieho telesa, ktoré preukáže schopnosť extrudéra nanášať materiál po vrstvách. Teleso by malo byť následne podrobené mikroštruktúrnej analýze na overenie kvality spoja vrstvenia a homogenity. Týmto spôsobom sa overí, že extrudér dosahuje nielen požadované technické parametre, ale aj vytvára kvalitné spojenie medzi jednotlivými vrstvami.

Overenie návrhu zahŕňa:

- Skúšku funkčnosti senzorov a regulácie teploty,
- Meranie teploty v nezaťaženom stave v kritických oblastiach,
- Určenie teplotného profilu v tavnej časti extrudéra,
- Extrúziu nízko-taviteľnej kovovej zliatiny.

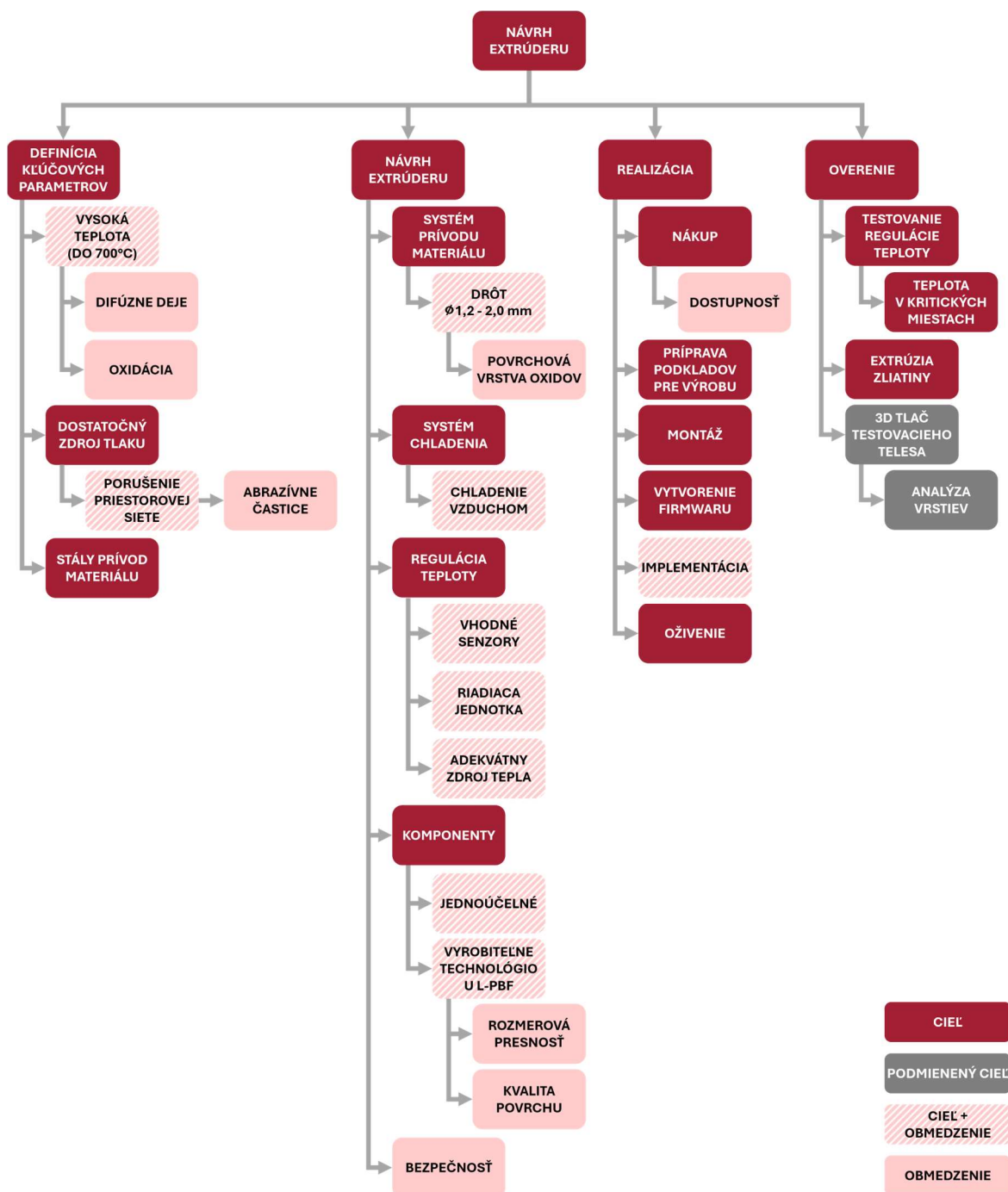
Za predpokladu úspešnej extrúzie:

- Tlač testovacieho telesa,
- Mikroštruktúrnú analýzu výtlačku.

Na základe analýzy bol zostavený hierarchický strom cieľov (viď Obr. 4-1) so zohľadnením obmedzení. Ciele sú znázornené bielou farbou, obmedzenia červenou, a kombinované označenia predstavujú faktory, ktoré sú zároveň cieľom aj obmedzením. Posledným krokom v tejto časti je stanovenie metriky, na základe ktorej bude možné rozhodnúť či bol stanovený cieľ dosiahnutý alebo nie. Do metriky sú zahrnuté iba tie najdôležitejšie ciele, ktoré je možné vyjadriť kvantitatívne alebo pomocou binárneho kritéria (viď Tab. 4-1).

Tab. 4-1 Metrika pre overenie dosiahnutých cieľov

CIEĽ	METRIKA
Dosiahnutie požadovanej teploty	400 – 700 °C
Použitie drôtu s priemerom 1,2 - 2,0 mm	Áno/Nie
Regulácia teploty	±2 °C
Extrúzia polotuhého kovu	Áno/Nie
Vznik pevného spoju	Na základe mikroštruktúrnej analýzy

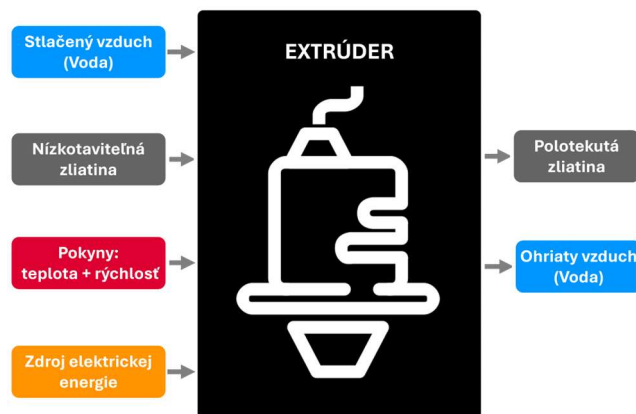


Obr. 4-1 Hierarchická štruktúra cieľov a obmedzení

4.2 Technická analýza funkcií

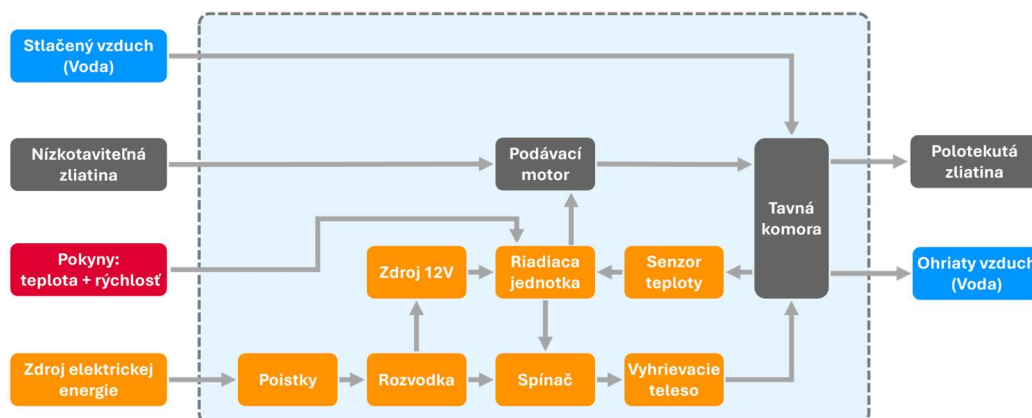
V tejto časti je podrobnejšie opísaná očakávaná činnosť navrhovaného extrudéra. Táto činnosť je analyzovaná na základe premeny vstupov na výstupy, pričom v procese môžu vznikať aj vedľajšie, prípadne nežiaduce produkty. Na analýzu funkcií sú využívané nástroje v podobe schém: Black Box a Glass Box.

Pri pohľade „zvonku“, kedy nie je cieľom pochopiť detailný vnútorný mechanizmus premeny, ale len sledovať vzťahy medzi vstupmi a výstupmi, sa využíva Black Box schéma (viď Obr. 4-2). V tomto modeli extrudér slúži ako funkčný celok, ktorý premieňa tuhý materiál (napr. kovový drôt) na polotuhý pomocou dodanej elektrickej energie. Okrem toho do systému vstupuje stlačený vzduch (resp. voda), ktorý sa zahrieva a slúži na odvod prebytočnej tepelnej energie z vybraných častí zariadenia.



Obr. 4-2 Black Box: Zjednodušená schéma funkcie extrudéra

Pri podrobnejšej analýze činnosti extrudéra a procesov premeny energie, materiálu a informácií, ktoré v ňom prebiehajú, je použitá Glass Box schéma (viď Obr. 4-3). Tento model detailne popisuje jednotlivé vnútorné toky a väzby medzi funkčnými blokmi systému. Hlavným vstupom do systému je elektrická energia. Časť z nej je využitá na napájanie 12V zdroja pre riadiacu jednotku. Zvyšná energia je transformovaná vo vyhrievacom telese na tepelnú energiu, ktorá je následne využitá na natavenie vstupného materiálu. Celý proces je riadený na základe vstupných pokynov z riadiacej jednotky a spätno-väzbovej komunikácie s tavnou komorou prostredníctvom teplotného senzora. Prebytočné teplo vznikajúce počas ohrevu je odvádzané prúdom stlačeného vzduchu (resp. vody), ktorý zabezpečuje lokálne chladenie a znižuje tepelné zaťaženie okolitých častí.



Obr. 4-3 Glass Box: Detailná schéma funkcie extrudéra

4.3 Návrh alternatívnych riešení

Táto časť sa venuje návrhu alternatívnych riešení extrudéra pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin. Návrhy vychádzajú z poznatkov získaných pri rešerši a z predchádzajúcich experimentálnych skúseností. Zásadné rozdiely medzi jednotlivými variantmi spočívajú najmä v type zdroja tlaku, ktorý zabezpečuje vytlačanie polotuhého kovu na stavebnú podložku. Okrem toho sa jednotlivé návrhy líšia aj stupňom konštrukčnej náročnosti a technickej komplexnosti.

4.3.1 Kritéria pre hodnotenie alternatívnych riešení

Každý z nižšie uvedených návrhov extrudérov sa vyznačuje určitými vlastnosťami. Vzhľadom na ne je možné poukázať na ich silné a slabé stránky. Tie v niektorých prípadoch predstavujú zásadné obmedzenia, ktoré môžu vyžadovať značné technické a finančné prostriedky na ich vyriešenie.

Hlavnou úlohou v tomto bode je stanoviť súbor výberových kritérií, ktoré zohľadnia rôzne aspekty návrhov a sú v súlade s cieľmi tejto práce. Kritériá slúžia ako nástroj na systematické vyhodnotenie jednotlivých variantov a výber najvhodnejšieho riešenia, ktoré bude ďalej rozpracované do podoby predbežného a následne detailného návrhu. Jednotlivým kritériám uvedeným v Tab. 4-2 je priradená váha vo forme maximálneho počtu bodov, ktorý vyjadruje ich dôležitosť. Návrhy sú hodnotené pomocou škály vhodnosti: 3 - Vysoká, 2 - Stredná a 1 - Nízka.

Tab. 4-2 Rozhodovacie kritéria pri voľbe konceptov

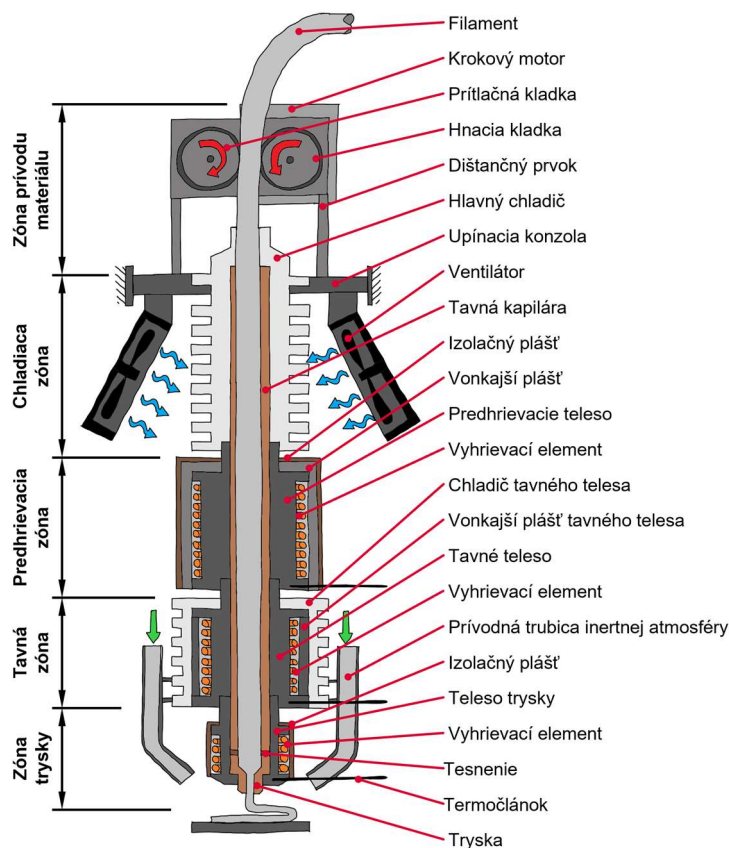
KRITÉRIA	DÔLEŽITOSŤ	VHODNOSŤ
Vyrobiteľnosť aditívnou technológiou L-PBF	10	3/2/1
Predpokladaná technologická náročnosť výroby	10	3/2/1
Vhodnosť na experimentálne účely	10	3/2/1
Bezpečnosť	8	3/2/1
Nároky na údržbu	7	3/2/1
Zotrvačnosť systému	7	3/2/1
Možnosť nepretržitého prívodu materiálu	5	3/2/1
Miera rizika oxidácie	5	3/2/1
Závislosť šmykového napätia na rýchlosti extrúzie materiálu	4	3/2/1
Použitie materiálu vo forme drôtu	4	3/2/1

4.3.2 Filamentový extrudér

Táto podkapitola predstavuje princíp činnosti navrhovaného filamentového extrudéra pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin. Obsahuje popis jeho hlavných častí, ich funkcie, ako aj pripomienky k návrhu s ohľadom na konštrukčné, výrobné a prevádzkové aspekty. Na konci podkapitoly sa nachádza tabuľka (viď Tab. 4-3) s bodovým ohodnotením konceptu.

Princíp činnosti

Navrhovaný extrudér (viď Obr. 4-4) pracuje s kovovým drôtom s priemerom 1,6 - 2,0 mm, ktorý je podávaný mechanizmom tvoreným hnacou a prítlačnou kladkou. Materiál najskôr prechádza chladiacou zónou, kde sa pomocou aktívneho chladenia zabráňuje spätnému šíreniu tepla. Následne vstupuje do predohrievacej zóny, kde je ohriaty tesne pod teplotu tavenia. V ďalšej fáze vstupuje do tavnej zóny, kde je vystavený intenzívnejšiemu ohrevu, v dôsledku čoho vzniká kvapalná fáza. Materiál je následne nanášaný cez trysku na tlačovú podložku alebo na predchádzajúce vrstvy.



Obr. 4-4 Konceptný návrh: Filamentový extrudér

Popis hlavných častí a ich funkcií

Podávací mechanizmus zabezpečuje odvíjanie materiálu z cievky a vytvára potrebný tlak na jeho pretlačenie cez kapiláru a trysku. Pozostáva z krokového motora s hnacou kladkou a prítlačnej kladky, pričom celý mechanizmus je uchytený cez konzolu a dištančné prvky vo vrchnej časti extrudéra.

Hlavný chladič chráni filament pred predčasným ohrevom a zabezpečuje odvod prebytočného tepla z oblasti medzi podávačom a predohrievacou zónou. Chladenie je zabezpečené pomocou hliníkového chladiča a dvojice ventilátorov, ktoré zabezpečujú nútenú konvekciu. Zároveň chladič prenáša mechanické zaťaženie do upínacej konzoly.

Predohrievacia zóna pozostáva z telesa, výhrevného prvku, plášťa a izolačnej vrstvy. Slúži na pozvoľný ohrev materiálu pred vstupom do tavnej zóny. V tejto fáze nie je potrebná dynamická regulácia teploty.

Tavná zóna je navrhnutá obdobne ako predohrievacia, avšak namiesto izolačnej vrstvy obsahuje chladič, čo umožňuje presnejšiu a dynamickejšiu reguláciu teploty. V tejto zóne dochádza k vzniku polotuhého stavu a tiež k časti ťahového zaťaženia prenášaného vyššie do systému.

Zóna trysky je najkritickejšia časť extrudéra. Obsahuje teleso trysky, výhrevný element, izoláciu, tesnenie a samotnú trysku. Materiál je tu zahriaty nad teplotu polotuhého stavu, aby sa zaistila adhézia k predchádzajúcim vrstvám. Kvôli vysokej teplote je v mieste tlače zabezpečená ochranná atmosféra, privádzaná trubicami uchytenými na chladič tavného telesa.

Tavná kapilára tvorí fyzickú bariéru medzi telesami vo vyhrievaných zónach a filamentom. Zabráňuje difúzii medzi filamentom a konštrukčnými materiálmi extrudéra, čím obmedzuje kontamináciu a predlžuje životnosť dielov. V prípade upchatia je kapilára navrhnutá ako vymeniteľná.

Pripomienky k návrhu

- Extrudér musí byť navrhnutý pre filameny s priemerom 1,6 - 2,0 mm. Priemer tavnej kapiláry musí byť optimalizovaný na zamedzenie vzniku príliš veľkej vzduchovej medzery medzi ňou a filamentom.
- Geometria komponentov musí byť prispôsobená technológii L-PBF, aby bola možná ich výroba bez potreby rozsiahleho obrábania.
- Je potrebné sa vyhnúť nerozoberateľným spojom, ktoré môžu vzniknúť následkom difúzie pri cyklickom ohreve.
- Materiály konštrukčných častí musia byť zvolené s ohľadom na ich mechanické vlastnosti pri vysokých teplotách (modul pružnosti, medza sklzu).
- Každá zóna by mala byť samostatne testovaná na schopnosť dosiahnuť požadovanú teplotu.

- Podávací mechanizmus musí mať dostatočný krútiaci moment na prekonanie odporov v kanáli a aj pri odvíjaní z cievky.
- Pri určitých podmienkach môže dochádzať k preklzu medzi hnacou kladkou a privádzaným materiálom.
- Privádzaný materiál môže vplyvom vedenia tepla zmäknúť, zdeformovať sa a upchať tavnú kapiláru.

Tab. 4-3 Bodové hodnotenie: Koncept filamentový extrudér

KRITÉRIA	VHODNOSŤ ¹
Vyrobiteľnosť aditívnou technológiou L-PBF	3
Predpokladaná technologická náročnosť výroby	3
Vhodnosť na experimentálne účely	2
Bezpečnosť	3
Nároky na údržbu	3
Zotrvačnosť systému	3
Možnosť nepretržitého prívodu materiálu	3
Miera rizika oxidácie	3
Závislosť šmykového napätia na rýchlosti extrúzie materiálu	1
Použitie materiálu vo forme drôtu	3

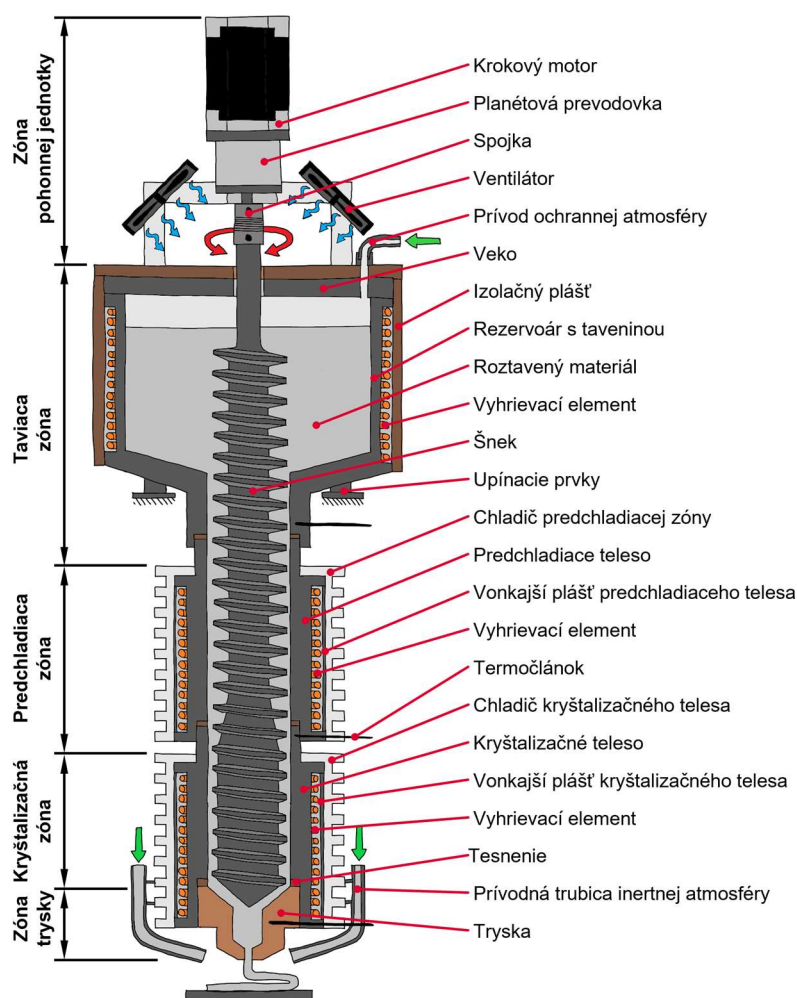
¹Vhodnosť konceptu pre splnenie kritéria: 3 - Vysoká, 2 - Stredná, 1 - Nízka.

4.3.3 Šnekový extrudér

V tejto podkapitole je predstavený princíp činnosti konceptu šnekového extrudéra, popis jeho hlavných častí, ich funkcie a pripomienky k návrhu. Tieto poznámky poukazujú na technické aspekty, ktoré je potrebné zohľadniť pri konštrukcii, výrobe, experimentálnom overovaní správnej funkcie a samotnej prevádzke zariadenia. Na konci podkapitoly sa nachádza tabuľka (viď Tab. 4-4) s bodovým ohodnotením návrhu.

Princíp činnosti

Druhý koncepčný návrh extrudéra (viď Obr. 4-5) je navrhnutý tak, aby bol schopný spracovať kovový materiál v rôznych formách (prášok, granule, drôtu, kusky ingotu). Vstupný materiál je najskôr vložený do rezervoára. Následne je v taviacej zóne úplne roztavený a pomocou šneku transportovaný do predchladiacej zóny, kde sa teplota taveniny zníži na hodnotu blízku teplote tuhnutia. V kryštalizačnej zóne dochádza k heterogénnej nukleácii a vzniku tuhej fázy na stenách chladiaceho telesa. Výsledná zmes tuhej a kvapalnej fázy je vytláčaná cez trysku na podložku alebo na predchádzajúce vrstvy.



Obr. 4-5 Konceptný návrh: Šnekový extrudér

Popis hlavných častí a ich funkcií

Taviaca zóna zabezpečuje úplné roztavenie vstupného materiálu. Vzhľadom na väčší objem taveniny sú na túto časť kladené vyššie nároky, najmä na výkon vyhrievacích elementov a kvalitu tepelnej izolácie. Teleso zóny musí zabezpečiť rovnomerný prenos tepla, minimalizovať tepelné straty a udržať stabilnú teplotu počas celej doby prevádzky. Kľúčovým komponentom tejto zóny je rezervoár, v ktorom je vstupný materiál roztavený. Počas tlače je potrebné rezervoár priebežne dopĺňať. Pri dopĺňaní však môže dochádzať ku kontaktu taveniny so vzduchom, čo vedie k tvorbe oxidov, ktoré môžu negatívne ovplyvniť kvalitu tlače. Tomuto javu je možné predísť vytvorením inertnej atmosféry v priestore rezervoára a privádzaním vstupného materiálu cez tesnený prívod.

Predchladiača zóna zabezpečuje postupné zníženie teploty taveniny na hodnoty blízke teplote tuhnutia. Dôležitú úlohu tu zohráva chladiaci systém, ktorý môže byť vzduchový alebo vodný. Okrem vonkajšieho chladenia je potrebné počítať s dodatočným ohrevom spôsobeným trením materiálu v šneku.

Kryštalizačná zóna je miestom, kde dochádza k vzniku tuhej fázy heterogénnou nukleáciou na vnútorných stenách komory. Pôsobením šneku je polotuhý materiál neustále premiestňovaný, čím sa znižuje pravdepodobnosť hromadenia tuhých častíc a zabezpečuje ich rovnomerné premiešanie. V tejto zóne musí byť presne vyvážený pomer medzi ohrevom a chladením.

V zóna trysky sa polotuhý materiál stabilizuje a následne nanáša na podložku. Teplota je mierne zvýšená, aby sa umožnila difúzia, čím by malo dôjsť k vzniku väzby medzi nanášanou a predchádzajúcou vrstvou. Z dôvodu zvýšenej reaktivity nataveného kovu s okolitou atmosférou je do tejto oblasti privádzaný inertný plyn.

Šnek predstavuje kľúčový prvok zariadenia, ktorý zabezpečuje dopravu, stláčanie a miešanie materiálu. Pozostáva z troch funkčných častí:

- Podávacia časť – s malým priemerom jadra na transport väčšieho objemu materiálu,
- Kompresná časť – s rastúcim priemerom jadra na zvýšenie rýchlosti toku materiálu,
- Dávkovacia časť – so stabilným profilom pre rovnomerné dávkovanie materiálu.

Chladiaca zóna motora sa nachádza medzi vekom rezervoáru a krokovým motorom. Jej úlohou je odvádzať teplo sálajúce zo zóny rezervoáru a chrániť motor pred prehriatím, keďže ten nie je určený na prevádzku pri zvýšených teplotách.

Pripomienky k návrhu

- Celý návrh by mal byť založený na dostupnosti vhodného šneku. V prípade jeho zákazkovej výroby môžu vzniknúť vysoké náklady.
- Extrudér musí byť rozoberateľný kvôli čisteniu pri zmene typu materiálu, aby sa predišlo kontaminácii pri zmene extrudovanej zliatiny.
- Na zníženie otáčok motora a zvýšenie krútiaceho momentu sa odporúča použiť planétovú prevodovku. Zabráni sa tým strate krokov pri nízkych otáčkach. Vhodnejší je však na túto úlohu servo motor.
- Všetky časti musia byť dôkladne utesnené, aby nedochádzalo k úniku taveniny mimo pracovný priestor.
- Odolnosť povrchov voči pôsobeniu taveniny musí byť overená s ohľadom na teplotu, agresivitu prostredia a mechanické opotrebenie.

Tab. 4-4 Bodové hodnotenie: Koncept šnekový extrudér

KRITÉRIA	VHODNOSŤ ¹
Vyrobiteľnosť aditívnou technológiou L-PBF	1
Predpokladaná technologická náročnosť výroby	1
Vhodnosť na experimentálne účely	3
Bezpečnosť	1
Nároky na údržbu	2
Zotrvačnosť systému	3
Možnosť nepretržitého prívodu materiálu	2
Miera rizika oxidácie	1
Závislosť šmykového napätia na rýchlosti extrúzie materiálu	3
Použitie materiálu vo forme drôtu	3

¹Vhodnosť konceptu pre splnenie kritéria: 3 - Vysoká, 2 - Stredná, 1 - Nízka.

4.3.4 Piestový extrudér

V tejto podkapitole je predstavený princíp činnosti návrhu piestového extrudéra (viď Obr. 4-6), popis jeho hlavných častí a ich funkcie, ako aj pripomienky k návrhu. Pozornosť je venovaná technickým aspektom konštrukcie, výroby, experimentálneho overovania funkčnosti a prevádzky zariadenia. Na konci podkapitoly sa nachádza tabuľka s bodovým ohodnotením návrhu.

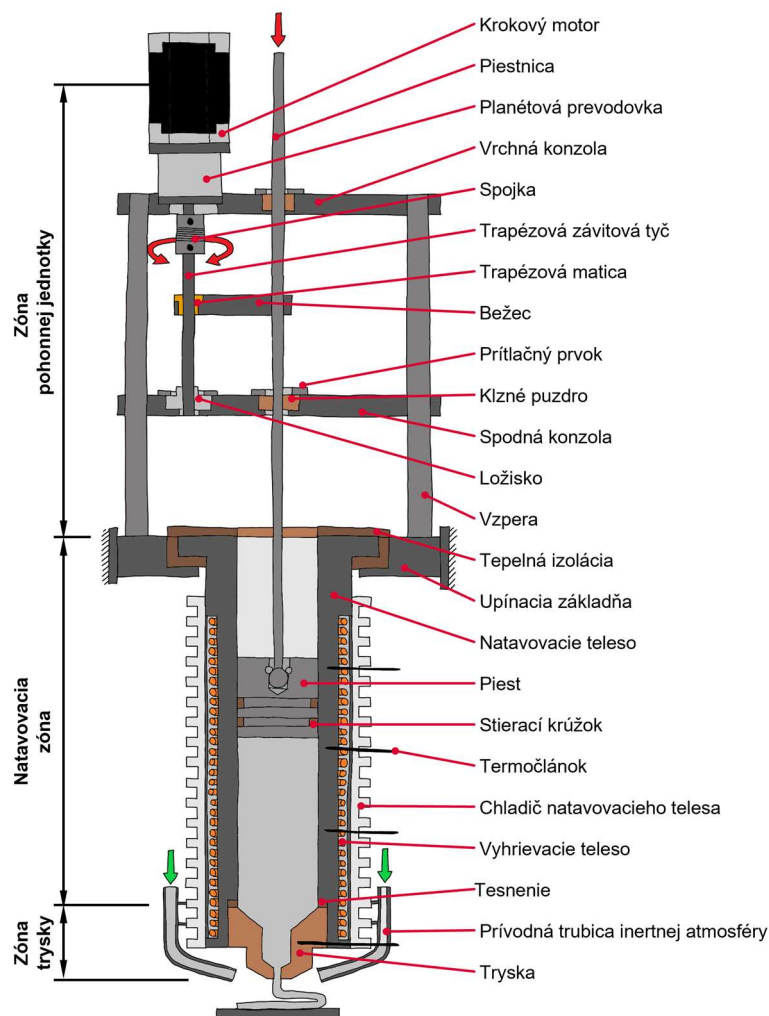
Princíp činnosti

Tretí koncepčný návrh extrudéra je založený na princípe činnosti piestu. Podobne ako v prípade šnekového extrudéra, aj tento systém umožňuje spracovanie materiálu vo viacerých formách. Výhodnejšie je však použiť materiál vo forme prášku alebo granúl, ktoré lepšie vyplňajú objem valca. V prípade použitia drôtu je potrebné ho rozdeliť na kratšie časti pre dosiahnutie rovnakého efektu. Po naplnení valca je materiál postupne zahrievaný na teplotu medzi solidusom a likvidusom, čím sa dostáva do polotuhého stavu. Následným zasúvaním piestu do valca vzniká tlak zabezpečujúci vytlačanie polotuhého materiálu cez trysku na tlačovú podložku alebo na predchádzajúce vrstvy.

Popis hlavných častí a ich funkcií

Pohonná jednotka zabezpečuje prevod rotačného pohybu krokového motora na priamočiary pohyb piestu. Transformácia pohybu je realizovaná prostredníctvom pohybovej skrutky a matice s trapézovým závitom. Piestnica je vedená dvojicou klzných puzdier uložených v hornej a spodnej konzole. Pre minimalizáciu ohybového namáhania je možné použiť dve trapézové skrutky umiestnené symetricky po stranách piestnice.

Piest je uchytený na guľovom čape a slúži na prenos tlaku na materiál vo valci. Jeho správna funkcia závisí od presného vedenia a minimálnej vôle voči valcu.



Obr. 4-6 Koncepčný návrh: Piestový extrudér

Natavovacia zóna zabezpečuje ohrev materiálu do polotuhého stavu. Hlavným zdrojom tepla je vyhrievací element umiestnený po obvode valca. Medzera medzi piestom a vnútorným povrchom valca musí byť čo najmenšia, aby sa zamedzilo priesaku taveniny. Veľkosť tejto vôle závisí najmä od tepelnej rozťažnosti použitých materiálov. Pomôcť môže stierací krúžok, ktorý kompenzuje dilatácie a zároveň bráni prenikaniu taveniny za piest. Ak dôjde k priesaku a následnému zatuhnutiu, môže sa piest zablokovat'. Natavovacia zóna je zakončená tryskou.

Zóna trysky tvorí prechod medzi natavovacou zónou a výstupom materiálu. V samotnej tryske dochádza k pasívnemu miešaniu materiálu vplyvom kónického tvaru. Vzhľadom na riziko oxidácie je do tejto oblasti privádzaná ochranná atmosféra.

Pripomienky k návrhu

- Piest, stierací krúžok a valec je potrebné navrhnuť s vysokou presnosťou, aby bola vôľa vzniknutá tepelnou rozťažnosťou kompenzovaná.
- V priebehu tlače dochádza k dynamickej zmene objemu zahriateho materiálu, preto je vhodné rozdeliť výhrevný element na viacero častí s nezávislou reguláciou teploty.
- Pri zmene materiálu je potrebné extrudér demontovať a dôkladne vyčistiť kvôli prevencii kontaminácie.
- Extrudér má obmedzenú kapacitu spracovateľného materiálu. Zvyšky materiálu, ktoré ostanú v spodnej časti valca, môžu pri dopĺňaní reagovať s atmosférou a následne znehodnotiť výtláčok.
- V natavovacej zóne vzniká len obmedzené šmykové napätie, čo môže viesť k nedostatočnému narušeniu priestorovej siete tuhých fáz. To môže spôsobiť upchatie trysky alebo segregáciu kvapalnej fázy.

Tab. 4-5 Bodové hodnotenie: Koncept piestový extrudér

KRITÉRIA	VHODNOSŤ ¹
Výrobiteľnosť aditívnou technológiou L-PBF	2
Predpokladaná technologická náročnosť výroby	2
Vhodnosť na experimentálne účely	1
Bezpečnosť	2
Nároky na údržbu	2
Zotrvačnosť systému	2
Možnosť nepretržitého prívodu materiálu	1
Miera rizika oxidácie	2
Závislosť šmykového napätia na rýchlosti extrúzie materiálu	1
Použitie materiálu vo forme drôtu	2

¹Vhodnosť konceptu pre splnenie kritéria: 3 - Vysoká, 2 - Stredná, 1 - Nízka.

4.4 Analýza alternatívnych riešení, výber varianty pre ďalší vývoj

Prvý z uvažovaných konceptov, filamentový extrudér, sa vyznačuje pomerne jednoduchou konštrukciou. Jeho jednotlivé časti je možné vyrobiť aditívnou technológiou L-PBF, pričom nevyžadujú vysokú výrobnú presnosť. Výnimku predstavuje osadenie trysky, tavnej kapiláry a vyhrievacích telies. Oproti tomu je výroba komponentov pre šnekový a piestový extrudér aditívnou technológiou menej vhodná, pretože často vzniká potreba dodatočného opracovania funkčných plôch.

Z hľadiska bezpečnosti je najvhodnejší práve filamentový extrudér, ktorý pracuje s malým množstvom nataveného materiálu. Naopak, šnekový extrudér si vyžaduje roztavenie väčšieho objemu materiálu, čo v prípade poruchy alebo úniku predstavuje výraznejšie riziko. Pri použití reaktívnych zliatin, ako sú napríklad zliatiny horčíka, je navyše nutné zabezpečiť tavnú komoru inertnou atmosférou, aby sa predišlo prudkým oxidačným reakciám. Piestový extrudér je v tomto ohľade menej rizikový. Pracuje s menším množstvom materiálu bez voľnej hladiny a nevyžaduje úplné roztavenie zliatiny.

Z hľadiska údržby je šnekový aj piestový extrudér náročnejší. Pri zmene spracovávaného materiálu je potrebné tieto zariadenia rozobrať a dôkladne vyčistiť, čo môže byť časovo náročné až komplikované. Naopak, pri filamentovom extrudéri postačuje výmena tavnej kapiláry a trysky, ktoré sa tak stávajú spotrebnými dielmi.

Nevýhodou filamentového a piestového extrudéra je, že šmykové napätie vznikajúce v systéme je priamo závislé od rýchlosti podávania alebo pohybu piestu. V prípade piestového extrudéra by bolo možné tento nedostatok čiastočne eliminovať pomocou elektromagnetického miešania. V šnekovom extrudéri je riešením náhrada šneku za miešací hriadeľ s lopatkami, pričom by sa nanášanie polotuhého materiálu riadilo tlakom inertnej atmosféry.

Na základe vyššie uvedenej analýzy je možné konštatovať, že šnekový extrudér predstavuje najlepšiu voľbu na experimentálne účely. Umožňuje samostatne sledovať vplyv šmykového napätia a rýchlosti nanášania, čo je z pohľadu výskumu dôležité. Na druhej strane je jeho konštrukcia technicky náročná a v prípade výmeny materiálu alebo zablokovania šneku sa ukazuje ako problematická. Piestový extrudér sa na základe kritérií javí ako najmenej vhodný pre ďalší vývoj. Na rozdiel od ostatných dvoch konceptov však už bol experimentálne overený v práci [41] z roku 2023.

Filamentový extrudér, napriek svojim nevýhodám, získal najvyššie hodnotenie v súbore definovaných kritérií. Na základe toho bol vybraný ako najvhodnejší variant, ktorý bude ďalej rozpracovaný do predbežného návrhu. Zhrnutie bodového hodnotenia jednotlivých návrhov je uvedené v Tab. 4-6.

Tab. 4-6 Zhrnutie bodového hodnotenia konceptov

KRITÉRIA	DÔLEŽITOSŤ ¹	VHODNOSŤ ²		
		FILAMENTOVÝ EXTRUDÉR	ŠNEKOVÝ EXTRUDÉR	PIESTOVÝ EXTRUDÉR
Vyrobiteľnosť aditívnou technológiou L-PBF	10	3	1	2
Predpokladaná technologická náročnosť výroby	10	3	1	2
Vhodnosť na experimentálne účely	10	2	3	1
Bezpečnosť	8	3	1	2
Nároky na údržbu	7	3	1	2
Zotrvačnosť systému	7	3	3	2
Možnosť nepretržitého prívodu materiálu	5	3	2	1
Miera rizika oxidácie	5	3	1	2
Závislosť šmykového napätia na rýchlosti extrúzie materiálu	4	1	3	1
Použitie materiálu vo forme drôtu	4	3	3	2
CELKOVÝ POČET BODOV³	210 ³	192	125	121

¹Dôležitosť kritéria s ohľadom na dosiahnutie cieľov: 10 (Veľké) - 1 (Zanedbateľná).

²Vhodnosť konceptu pre splnenie daného kritéria: 3 - Vysoká, 2 - Stredná, 1 - Nízka.

³Celkový počet bodov je daný súčtom hodnôt dôležitosti a maximálnej vhodnosti.

5 PREDBEŽNÝ NÁVRH

Po zvolení najvhodnejšieho konceptu extrudéra pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin bolo pristúpené k jeho predbežnému návrhu. Postup jeho tvorby je popísaný v nasledujúcich kapitolách. Prvá z nich sa venuje návrhu predbežného tvaru extrudéra, voľbe rozmerov a výberu použitých materiálov. Následne bol návrh overený pomocou matematického modelu, ktorý zahŕňal aj numerické analýzy. Na základe získaných výsledkov bol návrh upravený s cieľom zabezpečiť jeho správnu funkciu. V poslednej kapitole sú zhrnuté náklady na výrobu a predpokladaný objem produkcie.

V ideálnom prípade by výber tvaru extrudéra, rozmerov a materiálov nasledoval až po vytvorení matematického modelu, ktorý by slúžil ako podklad pre optimalizáciu týchto parametrov. V tejto práci však bolo poradie zvolené inak, z praktických dôvodov, súvisiacich s efektívnym využitím dostupných komponentov a zdrojov. Na základe funkcie extrudéra boli identifikované kľúčové súčasti a ich požadované parametre. Následne boli k nim vyhladané vhodné komerčne dostupné ekvivalenty. Podľa tvaru týchto dielov boli navrhnuté zvyšné, nadväzujúce komponenty. Tým, že k výberu rozmerov a materiálov došlo ešte pred vytvorením modelu, stali sa tieto hodnoty okrajovými podmienkami v matematickom modeli. Ten následne slúžil na priebežné overovanie ich vhodnosti a v prípade potreby aj na ich úpravu

5.1 Určenie tvaru, rozmerov a materiálu

Určenie tvaru

Tvar extrudéra vychádza z konštrukčných riešení, ktoré boli analyzované v rámci systematickej rešerše. Najväčší vplyv na jeho geometriu mali práce realizované A. Jabbarim et al. [4] a N. Nezicom et al. [8]. V prvej zo spomínaných štúdií bola dôkladne analyzovaná geometria extrúzneho komory, ktorá po optimalizácii mala tvar valca s efektívnou dĺžkou tavného kanála 30 mm. Ohrev bol zabezpečený pomocou pásového výhrevného elementu, bežne používaného pri nižších teplotách. Komora bola zakončená tryskou s priemerom 1 mm. Ukázalo sa, že takéto riešenie je nepraktické najmä v prípade upchatia trysky, kedy je údržba výrazne komplikovaná.

Druhá práca bola inšpiráciou najmä z dôvodu použitia dvoch nezávisle regulovaných vyhrievacích zón. Tieto časti boli prepojené tenkou trubicou, v ktorej dochádzalo k samotnému taveniu. Experimenty však ukázali, že vyhrievanie hneď za podávacím mechanizmom spôsobovalo vznik príliš veľkej tavej oblasti. Tá kládla výrazný odpor toku materiálu, ktorý použitý krokový motor nedokázal prekonať.

Navrhovaný extrudér (vid' Obr. 5-1a) pozostáva z troch hlavných celkov, ktoré sú usporiadané vertikálne. Vo vrchnej časti sa nachádza podávací mechanizmus, ktorý je

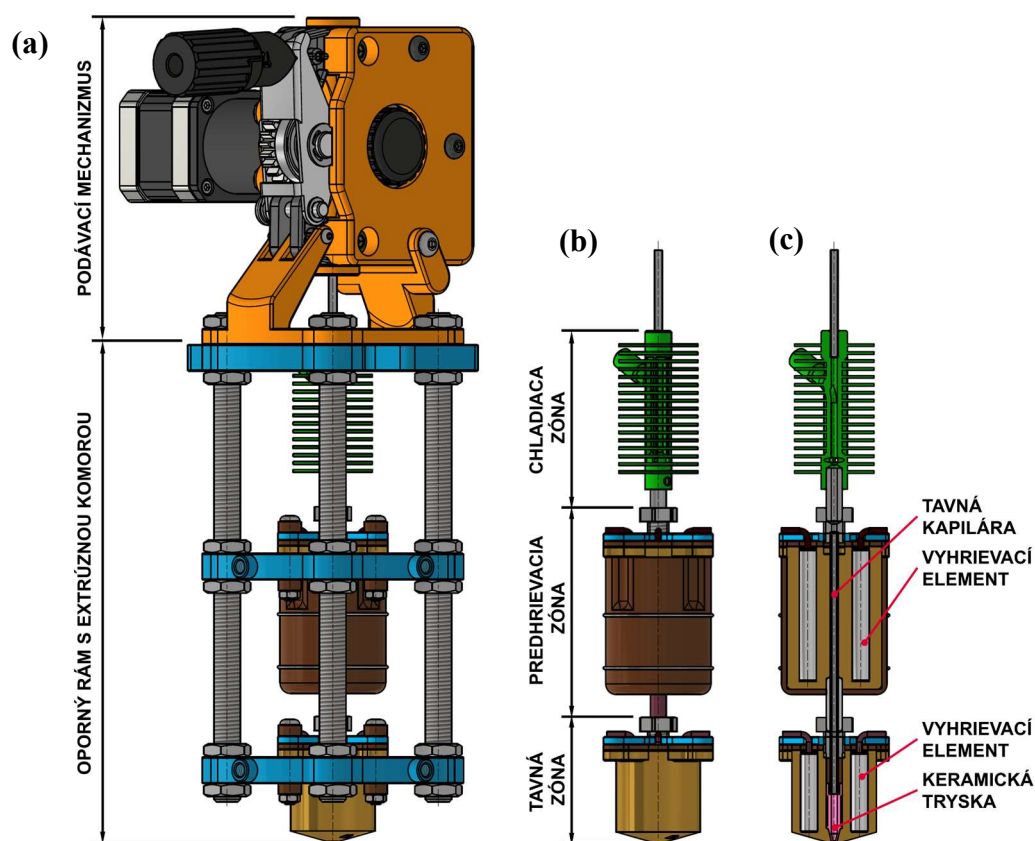
tvorený komerčne dostupným modulom. Slúži na odvíjanie filamentu z cievky a jeho plynulý prívod do extrúznei komory, čím zároveň zabezpečuje potrebný tlak na extrúziu. Pod podávacím mechanizmom sa nachádza oporný rám, pozostávajúci z troch prstencov, ktoré sú navzájom prepojené pomocou štyroch závitových tyčí:

- **Vrchný prstenec** slúži na uchytenie extrudéra do rámu 3D tlačiarne,
- **Stredný prstenec** prenáša zaťaženie z predohrievacej zóny,
- **Spodný prstenec** plní rovnakú funkciu pre tavnú zónu.

Vo vnútri posledných dvoch prstencov sú vedené chladiace kanáliky, ktoré zabezpečujú odvod prebytočnej tepelnej energie z kritických oblastí. Centrálnou časťou extrudéra je extrúzna komora (viď Obr. 5-1b až c), ktorá je upnutá v strede oporného rámu. Táto časť je rozdelená na tri funkčné zóny:

1. **Chladiaca zóna** – znižuje teplotu filamentu pred vstupom do ohrevnej časti,
2. **Predohrievacia zóna** – zabezpečuje postupný nárast teploty materiálu,
3. **Tavná zóna** – zabezpečuje vznik polotuhého stavu pred výstupom cez trysku.

Komponenty v jednotlivých zónach majú valcový tvar, čo prináša viacero výhod. Okrem rovnomernej distribúcie tepelnej energie zjednodušuje aj výpočtové modelovanie. Vzhľadom na osovú symetriu je možné zjednodušiť niektoré analytické aj numerické úlohy, najmä pri výpočte teplotných polí a mechanických napätí.



Obr. 5-1 Predbežný návrh extrudéra: a) Extrudér; b) Extrúzna komora; c) Rez extrúznou komorou.

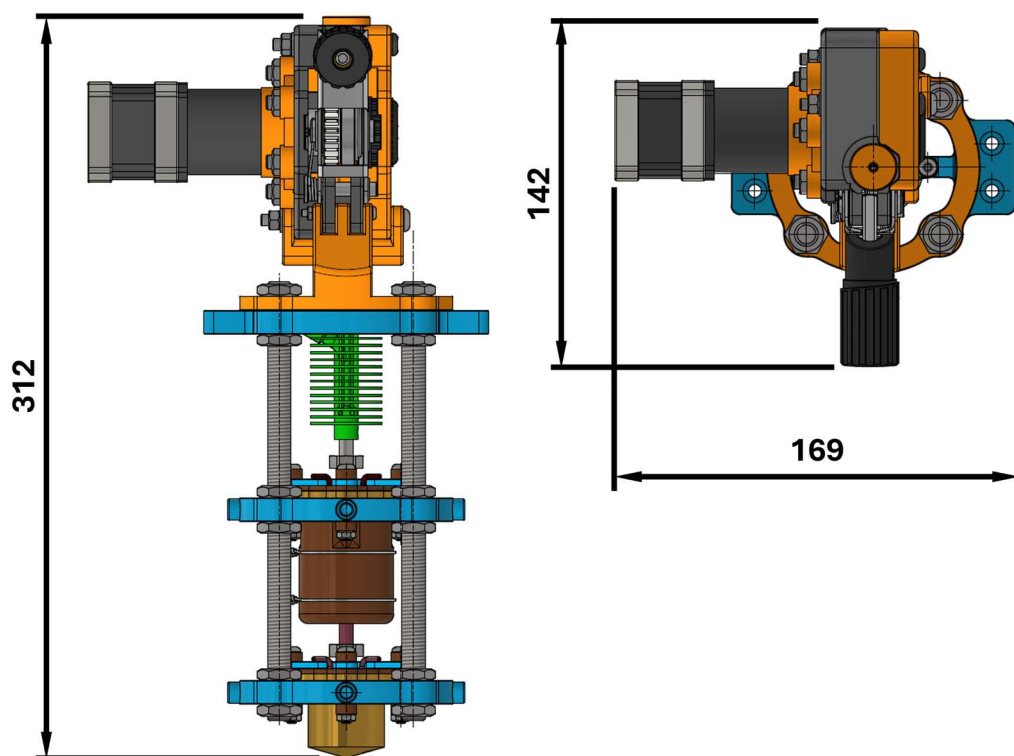
Určenie rozmerov

Rozmery extrudéra (viď Obr. 5-2) boli odvodené od piatich kľúčových komponentov: keramickej trysky, tavnej kapiláry a dvoch valcových vyhrievacích elementov umiestnených v predohrievacej a tavnej zóne, a modulu podávacieho mechanizmu.

Keramickej trysky bola zmeraná pomocou 3D skenovania a manuálneho merania dĺžky. Má tvar valca s vonkajším priemerom 6 mm a celkovou dĺžkou 23 mm. Je zakončená kužeľovým výstupom s priemerom výstupného otvoru 0,8 mm, ktorým je materiál vytláčaný na stavebnú podložku.

Druhým komponentom je nerezová tavná kapilára, ktorá prepája jednotlivé funkčné zóny extrudéra. Jej vonkajší priemer je 3 mm. Vnútorný priemer je volený v závislosti od priemeru použitého drôtu – typicky v rozsahu 1,6 až 2,0 mm. Tomu zodpovedajú kapiláry s vnútorným priemerom od 1,8 do 2,2 mm v krokoch po 0,2 mm. Dĺžka kapiláry je navrhnutá tak, aby plynulo prechádzala celým vyhrievaným úsekom a zároveň zasahovala až do chladiacej zóny.

Tretím a štvrtým rozhodujúcim prvkom sú valcové vyhrievacie elementy. Oba majú priemer 6 mm, pričom kratší s dĺžkou 30 mm je umiestnený v tavnej časti extrudéra a dlhší s dĺžkou 50 mm v predohrievacej zóne. Tieto rozmery boli zvolené s ohľadom na dostupnosť štandardných vyhrievacích telies a ich kompatibilitu s navrhovanou geometriou. Posledným kľúčovým komponentom je modul podávacieho mechanizmu uložený vo vrchnej časti extrudéra. Nemá priamy vplyv na geometriu tavnej komory.



Obr. 5-2 Obalové rozmery predbežného návrhu extrudéra

Voľba materiálu

Pri prevádzke extrudéra sa predpokladá, že v jeho vyhrievaných častiach budú dosahované teploty v rozmedzí 400 až 700 °C. Teplota však nie je jediným faktorom ovplyvňujúcim výber konštrukčných materiálov. Medzi ďalšie významné aspekty patrí:

- Abrazívne pôsobenie polotuhého kovu počas jeho prúdenia,
- Mechanické zaťaženie prenášané do rámu tlačiarne,
- Odolnosť voči oxidačnému prostrediu,
- Spracovateľnosť vybraných materiálov technológiou L-PBF.

Zohľadnením týchto požiadaviek vzniká potreba použiť materiály, ktoré sú žiarupevné, žiaruvzdorné, odolné voči oteru, a zároveň vhodné na aditívnu výrobu. Na základe uvedených kritérií boli pre jednotlivé časti extrudéra navrhnuté nasledovné materiály, ktorých základné mechanické a fyzikálne vlastnosti sú uvedené v Tab. 5-1:

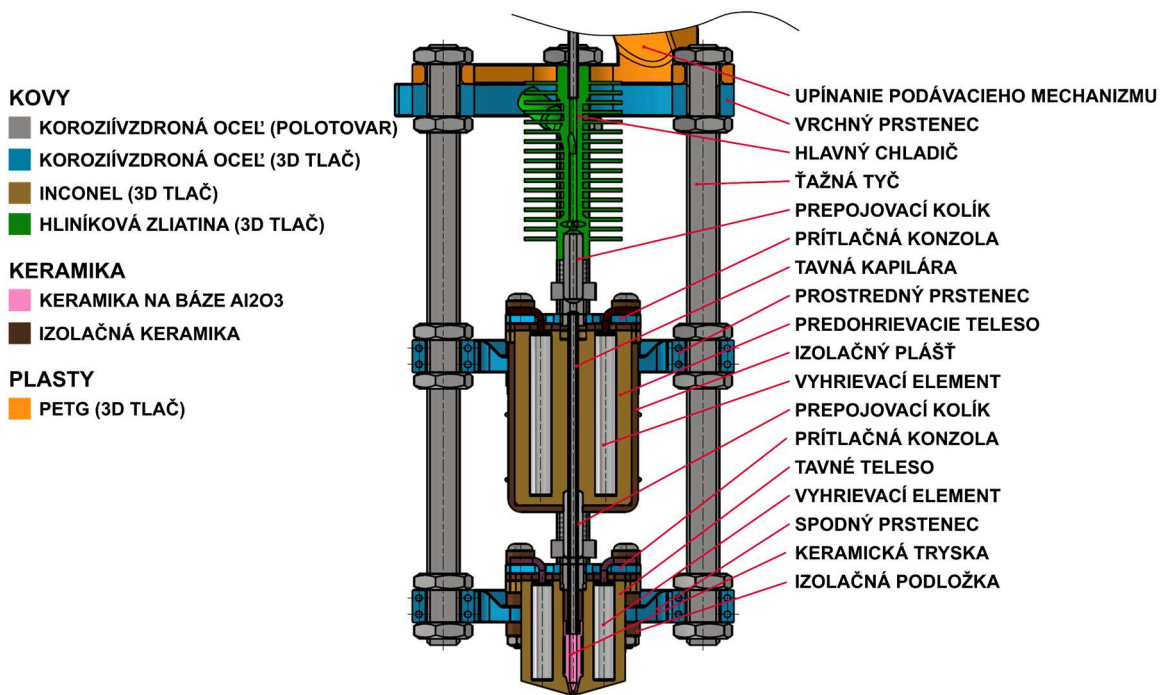
- **INCONEL 718** – vysokoteplotná niklová zliatina, navrhnutá pre tepelne najviac namáhané časti ako sú tavné (TT) a predohrievacie teleso (TP),
- **Nerezová oceľ AISI 304** – austenitická nerezová oceľ, vhodná pre tavnú kapiláru, prstence, prítlačné komponenty a spojovacie súčiastky,
- **AlSi10Mg** – hliníková zliatina s dobrou tepelnou vodivosťou a aditívnou spracovateľnosťou, použitá pre hlavný chladič vo vrchnej časti extrudéra,
- **Al₂O₃ (oxid hlinitý)** – keramický materiál s vysokou tepelnou a chemickou odolnosťou, použitý pre keramickú trysku,
- **Tepelnoizolačné materiály** – ako keramický papier alebo vermikulit, slúžia na lokálne obmedzenie prestupu tepla,
- **PETG** – plastový materiál vhodný pre časti, ktoré sú vzdialené od zdrojov tepla a prenášajú iba nízke mechanické zaťaženie.

Rozmiestnenie jednotlivých materiálov v rámci extrudéra je znázornené na farebnej mape (viď Obr. 5-3).

Tab. 5-1 Prehľad navrhovaných konštrukčných materiálov [42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49]

	T_{MAX} (°C)	E (GPa)		$R_{P0,2}$ (MPa)		λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)		α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	
	-	20 °C	700 °C	20 °C	700 °C	20 °C	700 °C	20 °C	700 °C
Kovové materiály									
304	870	195	140	200	84	13	18	16,0	19,0
INCONEL 718	700	200	159	1100	897	11	21	11,4	18,6
AlSi10Mg	200	77	-	204	-	140	-	2,21	-
Keramické materiály									
Al ₂ O ₃	1650	-	340	-	240*	-	25,0	-	8,1
Keramický papier	1250	-	-	0,04	-	0,1	-	0,1	0,2
Steatit	1200	-	80	-	85*	1,6	-	7,0	9,0
Plastové materiály									
PETG	70	V	-	48	-	68,5	-	0,2	-

*Pre keramické materiály je uvedená medza pevnosti v ohybe.



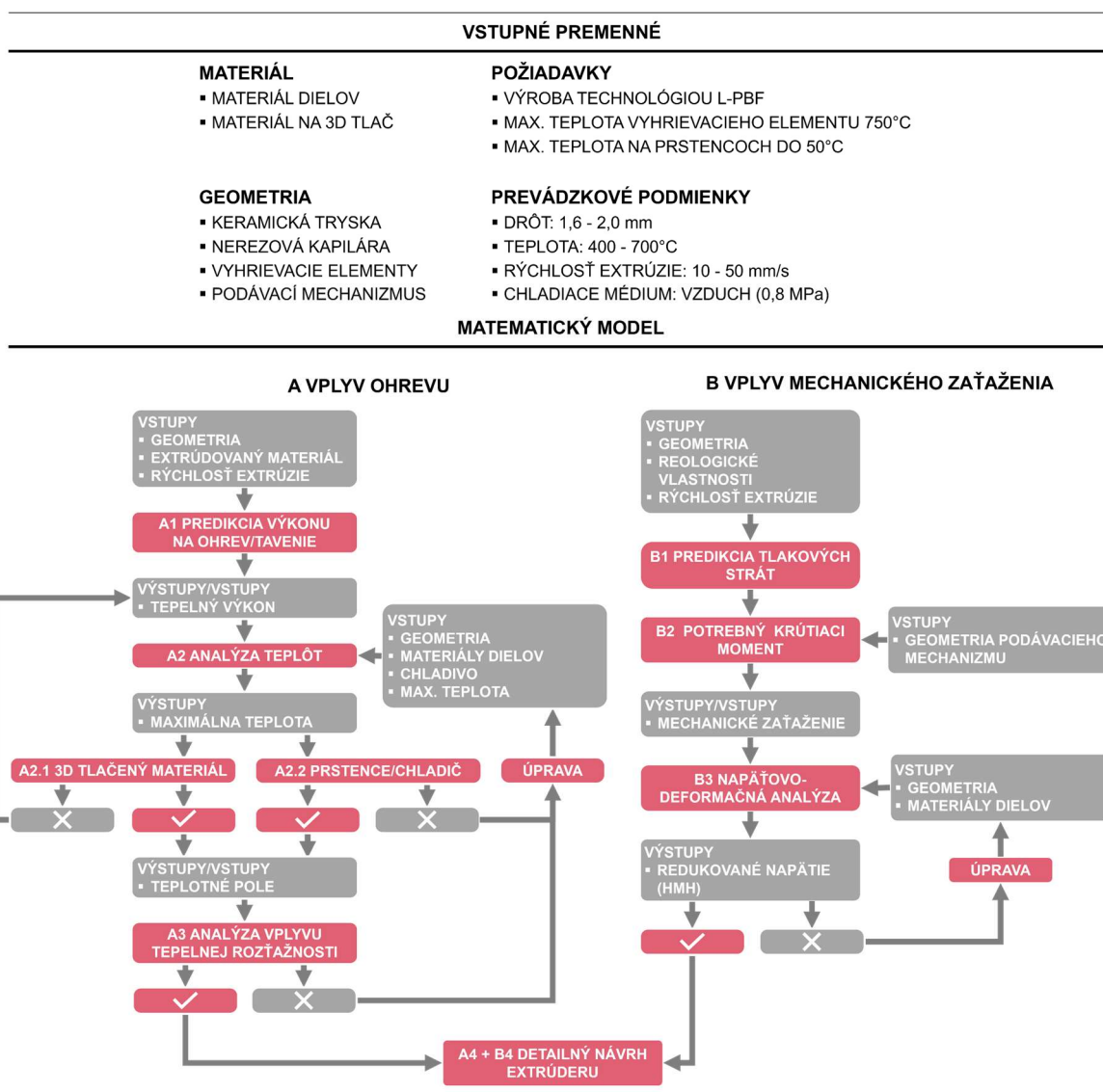
Obr. 5-3 Použité materiály

5.2 Matematický model

Matematický model slúži na popis správania filamentového extrudéra počas jeho prevádzky. Hlavnou funkciou extrudéra je vytlačanie polotuhého kovového materiálu na platformu. Tomuto procesu predchádzajú dve základné činnosti: natavovanie materiálu a jeho doprava podávacím mechanizmom. Každá z týchto činností významne ovplyvňuje okolité komponenty, a to často negatívnym spôsobom. Príkladom je tavné teleso, do ktorého je privádzaná tepelná energia. Táto energia je čiastočne využitá na natavovanie materiálu, zvyšok je spotrebovaný na kompenzáciu energetických strát smerom do okolia. Výsledkom je neželané zvyšovanie teplôt v pôvodne chladných častiach konštrukcie a znižovanie ich mechanických vlastností.

Z dôvodu, že niektoré komponenty extrudéra (napríklad vyhrievacie telesá alebo krokové motory) boli zvolené na základe ich dostupnosti, čím došlo k čiastočnému určeniu okrajových podmienok, slúži matematický model primárne ako nástroj na overenie vhodnosti týchto volieb a optimalizáciu návrhu. Model je rozdelený do dvoch vetiev – vetva A a vetva B.

Vetva A sa zaoberá výpočtom potrebného tepelného výkonu na natavenie materiálu a analýzou vplyvu dodávanej tepelnej energie na komponenty extrudéra. Sleduje, ako sa privádzané teplo distribuuje v rámci zariadenia. Vetva B je zameraná na voľbu pohonnej jednotky, konkrétne prevodový pomer planétovej prevodovky a jej vplyv na okolité komponenty. V rámci tejto vetvy sa hodnotí potrebný krútiaci moment na prekonanie odporu vo vnútri systému. Celkové usporiadanie a logická štruktúra matematického modelu je znázornená na nižšie uvedenej schéme (viď Obr. 5-4).



Obr. 5-4 Schéma matematického modelu

5.2.1 Predikcia výkonu potrebného na ohrev a tavenie

Vyhrievacie elementy zabezpečujú dodávku tepelnej energie potrebnej na dosiahnutie polotuhého stavu zliatiny. Celková energia, ktorú je potrebné počas prevádzky extrudéra dodať, pozostáva z dvoch základných zložiek:

- energie potrebnej na ohrev materiálu na požadovanú teplotu,
- energie potrebnej na fázové premeny.

V oboch prípadoch zohráva významnú úlohu hmotnostné zloženie zliatiny, ktoré ovplyvňuje jednak jej hmotnostnú tepelnú kapacitu, ako aj skupenské teplo tavenia. V prípade jednoduchších systémov je možné potrebnú tepelnú energiu odhadnúť na základe údajov z rovnovážnych fázových diagramov a známych fyzikálnych vlastností jednotlivých zložiek. Pri zložitejších zliatinách, kde dochádza k viacerým fázovým premenám, je potrebné použiť diferenčnú skenovaciu kalorimetriu (DSC), ktorá umožňuje určiť:

- teploty začiatku a konca fázových premien,
- množstvo dodanej alebo uvoľnenej energie počas jednotlivých reakcií.

Výsledný výkon potrebný na dosiahnutie polotuhého stavu je potom stanovený na základe času, počas ktorého má byť požadovaná energia dodaná.

Výpočet výkonu potrebného na ohrev 3D tlačeneho materiálu

Špecifikácia konkrétnej zliatiny, ktorá bude použitá pri testovaní extrudéra, je uvedená v ďalších kapitolách. Predbežne sa predpokladá využitie hliníkovej alebo horčíkovej zliatiny, keďže obe patria medzi nízko-taviteľné kovy vhodné na spracovanie v polotuhom stave. Pre potreby výpočtu bol zvolený čistý horčík ako referenčný materiál. V porovnaní s čistým hliníkom má horčík vyššiu tepelnú kapacitu, čo vedie ku konzervatívnejšiemu odhadu požadovaného výkonu. Zároveň sa predpokladá úplné roztavenie materiálu, čím sa do výpočtu zahrnie aj maximálna energetická náročnosť súvisiaca s fázovou premenou. Zložky potrebného výkonu pre ohrev $\dot{Q}_O$ a tavenie $\dot{Q}_T$ je možné určiť vzťahmi:

$$\dot{Q}_O = \rho \cdot \frac{\pi d_K^2}{4} \cdot v_T \frac{d_T^2}{d_K^2} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (W) \quad (12)$$

$$\dot{Q}_T = \rho \cdot \frac{\pi d_K^2}{4} \cdot v_T \frac{d_T^2}{d_K^2} \cdot q_T \quad (W) \quad (13)$$

kde:

ρ	$(kg \cdot m^{-3})$	hustota materiálu,
d_K	(m)	vnútorný priemer tavnej kapiláry,
d_T	(m)	priemer ústia trysky,
v_T	$(m \cdot s^{-1})$	rýchlosť extrúzie materiálu na stavebnú podložku,
c_p	$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	hmotnostná tepelná kapacita tlačenej materiálu,
ΔT	(K)	rozdiel teplôt medzi dvomi stavmi.
q_T	$(J \cdot kg^{-1})$	skupenské teplo materiálu.

Celkový výkon $\dot{Q}_C$ potrebný na ohrev a roztavenie 3D tlačeneho materiálu je daný súčtom vyššie vypočítaných výkonov:

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_O + \dot{Q}_T \quad (W) \quad (14)$$

Výpočet výkonu potrebného na kompenzáciu energetických strát konvekciou a radiáciou

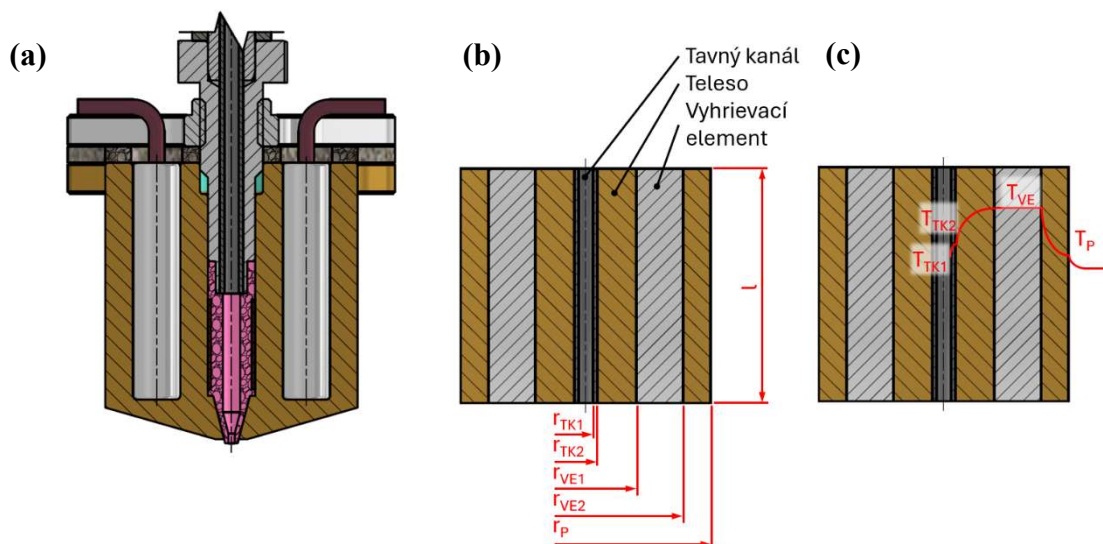
Výkon potrebný na ohrev 3D tlačeneho materiálu predstavuje len časť celkového tepelného výkonu, ktorý musí byť do systému dodávaný. Druhú významnú zložku tvoria tepelné straty, ktoré vznikajú v dôsledku:

- vedenia tepla (kondukcie),
- prúdenia (konvekcie),
- sálania (radiácie).

Ak by tieto straty neboli zohľadnené, mohol by byť celkový výkon vyhrievacieho telesa nedostatočný, čo by malo za následok nedosiahnutie požadovaných teplôt. Na predikciu stratového výkonu bol vytvorený zjednodušený výpočtový model, ktorý vychádza z vedenia tepla cez valcovú stenu. Model zohľadňuje iba straty spôsobené konvekciou a radiáciou. Zároveň bol zvolený zjednodušený tvar telies – sústredné valcové prstence. Vďaka tomu má riešená úloha osovú symetriu a je výpočtovo menej náročná (viď Obr. 5-5a až b).

V skutočnosti majú vyhrievacie telesá tvar valca a sú pevne vložené do telies extrudéra. Ďalším zjednodušujúcim predpokladom je uvažovanie ich dĺžky odpovedajúcej dĺžke samotného výhrevného elementu. Predpokladá sa tiež ideálny tepelný kontakt medzi jednotlivými súčasťami zostavy – t. j. bez tepelného odporu na styčných plochách.

Na základe takto vytvoreného modelu bol následne vypočítaný stratový výkon a určený teplotný profil v rámci vyhrievanej oblasti. Tento priebeh má logaritmický charakter (viď Obr. 5-5c).



Obr. 5-5 Tavná komora: a) Pôvodná geometria tavného telesa; b) Zjednodušená geometria tavného telesa; c) Očakávaný priebeh teplôt.

Výkon potrebný na kompenzáciu strát konvekciou bol stanovený na základe Fourierovho zákona vedenia tepla, ktorý popisuje tok tepelnej energie naprieč pevnou stenou. V tomto prípade bol použitý v tvare upravenom pre valcovú geometriu, ktorá zodpovedá zjednodušenému modelu tavného telesa (resp. predohrievacieho telesa). V prvom kroku bolo potrebné určiť teplotu na povrchu vyhrievacieho elementu. Výpočet tejto teploty vychádza zo známej geometrie (viď Obr. 5-5b), zo zvolených materiálových vlastností jednotlivých častí a z požadovanej teploty vo vnútri tavného kanála. Teplota vyhrievacieho elementu T_{VE} je vypočítaná vzťahom:

$$T_{VE} = T_{TK1} + \dot{Q}_C \cdot \frac{1}{2\pi l} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{TK}} \ln \frac{r_{TK2}}{r_{TK1}} + \frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{r_{VE1}}{r_{TK2}} \right) \quad (K) \quad (15)$$

kde:

T_{TK1}	(K)	teplota v tavnom kanáli,
$\dot{Q}_C$	(W)	celkový výkon potrebný na ohrev materiálu,
l	(m)	dĺžka tavného kanálu,
λ_{TK}	(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	tepelná vodivosť materiálu tavného kanálu,
λ_T	(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	tepelná vodivosť materiálu telesa,
r_{TK1}	(m)	vnútorný polomer tavného kanálu,
r_{TK2}	(m)	vonkajší polomer tavného kanálu,
r_{VE1}	(m)	vnútorný polomer vyhrievacieho elementu.

Zistená teplota vyhrievacieho elementu predstavuje kľúčovú vstupnú premennú pre výpočet stratového výkonu spôsobeného konvekciou a radiáciou. Tento výpočet určuje, aký výkon je potrebné navyše dodávať do sústavy, aby si vyhrievací element udržal svoju teplotu, a zároveň poskytoval požadované množstvo tepla pre ohrev extrudovaného materiálu. Výsledný stratový výkon pozostáva z dvoch zložiek – straty konvekciou $\dot{Q}_{SK}$ a straty radiáciou $\dot{Q}_{SR}$ – ktoré sú určené podľa nasledujúcich vzťahov:

$$\dot{Q}_{SK} = \frac{T_{VE} - T_O}{\frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{r_P}{r_{VE2}} + \frac{1}{\alpha \cdot r_P} \right)} \quad (W) \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{SR} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (2\pi \cdot r_P \cdot l) \cdot \left(\left(T_{VE} - \dot{Q}_{SK} \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{r_P}{r_{VE2}} \right) \right)^4 - T_O^4 \right) \quad (W) \quad (17)$$

kde:

T_{VE}	(K)	teplota vyhrievacieho elementu,
T_O	(K)	teplota okolitého prostredia,
l	(m)	dĺžka tavného kanálu,
λ_T	(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	tepelná vodivosť materiálu telesa,

r_p	(m)	vonkajší polomer telesa,
r_{VE2}	(m)	vonkajší polomer vyhrievacieho elementu,
α	(W · m ⁻² · K ⁻¹)	súčiniteľ prestupu tepla,
σ	(W · m ⁻² · K ⁻⁴)	Stefanova–Boltzmannova konštanta,
ε	(–)	emisivita povrchu.

Celkový výkon potrebný na pokrytie strát konvekciou a radiáciou je možné určiť len iteratívnym spôsobom. Dôvodom je, že teplota povrchu, ktorá sa používa na výpočet strát radiáciou, sa najprv odhaduje na základe strát konvekciou. Následne sa celkové straty určia ako súčet strát konvekciou a radiáciou.

V tomto bode sa však treba vrátiť k teplote povrchu, pretože súčet týchto strát vedie k vyššiemu požadovanému výkonu, než aký bol pôvodne uvažovaný len pre konvekciu. Vyšší výkon spôsobuje zvýšenie teploty povrchu, čím opäť narastajú tepelné straty. Týmto vzniká iteratívna slučka, ktorej výsledkom je ustálený stav s rovnovážnou teplotou povrchu.

Uvedené výpočty teda predstavujú len prvý krok v tomto procese. Výkon dodávaný vyhrievacím prvkom je daný súčtom výkonu potrebného na ohrev materiálu a výkonu potrebného na pokrytie tepelných strát konvekciou a radiáciou:

$$\dot{Q}_{VE} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_{SK} + \dot{Q}_{SR} \quad (W) \quad (18)$$

Zhrnutie predikcie výkonu potrebného na ohrev a tavenie 3D tlačného materiálu

Vzhľadom na predpokladané použitie horčíkových alebo hliníkových zliatin bol ako referenčný materiál pre aplikáciu vyššie uvedených vzťahov zvolený čistý horčík. Tento kov má veľmi podobné termo-fyzikálne vlastnosti ako hliník, a zároveň platí, že pri väčšine použiteľných zliatin je podiel prísadových prvkov nižší v porovnaní s podielom základného kovu – teda horčíka alebo hliníka. Preto možno výsledky výpočtov považovať za orientačný odhad potrebných výkonov.

Tabuľky Tab. 5-2 a Tab. 5-3 uvádzajú hodnoty potrebného výkonu na ohrev referenčného materiálu z teploty 20 °C na 400 °C v oblasti predohrevu, a následne z 400 °C na 650 °C vrátane tavenia v oblasti tavného telesa. Uvedené hodnoty nezahŕňajú kompenzáciu energetických strát, ktoré vznikajú kondukciou, konvekciou či radiáciou. Výkonové nároky boli stanovené v závislosti od rýchlosti extrúzie v rozsahu 10 až 50 mm·s⁻¹ a geometrie tavného kanálu, konkrétne priemerov kapiláry a trysky. Navrhovaná geometria umožňuje spracovanie filamentu s priemerom v rozmedzí 1,6 až 2,0 mm. Celý výpočet vrátane všetkých okrajových podmienok je podrobne uvedený v prílohe A1.

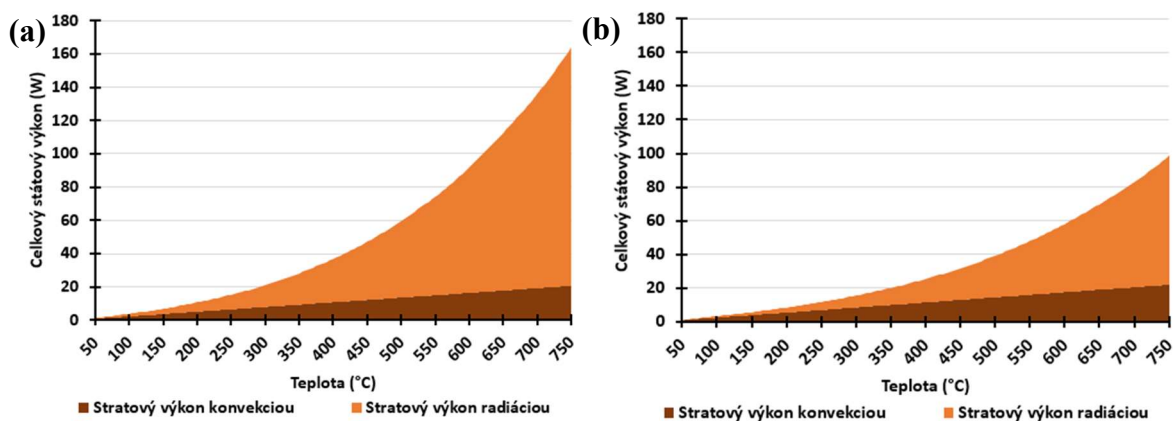
Tab. 5-2 Potrebný výkon na ohrev v telese predohrevu

Priemer drôtu	(mm)	1,6		1,8		2,0	
Priemer otvoru trysky	(mm)	0,8	1,8	0,8	2	0,8	2,2
Rýchlosť prúdenia na výstupe z trysky	(mm/s)	Potrebný výkon					
		(W)					
10		3,28	16,62	3,20	20,02	3,14	23,74
20		6,57	33,25	6,41	40,04	6,28	47,48
30		9,85	49,87	9,61	60,06	9,42	71,22
40		13,13	66,49	12,81	80,08	12,56	94,96
50		16,42	83,12	16,02	100,10	15,70	118,71

Tab. 5-3 Potrebný výkon na ohrev a tavenie v tavnom telese

Priemer drôtu	(mm)	1,6		1,8		2,0	
Priemer otvoru trysky	(mm)	0,8	1,8	0,8	2	0,8	2,2
Rýchlosť prúdenia na výstupe z trysky		Potrebný výkon					
(mm/s)		(W)					
10		5,50	27,86	5,50	34,40	5,50	41,62
20		11,01	55,73	11,01	68,80	11,01	83,25
30		16,51	83,59	16,51	103,20	16,51	124,87
40		22,02	111,46	22,02	137,60	22,02	166,50
50		27,52	139,32	27,52	172,00	27,52	208,12

Zistené hodnoty požadovaného výkonu sa pohybujú v rozmedzí od 3 do 210 W. K týmto hodnotám je však potrebné pripočítať aj výkon potrebný na kompenzáciu energetických strát, čím sa odhadne celkový dodávaný výkon do systému. V rámci uvedených výpočtov sú aktuálne zohľadnené len straty spôsobené konvekciou a radiáciou. Ich závislosť na teplote povrchu telies je uvedená na grafoch nižšie (viď Obr. 5-6).



Obr. 5-6 Závislosť strát na teplote plášťa telies: a) Teleso predohrevu; b) Tavné teleso.

5.2.2 Analýza teplotného poľa v predohrievacom a tavnom telese

Cieľom analýzy teplotného poľa bolo overiť, či výkon vypočítaný podľa vyššie uvedených rovníc postačuje na ohriatie 3D tlačeného materiálu na požadovanú teplotu. Na rozdiel od predikcie táto analýza umožňuje zohľadniť energetické straty spôsobené vedením tepla (kondukciou) do okolitých komponentov. Zároveň poskytuje možnosť vyhodnotiť, či v určitých oblastiach nedochádza k prekročeniu prípustných teplôt. Maximálna prípustná teplota je v prípade vyhrievacích elementov stanovená na 750 °C [50], pri komponentoch rámu extrudéra na 70 °C¹⁰.

Analýza teplotných polí a všetky súvisiace operácie (úprava geometrie, tvorba materiálových modelov a pod.) boli realizované v softvéri ANSYS Discovery 2024 R2 (ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA), ktorý umožňuje multifyzikálne simulácie. Na rozdiel od tradičných výpočtových softvérov využíva Discovery grafické procesory (GPU), čo výrazne skracuje čas potrebný na získanie výsledkov. Presnosť výpočtov však do značnej miery závisí od použitého hardvéru. Pri riešení úloh bol použitý real-time solver LiveGX. Nastavenia programu boli ponechané na základných hodnotách.

Voľba tohto softvéru vychádzala z potreby vykonávať parametrické simulácie, ktoré umožňujú hodnotiť vplyv vyhrievacieho a chladiaceho výkonu na okolité komponenty. Okrem toho je možné rýchlo testovať varianty dielov v rámci predbežného návrhu. Softvér zároveň prispieva k úspore času pri ladení simulácií. Je však potrebné mať na pamäti, že výsledné dáta sú do určitej miery ovplyvnené zvoleným hardvérom a modelovými zjednodušeniami. Poskytujú teda len orientačný pohľad na skúmané javy. Zrealizované simulácie vychádzali zo spoločných základných nastavení a dostupných materiálových modelov.

Rozloženie teploty v predohrievacom a tavnom telese bez chladenia

V tejto časti bola analyzovaná distribúcia teploty v predohrievacom telese, tavnom telese a okolitých komponentoch. Simulácia prebiehala za pokladu pasívneho chladenia konvekciou. Dosiahnuté teploty záviseli najmä od výkonu vyhrievacích elementov, rýchlosti prúdenia taveného materiálu v kapiláre, geometrie komponentov a použitých materiálov. Popis prípravy dát a priebeh simulácie bol rovnaký pre predohrievacie aj tavné teleso.

Na úvod simulácie bola vytvorená zjednodušená geometria zostáv tavnej a podhrievacej zóny pre filament s priemerom do 1,8 mm. Boli odstránené relatívne malé zaoblenia, skosenia a dutiny, ktoré by výrazne neovplyvnili výsledky, ako aj prvky s rozmermi mimo rozlišovaciu schopnosť simulačného nástroja. Následne bola zostava zjednodušená použitím štvrtinovej symetrie. V poslednej fáze úpravy geometrie boli povrchy telies rozdelené tak, aby bolo možné každému priradiť jednu okrajovú podmienku pre daný typ analýzy.

¹⁰ 70°C je teplota, pri ktorej dochádza k vzniku závažných popálenín. [53]

Upraveným telesám boli následne priradené materiálové modely – či už z knižnice ANSYS Discovery, alebo modely vytvorené na základe dostupných dát. Prehľad použitých materiálov a ich priradenie komponentom je uvedený v tabuľke 10.

Tab. 5-4 Materiály použité pri analýze teplotného poľa

MATERIÁL	TYP	KOMPONENT EXTRUDÉRA
Inconel 718, soluted treated	Z knižnice	Tavné teleso, predohrievacie teleso
Alumina 88%	Z knižnice	Keramická tryska
Stainless steel 304	Z knižnice	Tavná kapilára, prítlačné skrutky, prepojovacie kolíky, upínacie kríže, prstence, spojovacie prvky
Molten magnesium [50]	Vytvorený	3D tlačný materiál
Ceramic insulation [42]	Vytvorený	Tepelne izolačné podložky, izolácia tavného a predohrievacieho telesa predohrevu

Pred spustením simulácie boli definované okrajové podmienky, ktoré spadali do dvoch hlavných skupín. Prvá sa týkala šírenia tepla: na roviny symetrie štvrtinového modelu bola aplikovaná podmienka úplnej tepelnej izolácie, povrchy v kontakte s atmosférou mali nastavený súčiniteľ prestupu tepla $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ a okolitú teplotu 20°C . Vyhrievaciemu telesu bol priradený výkon s hodnotami od 5 do 100 W, zvyšovanými po 5 W.

Druhá skupina podmienok sa týkala prúdenia kvapaliny v tavnej kapiláre. Keďže použitý softvér nepodporuje simuláciu fázových premien, filament bol nahradený roztaveným horčíkom. Ten mal teplotu 20°C na vstupe do predohrievacieho telesa a 400°C na vstupe do tavného telesa. Rýchlosť prúdenia bola nadstavená parametricky tak, aby na výstupe zodpovedala hodnotám od 10 do $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, zvyšovanými po $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Na výstupe z kapiláry a trysky bola nastavená podmienka výtoku s 0 Pa. Pre zvýšenie presnosti bola sieť na povrchu filamentu zjemnená na 0,1 mm – inak by softvér túto oblasť ignoroval pre jej malé rozmery.

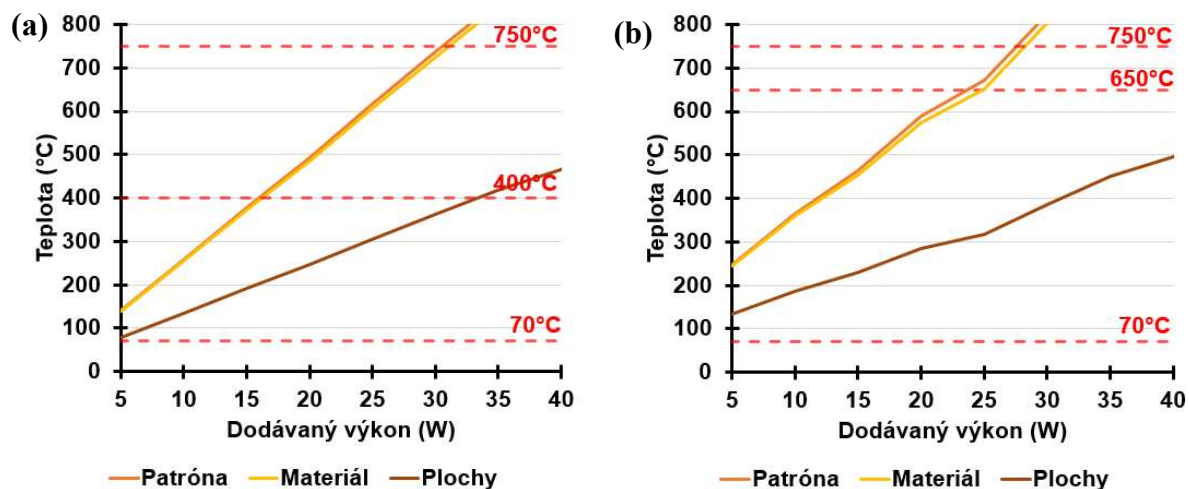
Výsledok simulácie ohrevu v predohrievacom a tavnom telese bez chladenia

Pri analýze vplyvu dodávaného výkonu v predohrievacom telese sa zistilo, že k prekročeniu prípustnej teploty na patrón dochádza približne pri výkone 30 W na jednu patrónu (viď Obr. 5-7a), čo predstavuje celkový výkon 120 W ($4 \times 30 \text{ W}$). V prípade tavného telesa bola táto hranica dosiahnutá už pri 27 W (108 W celkovo, viď Obr. 5-7b).

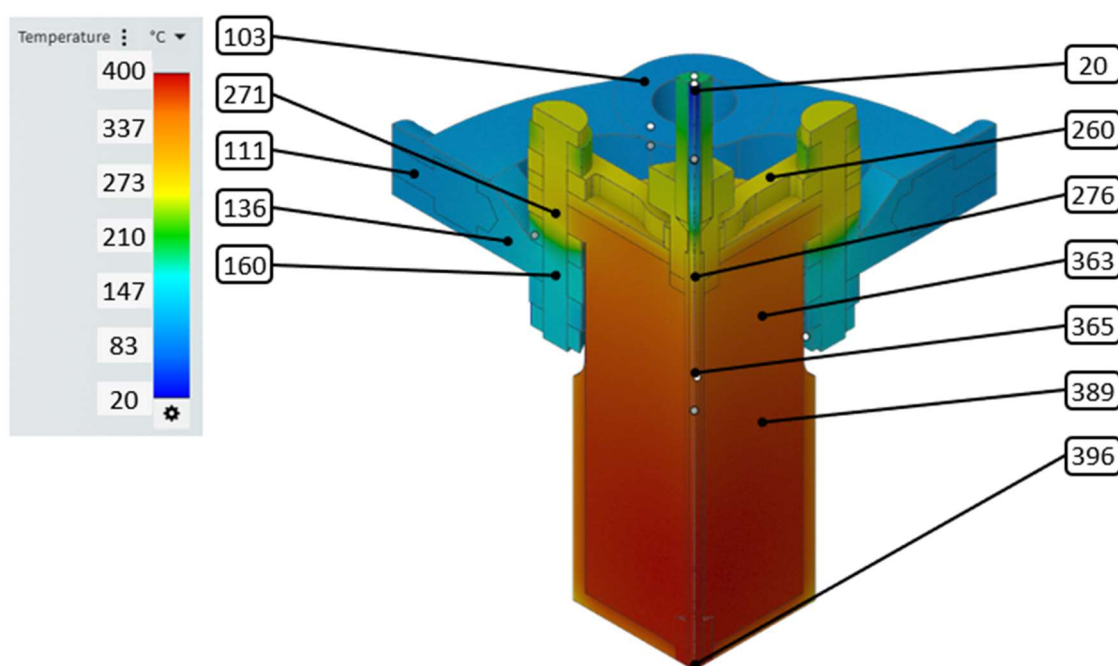
Zároveň bol pri rôznych rýchlostiach prúdenia roztaveného horčíka pozorovaný takmer identický priebeh teploty materiálu na výstupe z príslušnej časti tavného kanála. Tento trend sa prejavil rovnako pri tavnom aj predohrievacom telese. Na základe toho bola pre ďalšie analýzy zvolená stredná rýchlosť prúdenia $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ na výstupe z trysky.

Požadovaná teplota 400°C v predohrievacom telese bola dosiahnutá pri výkone približne 16 W (64 W celkovo) a teplota 650°C v tavnom telese pri 24 W (96 W celkovo). Priebeh teplotného poľa pre tieto prípady je znázornený nižšie (viď Obr. 5-8 a Obr. 5-9). Na kontaktných plochách prstencov oboch telies však došlo k prekročeniu teploty 70°C ,

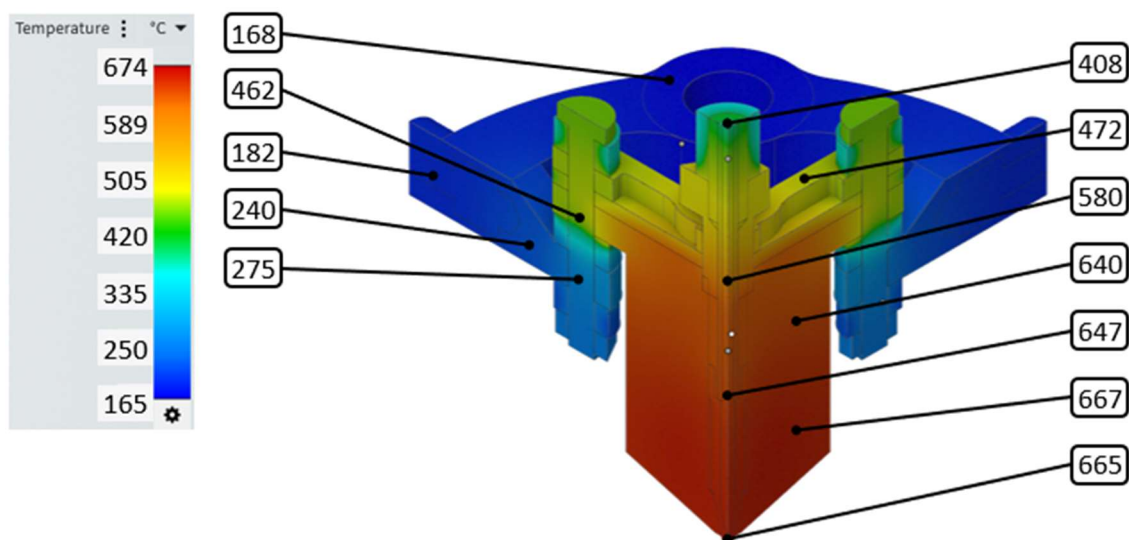
čo potvrdzuje potrebu aktívneho chladenia. Kontaktnými plochami je prstenec v styku s rámom extrudéra. Zvolený výkon výhrevných patrón (400 W celkovo pre predohrievacie aj tavné teleso) by mal byť vzhľadom na očakávané energetické straty dostatočný.



Obr. 5-7 Závislosť priebehu teplôt (Patróna, Extrudovaný materiál na výstupe, kontaktné plochy prstencov) na privádzanom výkone: a) Teleso predohrevu; b) Tavné teleso.



Obr. 5-8 Rozloženie teplotného poľa na telese predohrevu pri 16 W (celkovo 64 W)

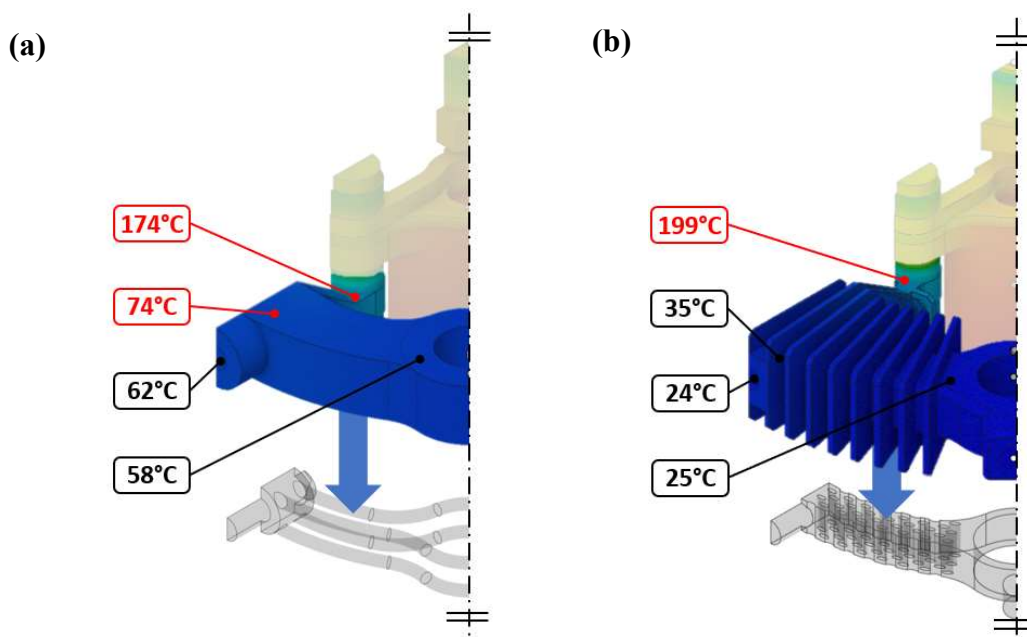


Obr. 5-9 Rozloženie teplotného poľa na tavnom telese pri 24 W (celkovo 96 W)

Analýza prstencov tavného telesa predohrevu a tavného telesa

Predchádzajúce analýzy s pasívnym chladením ukázali, že na prstencoch dochádzalo k výraznému prekročeniu prípustnej teploty 70 °C. Na zníženie tejto teploty bolo potrebné zvýšiť množstvo odvádzaného tepla, čo sa dosiahlo prívodom chladiaceho média – stlačeného vzduchu – a zväčšením teplo-vodivej plochy prostredníctvom pridaných rebier. Použitie samotného stlačeného vzduchu síce viedlo k výraznému poklesu teploty, avšak výsledná hodnota stále nebola dostatočná (viď Obr. 5-10a). Kombinácia oboch prístupov zabezpečila účinnejšiu voľnú aj nútenú konvekciu, čím boli dosiahnuté prijateľné hodnoty teplôt v analyzovanom telese (viď Obr. 5-10b). Keďže teploty na prstenci, ktorý je v kontakte s tavným telesom boli vyššie než na prstenci s telesom predohrevu, analýza prstenca s upravenou geometriou bola realizovaná iba pre prípad tavného telesa.

Pri simuláciách bola uvažovaná štvrtinová reprezentácia. Rýchlosť vzduchu na vstupe do prstenca bola nastavená na $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pri počiatkovej teplote 20 °C. Rýchlosť prúdenia roztaveného horčíka na vstupe do tavej kapiláry bola $0,00595 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pri počiatkovej teplote 400 °C. Privádzaný výkon vyhrievacieho telesa bol stanovený na 24 W, na základe výsledkov predchádzajúcej analýzy, pri ktorej dochádzalo k taveniu čistého horčíka. Ostatné okrajové podmienky a materiálové modely zostali zhodné s predchádzajúcimi simuláciami.



Obr. 5-10 Porovnanie teplôt na prstenci tavného telesa: a) Pôvodná geometria; b) Upravená geometria.

Analýzy hlavného chladiča

Teploty dosahované na hlavnom chladiči boli analyzované v rámci simulácie telesa predohrevu. Do simulácie bolo zahrnuté iba blízke okolie chladiča. Okrajové podmienky boli nastavené tak, aby teplota 3D tlačeneho materiálu na výstupe telesa dosahovala hodnotu 400 °C. Simulácia zohľadňovala iba teplo vedené kontaktom medzi telesom predohrevu a hlavným chladičom. Tepelná energia bola z chladiča odvádzaná nútenou konvekciou, pričom chladiace médium – vzduch – bolo privádzané ventilátorom.

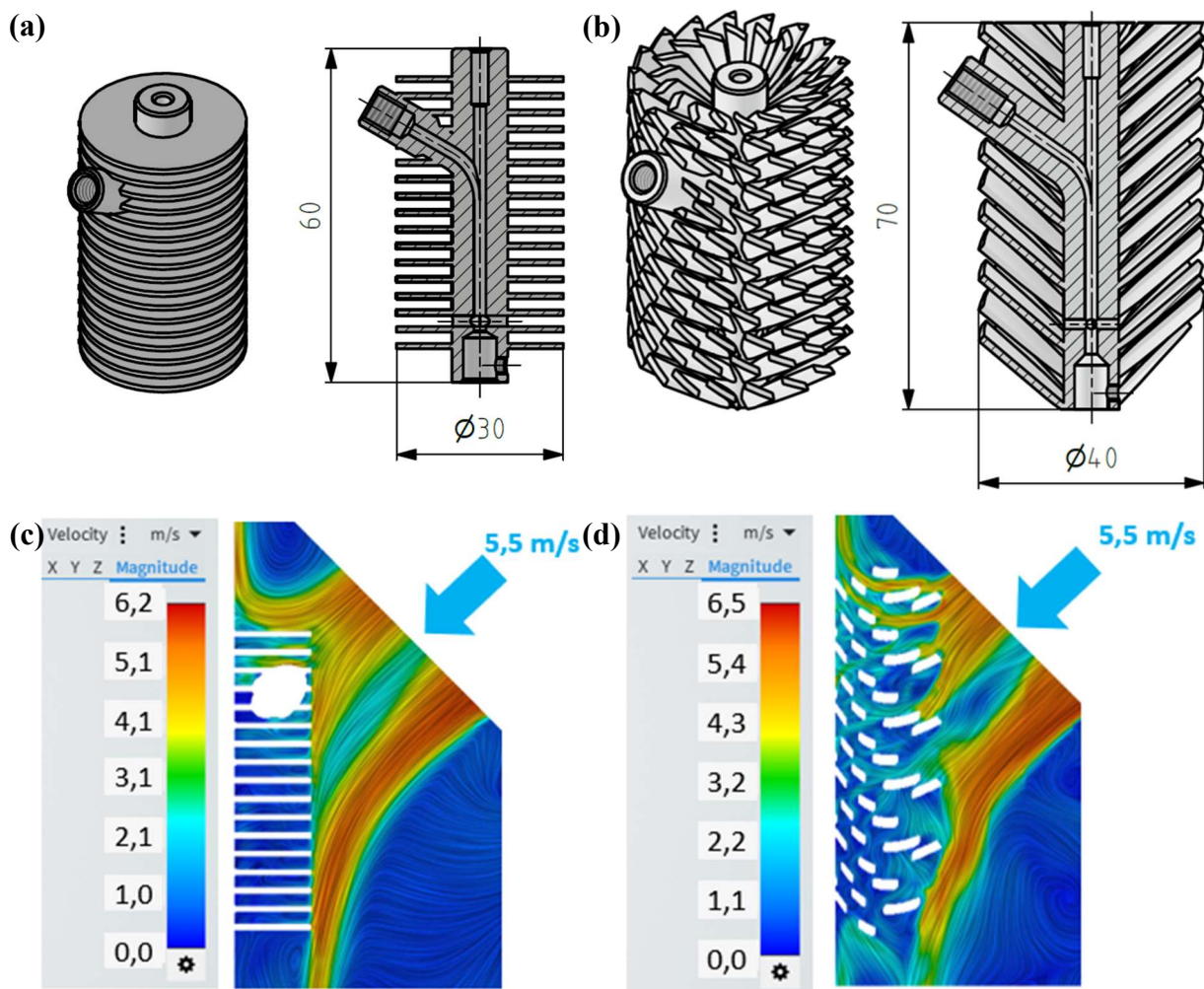
Na chladenie bol použitý dostupný ventilátor s rozmermi 40 × 40 × 20 mm, umožňujúci jeho umiestnenie do požadovanej polohy na extrudéri. Objemový prietok ventilátora bol 18,25 m³·h⁻¹, čo zodpovedalo rýchlosti toku 5,5 m·s⁻¹ vzhľadom na jeho geometriu. Výber ventilátora bol uskutočnený na základe objemového prietoku a dostupnosti. V simulácii bolo prúdenie vzduchu cez ventilátor nastavené ako statické – tok vzduchu v zdroji nerotoval, ako by tomu bolo v realite. Toto zjednodušenie bolo zvolené, pretože vysoké otáčky ventilátora (8000 ot·min⁻¹) viedli k nerelevantným výsledkom.

Priebeh teplôt ukázal, že na prvých kruhových rebrách, ktoré sa nachádzajú hneď za telesom predohrevu, teplota prudko klesla zo 74,5 °C na prvom rebre na 27,6 °C na ôsmom rebre. Na ďalších rebrách sa teplota udržiavala mierne nad 20 °C. Tieto hodnoty poukazovali na vhodnosť geometrie chladiča z hľadiska schopnosti dissipovať tepelnú energiu a zabrániť jej šíreniu smerom k podávaciemu mechanizmu.

Avšak analýza vektorového poľa rýchlosti ukázala, že v dôsledku geometrie rebier kolmých k ose jadra chladiča (viď Obr. 5-11a), ktoré boli ofukované pod uhlom približne 45°,

dochádzalo k pomerne neefektívnemu prúdeniu chladiaceho média. Zároveň bola uvažovaná geometria nevhodná z hľadiska výroby pomocou 3D tlače (viď Obr. 5-11c).

Na základe týchto zistení sa pristúpilo k úprave geometrie chladiča. Jednotlivé prstencové rebrá boli rozdelené na segmenty tvorené uhlovým výsekom kruhu, ktoré boli naklonené voči osi chladiča tak, aby s ňou zvierali uhol približne 45° . Navyše sa segmenty špirálovito ovíjali okolo jadra chladiča (viď Obr. 5-11b). Celkové rozmery chladiča boli zväčšené. Táto úprava geometrie viedla k efektívnejšiemu obtekaniu chladiča chladiacim médiom, čo je zrejmé na obrázku nižšie (viď Obr. 5-11d), kde svetlejšie oblasti v blízkosti jadra indikujú vyššie rýchlosti prúdenia.



Obr. 5-11 Analýza prúdenia vzduchu: a) Pôvodná prstencová geometria chladiča; b) Upravené špirálová geometria chladiča; c) Prúdenie vzduchu pre geometriu a); d) Prúdenie vzduchu pre geometriu b).

5.2.3 Analýza vplyvu tepelnej rozťažnosti

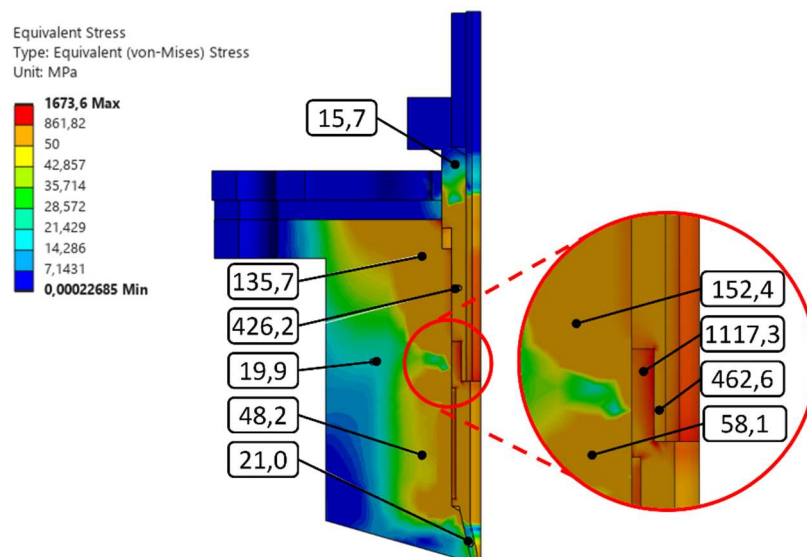
Posledná realizovaná simulácia, ktorá sa zameriavala na priamy vplyv privádzaného výkonu na časti extrudéra, bola zameraná na napäťovo-deformačnú analýzu. Jej cieľom bolo zistiť, aké veľké zmeny tvarov vznikajú v dôsledku rozdielnej tepelnej rozťažnosti použitých materiálov. Súčasne bolo analyzované aj vznikajúce napätie, ktoré indikovalo tesnosť spojov dielov.

Simulácia bola uskutočnená iba pre teleso trysky, vzhľadom na vyššie dosahované teploty, ktoré vedú k väčším zmenám tvaru. Nastavenie simulácie vychádzalo z už realizovanej simulácie analýzy teplotného poľa v telese trysky bez chladenia. Zachované boli pôvodné materiálové modely priradené jednotlivým komponentom extrudéra. Okrajové podmienky súvisiace s prúdením boli nahradené štrukturálnymi podmienkami, ktoré obmedzovali deformácie, pričom bola zachovaná osová symetria analyzovaných telies. V praxi to znamenalo aplikáciu okrajových podmienok typu *Frictionless* na plochy symetrie a upínacie plochy, ktoré obmedzovali pohyb kolmo na dané roviny.

Ďalej bolo nutné zmeniť typ kontaktu medzi komponentmi z *Bonded* na *Sliding*, čím bolo pevné spojenie nahradené ideálnym klzným kontaktom, umožňujúcim relatívny pohyb medzi komponentmi. Na vnútornú stranu tavnjej kapiláry bola aplikovaná podmienka úplnej tepelnej izolácie, ktorá nahrádzala taveninu vo vnútri kapiláry. Poslednou použitou podmienkou bolo priradenie merného tepelného výkonu vonkajšiemu plášťu vyhrievacej patróny, s hodnotou $0,0585 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$. Výsledné deformácie boli analyzované v polárnom súradnicovom systéme.

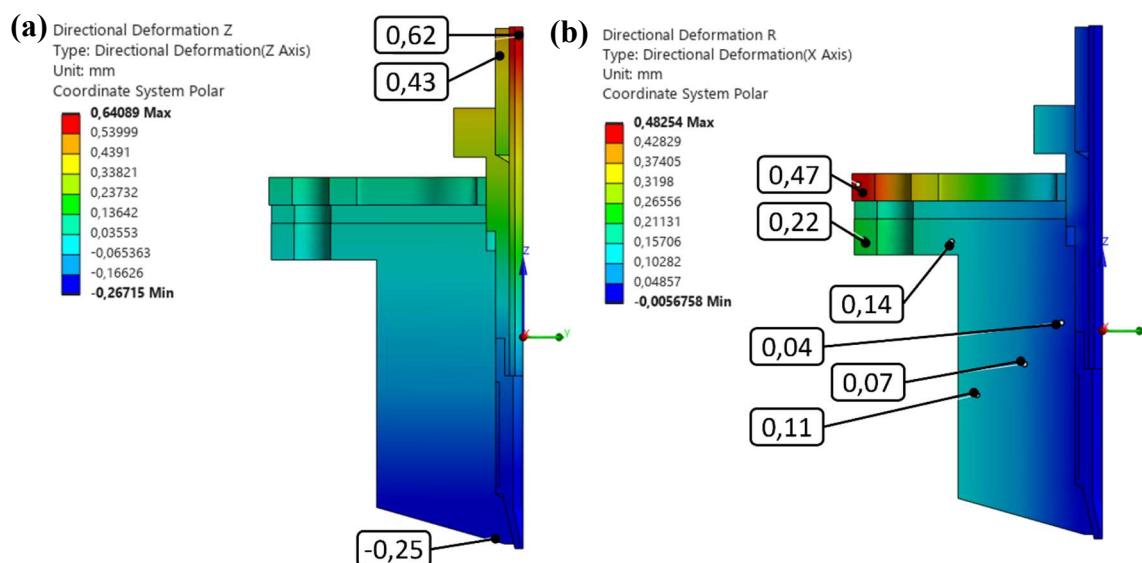
Výsledky napäťovo-deformačnej analýzy ukazujú, že pri dosiahnutí teploty 700°C vzniká najvyššie napätie v centrálnej časti tavného telesa. Toto napätie je spôsobené predovšetkým vyššou tepelnou rozťažnosťou komponentov vyrobených z austenitickej nerezovej ocele (viď Obr. 5-12). Ostatné komponenty, vyrobené z niklových zliatin alebo keramických materiálov, majú nižšiu tepelnú rozťažnosť. Oblasť najvyššieho napätia bola pozorovaná najmä v spoji keramickej trysky, nerezovej kapiláry a prítlačnej skrutki. Tryska vyrobená z keramiky na báze Al_2O_3 bola vystavená predovšetkým tlakovému namáhaniu. Tieto podmienky v spoji by mohli zabezpečiť jeho dostatočnú tesnosť, čím by sa predišlo úniku taveniny počas prevádzky.

Zníženie predikovaných hodnôt napätia v kontaktoch komponentov je možné dosiahnuť voľbou rozmerov umožňujúcich uloženie s vôľou. Celkovo je však minimalizovanie vôle pozitívne, keďže vedie k efektívnejšiemu prenosu tepelnej energie. Uloženie musí byť zabezpečené v celom pracovnom intervale teplôt ($400 - 700^\circ\text{C}$), čo si vyžaduje použitie tolerančných polí s menším rozsahom.



Obr. 5-12 Výsledok napäťovo-deformačnej analýzy tepelnej rozťažnosti tavného telesa pri teplote 700 °C

K najväčším deformáciám dochádza v pozdĺžnom smere, vzhľadom na väčšie lineárne rozmery než v priečnom smere (vid' Obr. 5-13). Najvyššia zmena bola zaznamenaná na tavnej kapilára, kde dosahovala až hodnoty 0,64 mm (vid' Obr. 5-13a). V priečnom smere bola najvyššia hodnota pozorovaná na prítlačnej konzole, vyrobenej z nerezovej ocele, a to s hodnotou 0,47 mm (vid' Obr. 5-13b).



Obr. 5-13 Výsledok napäťovo-deformačnej analýzy tepelnej rozťažnosti tavného telesa pri teplote 700 °C:
a) Deformácia v axiálnom smere; b) Deformácia v radiálnom smere.

5.2.4 Predikcia tlakových strát

Primárnou funkciou extrudéra je extrúzia parciálne nataveného materiálu na stavebnú podložku. Na zabezpečenie tejto funkcie musí pohonná jednotka extrudéra prekonať odpor vznikajúci počas tohto procesu. Tento odpor priamo ovplyvňuje rýchlosť, akou môže byť materiál privádzaný do extrudéra, ako aj rýchlosť, akou je následne extrudovaný. Stanovenie tlakových strát predstavuje komplexnú úlohu, pričom výsledok závisí od reologických vlastností spracovávaného materiálu a geometrie tavného kanála, cez ktorý materiál preteká.

Postup predikcie tlakových strát je prevzatý z práce B. N. Turner et al. [17] a následne upravený podľa publikácie U. Dombrowski et al. [19], ako je uvedené v kapitole 2.3.1. V obidvoch prácach bola predikcia aplikovaná na extrúziu termoplastov a elastomérov, ktoré sa vyznačujú ne-Newtónskym správaním, podobne ako kovy v polotuhom stave. Na základe tejto podobnosti bolo možné použiť uvedený postup aj pre materiály plánované na použitie v navrhovanom zariadení.

Reologické vlastnosti polotuhého kovu

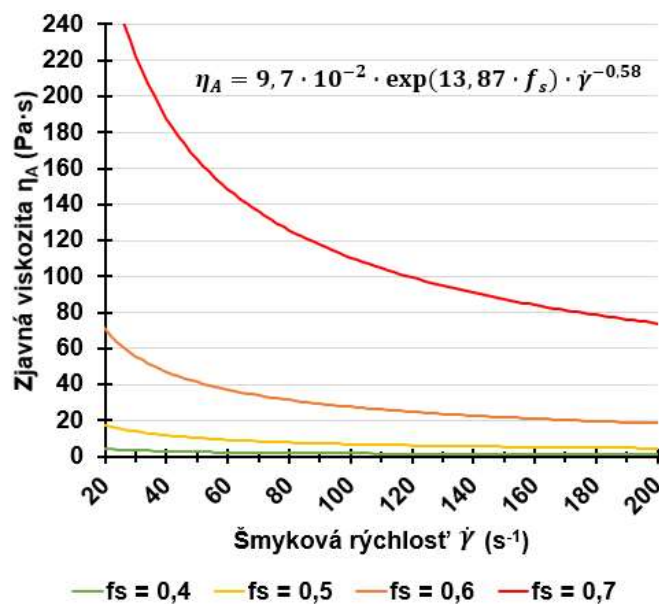
Reologické vlastnosti 3D tlačenej zliatiny v polotuhom stave zásadne ovplyvňujú tlakové straty. Pri extrúzii dochádza k poklesu viskozity v dôsledku vnášaného šmykového napätia, ktoré narušuje priestorovú sieť tuhých fáz. Tento pokles viskozity počas tečenia je vhodne reprezentovaný mocninovým modelom Ostwald–de Waeleho, ako ukazuje aj práca Y. Hong et al. [51] z roku 2015, kde bola skúmaná horčíková zliatina AZ91D. Pre túto zliatinu bol vytvorený analytický model popisujúci závislosť viskozity od šmykového napätia a podielu tuhých fáz. Model bol experimentálne overený a výsledky vykazovali dobrú zhodu s nameranými údajmi.

Vzhľadom na uvažované použitie horčíkových a hliníkových zliatin bola pre účely tejto práce ako referenčný materiál zvolená práve zliatina AZ91D. Pre túto zliatinu boli vypočítané tlakové straty. Na grafe (viď Obr. 5-14) je znázornená závislosť zdanlivej viskozity zliatiny AZ91D od šmykového napätia a podielu tuhej fázy. Kľúčovú úlohu zohráva rovnica (19), ktorá popisuje túto závislosť prostredníctvom mocninového modelu viskozity:

$$\eta_A = 9,7 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(13,87 \cdot f_s) \cdot \dot{\gamma}^{-0,58} \quad (Pa \cdot s) \quad (19)$$

kde:

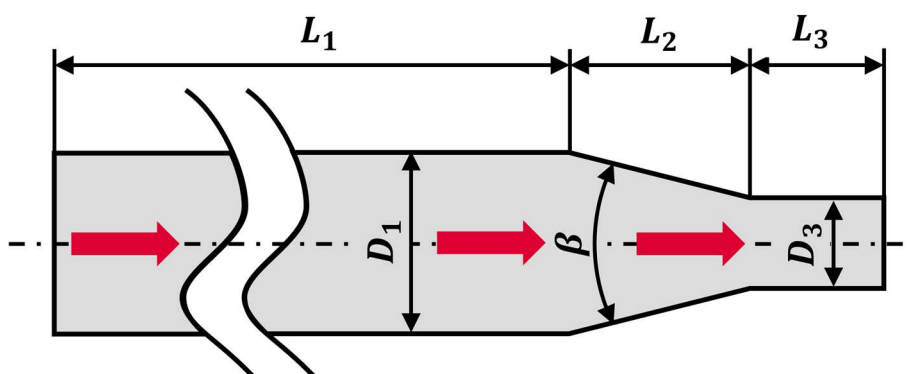
f_s	(–)	podiel tuhej fázy v polotuhom stave zliatiny,
$\dot{\gamma}$	(s^{-1})	šmyková rýchlosť.



Obr. 5-14 Závislosť zjavnej viskozity zliatiny AZ91D na rýchlosti šmykového napätia

Tlakové straty v tavnom kanáli

Tlakové straty vznikajúce v tavnom kanáli boli analyticky určené aplikáciou rovníc (3) – (8) uvedených v kapitole 2.3.1. Ich veľkosť závisí od geometrie tavného kanála (vid' Obr. 5-15), reologických vlastností extrudovaného materiálu a rýchlosti jeho prúdenia jednotlivými časťami kanála. Pri výpočtoch boli uplatnené viaceré zjednodušujúce predpoklady: tavenina sa považuje za nestlačiteľnú, prúdenie je plne rozvinuté, ustálené a laminárne, na stenách tavného kanála nedochádza k sklzu a teplota taveniny je konštantná. Príklad výpočtu tlakových strát s použitím konkrétnych hodnôt je uvedený v prílohe A2. Na základe rovnakých predpokladov bolo postavená i numerická verifikácia tlakových strát v programe ANSYS Fluent (ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA).



Obr. 5-15 Geometria tavného kanálu

Zhrnutie predikcie tlakových strát

Pri overovaní tlakových strát vznikajúcich v tavnom kanáli bola zistená pomerne vysoká zhoda medzi analytickým a numerickým riešením. Maximálny rozdiel medzi týmito prístupmi dosiahol hodnotu 1,54 %. Analytické riešenie viedlo k mierne nižším hodnotám tlakových strát, čo môže byť spôsobené použitím princípu superpozície pri ich určovaní. Naopak, v prípade numerického prístupu boli tlakové straty analyzované v celom objeme tavného kanála, pričom kužeľové zúženie ovplyvňovalo prúdenie aj vo valcových častiach. Z hľadiska sily potrebnej na prekonanie vznikajúcich tlakových strát poskytujú oba prístupy relevantné výsledky. Zistené tlakové straty a potrebné sily na ich prekonanie pri rôznych podieloch tuhej fázy v zliatine AZ91D sú uvedené nižšie (viď Tab. 5-5).

Tab. 5-5 Porovnanie zistených tlakových strát v tavnom kanáli polotuhej zliatiny AZ91D
rýchlosť extrúzie $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ na výstupe z trysky a priemeru drôtu $\varnothing 1,7 \text{ mm}$

PODIEL TUHEJ FÁZY	TLAKOVÉ STRATY		ROZDIEL	POTREBNÁ SILA	
	ANALYTICKY	NUMERICKY		ANALYTICKY	NUMERICKY
(-)	(Pa)	(Pa)	(%)	(N)	(N)
0,4	18 969,65	19 204,93	1,23	0,04	0,04
0,5	75 933,35	77 119,44	1,54	0,17	0,18
0,6	303 947,80	308 675,01	1,53	0,69	0,70
0,7	1 216 649,42	1 235 597,00	1,53	2,76	2,80

5.2.5 Voľba pohonu podávacieho mechanizmu

Pohon podávacieho mechanizmu plní dve hlavné úlohy: zabezpečuje odvíjanie filamentu z cievky a jeho vtlačanie do tavnej komory. V predchádzajúcej časti bola určená iba zložka sily potrebná na prekonanie odporov v tavnom kanáli. Druhá zložka predstavuje silu potrebnú na prekonanie odporov na trase filamentu od cievky k podávaciemu mechanizmu.

Pri FDM 3D tlačiarňach sa na tento účel bežne používajú krokové motory typu NEMA 17, ktoré štandardne dosahujú krútiaci moment $0,38 \text{ Nm}$. Rovnaký typ motorov bol použitý aj v konštrukcii zariadení navrhnutých N. Nezicom et al. [8] a A. Jabbarim et al. [4]. V prvej zo spomínaných prác sa však prejavili nedostatky tohto typu pohonu, konkrétne nedostatočný krútiaci moment na pretlačenie materiálu cez tavný kanál. Dôvodom bola pomerne rozsiahla oblasť parciálne nataveného materiálu, ktorá predstavovala výraznú prekážku prúdeniu.

Výber vhodného pohonu výrazne ovplyvňuje schopnosť extrúdovať materiál na stavebnú podložku. Najväčší krútiaci moment musí motor vyvinúť v počiatočnej etape extrúzie, kedy dochádza k narušeniu priestorovej siete tuhých fáz. Po tejto etape viskozita materiálu klesá, čím sa znižujú aj nároky na krútiaci moment.

Pri voľbe pohonu bol zvolený konzervatívnejší prístup. Ako základ bol vybraný podobný typ krokového motora, aký použil N. Nezic et al. v práci [8], avšak v kombinácii

s planétovou prevodovkou, čím sa zvýšil dostupný krútiaci moment. Bežne dostupné planétové prevodovky s prevodovými pomermi, ktoré umožňujú dosiahnuť maximálnu rýchlosť extrúzie filamentu do $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, sú uvedené v tabuľke (vid' Tab. 5-6). V tabuľke sú ďalej uvedené aj hodnoty sily vyvodenej na 15mm ramene (polomer hnacej kladky) a maximálneho generovaného tlaku pôsobiaceho na plochu filamentu s priemerom 1,7 mm.

Aj napriek tomu, že už menšie prevodové pomery by umožňovali prekonať odhadované tlakové straty, bola pre pohon podávacieho mechanizmu zvolená planétová prevodovka s prevodovým pomerom 27:1. Tento výber bol motivovaný snahou o zabezpečenie dostatočnej výkonovej rezervy, ktorá je dôležitá najmä v počiatočných fázach extrúzie, pri nepredvídaných odchýlkach procesných parametrov alebo v prípade mierneho zvýšenia odporu v tavnom kanáli počas dlhšej prevádzky. Vyšší prevodový pomer zároveň prispieva k lepšej riaditeľnosti extrúzie, keďže umožňuje presnejšie dávkovanie materiálu pri nízkych rýchlostiach podávania, čo je kľúčové pri jeho aplikácií.

Tab. 5-6 Porovnanie parametrov pohonu pre rôzne prevodové pomery

STATICKÝ MOMENT	PREVODOVÝ POMER	VÝSLEDNÝ MOMENT¹¹	SILA NA RAMENE	VYVODENÝ TLAK	¼ SILY
(Nm)	(-)	(Nm)	(N)	(MPa)	(N)
0,38	3,71	1,41	94,00	41,41	23,50
0,38	5,18	1,97	131,33	57,86	32,83
0,38	14,00	4,95	330,00	145,39	82,50
0,38	19,00	6,92	461,33	203,25	115,33
0,38	27,00	9,66	644,00	283,73	161,00

¹¹ Krútiaci moment krokového motoru NEMA 17 s planétovou prevodovkou podľa výrobcu [54].

5.2.6 Napätovo-deformačná analýza

Cieľom napätovo-deformačnej analýzy v tejto časti bolo vyšetrenie vplyvu mechanického zaťaženia generovaného pohonnou jednotkou podávacieho mechanizmu. Táto jednotka vnáša do sústavy silu 644 N, pôsobiacu v osi tavného kanála. Pôsobenie tejto sily najviac ovplyvňuje plastovú upínacu konzolu mechanizmu, tavné teleso a jeho upínací prstenec.

Konzola je zaťažovaná za bežných podmienok, t. j. pri okolitej teplote 20 °C. Naopak, tavné teleso a okolité komponenty sú vystavené mechanickému zaťaženiu pri zvýšených teplotách, ktoré môžu dosahovať až 700 °C. Tieto nepriaznivé podmienky vedú k poklesu mechanických vlastností použitých materiálov.

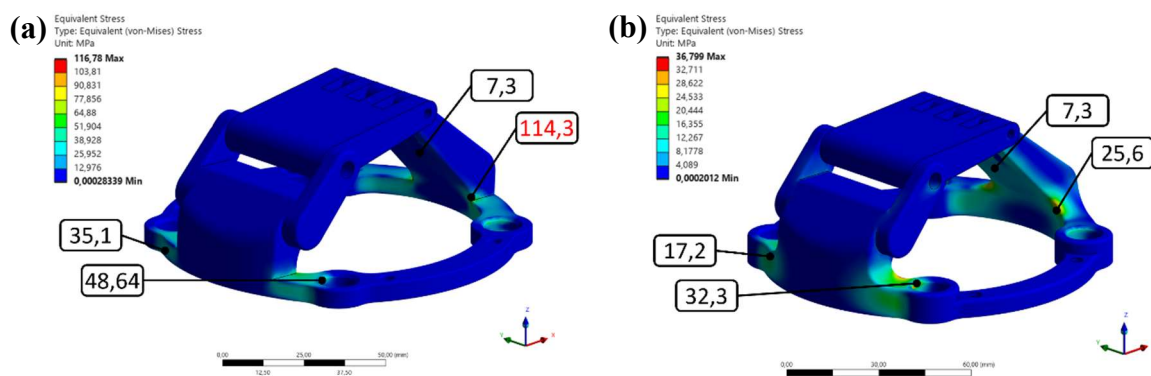
Predohrievacie teleso nebolo do tejto analýzy zahrnuté z dvoch dôvodov. Po prvé, v tejto oblasti sa dosahujú nižšie teploty ako v tavnom telese, a po druhé, mechanické zaťaženie sa naň prenáša iba prostredníctvom trecích síl medzi filamentom a stenou tavného telesa. Tieto sily pravdepodobne predstavujú nižšie zaťaženie než sily pôsobiace v tavnom telese, ktoré vznikajú priamym kontaktom medzi čelnou plochou filamentu a kužeľovým zúžením v oblasti trysky. V rámci nižšie popísaných simulácií bola analyzovaná schopnosť jednotlivých komponentov odolávať pôsobiacemu mechanickému zaťaženiu.

Napätovo-deformačná analýza plastovej konzoly

Napätovo-deformačná analýza plastovej konzoly bola realizovaná v programe ANSYS Workbench v module Static Structural. Do analýzy bola zahrnutá iba konzola a náhradný diel reprezentujúci podávací mechanizmus, aby sa zachovalo spojenie konzoly s mechanizmom. Obom komponentom bol priradený materiálový model PETG, vytvorený na základe hodnôt uvedených v kapitole 5.1 (viď Tab. 5-1).

Telesá boli diskretizované elementmi prvého rádu s veľkosťou 0,85 mm. Následne boli na konzolu aplikované okrajové podmienky: *Fixed* a *Remote Force*. Podmienka *Fixed* bola aplikovaná na vnútorné plochy otvorov slúžiacich na upevnenie konzoly k rámu extrudéra. Podmienka *Remote Force* bola aplikovaná na valcové plochy otvorov, ktoré spájajú konzolu s náhradným dielom. Prostredníctvom tejto podmienky bolo do sústavy zavedené silové zaťaženie o veľkosti 644 N pôsobiace v smere osi z. Ostatné nastavenia simulácie boli ponechané na predvolených hodnotách a programovom riadení.

Výsledky napätovo-deformačnej analýzy ukázali, že v miestach napojenia upínacích ramien konzoly na jej základňu dochádzalo k prekročeniu medze klzu. Tento nedostatok bol odstránený úpravou geometrie konzoly, ktorá zahŕňala pridanie prechodových rádiusov a zväčšenie hrúbky základne v oblasti napojenia ramien. Uvedené úpravy viedli k zníženiu maximálneho napätia z pôvodnej hodnoty 116,78 MPa na 36,80 MPa (viď Obr. 5-16).



Obr. 5-16 Redukované napätie (HMH) na konzole podávacieho mechanizmu: a) Pôvodná geometria; b) Upravená geometria.

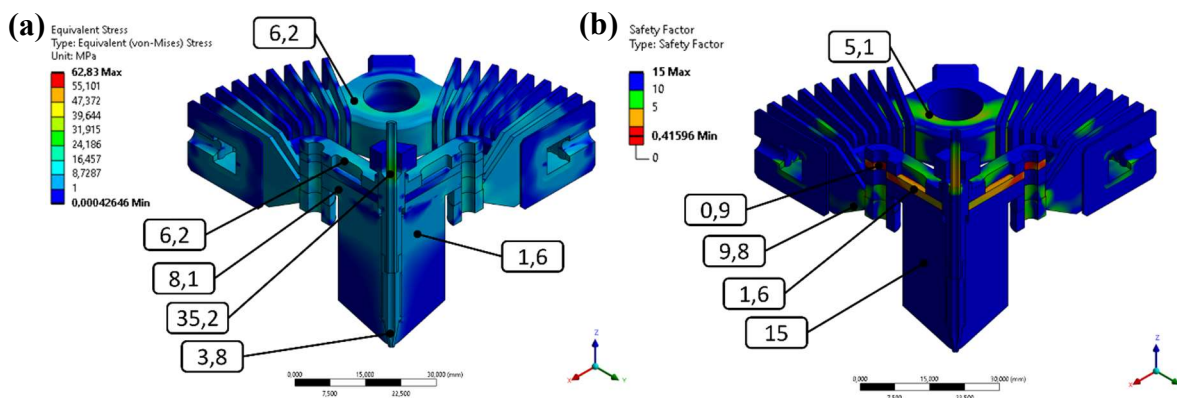
Napät'ovo-deformačná analýza tavného telesa

Napät'ovo-deformačná analýza tavného telesa bola realizovaná v programe ANSYS Workbench v module Static Structural. Do analýzy boli zahrnuté všetky komponenty pripojené k tavnému telesu. Medzi najdôležitejšie patria upínací prstenec a izolačné stĺpiky, ktoré prenášajú mechanické zaťaženie ďalej na rám extrudéra. Cieľom tejto analýzy bolo overiť, či vznikajúce napätia nepresahujú hodnoty medze klzu použitých materiálov pri teplote 700 °C.

Jednotlivým telesám boli priradené materiálové modely (vid' Tab. 5-1), pričom ich mechanické vlastnosti zodpovedali zníženým hodnotám pri teplote 700 °C. Na reprezentáciu zostavy bola použitá štvrtinová symetria, ktorá umožnila jemnejšiu diskretizáciu modelu. Základná veľkosť prvkov bola nastavená na 1 mm, pričom v oblasti trysky a tavného kanála bola použitá veľkosť 0,2 mm, v oblasti prstenca 0,3 mm a 0,4 mm pre ďalšie kritické časti. Veľkosti prvkov boli zvolené tak, aby v najužších miestach prechádzali minimálne tri prvky v smere najmenšieho rozmeru.

Silové zaťaženie s veľkosťou 161 N bolo aplikované na vnútornú plochu tavného kanála a trysky. Na zabezpečenie symetrie úlohy boli na roviny symetrie aplikované podmienky *Displacement*, ktoré obmedzovali deformácie v smere kolmého k rovine symetrie. Ďalšou použitou podmienkou bola väzba *Fixed*, aplikovaná na valcovú plochu prstenca slúžiacu na upnutie k rámu extrudéra. Kontakty medzi jednotlivými telesami boli definované ako *Bonded*. Ostatné nastavenia simulácie zostali nezmenené.

Výsledky napät'ovo-deformačnej analýzy nepreukázali prekročenie prípustných hodnôt medze klzu použitých materiálov. Maximálna hodnota redukovaného napätia dosiahla 62,83 MPa a bola lokalizovaná v oblasti hrany na prechode medzi prítlačnou skrutkou a tavnou kapilárou, v dôsledku koncentrácie napätia. Najnižší bezpečnostný faktor (0,85) bol zaznamenaný v izolačnej vrstve (vid' Obr. 5-17b), avšak táto skutočnosť nepredstavuje zásadný problém, keďže vrstva je vyrobená z keramického papiera — vlákňitého materiálu, ktorý sa môže vplyvom zaťaženia deformovať bez negatívneho vplyvu na funkciu extrudéra.



Obr. 5-17 Napät'ovo-deformačná analýza zostavy tavného telesa pri teplote 700 °C:
 a) Redukované napätie (HMH); b) Súčiniteľ bezpečnosti.

Zhrnutie napät'ovo-deformačných analýz

Napät'ovo-deformačné analýzy plastovej konzoly a tavného telesa preukázali dostatočnú mechanickú odolnosť jednotlivých komponentov pri predpokladaných prevádzkových podmienkach. V prípade plastovej konzoly boli v pôvodnom návrhu identifikované oblasti prekračujúce medzu klzu materiálu PETG. Úpravou geometrie, sa podarilo maximálne napätie výrazne znížiť. Analýza tavného telesa ukázala, že ani pri zaťažení a teplote 700 °C nedochádza k prekročeniu medze klzu použitých materiálov. Najvyššie zaznamenané napätie vzniklo v dôsledku lokálnej koncentrácie v oblasti spoja tavnej kapiláry a prítlačnej skrutky. V prípade izolačnej vrstvy bol zaznamenaný najnižší bezpečnostný faktor, avšak vzhľadom na charakter použitého materiálu táto deformácia neovplyvňuje funkčnosť zariadenia. Na základe realizovaných analýz možno konštatovať, že konštrukcia extrudéra je z hľadiska mechanického zaťaženia vhodná pre plánované prevádzkové podmienky a nevyžaduje ďalšie zásahy do návrhu.

5.3 Odhad výrobných nákladov a objemu výroby rovni

Predpokladaným výsledkom tejto záverečnej práce je funkčný vzorok, ktorý bude následne využívaný na výskumnú činnosť v oblasti 3D tlače kovových zliatin. Vzhľadom na charakter výstupu ide o kusovú výrobu experimentálneho zariadenia. Predpokladané náklady na jeho realizáciu sú uvedené v tabuľke (viď Tab. 5-7).

Tab. 5-7 Odhadované náklady na realizáciu jedného prototypu

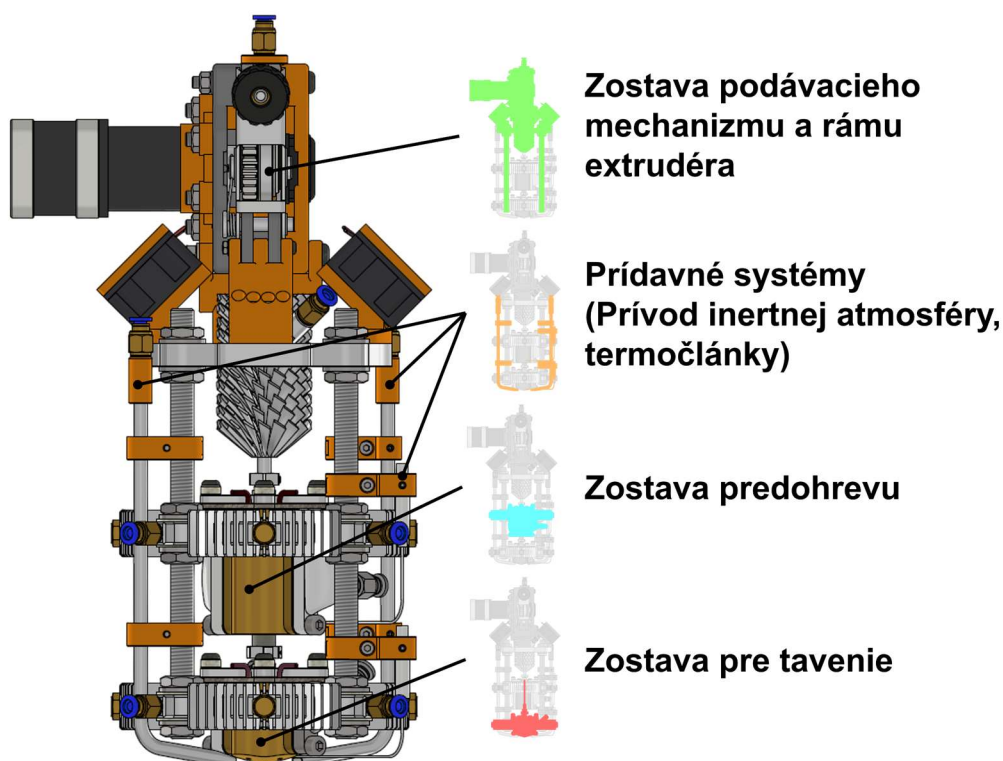
TYP	SKUPINA	KOMPONENT	CENA S DPH (CZK)
Nakupované	Materiál na 3D tlač	Zvárací drôt ER4043 (AlSi5)	2 610
	Spojovací materiál	Matice, podložky, skrutky, závitové tyče, kolíky, poistné krúžky	600
	Pneumatické prvky	Pneumatické spojky, výfuky, pneumatické hadice, rozdeľovače, záslepky	1 657
	Elektronika	Riadiaca elektronika, výkonová elektronika, senzorika, krokový motor, kabeláž	6 180
	Mechanické prvky	Nerezové kapiláry, keramické trysky, podávací mechanizmus	1 767
Vyrábané	Komponenty extrudéra	Kovové komponenty: Prstence, tavné teleso, predohrievacie teleso, hlavný chladič, upínacia konzola, prítlačné prvky	58 500
		Plastové komponenty: Upínacia konzola, upínacie svorky, komponenty podávacieho mechanizmu	
CELKOM			71 314

6 DETAILNÝ NÁVRH

Táto kapitola sa zameriava na detailný návrh extrudéra určeného pre 3D tlač kovových zliatin v polotuhom stave. Postupne sú v nej predstavené jednotlivé časti zariadenia vrátane podávacieho mechanizmu, zostavy predohrevu a zostavy pre tavenie materiálu. Nasleduje prehľad výrobných procesov, výberu materiálov a nákup komponentov, ako aj montáž mechanickej a elektrickej časti zariadenia. Osobitná pozornosť je venovaná systému riadenia a ovládania extrudéra, ako aj validačným experimentom, ktorých cieľom bolo overiť funkčnosť navrhnutého riešenia.

6.1 Návrh extrudéra

Táto časť kapitoly sa venuje návrhu kľúčových konštrukčných častí extrudéra určeného na spracovanie nízko-taviteľných kovových zliatin. Jednotlivé podkapitoly popisujú základné podzostavy extrudéra (viď Obr. 6-1) ich komponenty a funkcie, konštrukčné riešenie, spôsob montáže a prípadné technické obmedzenia. Dôraz je kladený na zabezpečenie tepelnej a mechanickej stability extrudéra, ako aj na možnosti jeho servisovateľnosti.



Obr. 6-1 Zostava podávacieho mechanizmu a rámu extrudéra

6.1.1 Podávací mechanizmus a hlavný chladič

Funkčný popis zostavy

Podávací mechanizmus (viď Obr. 6-2) plní dve primárne funkcie: odvíjanie filamentu z cievky a jeho privádzanie do tavnej komory extrudéra. V rámci tohto procesu dochádza zároveň k vytlačaniu materiálu cez trysku na stavebnú podložku, pričom materiál opúšťa tavnú komoru v polotuhom stave. Po prechode podávacím mechanizmom vstupuje filament do hlavného chladiča, ktorého úlohou je zabráňovať spätnému šíreniu tepla z vyhrievaných častí extrudéra smerom k pohonnému systému. V prípade, že by dochádzalo k spätnému vedeniu tepla, filament by predčasne zmäkol, čím by sa znížila jeho tuhosť. Dôsledkom by bolo preklzavanie materiálu v oblasti podávacích kladiek, čo by narušilo plynulosť extrúzie.

Konstruktívne riešenie podávacieho mechanizmu

Filament je do tavnej komory privádzaný dvojicou kladiek. Hnacia kladka je uložená pomocou puzdra s priamym ozubením na hriadeli planétovej prevodovky s prevodovým pomerom 19:1¹². Prevodovka je pripojená k hriadeľu krokového motora typu NEMA 17 s nominálnym krútiacim momentom 0,38 Nm. Po obvode hnacej kladky sa nachádza V - drážka so zúbkami, ktoré zabezpečujú tvarový styk s filamentom.

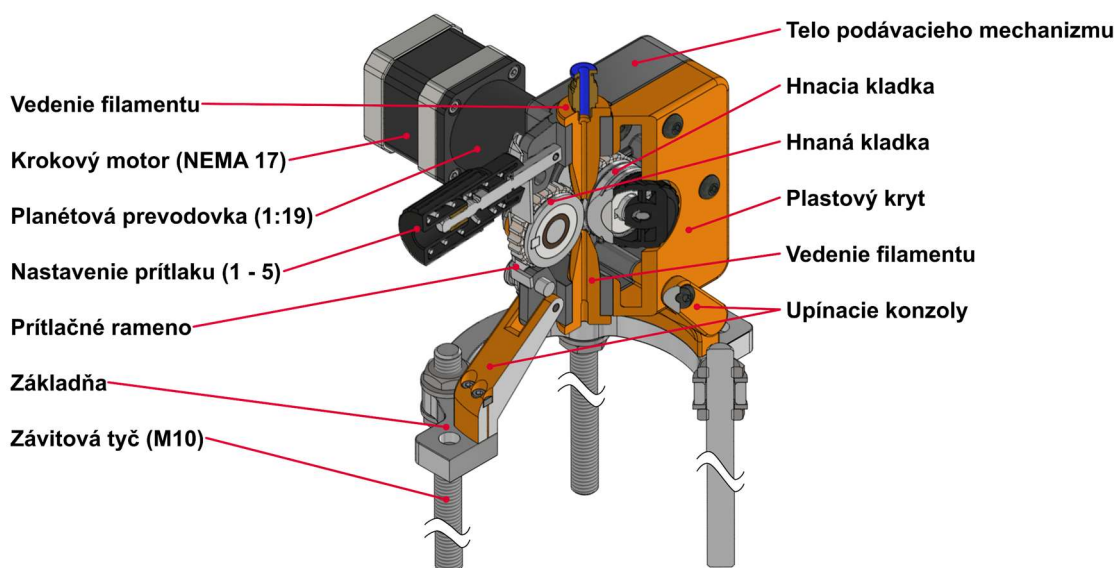
Zostava hnacej kladky je uchytená v plastovej redukcii, ktorá ju spája s domcom mechanizmu. Oproti nej je umiestnená hnaná kladka s hladkým povrchom, uložená na čape cez klzné puzdro. K hnacej kladke je pritláčaná pomocou nastaviteľnej prítlačnej matice a pružiny, čo umožňuje reguláciu prítlaku. Nastavením vhodnej sily dochádza k lokálnej plastickej deformácii filamentu, vďaka ktorej vzniká tvarový kontakt medzi ním a kladkou. Aby sa zabránilo strate vzpernej stability filamentu pri jeho namáhaní na tlak, je vedený pomocou vodiacich prvkov umiestnených pred aj za kladkami.

Celý podávací mechanizmus je upevnený pomocou plastových konzol na základni extrudéra. Tá má tvar prstenca s dvomi kvádrovými výčnelkami po vonkajšom obvode, ktoré sú umiestnené oproti sebe a slúžia na jej pripevnenie k rámu 3D tlačiarne. V telese prstenca sa nachádzajú závitové priebežné diery určené na upevnenie plastových konzol a ventilátorov, ako aj diery pre ťažné závitové tyče. Tieto tyče spolu so základňou tvoria rám extrudéra (viď Obr. 6-2).

Voľba vonkajšieho oporného rámu bola zvolená s cieľom minimalizovať negatívny vplyv prevádzkovej teploty. Týmto riešením sa dosiahlo čiastočné oddelenie komponentov vystavených tepelnému a mechanickému zaťaženiu. V opačnom prípade by mohlo počas

¹² V kapitole 5.2.5 bola navrhnutá planétová prevodovka s prevodovým pomerom 27:1. V dôsledku logistickej nehody však bola vo finálnom riešení použitá planétová prevodovka s prevodovým pomerom 19:1. Aj tento nižší prevodový pomer by mal byť dostatočný na prekonanie predikovaného odporu.

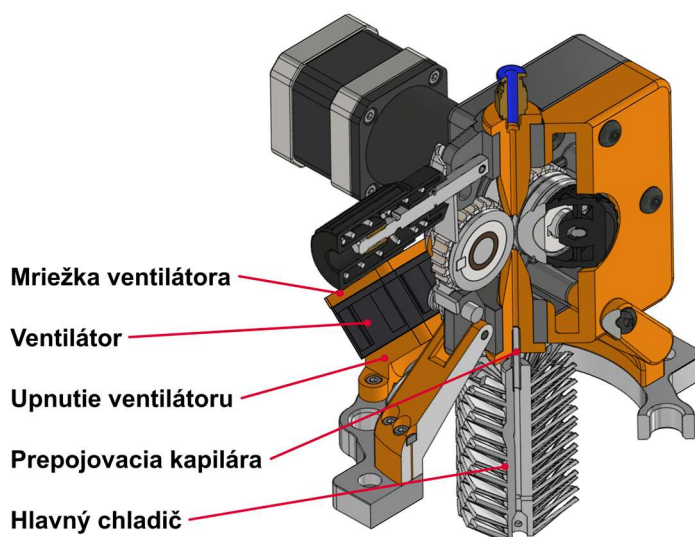
prevádzky, v dôsledku tepelnej rozťažnosti a creepu, dochádzať k strate tesnosti pozdĺž tavného kanála, čo by negatívne ovplyvnilo najmä servisovateľnosť celého systému.



Obr. 6-2 Zostava podávacieho mechanizmu a rámu extrudéra

Konštrukčné riešenie hlavného chladiča

Za podávacím mechanizmom vstupuje filament do hlavného chladiča (viď Obr. 6-3), ktorý je s jeho vodiacimi prvkami prepojený nerezovou kapilárou. Chladič je ovievaný dvojicou axiálnych ventilátorov, umiestnených po jeho stranách. Okrem toho je do chladiča integrovaný prívod pre inertnú atmosféru, ktorá môže byť vedená až k oblasti taveniny. Táto vlastnosť je výhodná pri spracovaní reaktívnych kovových zliatin, kde je nevyhnutná ochrana pred oxidáciou.



Obr. 6-3 Zostava hlavného chladiča

Montážne požiadavky a tolerancie

Na podávací mechanizmus nie sú kladené zvýšené nároky z hľadiska tolerancií, keďže väčšina jeho komponentov pozostáva z nakupovaných dielov s presne definovanými rozmermi a uložením. Pri výrobe základne extrudéra je však potrebné zabezpečiť rovinnosť čelných plôch, ku ktorým sú upevňované plastové konzoly podávacieho mechanizmu. Dôležitá je tiež kolmost' priebežných dier pre ťažné závitové tyče voči týmto plochám. Odchýlky v týchto miestach by mohli viesť k napnutiu rámu extrudéra pri montáži. Výkresová dokumentácia celej zostavy predohrevu, vrátane uloženia kapiláry, chladeného prstenca je uvedená v prílohe B1 až B3.

6.1.2 Zostava predohrevu

Funkčný popis zostavy

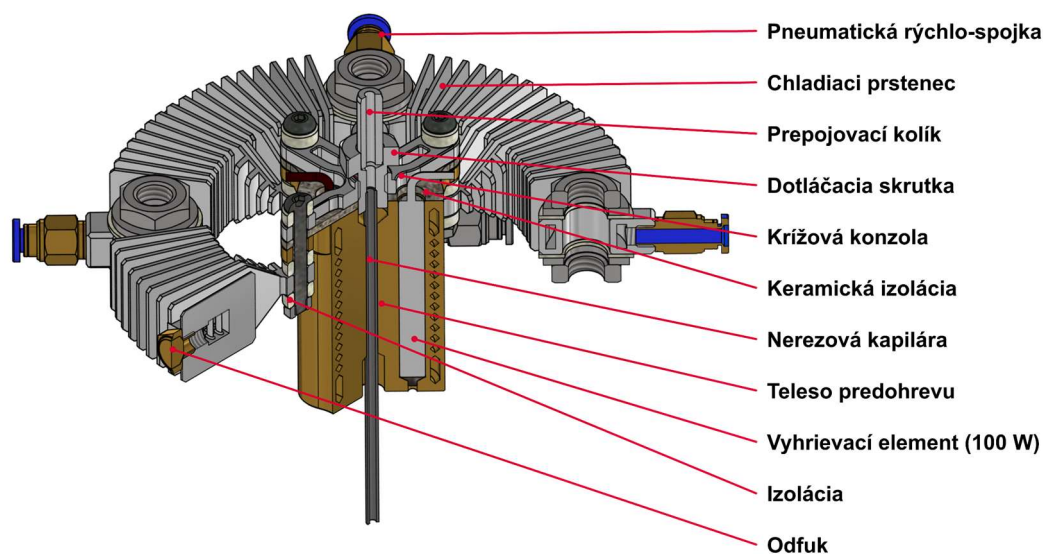
Úlohou predohrievacieho telesa (viď Obr. 6-4) je zabezpečiť čiastočný ohrev filamentu pred vstupom do tavného telesa. Materiál je zahrievaný na teplotu, pri ktorej ešte nedochádza k jeho taveniu, čím sa znižuje tepelná záťaž tavného telesa. Filament vstupuje do predohrievacieho telesa z hlavného chladiča cez prepojovací kolík, pokračuje do prítlačnej skrutky a následne do nerezovej kapiláry, kde prebieha ohrev. Kapilárou je vedený až k tryske tavného telesa. Samotné teleso predohrevu môže v prípade potreby plniť úlohu aktívneho chladiča. Na zabezpečenie tejto funkcie môžu byť využité integrované kanáliky v jeho plášti.

Konštrukčné riešenie zostavy predohrevu

Hlavnou časťou zostavy predohrevu je robustné inkelové teleso, v ktorom je nerezová kapilára uložená s vôľou. Kapilára slúži ako predohrievací a tavný kanál, ktorým materiál postupuje k tryske. V telesa sa nachádzajú štyri výhrevné patróny každá s výkonom 100 W, orientované pozdĺžne s osou kapiláry. Ich rozmiestnenie zabezpečuje rovnomerný ohrev po celej dĺžke. Súčasťou telesa sú aj chladiace kanáliky, ktoré umožňujú prívod chladiwa. Vďaka tomu je možné aktívne regulovať teplotu v oblasti predohrevu – nielen ohrevom, ale aj riadeným odvodom prebytočného tepla. Na výstupe z telesa sa nachádza otvor pre termočlánok, ktorý umožňuje reguláciu teploty materiálu, s akou materiál vstupuje do tavného telesa. V spodnej časti je umiestnený otvor, pre prepojovací kolík, ktorý zabezpečuje napojenie na tavné teleso.

Nad kapilárou je umiestnená prítlačná skrutka, ktorá zabezpečuje čelný kontakt kapiláry s keramickou tryskou tavného telesa. Skrutka zároveň plní funkciu uzatváracieho člena, ktorý eliminuje montážne vôle medzi tavným telesom, tryskou a kapilárou. Je zaskrutkovaná do príruby v tvare štvorramenného kríža, na ktorého koncoch ramien sa nachádzajú priebežné diery. Cez tieto otvory sú skrutkami spojené príruha, teleso predohrevu a prstenec, medzi nimi sú vložené keramické izolačné prvky. Tie znižujú prestup tepla do rámu

extrudéra. Prstenec prenáša mechanické zaťaženie vznikajúce v predohrievacom telese do rámu. Je aktívne chladený stlačeným vzduchom privádzaným do miest jeho napojenia. Konštrukcia prstenca je navrhnutá tak, aby zabezpečila čo najväčší teplotný gradient medzi telesom predohrevu a rámom.



Obr. 6-4 Zostava predohrevu

Montážne požiadavky a tolerancie

Pri konštrukcii tejto časti zostavy je nevyhnutné dodržať viaceré technické požiadavky súvisiace s toleranciami a demontovateľnosťou. Kapilára musí byť voľne zasúvateľná do telesa pri izbovej teplote. Rovnako musia byť výhrevné patróny voľne vložiteľné, bez potreby zalisovania. V opačnom prípade by nemuseli byť tieto časti vyňateľné po cyklickom zahrievaní, kedy by mohlo dôjsť k lokálnej plastickej deformácii či mikrozvarom.

Efektívna vyhrievaná dĺžka kapiláry v oblasti predohrevu je 50 mm, čo zodpovedá dĺžke výhrevných elementov ($\varnothing 6 \times 50$ mm). V miestach skrutkových spojov sa preferuje použitie spojenia skrutka-matica-podložka. Je potrebné sa vyhnúť rezaným závitom priamo v telese a to najmä v častiach, ktoré by mali byť opakovateľne rozoberateľné. Vysoké teploty a prítomnosť kovových kontaktov môžu viesť k difúznemu spojeniu závitov, ktoré by znemožnilo demontáž. Pri použití preferovaného spojenia – postačuje mechanicky odstrániť hlavu skrutky alebo maticu. Výkresová dokumentácia celej zostavy predohrevu, vrátane uloženia kapiláry, chladeného prstenca je uvedená v prílohe B4.

6.1.3 Zostava pre tavenie

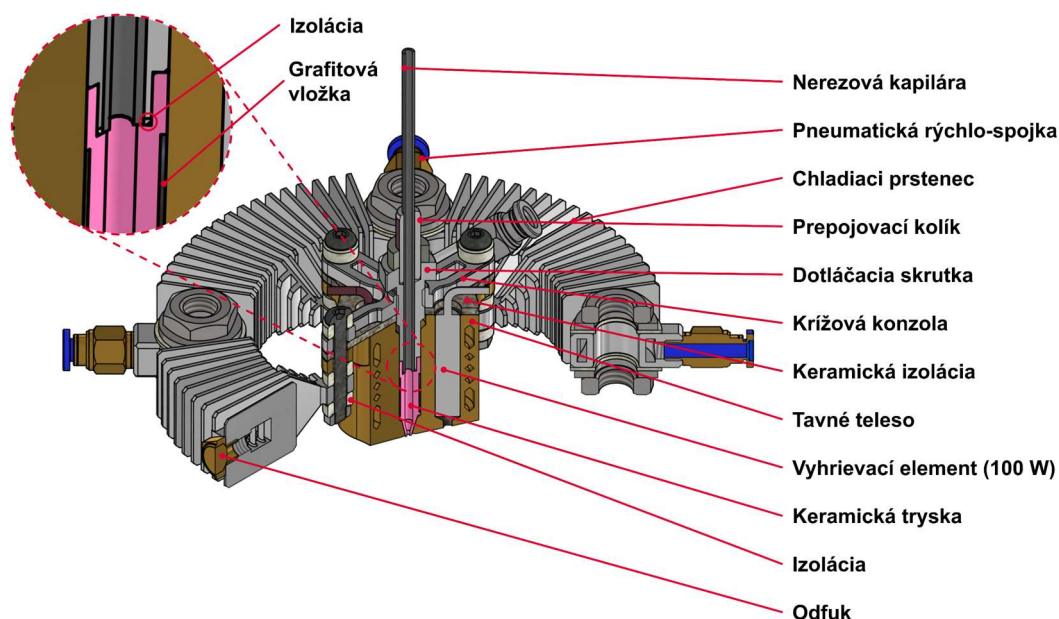
Funkčný popis zostavy

Tavné teleso (viď Obr. 6-5) zabezpečuje parciálne natavenie materiálu pred jeho vytláčanim cez trysku na stavebnú podložku. Materiál je vedený tavnou kapilárou, v ktorej dochádza k jeho ohrevu až do polotuhého stavu. Tento stav je nevyhnutný na zabezpečenie tvarovej stability extrudovaného materiálu. V opačnom prípade, ak by bol materiál úplne tekutý, mohlo by dochádzať k jeho nekontrolovanému roztekaniu po povrchu stavebnej podložky.

Konštrukčné riešenie zostavy pre tavenie

Konštrukcia zostavy pre tavenie je takmer identická so zostavou predohrevu. Základom je inkelové teleso, do ktorého je privedená tavná kapilára. V telesa sa nachádzajú štyri vyhrievacie elementy s rozmermi $\varnothing 6 \times 30$ mm, každý s výkonom 100 W, uložené pozdĺžne s osou kapiláry. Rovnako ako v telese predohrevu, aj v tomto sa nachádzajú chladiace kanáliky pre prípadný prívod chladiwa a aktívnu reguláciu teploty. Na konci telesa, v blízkosti ústia trysky je otvor, v ktorom je zasunutý regulačný termočlánok.

Na výstupe z kapiláry je umiestnená keramická tryska, cez ktorú je vytláčaný polotuhý materiál. Jej ústový otvor môže byť zväčšený podľa požiadaviek, maximálne však do veľkosti zodpovedajúcej priemeru tavného kanálu. Prázdny priestor medzi tryskou a tavným telesom je vyplnený grafitovou vložkou s vynikajúcou tepelnou vodivosťou. Tryska je na svojom mieste mechanicky zaistená – jednak prítlačnou skrutkou z telesa predohrevu pomocou kapiláry, a jednak prítlačnou skrutkou priamo z tavného telesa. Táto skrutka zároveň zabezpečuje stlačenie tesnenia medzi kapilárou a prírubou trysky, čím sa zabráňuje úniku taveniny mimo požadovanú oblasť. Pripojenie tavného telesa k rámu extrudéra je identické s uložením telesa predohrevu, viď kapitola 6.1.2. I v tomto prípade je použitý chladený prstenec a keramické izolačné prvky.



Obr. 6-5 Zostava pre tavenie

Montážne požiadavky a tolerancie

Pri montáži je potrebné zabezpečiť, aby bola kapilára voľne zasúvateľná do prítlačnej skrutky tavného telesa. Rovnako musia byť výhrevné elementy ($\varnothing 6 \times 30$ mm) vložené s vôľou. Dôležitou požiadavkou je správne uloženie keramickej trysky, ktorá musí byť v kontakte s kapilárou aj s telesom bez vznikajúcich vôlí. Nároky na skrutkové spoje sú totožné s tými pre zostavu telesa predohrevu. Technická dokumentácia zostavy tavného telesa, vrátane uloženia trysky, kapiláry, vyhrievacích elementov a napojenia na zvyšok zostavy, je uvedená v prílohe B5.

6.1.4 Chladenie a prívod ochrannej atmosféry

Funkcia

Chladenie a ochrana taveniny pred oxidáciou patria medzi kľúčové faktory zabezpečujúce jeho stabilnú prevádzku. V extrudéri sú chladené predovšetkým prstence, ktoré plnia funkciu tepelnej bariéry medzi výhrevnými telesami a rámom extrudéra. Chladenie je zabezpečované kombináciou radiácie a prirodzenej konvekcie na vonkajšej strane, a nútenej konvekcie na vnútornej strane prstenca, do ktorej je privádzaný stlačený vzduch.

Cieľom chladenia prstencov je zabrániť prenosu tepla do rámu, čím sa predchádza jeho prehrievaniu nad prípustnú hodnotu 70°C . Okrem chladenia sú do extrudéra privádzané aj inertné plyny, ktorých úlohou je ochrana taveniny pred oxidáciou, najmä pri spracovaní reaktívnych kovových zliatin. Inertná atmosféra je privádzaná jednak do hlavného chladiča, a jednak priamo k oblasti trysky.

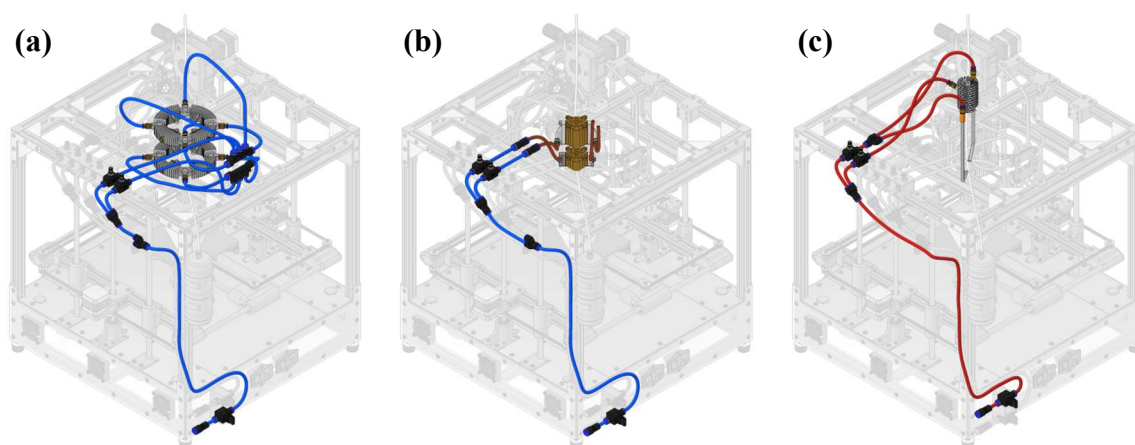
Konštrukčné riešenie

Predpokladaným zdrojom chladiva je rozvod stlačeného vzduchu v laboratóriu, s maximálnym tlakom 0,8 MPa (8 bar). Medzi rozvodom a hlavným ventilom umiestneným na ráme 3D tlačiarne sa nachádza tlakový regulátor, ktorým je možné tlak nastavovať v rozsahu 0 - 0,8 MPa. Z hlavného ventilu vedie PU hadička s vnútorným priemerom 4 mm k miestu s rozbočovacími Y-spojkami.

Odtiaľ je stlačený vzduch rozvádzaný do štyroch škrtiacich ventilov, ktoré umožňujú individuálnu reguláciu prietoku. Prvý ventil je určený pre prstenec tavného telesa, druhý pre prstenec telesa predohrevu, tretí pre prívod vzduchu do chladiacich kanálikov tavného telesa a štvrtý pre chladiace kanáliky telesa predohrevu. K prstencom je vzduch vedený priamo PU hadičkami k štyrom prípojným bodom, ktoré sa nachádzajú v miestach uchytenia prstencov k závitovým tyčiam rámu extrudéra (viď Obr. 6-6a). Na výstupoch z prstencov sú umiestnené tlmiče, ktoré znižujú hlučnosť vyfukovaného vzduchu.

Vzduch určený na chladenie telies je zo škrtiacich ventilov vedený PU hadičkami k spojkám, odkiaľ prechádza cez medenú trubicu do nerezových rýchlo-spojok, ktoré sú osadené priamo na telese predohrevu a tavnom telese (viď Obr. 6-6b). V tomto prípade nie sú na výfukoch telies použité tlmiče, a ohriaty vzduch je vypúšťaný priamo do okolia. Schéma zapojenia systému chladenia je uvedená v prílohe C1.

Prívod inertnej atmosféry je riešený obdobným spôsobom (viď Obr. 6-6c). Zdrojom je externá tlaková fľaša s redukčným ventilom. Hlavný ventil sa nachádza vedľa ventilu stlačeného vzduchu na ráme tlačiarne. Z neho vedie PU hadička k rozbočovaču, ktorý rozdeľuje tok ku dvom škrtiacim ventilom. Jeden z nich riadi prívod plynu do hlavného chladiča a druhý do oblasti trysky. Prívod k chladiču je riešený PU hadičkou, zatiaľ čo k tryske sú vedené tvarované nerezové trubice, ktoré zabezpečujú presné smerovanie plynu. Schéma zapojenia prívodu inertného plynu je uvedená v prílohe C2.



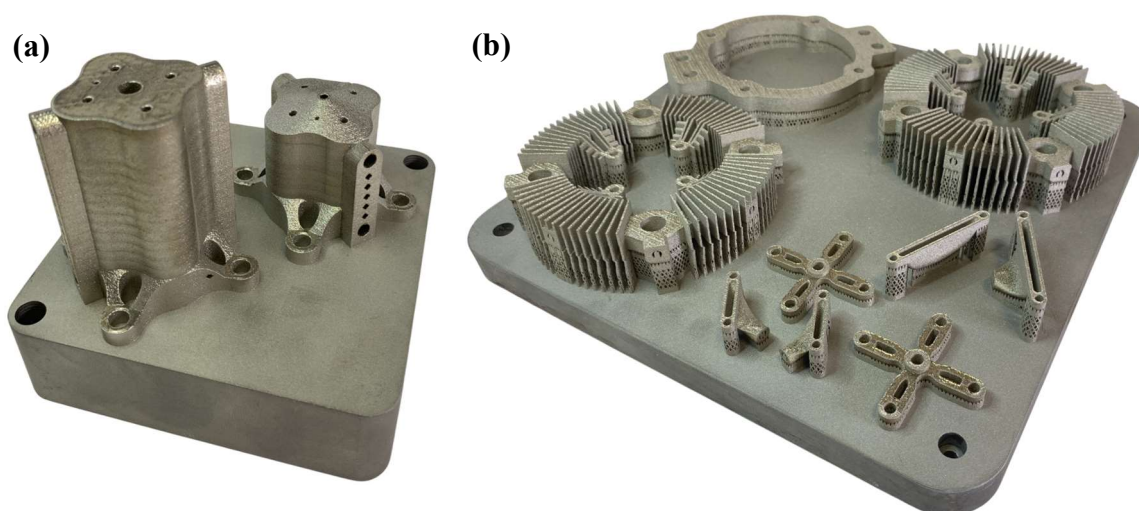
Obr. 6-6 Rozvod stlačeného vzduchu a inertnej atmosféry: a) Chladenie tavného telesa a telesa predohrevu; b) Chladenie prstencov; c) Rozvod inertnej atmosféry.

6.2 Výroba a nákup komponentov

6.2.1 Výroba

Aditívna výroba kovových komponentov

Pri výrobe hlavných komponentov extrudéra bol kladený dôraz na využitie aditívnej technológie L-PBF, ktorá umožňuje výrobu zložitých tvarov z kovových materiálov. Touto technológiou boli vyrobené: tavné teleso, teleso predohrevu, hlavný chladič, konzoly v tvare štvorramenného kríža, príruby a odvody stlačeného vzduchu k obom telesám a taktiež základňa extrudéra (viď Obr. 6-7). Pre lepšie využitie potenciálu tejto technológie boli v tavnom telese a telese predohrevu integrované vnútorné chladiace kanáliky, ktoré neboli súčasťou pôvodného návrhu. Ako sa ukázalo pri testovaní, práve tieto kanáliky zohrali zásadnú úlohu pri regulácii teploty výhrevných častí extrudéra (viď kapitola 6.4.2). Aby bolo možné tieto komponenty úspešne vyrobiť, bolo potrebné ich geometriu prispôsobiť technologickým limitom L-PBF, najmä s ohľadom na prevísajúce plochy, ktoré si vyžadujú dodatočné podporné štruktúry alebo úpravu uhla nábehu.

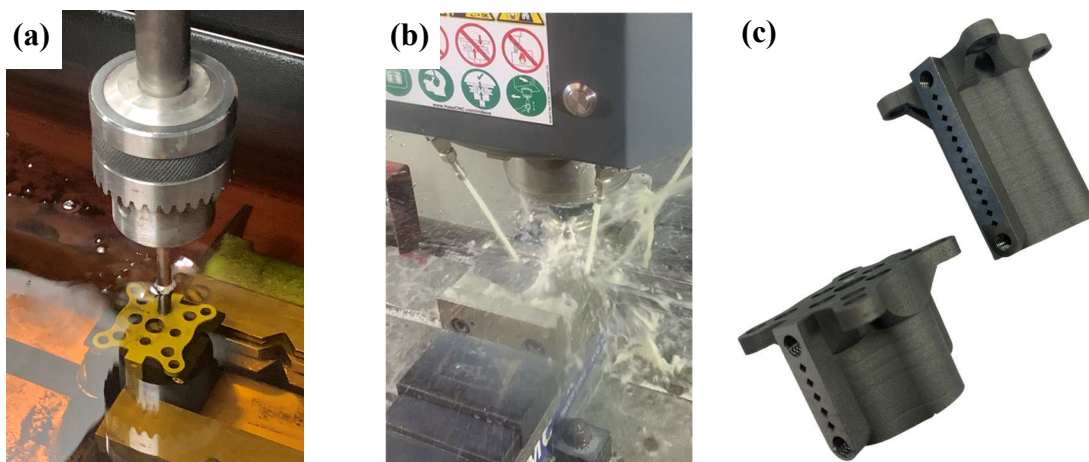


Obr. 6-7 Aditívne vyrábané diely: a) Inkonelové komponenty; b) Nerezové diely.

Obrobenie funkčných plôch

Jednou z nevýhod aditívnej výroby kovov je nízka kvalita finálneho povrchu, ktorá je nevyhovujúca pre presné uloženie a montážne spoje. Preto boli v návrhu vytvorené prídavky na obrábanie v miestach uloženia vyhrievacích elementov, keramickej trysky a kapiláry. Pôvodne sa predpokladalo CNC obrábanie, avšak počas realizácie sa ukázalo, že obrobenie vnútorných plôch dielov z inkonelu 939 bez poškodenia nástrojov nebolo možné. Z tohto dôvodu sa pristúpilo k elektro-erozívnemu obrábaniu (EDM). Táto technológia bola použitá na vytvorenie presných montážnych otvorov pre výhrevné elementy, trysku, prepojovacie kolíky a kapiláru (viď Obr. 6-8a). Náročnosť elektro-erozívneho opracovania sa premietla

do časového zdržania výroby a zvýšenia nákladov, avšak bola nevyhnutná pre dosiahnutie požadovanej presnosti a funkčnosti zostavy. Ostatné funkčné plochy boli dokončené na CNC stroji.



Obr. 6-8 Dodatočné obrábanie inkonelových dielov: a) Elektro-erozívne obrábanie dier pre patróny; kolíky a kapiláru; b) Zarovnanie čelných plôch a rezanie závitov; c) Finálne diely.

Výroba doplnkových komponentov

Niektoré komponenty boli vyrobené tradičnými technológiami obrábania z nerezového polotovaru. Išlo najmä o prepojovacie kolíky a dotlačacie skrutky, ktoré boli vyrobené na sústruhu. Tesnenia a keramické izolačné prvky boli vyrábané až priamo počas montáže, podľa aktuálne nameraných rozmerov jednotlivých zostáv. Tento prístup umožnil zohľadniť drobné odchýlky, ktoré vznikli počas výroby a montáže čím bolo možné zabezpečiť optimálne lícovanie súčiastok.

Použité materiály

Pre jednotlivé komponenty boli zvolené materiály s ohľadom na ich teplotnú odolnosť, mechanické vlastnosti a technologickú spracovateľnosť:

- **Teleso predohrevu a tavné teleso:** Inkonel 939 – materiál s vysokou pevnosťou a tvrdosťou, ale horšími deformačnými vlastnosťami oproti pôvodne uvažovanému materiálu (Inkonel 739).
- **Prstence, príводы, odvody a konzoly:** nerezová oceľ 304, vhodná na L-PBF.
- **Hlavný chladič:** zliatina AlSi10Mg, vhodná pre komplexné tvarové prvky s nižšími teplotnými nárokmi.

Plastové komponenty

Plastové časti extrudéra boli vyrobené 3D tlačou z materiálu PETG na zariadení Prusa. Išlo prevažne o komponenty ako kryty, redukcie a držiaky, ktoré nie sú vystavené mechanickému namáhaniu ani vyšším teplotám. Vďaka jednoduchej výrobe a dostupnosti materiálu bolo možné tieto diely rýchlo prispôbiť a v prípade potreby opakovane vyrobiť.

6.2.2 Výrobné náklady

V počiatočnej fáze návrhu boli výrobné náklady extrudéra odhadnuté na základe plánovaného počtu komponentov, použitej technológie (L-PBF, bežné obrábanie, 3D tlač plastov) a cien známych komerčne dostupných prvkov, ako sú senzory, výhrevné elementy či riadiaca elektronika. Predpokladalo sa, že väčšina súčiastok bude vyrobená jednorazovo bez potreby úprav, a že použitie štandardizovaných dielov minimalizuje dodatočné výdavky.

V priebehu výroby však došlo k navýšeniu nákladov, ktoré súviseli najmä s komplikáciami pri opracovaní komponentov vyrobených aditívne z inkonelu 939. Ďalšie náklady vznikli v dôsledku potreby dokúpenia pneumatických prvkov, ktoré neboli pôvodne zahrnuté v rozpočte. Išlo najmä o nerezové rýchlo-spojky a izolačné návleky. Rovnako bolo nutné rozšíriť nákup o dodatočné trysky, ktoré slúžia ako spotrebný materiál.

Hoci neboli pôvodné výrobné náklady plánované s rezervou, nepredvídané technologické a prevádzkové úpravy viedli k ich opodstatnenému navýšeniu. Tieto náklady však priamo prispeli k zvýšeniu spoľahlivosti a funkčnosti prototypu, a teda boli nevyhnutné pre jeho úspešné dokončenie a testovanie. Prehľad nákladov a ich porovnanie oproti odhadu je uvedené tabuľke (viď Tab. 6-1).

Tab. 6-1 Porovnanie odhadovaných a skutočných nákladov na realizáciu prototypu

TYP	SKUPINA	KOMPONENT	CENA S DPH (CZK)		NAVÝŠENIE
			ODHAD	SKUTOČNE	
Nakupované	Materiál na 3D tlač	Zvárací drôt ER4043 (AlSi5)	2 610	2610	0 %
	Spojovací materiál	Matice, podložky, skrutky, závitové tyče, kolíky, poistné krúžky	600	600	0 %
	Pneumatické prvky	Pneumatické spojky, výfuky, pneumatické hadice, rozdeľovače, záslepky	1 657	3 254	+ 96 %
	Elektronika	Riadiaca elektronika, výkonová elektronika, senzorika, krokový motor, kabeláž	6 180	6 072	0 %
	Mechanické prvky	Nerezové kapiláry, keramické trysky, podávací mechanizmus	1 767	2 272	+ 29 %
Vyrábané	Komponenty extrudéra	Kovové komponenty: Prstence, tavné teleso, predohrievacie teleso, hlavný chladič, upínacia konzola, prítlačné prvky	58 500	85 300	+ 46 %
		Plastové komponenty: Upínacia konzola, upínacie svorky, komponenty podávacieho mechanizmu			
CELKOM			71 314	100 108	+ 40 %

6.3 Montáž

Montáž extrudéra a pridružených podporných systémov prebiehala v niekoľkých etapách. Najprv boli zmontované jednotlivé podzostavy extrudéra, následne bol zostavený celý extrudér. Ten bol následne upevnený do zástavbového priestoru 3D tlačiarne, ktorá bola vyvinutá v rámci práce zrealizovanej T. Slezákom v roku 2023 [41]. V ďalšom kroku bola zapojená jednotka regulácie teploty, ktorá bola pred pripojením extrudéra samostatne odskúšaná na 40W žiarovke. Po úspešnom overení funkčnosti bola prepojená s extrudérom a nakoniec boli doplnené pneumatické obvody slúžiace na chladenie a prívod inertnej atmosféry.

6.3.1 Mechanická časť

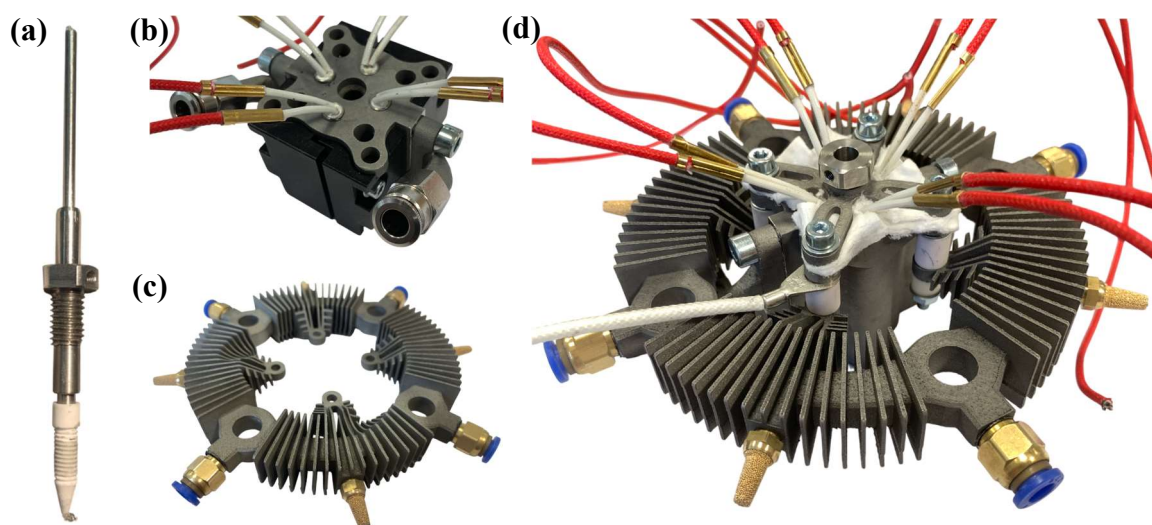
Montáž začínala zostavením podávacieho mechanizmu (vid' Obr. 6-9). V prvom kroku bola k jeho telesu pripojená pohonná jednotka cez plastovú redukciu, následne bola osadená hnacia a hnaná kladka, a mechanizmus bol uzatvorený plastovým krytom. Hotový mechanizmus bol vložený do upínacích konzol upevnených na základni extrudéra. Potom boli k základni namontované ventilátory a štyri závitové tyče, ktoré spolu so základňou vytvárajú rám extrudéra.



Obr. 6-9 Zostava podávacieho mechanizmu

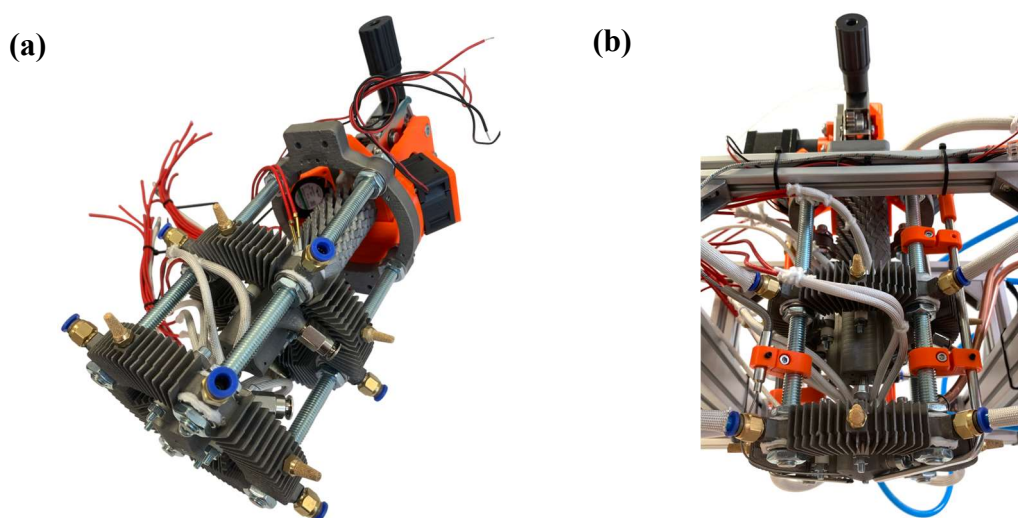
V ďalších krokoch boli zmontované zostavy telesa predohrevu a tavného telesa (Obr. 6-10b až d). Montáž oboch prebiehala podobne: najprv boli k ich inkonelovým telesám pripojené prívody a odvody stlačeného vzduchu, medzi ktoré bolo vložené grafitové tesnenie. Do pripravených otvorov boli vložené vyhrievacie elementy, pričom otvory boli najprv vyplnené teplo-vodivou grafitovou pastou VAR RG 100, odolnou až do 950 °C, čím sa zabezpečil ideálny kontakt medzi nimi a telesami. Následne boli telesá pripojené

ku chladiacim prstencom (vid' Obr. 6-10c) pomocou krížovej konzoly, keramických izolačných prvkov a skrutkových spojov. Zostava s tryskou, kapilárou, dotlačiacou skrutkou a izoláciou bola kompletne osadená do tavného telesa (vid' Obr. 6-10a). Dotlačacia skrutka bola jemne predopnutá, aby sa zabezpečil kontakt medzi ňou a tavným telesom.



Obr. 6-10 Podzostavy extrudéra: a) Zostava trysky; b) Tavné teleso s patrónami a prívodom/odvodom stlačeného vzduchu; c) Chladiaci prstenec; d) Zostava predohrevu.

Potom bola zostava predohrevu s hlavným chladičom nasunutá na rám extrudéra cez prepojovací kolík, pričom matice a skrutky ešte neboli definitívne dotiahnuté. Následne bola zostava tavného telesa umiestnená na rám, pričom sa dbalo na presné osadenie kapiláry a jej plynulé zasunutie do predohrievacieho telesa. Až po fyzickom kontakte dotlačacích skrutiek s kapilárou boli zostavy dokonale dotiahnuté. V záverečnej fáze montáže boli na rám pridané termočlánky a ofuky trysky. Posledným krokom mechanickej časti bolo upevnenie zostavy extrudéra do rámu 3D tlačiarne a pripojenie pneumatických a elektrických obvodov (vid' Obr. 6-11). Detailná fotodokumentácia je uvedená v prílohe E1.



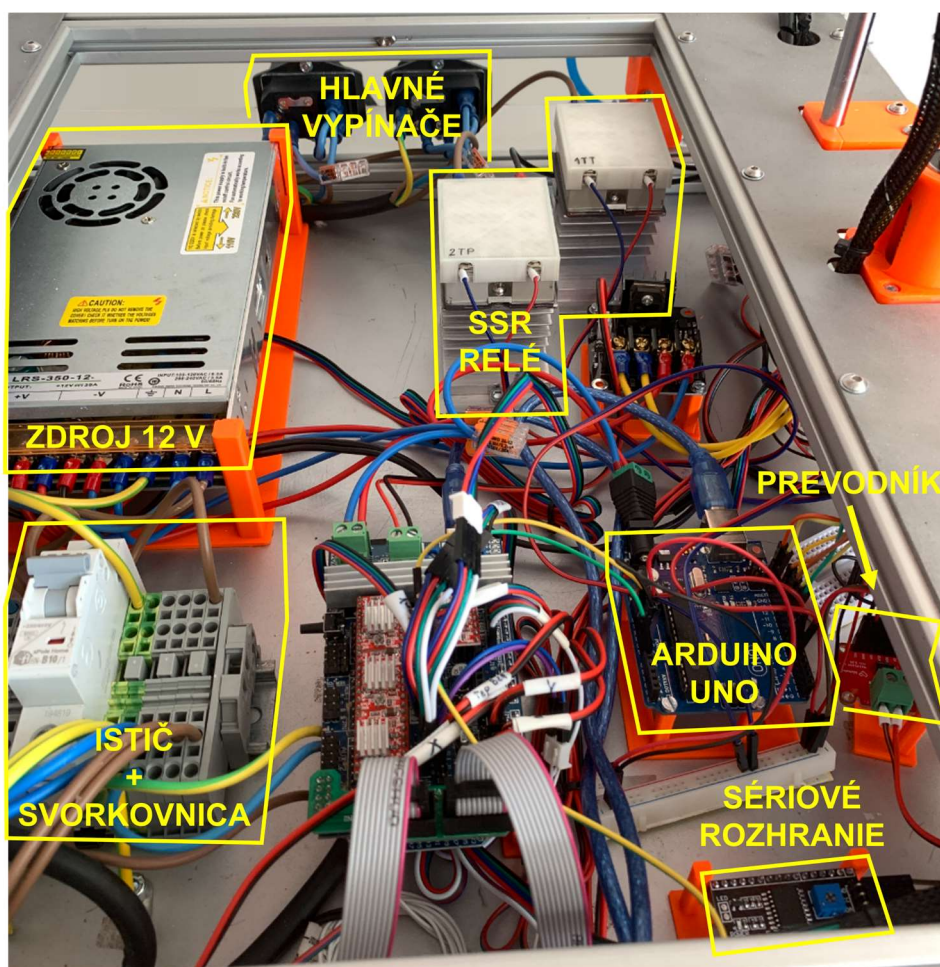
Obr. 6-11 Extrudér: a) Finálna zostava extrudéra; b) Umiestnenie extrudéra v 3D tlačiarňi.

6.3.2 Zapojenie elektroinštalácie

Elektroinštalácia (viď Obr. 6-12) zabezpečujúca ako spracovanie signálov, tak aj riadenie výhrevných telies, bola umiestnená do elektrickej skrinky 3D tlačiarne. Jej hlavnou úlohou je regulácia teploty na základe spätnej väzby z termočlánkov umiestnených na telese predohrevu a tavnom telese. Ide o uzavretú regulačnú slučku, ktorej hlavným prvkom je Arduino UNO, napájané z 12 V zdroja 3D tlačiarne.

Arduino prijíma signály z termočlánkov typu K, prepojených cez prevodník MAX31856 s rozlíšením $0,0078125\text{ }^{\circ}\text{C}$ a integrovaným filtrom sieťových frekvencií 50/60 Hz. Na základe spracovaných údajov Arduino vydáva signály pre zopnutie SSR relé, ktoré ovládajú výhrevné elementy oboch telies. Celý systém je istený tavnou 10A poistkou a ističom, umiestnenými pred hlavným vypínačom. Obe telesá sú uzemnené.

Používateľské rozhranie tvorí LCD displej s ovládacím panelom (tlačidlá: hore, dole, vľavo, vpravo, select, reset), pripojený cez sériové rozhranie. Na bočnej strane panelu je vyvedený USB port, cez ktorý možno zaznamenávať nastavené a aktuálne hodnoty teploty a regulačný signál. Schéma zapojenia je uvedená v prílohe C3. Ventilátory základne sú taktiež napájané z hlavného zdroja 3D tlačiarne.

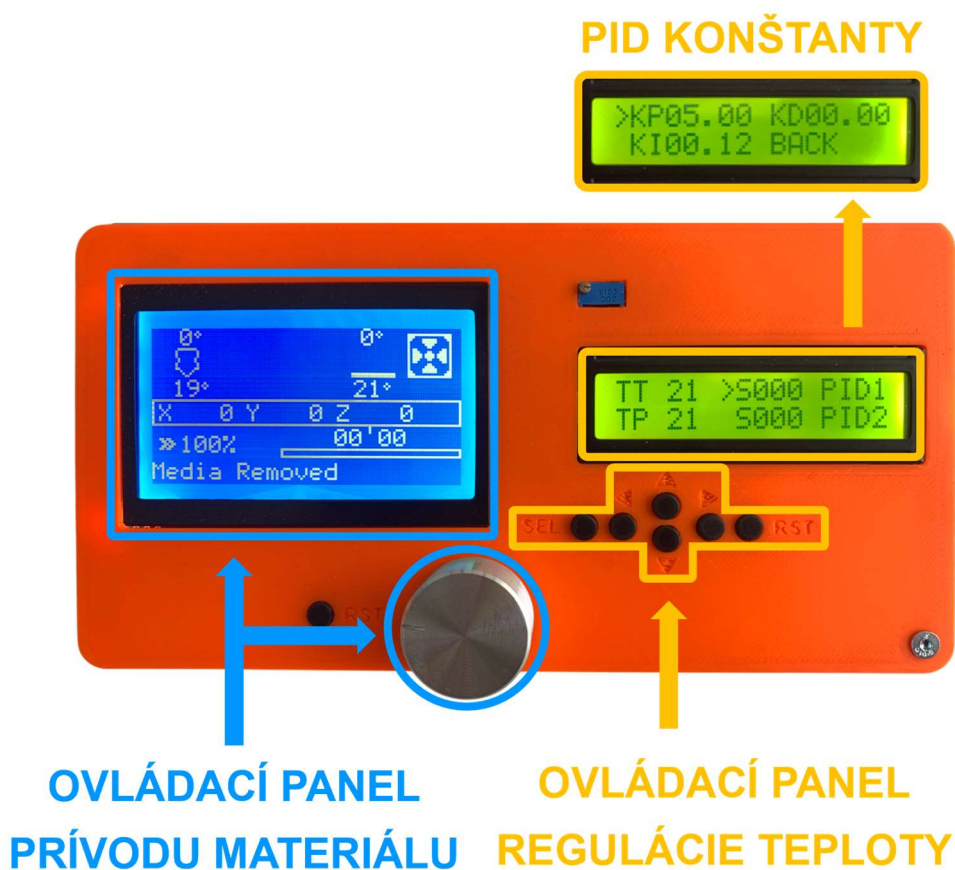


Obr. 6-12 Elektroinštalácia pre riadenie ohrevu extrudéra

6.3.3 Riadenie a ovládanie

Riadenie extrudéra je zabezpečené dvoma samostatnými riadiacimi jednotkami (viď Obr. 6-13). Prvou je riadiaca jednotka pohybu osi 3D tlačiarne, ktorá ovláda prívod materiálu pomocou krokového motora. Vďaka vhodnému pomeru medzi počtom krokov motora a priemerom hnacej kladky bolo možné presne definovať počet krokov na 1 mm posunu filamentu.

Druhou riadiacou jednotkou je systém pre reguláciu teploty, založený na PID regulátore s implementovanou ochranou antiwind-up, ktorá zabráňuje hromadeniu chyby v prípade saturácie výstupu (viď Príloha D1). Používateľ má možnosť nastaviť požadovanú teplotu a upravovať PID konštanty počas prevádzky, pričom po reštarte zariadenia sa obnovia východiskové hodnoty. Ovládacie rozhranie umožňuje priame nastavovanie parametrov aj kontrolu aktuálneho stavu systému, pričom záznamové údaje možno priebežne exportovať cez USB port.

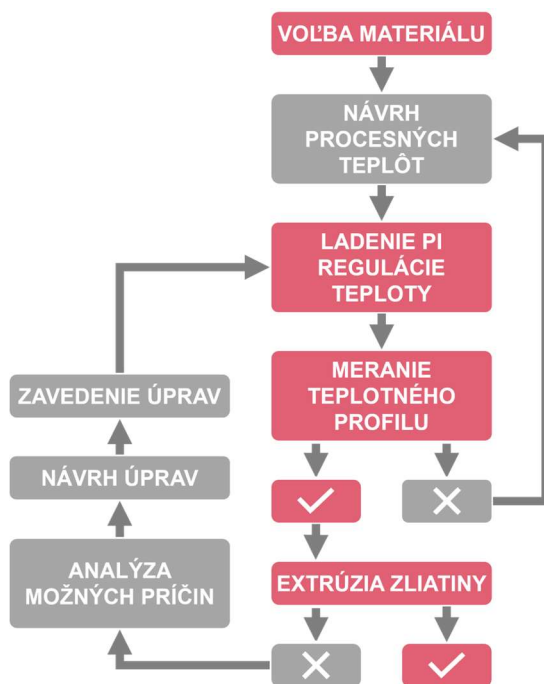


Obr. 6-13 Ovládací panel prívodu materiálu (resp. riadenie pohybu častí 3D tlačiarne) a nastavenia požadovanej teploty na telese predohrevu (TP) a tavnom telese (TT)

6.4 Validačné experimenty

Po dokončení montáže extrudéra a overení funkčnosti jeho jednotlivých častí bolo potrebné experimentálne overiť jeho hlavnú funkciu – schopnosť extrúzie materiálu v polotuhom stave. Pred samotnou extrúziou zvolenej kovovej zliatiny bolo nutné realizovať sériu prípravných meraní, ktorých cieľom bolo doladiť regulačné parametre systému a určiť vhodné nastavenie prevádzkových teplôt. Následne prebehla iteratívna séria experimentov, pri ktorej boli na základe priebežných výsledkov postupne vykonávané úpravy vedúce k zlepšeniu funkčnosti celého procesu extrúzie.

Nižšie uvedené schéma znázorňuje postupnosť jednotlivých validačných experimentov (viď Obr. 6-14). Nižšie uvedená schéma znázorňuje postupnosť jednotlivých validačných krokov. V prípade neúspešného výsledku je označený bod, ku ktorému sa treba vrátiť a prehodnotiť, či zavedené zmeny mali natoľko zásadný vplyv, že mohli ovplyvniť ďalšie fázy postupu. Na základe tohto zhodnotenia sa následne pristupuje buď k opakovaniu experimentálneho merania, alebo k postupu na ďalší validačný krok.

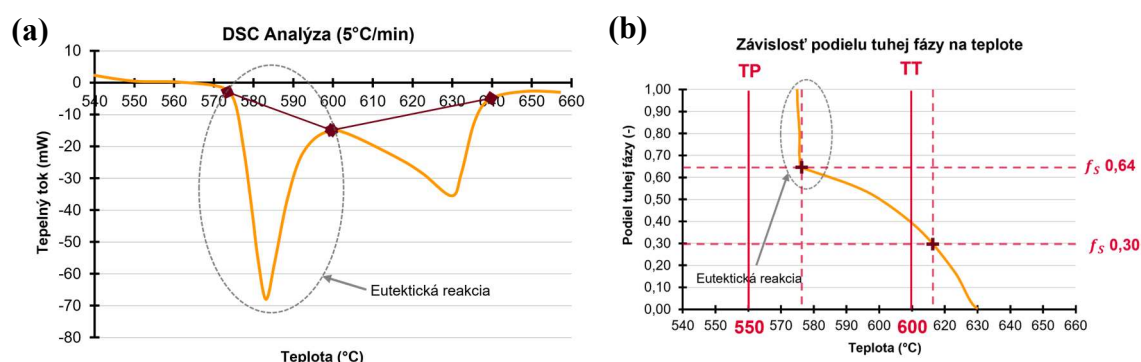


Obr. 6-14 Schéma priebehu validačných experimentov

6.4.1 Výber materiálu

Ako testovací materiál pre validáciu extrúzneho procesu bola zvolená eutektická hliníkovo-kremíková zliatina AlSi5 (hm. %). Voľba tejto zliatiny vychádzala z jej dostupnosti, známeho chemického zloženia a predchádzajúcich experimentálnych skúseností, najmä z práce G. K. Sharma et al. [3], kde bola úspešne testovaná v kontexte extrúzie v polotuhom stave. Na základe DSC (vid' Obr. 6-15) analýzy prevzatej z práce [52] boli určené základné termo-fyzikálne údaje:

- Teplota solidus: 576 °C,
- Teplota likvidus: 630 °C,
- Šírka polotuhého pásma: 54 °C,
- Podiel kvapalnej fázy vznikajúci pri eutektickej reakcii: 0,36.



Obr. 6-15 Termická analýza zliatiny: a) DSC krivka; b) Závislosť podielu tuhej fázy na teplote s vyznačenými procesnými teplotami na telese predohrevu (TP) a tavnom telese (TT). Upravené podľa [52].

Na základe týchto údajov bola zvolená teplota na telese predohrevu 550 °C, pri ktorej sa materiál nachádza v tuhom stave, a teplota na tavnom telese 600 °C, kde je podiel prítomnej tuhej fázy $f_s = 0,4$, čo je vhodné pre extrúziu v polotuhom stave.

6.4.2 Ladenie regulácie teplôt

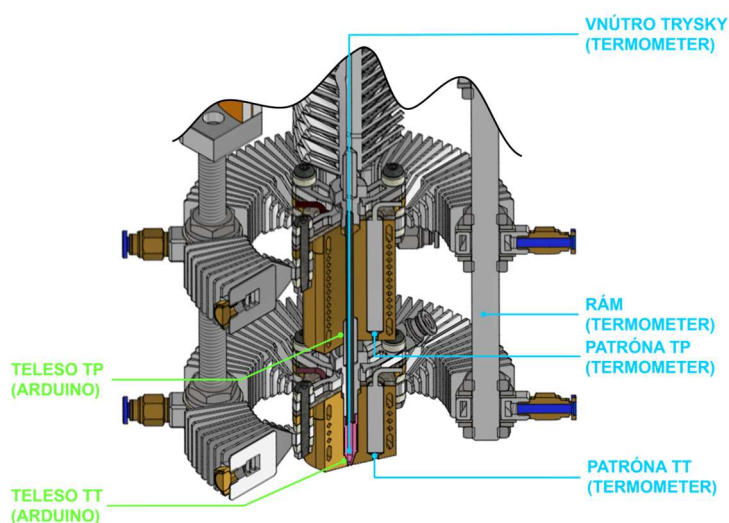
Príprava

Po stanovení cieľových teplôt pre teleso predohrevu a tavné teleso bolo potrebné vykonať ladenie regulátora teplôt, aby bola zabezpečená požadovaná presnosť regulácie na úrovni ± 2 °C. Ladenie prebiehalo pri aktívnom chladení extrudéra. Na hlavnom regulátore tlaku bol nastavený tlak 1,5 bar (0,15 MPa). Škrtiace ventily chladených prstencov boli úplne otvorené, zatiaľ čo ventily tavného telesa a telesa predohrevu boli otvorené len na 10–15 %. Teplotná regulácia bola riadená Arduino, ktoré bolo pripojené k notebooku prostredníctvom USB portu. Na obrazovke boli zobrazované aktuálne hodnoty teploty (s presnosťou na dve desatinné miesta) a hodnota riadiaceho signálu pre SSR relé.

Frekvencia snímania teploty bola približne 1–2 Hz, v závislosti od rýchlosti operácií vykonávaných firmvérom. Okrem toho boli dodatočne pripojené štyri externé termočlánky typu K s frekvenciou záznamu 1 Hz, ktoré boli umiestnené na týchto miestach (viď Obr. 6-16):

- Rám extrudéra (závitová tyč medzi oboma telesami),
- Čelné plochy výhrevných patrón oboch telies,
- Kužeľové zúženie trysky (vnútorný priestor tavného kanálu).

Údaje o teplote získavané prostredníctvom Arduina boli zaznamenávané priamo na notebooku. Teploty z prídavných termočlánkov boli zaznamenávané pomocou termometra Omega RDXL4SD, ku ktorému boli pripojené. Namerané hodnoty boli následne spracované a vyhodnotené.



Obr. 6-16 Schematické rozmiestnenie termočlánkov na extrudéri pri ladení PID konštánt

Priebeh ladenia

Ladenie PID konštánt prebiehalo manuálne, postupným nastavovaním jednotlivých zložiek regulátora. Najprv bola ladená regulácia teploty na tavnom telese, až následne na telese predohrevu. Postup bol nasledovný:

- **Zvýšenie proporčionalnej zložky (KP):** Po jej postupnom navýšení sa systém ustálil zhruba 30 °C pod požadovanou hodnotou, pričom teplota sa udržiavala konštantná.
- **Zvyšovanie integračnej zložky (KI):** Prebiehalo veľmi jemne, po desatinách až stotinách, až do momentu, kým bola dosiahnutá cieľová teplota s požadovanou presnosťou.

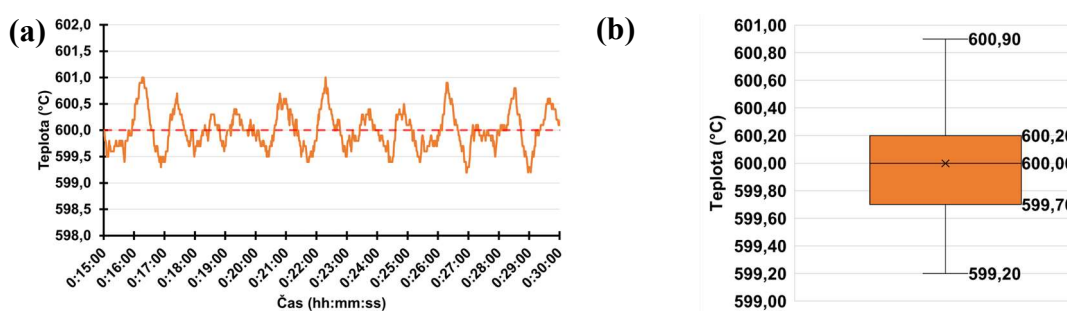
Vzhľadom na to, že nebolo potrebné reagovať na rýchle zmeny, derivačná zložka (KD) nebola zavedená. Použitý regulátor teda pracuje ako PI regulátor. Po nájdení vhodných KP a KI konštánt (vid' Tab. 6-2) bol extrudér ochladený na izbovú teplotu a opäť zahriaty, aby sa overila reprodukovateľnosť regulácie. Po ustálení teploty bol vyhotovený 15-minútový záznam, z ktorého bola určená premenlivosť teploty v čase (vid' Obr. 6-17a).

Tab. 6-2 Odladené PID konštanty

	TELESO PREDOHREVVU 550 °C	TAVNÉ TELESO 600 °C
KP	5,00	6,00
KI	0,12	0,10
KD	0,00	0,00

Výsledky a hodnotenie

Zistená presnosť regulácie teploty sa po odladení pohybovala v rozsahu 599,2 – 600,9 °C, čo predstavuje rozdiel medzi maximom a minimom zaznamenananej teploty 1,7 °C (vid' Obr. 6-17). Výsledky ukázali, že regulátor dokáže udržať požadovanú teplotu aj v dlhšom časovom intervale, pričom reakcia systému je stabilná a bez výrazných oscilácií.

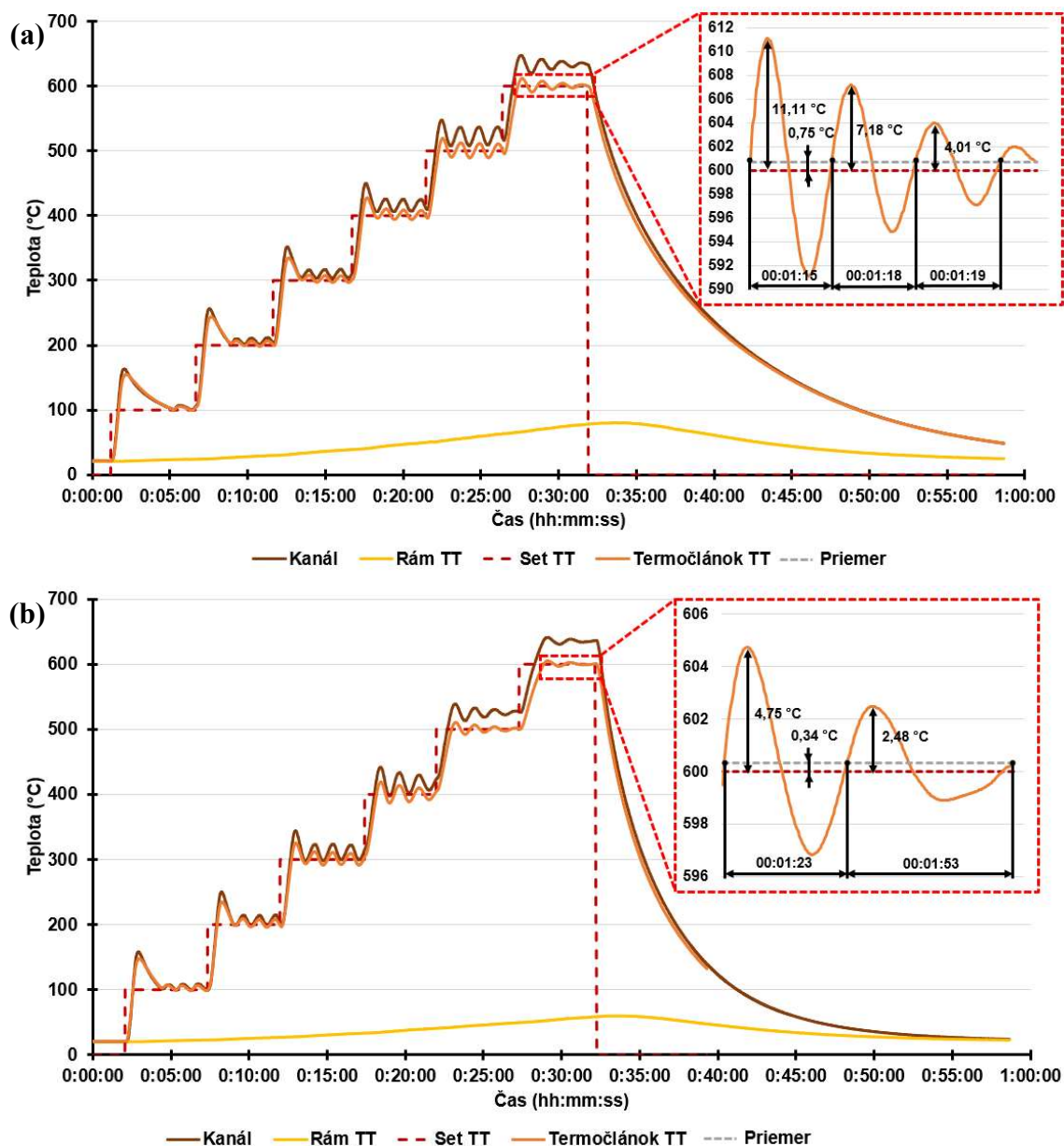


Obr. 6-17 Regulácia teploty na tavnom telese počas 15 min: a) Záznam teplota – čas; b) Rozsah a rozloženie zaznamenaných teplôt.¹³

Ďalším krokom bolo porovnanie správania systému s aktívnym chladením a bez neho, pričom boli použité rovnaké PI konštanty. Výsledky ukázali výrazné rozdiely:

- **BEZ chladenia (vid' Obr. 6-18a):** Vyššie prekmity nad nastavenú hodnotu, väčšia amplitúda a kratšia perióda oscilácií pri teplotách bližších nastavenej hodnote.
- **S chladením (vid' Obr. 6-18b):** Nižšia amplitúda výkyvov, ale dlhšia perióda. Chladenie zvyšuje tepelný odvod, čo vedie k pomalšiemu nárastu a poklesu teploty, a tým aj k celkovo pomalšej, ale stabilnejšej regulačnej odozve.

¹³ Teplota bola zaznamenaná pri týchto podmienkach: Tlak stlačeného vzduchu: 3,5 bar (0,35 MPa); Škrtiace ventily: Prstence TT a TP, Teleso predohrevu – ÚPLNE OTVORENÉ, Tavné teleso – ČIASTOČNE OTVORENÝ (10 – 15 %); Teplota: TT 600 °C a TP - °C; PID konštanty TT: KP 5,00 KI 0,08 KD 0,00.



Obr. 6-18 Postupný ohrev na teplotu 600 °C na tavnom telese: a) BEZ prívodu stlačeného vzduchu na TT a TP; b) S prívodom stlačeného vzduchu na TT a TP.¹⁴

Aj keď by sa dalo predpokladať, že systém bez chladenia bude reagovať rýchlejšie, v skutočnosti tomu tak nebolo – dôvodom bola nevhodnosť PI konštánt pre tento režim. Tie boli totiž odladené pre podmienky s aktívnym chladením. Pre optimalizáciu správania systému bez chladenia by bolo potrebné konštanty prispôbiť. Systém s chladením sa správa pomalšie, no stabilnejšie a umožňuje presnejšiu reguláciu. Bez chladenia je regulačný systém síce rýchlejší, ale vykazuje vyššiu mieru nestability. Správna voľba a odladenie PID konštánt je teda kritická pre každý konkrétny režim prevádzky.

¹⁴ Teplota bola zaznamenaná pri týchto podmienkach: Tlak stlačeného vzduchu: 1,5 bar (0,15 MPa); Škrtiace ventily: Prstence TT a TP - ÚPLNE OTVORENÉ, Tavné teleso a teleso predohrevu – ČIASTOČNE OTVORENÉ (10 – 15 %)/UZAVRETÉ; Teplota: TT 600 °C a TP 550 °C; PID konštanty TT: KP 5,00 KI 0,08 KD 0,00 a TP: KP 6,00 KI 0,10 KD 0,00

6.4.3 Meranie teplotného profilu

Príprava

Po stanovení požadovaných pracovných teplôt (550 °C na telese predohrevu a 600 °C na telese tavenia) a odladení regulácie teploty, bolo potrebné experimentálne overiť skutočný priebeh teploty pozdĺž tavného kanála, teda vo vnútri kapiláry. Cieľom bolo získať reálny teplotný profil, ktorý by umožnil overenie, či nedochádza k nežiaducemu taveniu materiálu ešte pred vstupom do tavného telesa.

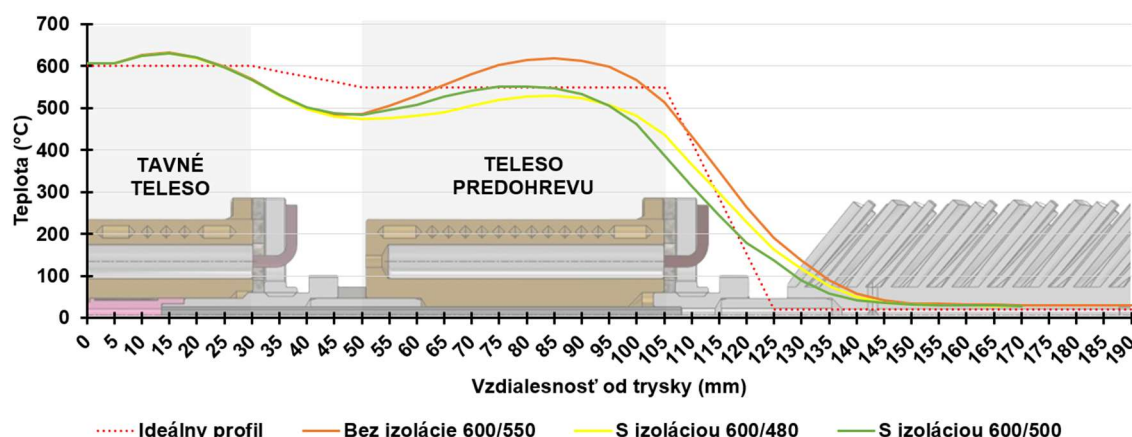
Na meranie bol použitý termočlánok typu K, ktorý bol zasunutý do kapiláry a pripojený k termometru Omega RDXL4SD. Meranie prebiehalo pri aktívnom chladení prstencov a vyhrievaných telies, tlakom stlačeného vzduchu 1,5 bar (0,15 MPa). PID konštanty boli nastavené podľa vyššie uvedenej tabuľky (viď Tab. 6-2).

Priebeh merania

Počas prípravy bolo najprv zahriate tavné teleso, počkalo sa na ustálenie teploty, a následne bolo zahriate aj teleso predohrevu. Po ustálení oboch teplôt sa po 5 minútach stabilizácie pristúpilo k meraniu. Meranie spočívalo v postupnom vyťahovaní termočlánku z kapiláry pomocou podávacieho mechanizmu. Celková dĺžka kanála, od trysky po podávacie kladky, bola 270 mm. Termočlánok bol každú minútu povytiahnutý o 5 mm, pričom jedna minúta bola ponechaná na stabilizáciu teploty v novej polohe. Takto bol získaný časový záznam závislosti teploty, ktorý bol následne spracovaný a prevedený na teplotný profil pozdĺž kapiláry. Spracovanie dát prebiehalo manuálne pomocou skriptu (viď Príloha D2), ktorý umožňoval manuálny výber časového intervalu a výpočet priemernej hodnoty teploty v danom úseku.

Výsledky a hodnotenie

Prvé meranie odhalilo (viď Obr. 6-19), že pri pôvodne nastavených teplotách bolo v jadre tavného telesa nameraných až 630 °C a v telese predohrevu takmer 620 °C. To znamenalo, že už v predohrievacej časti by mohla vzniknúť tavenina, ktorá by následne stuhla pri prechode do chladnejšej časti, čo by mohlo viesť k upchatiu kapiláry a prerušeniu extrúzie. Na základe tohto zistenia bola v druhom meraní znížená teplota predohrevu na 480 °C. Nameraná maximálna hodnota však dosiahla iba 530 °C, čo bolo na druhú stranu nižšie než požadovaná hodnota. Nakoniec sa ukázalo, že na dosiahnutie požadovaných 550 °C v jadre predohrievacieho telesa je potrebné nastaviť teplotu na 500 °C. Tým bolo zabezpečené, že sa v tejto časti nevytvára tavenina a materiál zostáva v tuhom stave.



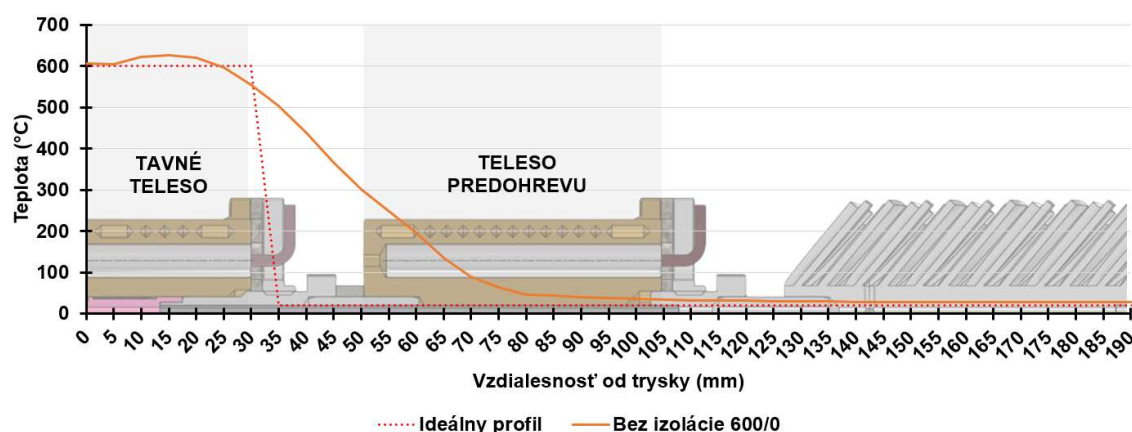
Obr. 6-19 Meranie teplotného profilu pozdĺž tavného kanálu (kapiláry) pri ohreve oboch telies

Teplota tavného telesa nemusela byť upravená, pretože cieľom je, aby práve v tejto časti došlo k taveniu materiálu. Vyššia teplota v oblasti trysky navyše vedie k nižšej viskozite taveniny, čo znižuje požiadavky na extrúznú silu. Finálne nastavenie teplôt pre extrúziu teda bolo:

- Teleso predohrevu: 500 °C,
- Tavné teleso: 600 °C.

Dodatočné pozorovanie: Efekt výhrevných elementov

V rámci merania bol realizovaný aj test, pri ktorom bolo zahrievané iba tavné teleso (bez predohrevu). V tomto prípade bol pozorovaný rovnako nekonštantný priebeh teplôt (viď Obr. 6-20), ako pri predošlých meraniach. Príčinou bola ako sa neskôr ukázalo konštrukcia samotných vyhrievacích elementov.



Obr. 6-20 Meranie teplotného profilu pozdĺž tavného kanálu (kapiláry) pri ohreve iba tavného telesa

Analýzou vyhrievacích patrón bolo zistené, že sa v ich vnútri nachádza odporový drôt, ktorého výhrevná časť tvorí len približne 1/3 z celkovej dĺžky elementu a je sústredená do strednej časti telesa. Z toho vyplýva, že najväčší tepelný výkon je sústredený v strede výhrevných telies, ako dokazujú i priebehy teplôt získaných vo vyššie popísaných meraniach.

6.4.4 Skúšobná extrúzia nízko-taviteľnej zliatiny

Príprava

Cieľom validačných experimentov bolo overiť schopnosť extrudéra spracovávať vybranú zliatinu AlSi5 v polotuhom stave. Zliatina bola počas testovania zahrievaná v tavnom telese na teploty v rozmedzí 600–630 °C, čomu zodpovedal podiel kvapalnej fázy od 0,40 do 1,00. V počiatočných experimentoch bola zliatina predohrievaná na teplotu 500 °C, pričom v telese bolo dosahovaných požadovaných 550 °C. Teplotné podmienky boli regulované prostredníctvom dvoch PID regulátorov. Najčastejšie používané nastavenia konštánt sú uvedené v tabuľke nižšie (viď Tab. 6-3).

Tab. 6-3 Používané PID konštanty

	TELESO PREDOHREVVU	TAVNÉ TELESO
KP	6,00	5,00
KI	0,10	0,08–0,12
KD	0,00	0,00

Chladienie bolo zabezpečené stlačeným vzduchom s tlakom v rozsahu 1,5–3,5 bar (0,15–0,35 MPa). V neskorších fázach bol zavedený aj vodný okruh na telese predohrevu, ktoré tak namiesto ohrevu plnilo funkciu aktívneho chladiča. V prípade experimentov s ochranou proti oxidácii bol pridaný prívod argónu s nastaviteľným prietokom od 1,5 do 4,5 l·min⁻¹. V závislosti od experimentálneho nastavenia sa používala kapilára s priemerom 1,8 mm alebo 2,0 mm. V niektorých prípadoch bola keramická tryska odstránená, čím vznikol tavný kanál s konštantným prierezom.

Priebeh experimentu

Každý experiment prebiehal podľa ustáleného postupu. V prvej fáze bolo zapnuté chladienie – najskôr voda (ak bola použitá), následne stlačený vzduch. Pri experimentoch s ochrannou atmosférou bol ešte pred zapnutím tlačiarne spustený prívod argónu. Potom nasledovalo:

- Zapnutie 3D tlačiarne,
- Spustenie záznamu údajov z Arduina a kamery,
- Ohrev tavného telesa na cieľovú teplotu a jeho ustálenie,
- V prípade potreby následný ohrev telesa predohrevu a jeho ustálenie.

Filament bol do systému zavádzaný automaticky alebo manuálne. Počas samotného experimentu bolo priebežne sledované správanie systému – najmä odpor filamentu, charakter vytlačanej taveniny a výskyt porúch. Po ukončení experimentu nasledovalo:

- Vyhodnotenie záznamov a návrh úprav,
- Demontáž zostavy a vizuálna analýza,
- Zavedenie konštrukčných alebo technologických zmien,
- Opakovanie experimentu.

Výsledky a vyhodnotenie

Prvé experimenty s extrúziou materiálu v polotuhom stave odhalili viaceré problémy. Tieto komplikácie možno rozdeliť do dvoch hlavných skupín – komplikácie technického charakteru a komplikácie materiálového charakteru, prípadne ich kombinácie. Časť z nich sa podarilo identifikovať a vzhľadom na ich charakter navrhnúť vhodné úpravy. Následným zavedením týchto úprav do konštrukcie alebo do samotného experimentu sa podarilo čiastočne overiť schopnosť extrudéra vytláčať materiál z tavného telesa.

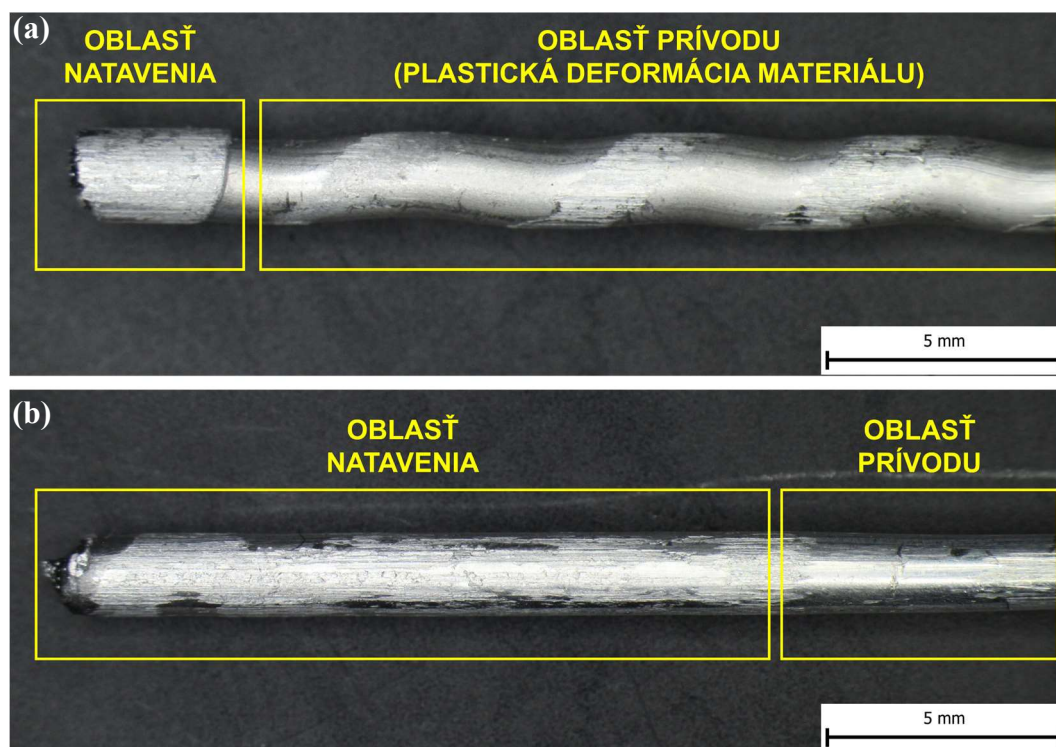
Už pri prvej demontáži extrudéra bolo zistené, že zostavu dotláčacej skrutky tavného telesa, prepojovacieho kolíka a tavnej kapiláry nie je možné rozobrať. Pravdepodobne došlo k ich vzájomnému difúznemu spojeniu alebo k lokálnej plastickej deformácii, spôsobenej kombináciou tepelnej rozťažnosti a geometrických odchýlok počas montáže a výroby. Tento problém bol riešený pasiváciou dotláčacej skrutky, čím sa na jej povrchu vytvorila oxidová vrstva slúžiaca ako ochranná bariéra. Zároveň bola medzi kontaktné plochy aplikovaná teplovodivá pasta, ktorá plnila funkciu fyzikálnej separačnej vrstvy. Ďalším opatrením bolo zlúčenie skrutky a kolíka do jedného telesa, čím sa eliminoval vplyv výrobných a montážnych odchýlok.

Počas experimentov došlo tiež k poškodeniu jedného z vyhrievacích elementov, pravdepodobne v dôsledku skratu na vinutí odporového drôtu. Následná analýza (vrátane rozrezania telesa) ukázala, že výhrevná časť patróny zaberá len zhruba jednu tretinu jej celkovej dĺžky a je sústredená v jej strede. Takéto konštrukčné riešenie významne ovplyvňuje priebeh teplotného poľa v telese, čo sa potvrdilo aj pri meraní teplotného profilu, viď kapitola 6.4.3.

Za dôležité sa ukázalo aj presné zosadenie jednotlivých komponentov. Pokiaľ bola zostava telesa predohrevu namontovaná tak, že vzdialenosti medzi jeho pripojovacími bodmi a pripojovacími bodmi zostavy tavenia na ráme neboli zhodné, dochádzalo k miernemu ohýbaniu kapiláry, čo spôsobovalo zvýšený odpor pri zasúvaní filamentu.

V experimentoch označených ako extrúzia 1 až 5 sa síce podarilo materiál úspešne zahriať a nataviť, no nedošlo k jeho plynulej extrúzii. V niektorých prípadoch sa z trysky objavila iba kvapka nataveného materiálu (viď Obr. 6-22a až b), čo poukazuje na segregáciu kvapalnej fázy. V takýchto situáciách pravdepodobne dochádzalo k stláčaniu priestorovej siete tuhých fáz, z ktorej bola tavenina vytláčaná. Táto sieť nebola dostatočne porušovaná šmykovým napätím, ale skôr deformovaná privádzaným materiálom. Logickým krokom na odstránenie tohto problému bolo zvýšenie teploty, ktorým sa znížil podiel tuhých fáz.

So zvyšovaním teploty však súviselo viacero komplikácií. Materiál sa pravdepodobne postupne taval a hladina nataveného objemu stúpa do oblastí, kde to ešte umožňuje teplotné pole. V týchto vyšších oblastiach však mohla tavenina zatuhnúť alebo zoxidovať, čím vznikla bariéra, ktorá bránila ďalšiemu prívodu materiálu. Okrem toho, zahrievaním materiál strácal svoje mechanické vlastnosti a pri vtláčaní do komory plasticke zdeformoval (viď Obr. 6-21a). Takto zdeformovaný filament sa následne pritláčal k stenám kapiláry, čím sa ďalej zvyšoval odpor proti jeho pohybu.



Obr. 6-21 Filament privádzaný do tavnej komory: a) Filament so špirálovito zdeformovanou oblasťou prívodu pri chladení telesa predohrevu stlačeným vzduchom; b) Filament s postupne sa rozširujúcou oblasťou prívodu pri použití vodného chladenia.

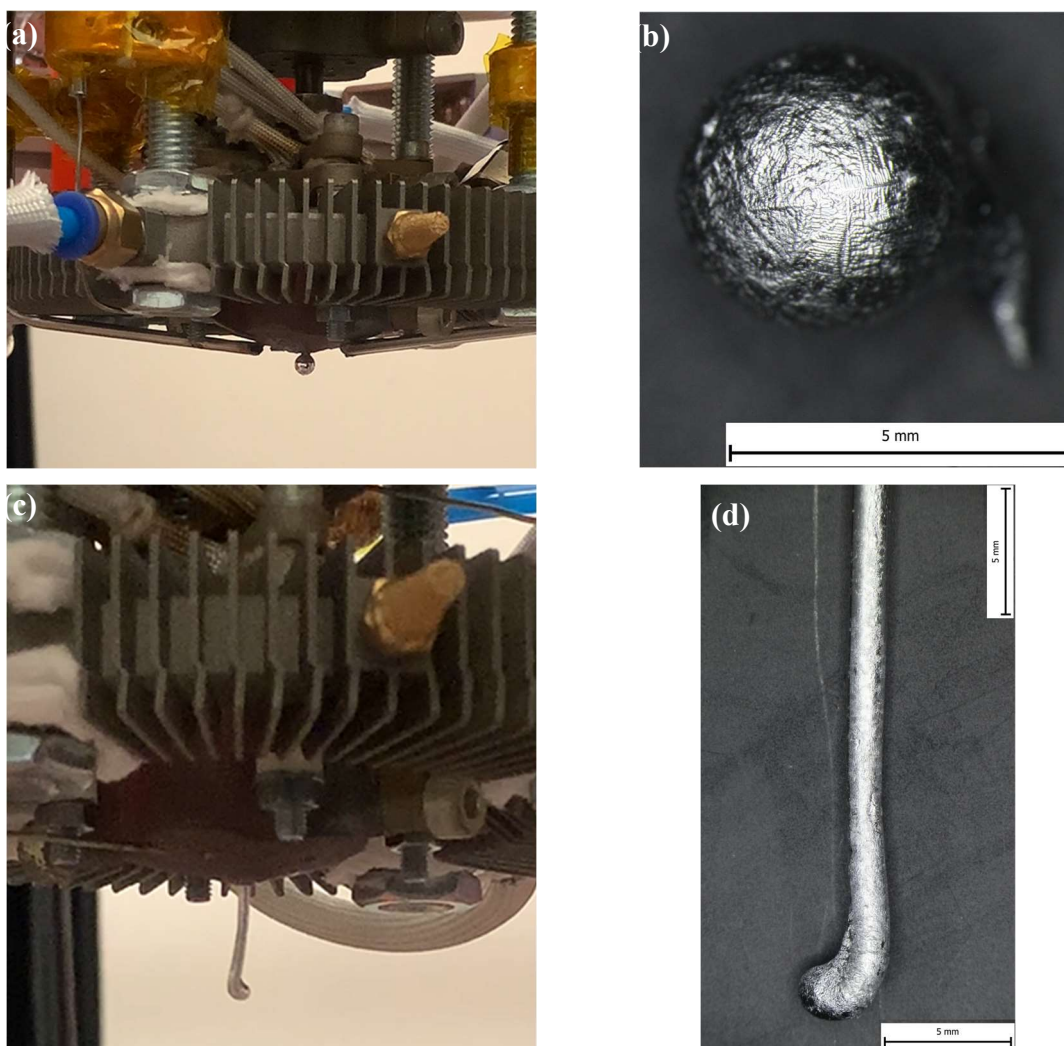
Zvyšovanie teploty síce znižovalo viskozitu polotuhého materiálu, avšak zároveň dochádzalo k nárastu iných odporových síl pôsobiacich proti pohybu materiálu. Výsledkom bolo, že pohonná jednotka nedokázala vyvinúť dostatočný krútiaci moment na prekonanie vzniknutého odporu, a extrúzia zlyhávala. Preto bolo pristúpené k viacerým úpravám:

- **Odstránenie trysky** so zužujúcim sa prierezom a ponechanie iba kapiláry s konštantným prierezom, čím sa znížil hydraulický odpor v poslednej časti tavného kanála.
- **Skrátenie vzdialenosti medzi TT a TP** odstránením prepojovacieho kolíka a ich priame, tesné zosadenie. Teleso predohrevu bolo následne využité ako aktívny chladič, podchladený pomocou vody na teplotu približne 10 °C. Tá bola privádzaná priamo z laboratórneho rozvodu cez navrhnuté chladiace kanáliky telesa. Tento krok významne zúžil oblasť ohrevu a prispel k jeho lokalizácii v kratšej časti kapiláry. Materiál sa plasticke nedeformoval (viď Obr. 6-21b), nedochádzalo tak k upchávaniu kapiláry.
- **Oxidácia taveniny** bola potlačená prívodom argónu. Pôvodne nastavený prietok $4,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ však pôsobil kontraproduktívne, pretože kvôli nízkej tepelnej vodivosti

argónu a jeho prúdenia okolo filamentu pôsobil zároveň ako chladivo, ktoré bránilo nataveniu filamentu. Znížením prietoku na $1,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ sa dosiahla rovnováha medzi ochranou atmosférou a udrжанím dostatočnej teploty v oblasti tavenia.

- **Nedostatočný výkon pohonnej jednotky** bol prekonaný najprv manuálnym zavádzaním filamentu, prípadne jeho kombináciou s automatickým posuvom. V neskorších experimentoch bol pohon nahradený silnejšou jednotkou s vyšším krútiacim momentom¹⁵.

Zavedením týchto úprav sa podarilo dosiahnuť úspešnú a opakovateľnú extrúziu materiálu, pričom natavený materiál bol schopný prejsť celou dĺžkou kapiláry až k výstupu. V najlepšom prípade sa podarilo extrudovať materiál o dĺžke približne 20 mm, bez prítomnosti keramickej trysky (viď Obr. 6-22c až d).



Obr. 6-22 Experiment s extrúziou zliatiny: a) Extrúzia s keramicou tryskou (Experiment 3); b) Kvapka extrudovaného materiálu a); c) Extrúzia s konštantným priemerom tavného kanálu bez trysky (Experiment 6); d) Vzorka vyextrudovaného materiálu c).

¹⁵ Je však potrebné uviesť, že experiment s výkonnejšou pohonnou jednotkou NEMA 23 (3 Nm) v kombinácii s planétovou prevodovkou s pomerom 20:1 sa z časových dôvodov nepodarilo zrealizovať.

6.5 Hodnotenie kľúčových parametrov

Cieľom tejto kapitoly je zhodnotiť mieru naplnenia cieľov, ktoré boli definované v kapitole 3. Tieto ciele predstavovali základné smerovanie práce a boli rozdelené do štyroch hlavných oblastí:

- definícia kľúčových parametrov extrudéra,
- návrh vyhrievacej komory extrudéra,
- realizácia prototypu extrudéra,
- overenie funkcie zariadenia na vybranej nízko-taviteľnej zliatine.

Na konci kapitoly je uvedená súhrnná tabuľka (viď Tab. 6-4), ktorá poskytuje prehľad všetkých cieľov, ich stav naplnenia a stručný komentár k ich dosiahnutiu. Táto tabuľka vychádza z pôvodnej tabuľky atribútov (viď Tab. 3-1), uvedenej v kapitole 3.

6.5.1 Definovanie kľúčových parametrov extrudéra

Kľúčové parametre extrudéra boli navrhnuté na základe systematickej rešerše zameranej na spracovanie kovových zliatin v polotuhom stave. Niektoré z nich boli následne priebežne overovaný počas návrhovej fázy pomocou analytických aj numerických výpočtov. Finálne boli tieto parametre validované v rámci testovacej prevádzky vyrobeného prototypu extrudéra. Medzi najdôležitejšie parametre, ktoré musí extrudér spĺňať pre úspešnú extrúziu zliatiny v polotuhom stave, patria:

- Zahriať zliatinu na teplotu, pri ktorej sa nachádza v polotuhom stave,
- Zabezpečiť dostatočné šmykové napätie na porušenie priestorovej siete tuhých fáz,
- Umožniť pretlačenie polotekutej zliatiny cez natavovaciu časť a trysku extrudéra,
- Zabezpečiť stály a spoľahlivý prívod materiálu do extrúzneho komory.

Ako ukázali realizované experimenty, navrhnuté parametre boli vhodne zvolené. Zliatinu sa podarilo opakovane zahriať do požadovaného polotuhého stavu a tento stav udržať po dostatočne dlhú dobu. Kľúčovými predpokladmi bolo presné riadenie teploty v oblasti tavného telesa a zabezpečenie ochranného atmosféry, ktoré boli dodržané.

Dostatočné šmykové napätie potrebné na narušenie priestorovej siete tuhých fáz sa podarilo dosiahnuť predovšetkým pri manuálnom zavádzaní filamentu do tavného kanála s konštantným prierezom. V súčasnosti pohonná jednotka nedosahuje potrebný točivý moment na zabezpečenie tejto funkcie v automatizovanom režime.

Pretláčanie polotekutej zliatiny cez natavovaciu časť sa podarilo iba v prípade, keď nebola použitá výstupná tryska. V opačnom prípade dochádzalo pravdepodobne k jej upchávaniu tuhými fázami, čo znemožnilo plynulú extrúziu materiálu. Tento jav môže súvisieť so zmenami mikroštruktúry spôsobenými izotermickou výdržou materiálu v oblasti tavného kanála. Na podrobné preskúmanie tohto vplyvu by bolo potrebné odoberať vzorky v definovaných časových intervaloch, okamžite ich schladiť a následne analyzovať ich mikroštruktúru.

Plynulý prívod materiálu sa nepodarilo zabezpečiť z dôvodu potreby manuálneho zavádzania filamentu. Na vyriešenie tejto nedokonalosti je potrebné použiť výkonnejšiu pohonnú jednotku schopnú zabezpečiť konzistentné podávanie materiálu.

Táto diplomová práca sa nezameriava na presnú kvantifikáciu jednotlivých parametrov, ako je napríklad veľkosť počiatočného šmykového napätia potrebného na iniciáciu toku materiálu. Vzhľadom na konštrukčný charakter práce bol dôraz kladený predovšetkým na overenie funkčnosti navrhnutého riešenia v praxi a identifikáciu kľúčových javov, ktoré ovplyvňujú spracovanie zliatiny v polotuhom stave. Je však zrejmé, že veľkosť potrebného šmykového napätia je silne závislá od geometrie tavného kanála a reologických vlastností zliatiny. Na získanie presnejších údajov by bolo vhodné použiť kapilárnu reometriu, pričom optimálne by bolo mať možnosť meniť parametre prietokového kanála (napr. jeho dĺžku a prierez). Takýto prístup by umožnil detailnejšie určiť nielen potrebné šmykové napätie, ale aj ďalšie reologické charakteristiky spracovávanej zliatiny.

6.5.2 Návrh vyhrievacej komory

Konštrukcia

Návrh vyhrievacej komory, pozostávajúcej z tavného a predohrievacieho telesa, bol inšpirovaný prácou N. Nezica et al. [6]. Vytvorená komora bola koncipovaná ako trojzónová zostava, skladajúca sa z chladiacej, predohrievacej a tavnej časti. Predohrev mal pôvodne slúžiť na zníženie nárokov na ohrev v tavnom telese a stabilizáciu teplotného poľa. Počas experimentov sa však ukázalo, že predohrev síce prispieva k zohriatiu materiálu, zároveň však spôsoboval neželané plastické deformácie privádzaného drôtu, čím vznikala výrazný odpor voči jeho plynulému prívodu. Tento problém sa podarilo eliminovať vďaka flexibilnému konštrukčnému riešeniu – predohrev bolo možné prestavať na aktívne chladenú zónu, pričom ako chladiace médium bola použitá voda.

Zvolená kombinácia materiálov jednotlivých častí extrudéra sa ukázala ako správna – komponenty spoľahlivo plnili svoju funkciu a zároveň umožňovali jednoduchú výmenu v prípade poruchy. Modulárna konštrukcia extrudéra umožňovala bezproblémovú montáž a demontáž. Výmena kritických dielov, ako je tryska alebo tavná kapilára, prebiehala pravidelne po každom experimente. V prípade výmeny trysky postačovalo odskrutkovať prítlačnú skrutku, pričom tryska, kapilára aj skrutka boli následne vysunuté ako jeden celok.

Nové komponenty bolo možné jednoducho nasadiť späť bez potreby zásahu do zvyšku zostavy.

Chladienie prostredníctvom dutých prstencov zabezpečilo, že teplota rámu extrudéra neprekročila 70 °C, čo bolo v súlade s očakávaniami. Extrudér bol plne kompatibilný s použitou 3D tlačiarňou a umožňoval teoreticky spracovanie drôtov rôznych priemerov, pričom bolo potrebné zvoliť vhodný rozmer tavnej kapiláry.

Narušenie priestorovej siete tuhých fáz bolo zabezpečované iba pasívne – vplyvom šmyku pri prúde cez zúžený tavný kanál, ktoré sa ukázalo byť nedostatočné. Tento efekt by bolo možné posilniť použitím vibračného piezoelektrického prvku, ktorý by aktívne napomáhal jej porušovaniu.

Elektroinštalácia a riadenie

Teplota v systéme bola úspešne riadená PI regulátorom implementovaným v Arduine. Výstupom regulátora bol PWM signál, ktorým sa ovládalo SSR relé (typ SSR-25DA), spínajúce odporové výhrevné telesá napájané z AC siete. Napriek tomu, že SSR-25DA nie je určené na vysokofrekvenčné PWM, systém fungoval stabilne vďaka tepelnej zotrvačnosti a dostatočnej dĺžke impulzov pri vyšších hodnotách PWM. Z technického hľadiska by však bolo vhodnejšie použiť softvérový PWM s nižšou frekvenciou (napr. 1 Hz), kde by sa SSR relé spínalo v sekundových cykloch.

Matematický model

Z hľadiska výpočtov a simulácií možno konštatovať, že predikovaný tepelný výkon, ako aj voľba štyroch výhrevných patrón každá s výkonom 100 W, boli dostatočné aj pre prípad, keď pracovalo len samotné tavné teleso.

Pokiaľ ide o numerické simulácie, ukázalo sa, že zvolené okrajové podmienky neumožňovali presné porovnanie s experimentálnymi meraniami. V simuláciách bol použitý konštantný prívod výkonu (5–100 W), zatiaľ čo v realite boli výhrevné telesá spínané medzi stavmi 0 W a 100 W. Vhodnejšou by bola podmienka konštantnej teploty v objeme výhrevného elementu. Táto možnosť však predpokladá znalosť rozloženia teploty v patróne, ktoré nie je rovnomerné vzhľadom na nerovnomernú distribúciu dodávaného výkonu. Ako riešenie sa javí použitie patrón so zabudovaným termočlánkom alebo viacerých termočlánkov rozmiestnených pozdĺžne ich umiestneniu v telesách. To by umožňovalo získať dáta, ktoré by následne mohli byť využité na spresnenie modelu – napr. delením patróny na segmenty alebo zavedením rovnomerného teplotného profilu. Zohľadnený by mal byť aj vplyv radiácie, ktorá je pri týchto teplotách významná.

Voľba pohonnej jednotky vychádzala z predikcie tlakových strát pomocou Ostwald-de Waeleho modelu, ktorý však neberie do úvahy počiatočné prekonanie medze sklzu. Pre presnejšiu predikciu by bolo vhodnejšie použiť Herschel-Bulkleyho model, ktorý túto vlastnosť zahŕňa.

Smerovanie vývoju

Za vhodné smerovanie ďalšieho vývoja možno označiť úpravu konštrukcie extrudéra nasledovne:

- Umožniť výmenu tavnej kapiláry bez nutnosti demontovať celú zostavu, ideálne cez demontovateľný spodný segment tavného telesa.
- V prípade výhrevných patrón zvážiť použitie elementov s rovnomernejšou distribúciou výkonu, prípadne viacerých menších prvkov s individuálnou reguláciou.
- Rozdeliť tavné teleso na viac segmentov s nezávislou reguláciou teploty, čím by sa zabezpečil lepší teplotný profil v tavnom kanáli.
- Optimalizovať teleso predohrevu pre funkciu aktívneho chladiča tak, aby v čo najkratšej oblasti vznikol maximálny teplotný gradient medzi ním a tavným telesom.

6.5.3 Realizácia prototypu extrudéra

Po výbere najvhodnejšieho koncepčného riešenia extrudéra – filamentového variantu – bol spracovaný kompletný CAD model extrudéra a všetkých funkčných podsystémov. Na základe tohto modelu bola vytvorená výkresová dokumentácia potrebná pre výrobu a montáž zariadenia. Výroba nenormalizovaných komponentov prebiehala pomocou aditívnej technológie L-PBF, pričom jednotlivé diely boli navrhnuté s dôrazom na zníženie potreby dodatočného obrábania. K oneskoreniu výroby došlo v dôsledku zmeny technológie obrábania funkčných plôch. Súčasti, ktoré podliehajú vysokým teplotám a mechanickému namáhaniu, boli vyrobené z materiálov ako INCONEL 939 a AISI 304. Komerčne dostupné diely (výhrevné telesá, prvky pneumatických obvodov, elektronika, spojovací materiál) boli objednané a doručené v požadovanom termíne.

Samotný proces montáže prebiehal bez výrazných komplikácií. Vďaka modulárnemu návrhu bolo možné jednotlivé časti zostaviť intuitívne a bez potreby dodatočných úprav. Osadenie výhrevných telies, senzoriky a chladiacich prvkov bolo realizované podľa technickej dokumentácie. Zároveň bol naprogramovaný riadiaci systém, ktorý zabezpečuje presnú reguláciu teploty pomocou PID regulátora.

Celkové náklady na výrobu nenormalizovaných dielov a nákup komponentov dosiahli hodnotu 100 108 CZK s DPH, čo bolo o 40 % viac než plánované náklady. Z hľadiska stanovených cieľov možno výrobu a montáž hodnotiť ako úspešnú – všetky fázy boli dokončené včas, v súlade s technickými požiadavkami.

6.5.4 Overenie funkcie na vybranej nízko-taviteľnej zliatine

Validačné experimenty predstavovali záverečnú a súčasne najdôležitejšiu fázu vývoja extrudéra. Ich cieľom bolo overiť funkčnosť zariadenia v podmienkach blízkych reálnej prevádzke, s dôrazom na schopnosť stabilného spracovania materiálu v polotuhom stave. Postup experimentov reflektoval potrebu iteratívneho ladenia systému, kde každé pribežné zistenie viedlo k úpravám konštrukcie alebo parametrov procesu.

Výber materiálu a nastavenie pracovných teplôt

Ako referenčná zliatina bola zvolená AlSi5, ktorá sa vyznačuje vhodným zložením, relatívne širokým polotuhým pásmom (54°C). Vďaka známej DSC analýze bolo možné spoľahlivo určiť procesné teploty, čo výrazne prispelo k predikcii správania zliatiny počas ohrevu a extrúzie. Táto voľba sa ukázala ako opodstatnená a umožnila postupné doladenie parametrov systému.

V budúcnosti by mal byť testovaný širší rozsah zliatin s rôznymi podielmi kvapalnej fázy, aby sa overila univerzálnosť navrhnutého systému. Zároveň sa odporúča získať informácie reologických vlastnostiach zliatin pre návrhov a numerické simulácie.

Teplotná regulácia a meranie teplotného profilu

Riadiaci systém na báze PID regulácie umožnil stabilné udržiavanie teploty s presnosťou pod ± 2 °C, čo bolo experimentálne overené. Pri ladení sa ukázalo, že aktívne chladenie stlačeným vzduchom výrazne zvyšuje stabilitu systému a minimalizuje výkyvy teploty, hoci za cenu pomalšej odozvy.

Meranie pozdĺžneho teplotného profilu poukázalo na dôležité rozdiely medzi nastavenými a skutočnými teplotami v kapiláre. Zistené teplotné maximum v oblasti predohrevu presahovalo hranicu solidus, čo mohlo viesť k predčasnému taveniu materiálu. Táto odchýlka bola úspešne eliminovaná znížením cieľovej teploty na výhrevnom telese. Experiment zároveň potvrdil nerovnomerné rozloženie teploty vo výhrevných patrónach, čo bolo spôsobené ich vnútornou konštrukciou.

V ďalšej nadväznosti práce by sa malo venovať väčšia pozornosť metodike merania teplotného profilu. Aktuálne používaná metóda založená na statickom meraní – postupné vysúvanie termočlánku po 5 mm s intervalom jednej minúty – poskytuje skôr stacionárny obraz teplotného poľa. Vzhľadom na dynamickú povahu extrúzného procesu by bolo vhodnejšie zvoliť opačný prístup – teda plynulé zasúvanie termočlánku, ktoré lepšie vystihuje podmienky počas prevádzky extrudéra. Takéto meranie by lepšie simulovalo reálne podmienky, ktorým je vystavený privádzaný materiál, a mohlo by priniesť relevantnejšie údaje o teplotách priamo ovplyvňujúcich spracovávanú zliatinu.

Skúšobná extrúzia a optimalizácia parametrov

Priebeh experimentov ukázal, že extrúzia v polotuhom stave predstavuje technicky náročný proces s citlivosťou na teplotu, tvar tavného kanála a točivý moment pohonnej jednotky. Prvé pokusy odhalili viacero problémov, ako napr. upchávanie kapiláry, segregáciu taveniny alebo deformáciu filamentu. Všetky tieto javy boli dôsledkom buď neoptimálneho teplotného režimu, nevhodného kontaktu komponentov, alebo nedostatočného výkonu pohonnej jednotky.

Postupným zavádzaním technických a technologických úprav – napr. nahradením keramickej trysky, úpravou chladiaceho režimu na telese predohrevu, aplikáciou ochrannej atmosféry a manuálnym zavádzaním filamentu – sa podarilo dosiahnuť stabilný režim, pri ktorom bol materiál opakovane vytláčaný cez vyhrievanú časť kapiláry. Extrúzia bola síce obmedzená na krátky úsek (cca 20 mm), no aj tento výsledok je z pohľadu overenia funkčnosti zariadenia významný.

Budúci vývoj by sa mal sústrediť na riadenie šmykového napätia počas extrúzie – napr. zavedením vibračného piezoelektrického prvku. Odporúča sa aj rozšírenie experimentov o sledovanie tlaku a sily potrebnej na pretlačenie materiálu, čo môže slúžiť ako vstup pre automatizované riadenie procesu. Vhodné by bolo doplniť zariadenie o silomer alebo snímač odporu podávacieho mechanizmu.

Tab. 6-4 Hodnotenie dosiahnutia stanovených cieľov

CIEĽ	METRIKA	ZÁVER	HODNOTENIE
Skonštruovať extrudér pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin	Kompletný návrh a montáž extrudéra	Extrudér bol úspešne navrhnutý a zmontovaný, preukázal funkčnosť v rámci experimentov.	Splnené
Extrudér by mal extrudovať materiál v polotuhom stave	Experimentálne overenie funkčnosti v polotuhom stave	Zliatina bola opakovane zahriata do polotuhého stavu a extrudovaná. Funkčnosť bola potvrdená počas manuálneho zavádzania filamentu.	Čiastočne splnené
Extrudér by mal pracovať s materiálom v podobe drôtu s priemerom 1,6 - 2 mm	Kompatibilita podávacieho mechanizmu a kapiláry	Extrudér umožňoval spracovanie drôtu požadovaného priemeru. Pri výmene bolo potrebné zvoliť vhodný vnútorný priemer kapiláry (1,8/2,0/2,2).	Splnené
Extrudér by mal byť kompatibilný s 3D tlačiarňou, ktorá bola vyvinutá v rámci predošlého výskumu na UMVI	Mechanické a softvérové prepojenie	Extrudér bol úspešne inštalovaný do tlačiarne z predošlého výskumu, montáž prebehla len s minimálnymi úpravami rámu.	Splnené
Extrudér by byť schopný zahriať materiál najviac na teplotu 700 °C vo vyhrievanej komore	Meranie max. dosiahnuteľnej teploty	Vyhrievacie telesá (4×100 W patróny) umožnili dosiahnutie max. teploty nad 730 °C, systém bol navrhnutý až do 700 °C.	Splnené
Navrhovaný extrudér by mal byť modulárny	Demontovateľnosť a výmena dielov	Konštrukcia umožňuje výmenu trysky a tavnej kapiláry bez zásahu do celého zariadenia.	Splnené
Kľúčové komponenty extrudéra by mali mať flexibilný návrh	Prispôsobenie funkcií – predohrev, chladenie	Predohrev mohol byť upravený na aktívne chladenie.	Splnené
Zariadenie by malo byť bezpečné	Funkčnosť bezpečnostných prvkov	Pri poruche výhrevného telesa sa bezpečnostné prvky aktivovali. Nezaznamenal sa priesak taveniny.	Splnené
Riadiaci systém by mal umožňovať presnú reguláciu teploty taveného materiálu	Presnosť PID regulácie	PID regulácia umožnila stabilné udržiavanie teploty s presnosťou $\pm 0,85$ °C, potvrdené experimentálne.	Splnené

7 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberala návrhom, realizáciou a experimentálnym overením funkčnosti extrudéra určeného pre 3D tlač nízko-taviteľných kovových zliatin v polotuhom stave. Cieľom bolo vyvinúť zariadenie, ktoré by umožňovalo extrúziu kovového drôtu so zohľadnením presne riadeného ohrevu do parciálne nataveného stavu a zabezpečilo stabilnú a kontrolovanú extrúziu materiálu.

Na základe rešeršnej analýzy a vyhodnotenia viacerých návrhov konštrukčných koncepcií bol ako najvhodnejšie riešenie zvolený filamentový extrudér. Jeho konštrukcia bola navrhnutá so zreteľom na vysokú tepelnú odolnosť, možnosť presného riadenia teploty, aktívne chladenie jednotlivých zón a jednoduchú údržbu. Na výrobu komponentov extrudéra bola použitá kombinácia aditívnej výroby a tradičných obrábacích technológií, pričom ako konštrukčné materiály boli zvolené Inkonel 939, AISI 304, AlSi10Mg a keramika Al_2O_3 .

Experimentálne overenie funkčnosti prebehlo s využitím zliatiny AlSi5. Počas testovania boli optimalizované procesné parametre ako teplota v tavnej komore, ochrana inertnou atmosférou. Merania preukázali, že zariadenie umožňuje stabilnú extrúziu pri teplote približne 630 °C a manuálnom privádzaní filamentu.

Medzi hlavné prínosy vyvinutého extrudéra možno zaradiť:

- Realizáciu extrúzie kovového materiálu v polotuhom stave,
- Možnosť presnej a stabilnej regulácie teploty s presnosťou $\pm 0,85$ °C,
- Využitie lacnejšieho, dostupnejšieho a bezpečnejšieho vstupného materiálu vo forme drôtu,
- Modulárnu a flexibilnú konštrukciu umožňujúcu jednoduchú výmenu komponentov.

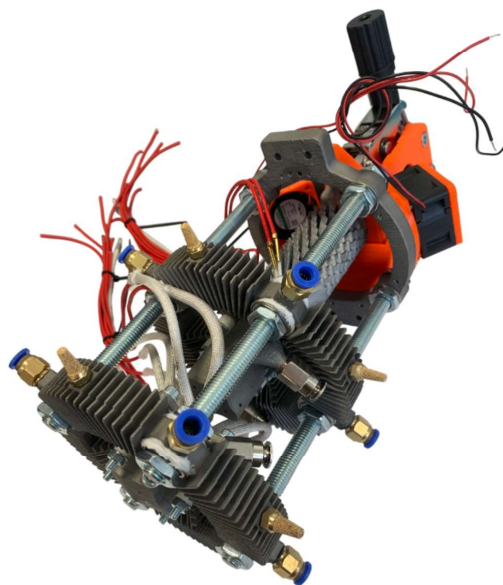
Možné smerovanie budúceho vývoju zahŕňa najmä:

- Optimalizácia konštrukcie extrudéra, najmä v oblasti tavného telesa a prechodu medzi ním a chladičom na dosiahnutie väčšieho teplotného gradientu,
- Voľba vhodnejšej pohonnej jednotky,
- Implementáciu pokročilej viaczónovej teplotnej regulácie tavného telesa s využitím PID algoritmov a aktívneho vodného chladiča,
- Prehľadenie poznatkov o vplyve procesných parametrov na výslednú mikroštruktúru výtlačkov,
- Rozšírenie testovania na iné typy zliatin ako napr. Mg, SnBi alebo AlMg,
- Dlhodobé testy zamerané na životnosť komponentov a stabilitu procesu pri opakovanej prevádzke.

Záverom možno konštatovať, že navrhnutý a overený prototyp potvrdil technickú uskutočniteľnosť 3D tlače kovov v polotuhom stave. Práca tak vytvára pevnú bázu pre ďalší vývoj a optimalizáciu tejto technológie v oblasti nízkonákladovej a efektívnej aditívnej výroby kovových súčiastok.

8 VÝSLEDKY PODĚA RIV

Extrudér pro 3D tisk nízko-tavitelných kovových slitin



Apollo ID: 197950

Datum: 22.5.2025

Typ výsledku: G - funkční vzorek

Autoři: Bc. Tomáš Slezák, doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Technický popis:

Funkční vzorek extrudéru je určen pro 3D tisk nízko-tavitelných kovových slitin v polotuhém stavu. Zařízení umožňuje zpracování drátu o průměru 1,6-2,0 mm při teplotách 400-700°C. Vytlačovací zařízení se skládá z hlavního chladiče, předehřívacího tělesa, tělesa taveniny, podávacího mechanismu, rámu a doplňkových systémů (čidla, přívod inertní atmosféry, řídicí jednotka). Extrudér zajišťuje přesnou regulaci teploty pomocí PID regulátoru, aktivní chlazení a ochranu taveniny inertní atmosférou. Hlavní komponenty byly optimalizovány pro výrobu technologií L-PBF a modulární koncepce umožňuje výměnu spotřebních dílů a využití pro experimenty s novými materiály.

Základní technické parametry

- Vstupní materiál: drát 1,6-2,0 mm
- Rozsah pracovních teplot: 400-700 °C
- Přesnost regulace teploty: ± 2 °C (PID)
- Celkový tepelný výkon topných těles: 2×400 W (předehřívací a tavicí těleso)
- Rozměry: 170 × 145 × 320 (mm × mm × mm)

Způsob realizace

Klíčové komponenty byly vyrobeny pomocí aditivní technologie laserové fúze v práškovém loži (L-PBF). Funkční povrchy byly dokončeny pomocí elektro-erozivního hloubení a CNC obrábění. Po montáži byla funkce ověřena experimenty.

Výsledky zkoušek, použití

Výsledky testování jsou popsány v diplomové práci hlavního autora funkčního vzorku.

SLEZÁK, Tomáš. Konstrukce extrudéru pro 3D tisk nízko-tavitelných kovových slitin. Diplomová práce. Daniel KOUTNÝ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.

Vazba na projekt

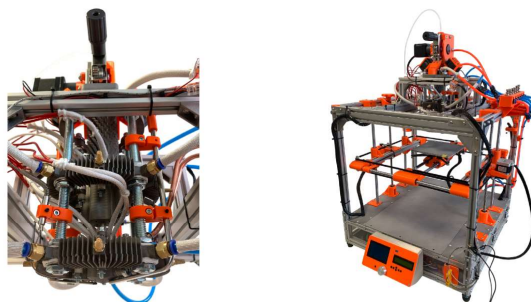
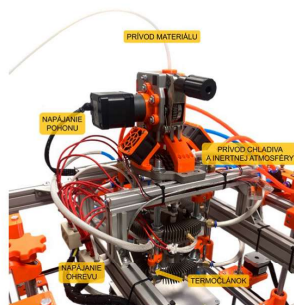
FSI-S-23-8340 – Aditivní výroba pokročilých materiálů a struktur

Umístění

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
61669 Brno
místnost D5/465

Kontaktní osoba

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Fotografická dokumentace**Funkční schéma**

Prohlašuji, že popsaný výsledek naplňuje definici uvedenou v Příloze č. 2 Metodiky hodnocení výsledků výzkumu, experimentálního vývoje a inovací pro rok 2025, a že jsem si vědom důsledků plynoucích z porušení § 14 zákona č. 130/2002 Sb. (ve znění platném od 1. července 2009). Prohlašuji rovněž, že na požádání předložím technickou dokumentaci výsledku.

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] ISO/ASTM 52900:2021(en): Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. 2. 2021. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>.
- [2] SHARMA, Gourav K; PANT, Piyush; JAIN, Prashant K; KANKAR, Pavan K a TANDON, Puneet. Analysis of novel induction heating extruder for additive manufacturing using aluminum filament. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021, roč. 235, č. 12, s. 1961-1970. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/09544054211014451>.
- [3] SHARMA, Gourav K; PANT, Piyush; JAIN, Prashant K; KANKAR, Pavan K a TANDON, Puneet. On the suitability of induction heating system for metal additive manufacturing. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021, roč. 235, č. 1-2, s. 219-229. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0954405420937854>.
- [4] JABBARI, Amin a ABRINIA, Karen. Developing thixo-extrusion process for additive manufacturing of metals in semi-solid state. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, roč. 35, s. 664-671. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.031>.
- [5] JABBARI, Amin a ABRINIA, Karen. A metal additive manufacturing method: semi-solid metal extrusion and deposition. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 94, č. 9-12, s. 3819-3828. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1058-7>.
- [6] NEZIC, N.; SPETH, Marco; ROUVEN RIEDMÜLLER, Kim a LIEWALD, Mathias. Development of a new method utilizing semi-solid aluminum wires for extrusion based additive manufacturing. Online. *Materials Research Proceedings*. 2023, roč. 2023, č. 28, s. 75-84. ISSN 24743941. Dostupné z: <https://doi.org/10.21741/9781644902479-9>. [cit. 2023-11-07].
- [7] LIMA, Dalton Daniel; CAMPO, Kaio Niitsu; BUTTON, Sergio Tonini a CARAM, Rubens. 3D thixo-printing: A novel approach for additive manufacturing of biodegradable Mg-Zn alloys. Online. 2020, roč. 196. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109161>.

- [8] CHEN, Wen; THORNLEY, Luke; COE, Hannah G.; TONNESLAN, Samuel J.; VERICELLA, John J. et al. Direct metal writing: Controlling the rheology through microstructure. Online. *Applied Physics Letters*. 2017, roč. 110, č. 9. ISSN 0003-6951. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.4977555>.
- [9] STRATASYS, INC., MINNEAPOLIS, MINN (USA). *Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects*. 1992. Přihl.: 10.10.1989. Uděl.: 09.06.1992. US005121329A. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/023701397/publication/US5121329A?q=5121329>.
- [10] ALTIPARMAK, Sadettin Cem; YARDLEY, Victoria A.; SHI, Zhusheng a LIN, Jianguo. Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, roč. 83, s. 607-636. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.032>.
- [11] S. RICE, Christopher. *Solid freeform fabrication using semi-solid processing*. Master Thesis, vedoucí Stuart B. Brown. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. Department of Materials Science and Engineering, 1995. Dostupné z: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/32166>.
- [12] RICE, Christopher S.; MENDEZ, Patricio F. a BROWN, Stuart B. Metal solid freeform fabrication using semi-solid slurries. Online. *JOM*. 2000, roč. 52, č. 12, s. 31-33. ISSN 1047-4838. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0065-5>.
- [13] *Method and Apparatus for Metal Solid Freeform Fabrication Utilizing Partially Solidified Metal Slurry*. Přihl.: 1994-11-22. Uděl.: 1999-10-10. US5622216A. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/023344787/publication/US5622216A?q=pn%3DUS5622216A>.
- [14] FINKE, S. a FEENSTRA, F. K. Solid freeform fabrication by extrusion and deposition of semi-solid alloys. Online. *Journal of Materials Science*. 2002, roč. 37, č. 15, s. 3101-3106. ISSN 00222461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1016137723481>.
- [15] FINKE, S.; WEI, W. a FEENSTRA, F. K. Extrusion and Deposition of Semi-Solid Metals. Online. 1999. Dostupné z: <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/1999/1999-074-Finke.pdf>.

- [16] SPENCER, D. B.; MEHRABIAN, R. a FLEMINGS, M. C. Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range. Online. *Metallurgical Transactions*. 1972, roč. 3, č. 7, s. 1925-1932. ISSN 0026-086X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02642580>.
- [17] N. TURNER, Brian; STRONG, Robert a A. GOLD, Scott. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Online. *Rapid Prototyping Journal*. 2014, roč. 20, č. 3, s. 192-204. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>.
- [18] BELLINI, Anna; GUCCI, Selcuk a BERTOLDI, Maurizio. Liquefier Dynamics in Fused Deposition. Online. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2004, roč. 126, č. 2, s. 237-246. ISSN 1087-1357. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.1688377>.
- [19] DOMBROWSKI, Ulrich; HUSGEN, Ulrich; KALWA, Matthias; MEIER, Michael a SCHWENZER, Claus. *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*. 2. Hanser Publishers, 1992. ISBN 3-446-16190-2.
- [20] FLEMINGS, M. C. Semi-solid forming: The process and the path forward. Online. *Metallurgical Science and Technology*. 2000, č. Vol. 18 (2), s. 3-4. Dostupné z: <https://www.fracturae.com/index.php/MST/article/view/1063/1016>.
- [21] FEI, Yifan; XU, Jie; YAO, Donggang a ZHOU, Jack. From semisolid metal processing to thixotropic 3D printing of metallic alloys. Online. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022, roč. 17, č. 3, s. 489-507. ISSN 1745-2759. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2045674>.
- [22] AHMAD, A.H.; NAHER, S.; AQIDA, S.N. a BRABAZON, D. Routes to Spheroidal Starting Material for Semisolid Metal Processing. Online. *Comprehensive Materials Processing*. 2014, s. 135-148. ISBN 9780080965338. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00515-X>.
- [23] ROGAL, Ł. Critical assessment: Opportunities in developing semi-solid processing: Aluminium, magnesium, and high-temperature alloys. Online. *Materials Science and Technology*. 2017, roč. 33, č. 7, s. 759-764. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1295212>.

- [24] ATKINSON, Helen V. Alloys for Semi-Solid Processing. Online. *Solid State Phenomena*. 2012, roč. 192-193, s. 16-27. ISSN 1662-9779. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.192-193.16>. [cit. 2025-03-21].
- [25] ATKINSON, H.V. Modelling the semisolid processing of metallic alloys. Online. *Progress in Materials Science*. 2005, roč. 50, č. 3, s. 341-412. ISSN 00796425. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.04.003>.
- [26] LARSON, Ronald G. a WEI, Yufei. A review of thixotropy and its rheological modeling. Online. *Journal of Rheology*. 2019, roč. 63, č. 3, s. 477-501. ISSN 0148-6055. Dostupné z: <https://doi.org/10.1122/1.5055031>.
- [27] ŠLEZAK, Marta. Study of Semi-Solid Magnesium Alloys (With RE Elements) as a Non-Newtonian Fluid Described by Rheological Models. Online. *Metals*. 2018, roč. 8, č. 4. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met8040222>.
- [28] ZHANG, Qi; LI, Hao; HAN, Bin; HUANG, Ke; FANG, Xuewei et al. A distinctive Pb-Sn semi-solid additive manufacturing using wire feeding and extrusion. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, roč. 80, s. 247-258. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.006>.
- [29] DE LIMA, Dalton Daniel; CAMPO, Kaio Niitsu a CARAM, Rubens. Coupling thermodynamic simulation and thermal analysis to select Sn–Bi alloys for semisolid additive manufacturing. Online. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023, roč. 148, č. 18, s. 9423-9433. ISSN 1388-6150. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12337-4>.
- [30] JI, S a FAN, Z. Extruded microstructure of Zn–5 wt-Al eutectic alloy processed by twin screw extrusion. Online. *Materials Science and Technology*. 2012, roč. 28, č. 11, s. 1287-1294. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/1743284712Y.00000000064>.
- [31] HERHOLD, Lars. *Modeling and validations of control parameters for material extrusion-based additive manufacturing of thixotropic aluminum alloys*. Dissertation, vedoucí Brent Stucker. Louisville, Kentucky, USA: University of Louisville, 2018. Dostupné z: <https://ir.library.louisville.edu/etd/3055/>.
- [32] ENGLERT, Lukas; KLUMPP, Alexander; AUSLÄNDER, Antonia; SCHULZE, Volker a DIETRICH, Stefan. Semi-solid wire-feed additive manufacturing of

- AlSi7Mg by direct induction heating. Online. *Additive Manufacturing Letters*. 2022, roč. 3. ISSN 27723690. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100067>.
- [33] PRASAD, A. Kishore; KAPIL, S. a BAG, S. Critical conditions for melting of metallic wire in induction heating system through numerical simulation and experiments. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, roč. 77, s. 678-693. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.054>.
- [34] MISAL, Pravin S. a CHANDRASHEKHAR, N. S. Design of Feedstock and Liquefier for Printing Aluminium Parts by Fused Deposition Modeling. Online. *Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019, s. 171-180. ISBN 978-981-13-2489-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2490-1_16.
- [35] STRATASYS, INC., (USA). *SYSTEM AND METHOD FOR BUILDING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS WITH METAL-BASED ALLOYS*. Přihl.: 24.06.2008. Uděl.: 24.12.2009. US2009314391A1. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/040951536/publication/US2009314391A1?q=20090314391>.
- [36] *ADDITIVE MANUFACTURING APPARATUS USING A SEMI-SOLID EXTRUSION OF WIRE*. Přihl.: 19.02.2018. Uděl.: 11.10.2018. US2018290194A1. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/083284322/publication/US2018290194A1?q=pn%3DUS2018290194A1>.
- [37] *Semisolid metal additive manufacturing equipment and process based on direct resistance heating technology* (CN110202139A). Přihl.: 23.05.2019. Uděl.: 09.06.2019. Dostupné z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/067788450/publication/CN110202139A?q=pn%3DCN110202139A>.
- [38] KAUPPILA, Ile. *The Best Metal 3D Printers in 2023: Additive Metallurgy*. Online. All3DP Pro. 2023. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>.
- [39] *316L Stainless Steel Powder – SS316L*. Online. 3D Powder Hub™. Dostupné z: <https://www.3dpowderhub.com/product/316-stainless-steel-powder/>. [cit. 2023-10-16].

- [40] ATREON - HUTNÍ MATERIÁL. *Nerezová čtvercová ocel tažená 40x40 mm (1.4404)*. Online. Atreon.cz. Dostupné z: <https://www.atreon.cz/nerezova-ctvercova-ocel-tazena--40x40-mm--1-4404/>. [cit. 2023-10-16].
- [41] SLEZÁK, Tomáš. *Návrh extrudéru a experimentálního materiálu pro tisk poloroztaveným kovem*. Bakalárska práca, vedoucí Jan, Vít. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2023. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/213170>.
- [42] POKORNY INDUSTRIES S.R.O. *POWER® therm - 5501*. Online. Dostupné z: https://pokornyindustries.b-cdn.net/category-files/20240822094938_Pokorny%20industries%20katalog%2011-2023-online.pdf.
- [43] STEATIT S.R.O. *Steatit*. Online. Dostupné z: https://www.steatit.cz/material_steatit.
- [44] AZOM. *Alumina - Aluminium Oxide - Al₂O₃ - A Refractory Ceramic Oxide*. Online. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=52>.
- [45] FILAMENTPM. *PETG - Oranžová*. Online. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg-oranzova-1-75-mm-1-kg/p51>.
- [46] BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION. *Elevated temperature physical properties of stainless steels*. Online. Dostupné z: https://bssa.org.uk/bssa_articles/elevated-temperature-physical-properties-of-stainless-steels/.
- [47] MATWEB. *Special Metals INCONEL® Alloy 718*. Online. Dostupné z: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=94950a2d209040a09b89952d45086134.
- [48] VIRGAMET. *Alloy 718, 2.4668, UNS N07718, Inconel® 718 - Nickel Alloy*. Online. Dostupné z: <https://virgamet.com/offer/alloy-inconel-718-2-4668-n07718-bs2901-na51-ncf718-chn55mbju>.
- [49] XOMETRY. *Aluminium AlSi10Mg*. Online. Dostupné z: <https://xometry.pro/wp-content/uploads/2023/08/Aluminium-1706-1.pdf>.
- [50] INTERNATIONAL MAGNESIUM ASSOCIATION. *Physical Properties of Mg*. Online. Dostupné z: https://www.intlmag.org/page/basics_phys_prop_ima.

- [51] YAN, Hong; RAO, Yuansheng a CHEN, Guoxiang. Rheological behavior of semi-solid AZ91D magnesium alloy at steady state. Online. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2015, roč. 30, č. 1, s. 162-165. ISSN 1000-2413. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1119-4>.
- [52] POLA, Annalisa; ROBERTI, Roberto; MODIGELL, Michael a PAPE, Lars. Rheological Characterization of a New Alloy for Thixoforming. Online. *Solid State Phenomena*. 2008, roč. 141-143, s. 301-306. ISSN 1662-9779. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.141-143.301>.
- [53] *Unraveling the Impact: How Temperature Affects Skin Burns*. Online. Dostupné z: <https://cprcertificationnow.com/blogs/mycpr-now-blog/unraveling-the-impact-how-temperature-affects-skin-burns>.
- [54] GUANGZHOU HANPOSE 3D TECHNOLOGY CO., LTD. *Stepper Motor Nema 17 17HS4401S Planetary Gearbox*. Online. Dostupné z: <https://hanpose.en.alibaba.com/>.

10 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

SKRATKA	VÝZNAM
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
DC	Direct Current
DED	Directed Energy Deposition
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOD	Drop On Demand (inkjet AM)
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EBM	Electron Beam Melting
EDM	Electrical Discharge Machining
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GPU	Graphics Processing Unit
HCP	Hexagonal Close-Packed (kryštálová štruktúra)
IR	Infrared
ISO	International Organization for Standardization
LCD	Liquid Crystal Display
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMD	Laser Metal Deposition
LOM	Laminated Object Manufacturing
L-PBF	Laser Powder Bed Fusion
MJ	Material Jetting
MKP	Metóda konečných prvkov
PBF	Powder Bed Fusion
PID	Proportional–Integral–Derivative (regulátor)
PTAAM	Plasma Transferred Arc Additive Manufacturing

SKRATKA	VÝZNAM
PWM	Pulse Width Modulation
RAP	Recrystallization and Partial Melting
RIAT	Odbor reverzného inžinierstva a aditívnych technológií na Ústave konštruovania Fakulty strojného inžinierstva Vysokého učenia technického v Brne
SIMA	Strain Induced Melt Activation
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SSMED	Semi Solid Metal Extrusion and Deposition
SSR	Solid State Relay
TP	Teleso predohrevu
TT	Tavné teleso
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
UMVI	Ústav materiálových vied a inžinierstva Fakulty strojného inžinierstva Vysokého učenia technického v Brne
USB	Universal Serial Bus
VUT	Vysoké učenie technické v Brne
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

ZOZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ MATERIÁLOV

OZNAČENIE	VÝZNAM
2014	Al–Cu (2xxx) séria, vysokopevnostná liata zliatina
6061	Al–Mg–Si (6xxx) séria, stredne až vysoko odolná tepelne spracovateľná zliatina
6082	Al–Mg–Si (6xxx) séria, dobrá korózna odolnosť
7010	Al–Zn–Mg–Cu (7xxx) séria, vysoká pevnosť
7075	Al–Zn–Mg–Cu (7xxx) séria, veľmi vysoká pevnosť
100Cr6	Ložisková oceľ
43CrMo4	Legovaná konštrukčná oceľ
7075ScZr	7075 Al micro-alloyed with Sc and Zr
A319	Liaty Al–Si–Cu, bežné odliatky v automobilovom priemysle
A356	Liaty Al–Si–Mg, všeobecné odliatky
A357	Liaty Al–Si–Mg, tepelne spracovateľný
Al	Hliník
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý (korund)

OZNAČENIE	VÝZNAM
Al4018	Zvárači drôt Al–Si (prídavný materiál)
Al-5356	Zvárači drôt Al–Mg
AlN	Hlinový nitrid
AlSi10Mg	Al–Si–Mg (10 % Si) zliatina
AlSi5	Al–Si (5 % Si) zliatina
AlSi7Mg	Al–Si–Mg zliatina
AM50A	Mg–Al (≈ 5 % Al), liata zliatina
AM60B	Mg–Al (≈ 6 % Al), liata zliatina
AS41	Mg–Al–Si zliatina
AZ31	Mg–Al–Zn (3 % Al, 1 % Zn)
AZ61	Mg–Al–Zn (6 % Al, 1 % Zn)
AZ70	Mg–Al–Zn (7 % Al, 0 % Zn) – bežné označenie
AZ80	Mg–Al–Zn (8 % Al, 0 % Zn)
AZ91	Mg–Al–Zn (9 % Al, 1 % Zn)
AZ91D	Vylepšená verzia AZ91
Bi	Bizmut
ER4043	Zvárači drôt (AlSi5), MIG/MAG
H18 / H18-B	Oceľ pre ložiská/nástrojová oceľ (varianty H-series)
Hadfield-B	Vysoko-mangánová oceľ (Hadfield steel, variant B)
M2	Vysoko-rýchlostná oceľ (HS steel)
Mg	Horčík
MgZnRE	Mg–Zn–Rare Earth zliatina
Pb	Olovo
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol-modified (termoplast pre FDM/FFF)
PU	Polyuretán
Sn	Cín
TX630	nástrojová oceľ
X210CRW12-B	Martenzitická nerez oceľ (DIN X210CrW12 variant)
X210CzW12	Martenzitická nerez oceľ (lokálna značka)
Zn	Zinok

ZOZNAM POUŽITÝCH VELIČÍN

ZNAČKA	JEDNOTKA	VELIČINA
a	$(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	Tepelná rozťažnosť
$\dot{\gamma}$	(s^{-1})	Šmyková rýchlosť
ε	$(-)$	Emisivita povrchu
$\Delta P, \Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$	(Pa)	Tlakové straty
ΔT	(K)	Rozdiel teplôt medzi dvomi stavmi
η	$(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Viskozita
η_A	$(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Zjavná viskozita
η_{T0}	$(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Viskozita pri referenčnej teplote T_0
λ	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Tepelná vodivosť
λ_T	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Tepelná vodivosť materiálu telesa
λ_{TK}	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Tepelná vodivosť materiálu tavného kanálu
$\emptyset$	$(XX)^{16}$	Koeficient konzistencie.
ρ	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Hustota materiálu
σ	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$	Stefanova–Boltzmannova konštanta
τ	(Pa)	Šmykové napätie
τ_y	(Pa)	Minimálne napätie potrebné na to, aby začala látka tiecť
c_p	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Hmotnostná tepelná kapacita
D_1, D_3	(m)	Priemer časti tavného kanálu
d_K	(m)	Vnútorň priemer tavnej kapiláry
d_T	(m)	Priemer ústia trysky
E	(GPa)	Youngov modul pružnosti
F	(N)	Sila
f_L	$(-)$	Podiel kvapalnej fázy
f_S	$(-)$	Podiel tuhej fázy
H	$(-)$	Teplotná závislosť viskozity
K	$(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	Koeficient konzistencie
L_1, L_2, L_3	(m)	Dĺžka časti tavného kanálu
l	(m)	Dĺžka tavného kanálu
M	(Nm)	Moment sily

¹⁶ Jednotka koeficientu konzistencie závisí na aktuálnom prepočte z mocninového modelu viskozity.

ZNAČKA	JEDNOTKA	VELIČINA
m	$(-)$	Tokový exponent
$\dot{m}$	$(kg \cdot s^{-1})$	Hmotnostný tok
n	$(-)$	Index toku
R	(m)	Polomer hnacej kladky
$R_{P0,2}$	(MPa)	Zmluvná medza klzu
r_P	(m)	Vonkajší polomer telesa
r_{TK1}	(m)	Vnútorý polomer tavného kanálu
r_{TK2}	(m)	Vonkajší polomer tavného kanálu
r_{VE1}	(m)	Vnútorý polomer vyhrievacieho elementu
r_{VE2}	(m)	Vonkajší polomer vyhrievacieho elementu
S	(mm^2)	Plocha prierezu filamentu
T	$(^{\circ}C)$	Teplota materiálu na výstupe z kanálu
T_{MAX}	$(^{\circ}C)$	Maximálna teplota použitia
T_O	(K)	Teplota okolitého prostredia
T_{TK1}	(K)	Teplota v tavnom kanáli
T_{VE}	(K)	Teplota vyhrievacieho elementu
T_i	$(^{\circ}C)$	Teplota materiálu na vstupe do kanálu
$\dot{Q}_C$	(W)	Celkový výkon
$\dot{Q}_{SK}$	(W)	Výkon pre kompenzáciu strát konvekciou
$\dot{Q}_{SR}$	(W)	Výkon pre kompenzáciu strát radiáciou
$\dot{Q}_O$	(W)	Výkon pre ohrev
$\dot{Q}_T$	(W)	Výkon pre tavenie
$\dot{Q}_{VE}$	(W)	Výkon ktorý je potrebné, aby vyhrievací element dodával
q	(W)	Tepelný výkon
q_T	$(J \cdot kg^{-1})$	Skupenské teplo materiálu
v_1, v_3	$(m \cdot s^{-1})$	Rýchlosť na vstupe do časti tavného kanálu
v_T	$(m \cdot s^{-1})$	Rýchlosť extrúzie materiálu na stavebnú podložku

11 ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2-1 PRISMA diagram.....	16
Obr. 2-2 Rozdelenie aditívnych technológií podľa normy ISO/ASTM 52900:2021 s uvedenými príkladmi konkrétnych aditívnych technológií a formy vstupného materiálu .	17
Obr. 2-3 Klasifikácia aditívnych technológií extrúzie materiálu podľa spôsobu extrúzie: a) Na báze filamentu; b) Na báze piestu; c) Na báze šneku [10].	19
Obr. 2-4 Geometria tavného kanálu , upravené podľa [17].	21
Obr. 2-5 Príklad rovnovážneho binárneho fázového diagramu [11].	25
Obr. 2-6 Schémy metód na získanie nedendritickej mikroštruktúry: a)Miešanie dávky materiálu; b)Kontinuálne miešanie; c)Elektromagnetické miešanie. [20]	26
Obr. 2-7 Príklad formovania tixotropie, upravené podľa [21]	28
Obr. 2-8 Mikroštruktúra: a) Dendritická mikroštruktúra odlievanej vzorky; b) Globulárna mikroštruktúra v polotuhej vzorke zliatiny. [25]	29
Obr. 2-9 Výsledok DSC analýzy zliatiny Mg62Zn38 (hm.%): a) DSC krivky ohrevu a chladnutia; b) Závislosť podielu kvapalnej fázy od teploty získaná integráciou DSC kriviek a porovnanie voči simuláciám [7].	30
Obr. 2-10 Extrudéry s priamym odporovým ohrevom: a) Extrudér inšpirovaní kapilárnym viskozimetrom [15]; b) Thixoextruder [5]; c) Vysokoteplotný extrudér (700 °C) [29]; d) Konvenčný typ extrudéra [28]; e) Extrudér s predohrevom [6].	35
Obr. 2-11 Zariadenie na aditívnu výrobu pomocou priameho indukčného ohrevu: a) CAD model; b) Experimentálne zariadenie. [32]	37
Obr. 2-12 Výsledky testovania 3D tlače: a) 3D Tlač jednej vrstvy pri výkone 10 kW, rýchlosti nanášania materiálu 15 mm·s ⁻¹ ; b) Mikroštruktúra vzorky a); c) 3D Tlač s parametrami optimalizovanými pre tvorbu jednej vrstvy; d) 3D Tlač s redukovaným výkonom. [32]	38
Obr. 2-13 3D tlačiareň s nepriamym indukčným ohrevom: a) Popis časti zariadenia; b) Schéma extrudéra; c) Fyzická podoba extrudéra. [2]	39
Obr. 2-14 Výsledky experimentov: a) IR Tomografia nanášania prvej vrstvy; b) IR Termografia nanášania druhej vrstvy; c) Objekt vytvorený počas experimentov. [2]	40
Obr. 2-15 Tri generácie extrudérov: a) Extrudér I. generácie; b) Extrudér II. Generácie; c) Extrudér III. generácie. [11]	41
Obr. 2-16 Prvé testovacie objekty [12]	42

Obr. 2-17 DMW Systém: a) Schematický nákres; b) Skutočný vzhľad DMW systému. [8]	42
Obr. 2-18 Vzorky vyrobené DMW systémom a ich mikroštruktúry: a) „Zig-Zag“ štruktúra 200 °C; b) „Zig-Zag“ štruktúra s premostením 190 °C; c) Mikroštruktúra vzorky a); d) Mikroštruktúra vzorky b); c) Mikroštruktúra bez šmyku. [8]	43
Obr. 2-19 Zariadenia na výrobu kovových dielov. Hlavné časti: 18 - Zdroj parciálne nataveného materiálu; 20 - Čiastočne stuhnúť suspenzia; 22 - Nádoba s úplne roztaveným materiálom; 24 - Predtavená zliatina; 26 - Kúsky stuhutej zliatiny; 28 - Zóna roztaveného materiálu; 29 - Vyhrievací systém; 30 - Zóna transformácie; 32 - Tryska; 34 - Roztavená zliatina; 36 - Rotor; 38 - Miešacia časť rotoru; 40 - Centrálna osa rotácie rotoru; 44 - Dávkovaná suspenzia; 46 - Ústie trysky; 48 - Substrát; 50 - Indukčný ohrev; 54 - Prívod stlačeného vzduchu; 56 - Absolútny tlak atmosféry; 58 - Vonkajší závit. [13]	45
Obr. 2-20 Zariadenia na výrobu kovových dielov. Hlavné časti: 10 - Čelný pohľad na zariadenie; 12 - Obal; 13 - Riadiaca jednotka; 14 - Stavebná komora; 16 - Platforma; 18 - Zostava tlačovej hlavy; 20 - Chladiaca nádrž; 22 - Vyrábaný objekt; 24 - Steny komory; 26 - Prístupový otvor; 28 - Motor osi z; 30 - Zostava pohybovej osi z; 32 - Podložka; 34 a 36 - Motory pre pohyb v rovine xy; 38 - Zostava os x a y; 40 - Extrúzna hlava.[35]	47
Obr. 2-21 Zariadenia na výrobu kovových dielov vytláčaním drôtu v polotuhom stave. Hlavné časti: 100 - Výrobné zariadenie; 102 - Rám; 104 - Vedenie v ose x; 106 - Hlava extrudéra; 108 - Podávací mechanizmus; 112 - Tlačová podložka; 114 - Tryska; 116b - Vedenie v osi z; 120 - Vyhrievacie teleso; 122 - Chladič; 124 - Trubica; 126 - Vodiaci kanál; 128 - Uloženie teploty mariaceho senzoru; 130 - Tepelná bariéra; 134 - Ústie trysky.	49
Obr. 2-22 Zariadenia na výrobu kovových dielov vytláčaním drôtu v polotuhom stave. Hlavné časti: 1 - Skladovací mechanizmus; 2 - Polotovár; 3 - Prvý valcovací mechanizmus; 4 - Druhý valcovací mechanizmus; 5 - Tretí valcovací mechanizmu; 6 - Štvrtý valcovací mechanizmus; 7 - DC vyhrievacie zariadenie; 8 - Infračervený teplotný senzor; 9 - Mechanizmus na odstraňovanie povrchovej vrstvy oxidov; 10 - Zariadenie na izotermické spracovanie v polotuhom stave; 11 - Základová platňa; 12 - Rám; 13,14 - Kryt ochrannej atmosféry; 15 - Dutá kužeľová tlačová hlava; 16 - Platforma; 17 - Tlačený objekt; 18 - Základňa; 101 - Držiak spojovacieho valcu; 102 - Spojovací valec; 103 - Prvé valivé ložisko; 301 - Hnací valec; 302 - Hnaný valec; 303 - Valčekové ložisko; 304 - Spojovací rám valcov; 305 - Servomotor poháňací valce. [37]	51
Obr. 4-1 Hierarchická štruktúra cieľov a obmedzení	63
Obr. 4-2 Black Box: Zjednodušená schéma funkcie extrudéra	64
Obr. 4-3 Glass Box: Detailná schéma funkcie extrudéra	64
Obr. 4-4 Konceptný návrh: Filamentový extrudér	66
Obr. 4-5 Konceptný návrh: Šnekový extrudér	69

Obr. 4-6 Konceptný návrh: Piestový extrudér	72
Obr. 5-1 Predbežný návrh extrudéra: a) Extrudér; b) Extrúzna komora; c) Rez extrúznou komorou.....	77
Obr. 5-2 Obalové rozmery predbežného návrhu extrudéra	78
Obr. 5-3 Použité materiály	80
Obr. 5-4 Schéma matematického modelu.....	82
Obr. 5-5 Tavná komora: a) Pôvodná geometria tavného telesa; b) Zjednodušená geometria tavného telesa; c) Očakávaný priebeh teplôt.	84
Obr. 5-6 Závislosť strát na teplote plášťa telies: a) Teleso predohrevu; b) Tavné teleso. .	87
Obr. 5-7 Závislosť priebehu teplôt (Patróna, Extrúdovaný materiál na výstupe, kontaktné plochy prstencov) na privádzanom výkone: a) Teleso predohrevu; b) Tavné teleso.	90
Obr. 5-8 Rozloženie teplotného poľa na telese predohrevu pri 16 W (celkovo 64 W).....	90
Obr. 5-9 Rozloženie teplotného poľa na tavnom telese pri 24 W (celkovo 96 W)	91
Obr. 5-10 Porovnanie teplôt na prstenci tavného telesa: a) Pôvodná geometria; b) Upravená geometria.	92
Obr. 5-11 Analýza prúdenia vzduchu: a) Pôvodná prstencová geometria chladiča; b) Upravené špirálová geometria chladiča; c) Prúdenie vzduchu pre geometriu a); d) Prúdenie vzduchu pre geometriu b).....	93
Obr. 5-12 Výsledok napäťovo-deformačnej analýzy tepelnej rozťažnosti tavného telesa pri teplote 700 °C.....	95
Obr. 5-13 Výsledok napäťovo-deformačnej analýzy teplotnej rozťažnosti tavného telesa pri teplote 700 °C: a) Deformácia v axiálnom smere; b) Deformácia v radiálnom smere.	95
Obr. 5-14 Závislosť zjavnej viskozity zliatiny AZ91D na rýchlosti šmykového napätia ..	97
Obr. 5-15 Geometria tavného kanálu	97
Obr. 5-16 Redukované napätie (HMH) na konzole podávacieho mechanizmu: a) Pôvodná geometria; b) Upravená geometria.	101
Obr. 5-17 Napäťovo deformačná analýza zostavy tavného telesa pri teplote 700 °C: a) Redukované napätie (HMH); b) Súčiniteľ bezpečnosti.....	102
Obr. 6-1 Zostava podávacieho mechanizmu a rámu extrudéra	104
Obr. 6-2 Zostava podávacieho mechanizmu a rámu extrudéra	106
Obr. 6-3 Zostava hlavného chladiča	106
Obr. 6-4 Zostava predohrevu	108
Obr. 6-5 Zostava pre tavenie	110

Obr. 6-6 Rozvod stlačeného vzduchu a inertnej atmosféry: a) Chladenie tavného telesa a telesa predohrevu; b) Chladenie prstencov; c) Rozvod inertnej atmosféry.....	111
Obr. 6-7 Aditívne vyrábané diely: a) Inkonelové komponenty; b) Nerezové diely.....	112
Obr. 6-8 Dodatočné obrábanie inkonelových dielov: a) Elektro-erozívne obrábanie dier pre patróny; kolíky a kapiláru; b) Zarovnanie čelných plôch a rezanie závitov; c) Finálne diely.	113
Obr. 6-9 Zostava podávacieho mechanizmu.....	115
Obr. 6-10 Podzostavy extrudéra: a) Zostava trysky; b) Tavné teleso s patrónami a prívodom/odvodom stlačeného vzduchu; c) Chladiaci prstenec; d) Zostava predohrevu.	116
Obr. 6-11 Extrudér: a) Finálna zostava extrudéra; b) Umiestnenie extrudéra v 3D tlačiarňi.	116
Obr. 6-12 Elektroinštalácia pre riadenie ohrevu extrudéra	117
Obr. 6-13 Ovládací panel prívodu materiálu (resp. riadenie pohybu častí 3D tlačiarne) a nastavenia požadovanej teploty na telese predohrevu (TP) a tavnom telese (TT)	118
Obr. 6-14 Schéma priebehu validačných experimentov	119
Obr. 6-15 Termická analýza zliatiny: a) DSC krivka; b) Závislosť podielu tuhej fázy na teplote s vyznačenými procesnými teplotami na telese predohrevu (TP) a tavnom telese (TT). Upravené podľa [52].....	120
Obr. 6-16 Schematické rozmiestnenie termočlánkov na extrudéri pri ladení PID konštánt	121
Obr. 6-17 Regulácia teploty na tavnom telese počas 15 min: a) Záznam teplota – čas; b) Rozsah a rozloženie zaznamenaných teplôt.	122
Obr. 6-18 Postupný ohrev na teplotu 600 °C na tavnom telese: a) BEZ prívodu stlačeného vzduchu na TT a TP; b) S prívodom stlačeného vzduchu na TT a TP.....	123
Obr. 6-19 Meranie teplotného profilu pozdĺž tavného kanálu (kapiláry) pri ohreve oboch telies.....	125
Obr. 6-20 Meranie teplotného profilu pozdĺž tavného kanálu (kapiláry) pri ohreve iba tavného telesa	125
Obr. 6-21 Filament privádzaný do tavrnej komory: a) Filament so špirálovito zdeformovanou oblasťou prívodu pri chladení telesa predohrevu stlačeným vzduchom; b) Filament s postupne sa rozširujúcou oblasťou prívodu pri použití vodného chladenia.....	128
Obr. 6-22 Experiment s extrúziou zliatiny: a) Extrúzia s keramickou tryskou (Experiment 3); b) Kvapka extrudovaného materiálu a); c) Extrúzia s konštantným priemerom tavného kanálu bez trysky (Experiment 6); d) Vzorka vyextrudovaného materiálu c).....	129

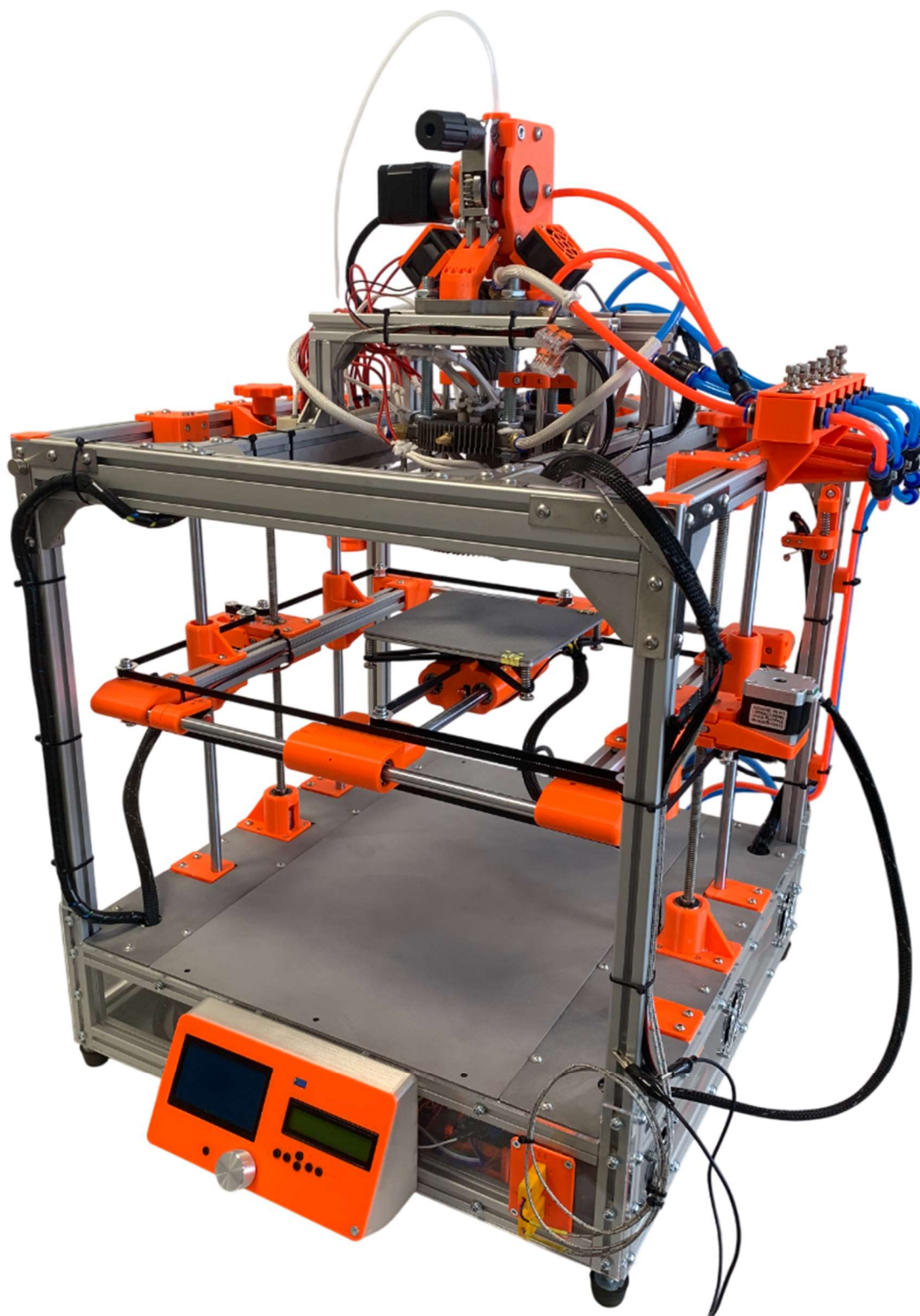
12 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2-1 Príklady kovových zliatin používaných na thixoforming [23].....	32
Tab. 2-2 Zhrnutie analyzovaných experimentálnych zariadení	53
Tab. 3-1 Prehľad atribútov (C - Cieľ, O - Obmedzenie, F - Funkcia, S - Spôsob)	58
Tab. 4-1 Metrika pre overenie dosiahnutých cieľov	62
Tab. 4-2 Rozhodovacie kritéria pri voľbe konceptov	65
Tab. 4-3 Bodové hodnotenie: Koncept filamentový extrudér.....	68
Tab. 4-4 Bodové hodnotenie: Koncept šnekový extrudér	71
Tab. 4-5 Bodové hodnotenie: Koncept piestový extrudér.....	73
Tab. 4-6 Zhrnutie bodového hodnotenia konceptov.....	75
Tab. 5-1 Prehľad navrhovaných konštrukčných materiálov [42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49]	80
Tab. 5-2 Potrebný výkon na ohrev v telese predohrevu.....	87
Tab. 5-3 Potrebný výkon na ohrev a tavenie v tavnom telese	87
Tab. 5-4 Materiály použité pri analýze teplotného poľa	89
Tab. 5-5 Porovnanie zistených tlakových strát v tavnom kanály polotuhej zliatiny AZ91D rýchlosť extrúzie $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ na výstupe z trysky a priemeru drôtu $\varnothing 1,7 \text{ mm}$	98
Tab. 5-6 Porovnanie parametrov pohonu pre rôzne prevodové pomery	99
Tab. 5-7 Odhadované náklady na realizáciu jedného prototypu	103
Tab. 6-1 Porovnanie odhadovaných a skutočných nákladov na realizáciu prototypu	114
Tab. 6-2 Odladené PID konštanty	122
Tab. 6-3 Používané PID konštanty	126
Tab. 6-4 Hodnotenie dosiahnutia stanovených cieľov.....	136

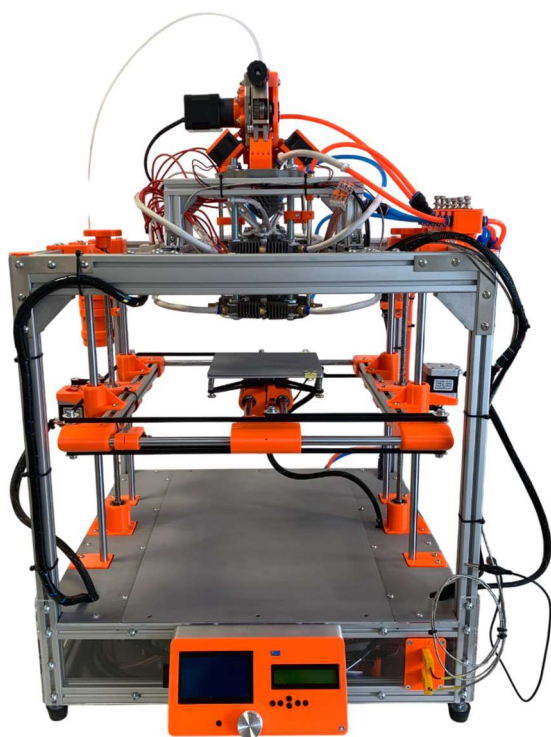
13 ZOZNAM PRÍLOH

	TYP	NÁZOV PRÍLOHY
A1	*.xlsx	Predikcia výkonu pre ohrev/tavenie/kompenzáciu energetických strát
A2	*.pdf	Výpočet tlakových strát v tavnom kanáli extrudéra
B1	*.pdf	Výkresy zostavy extrudéra + Výkresy obrábaných dielov
B2	*.pdf	Výkresy zostavy podávacieho mechanizmu + Výkresy obrábaných dielov
B3	*.pdf	Výkresy zostavy rámu + Výkresy obrábaných dielov
B4	*.pdf	Výkres zostavy predohrevu + Výkresy obrábaných dielov
B5	*.pdf	Výkres zostavy pre tavenie + Výkresy obrábaných dielov
C1	*.pdf	Schéma rozvodu stlačeného vzduchu
C2	*.pdf	Schéma rozvodu stlačeného inertnej atmosféry
C3	*.pdf	Schéma elektroinštalácie
D1	*.ino	Riadiaci firmware PID regulácie teploty
D2	*.m	Skript pre vyhodnocovanie teplotného profilu
E1	156	Fotodokumentácia zmontovaného extrudéra a 3D tlačiarne

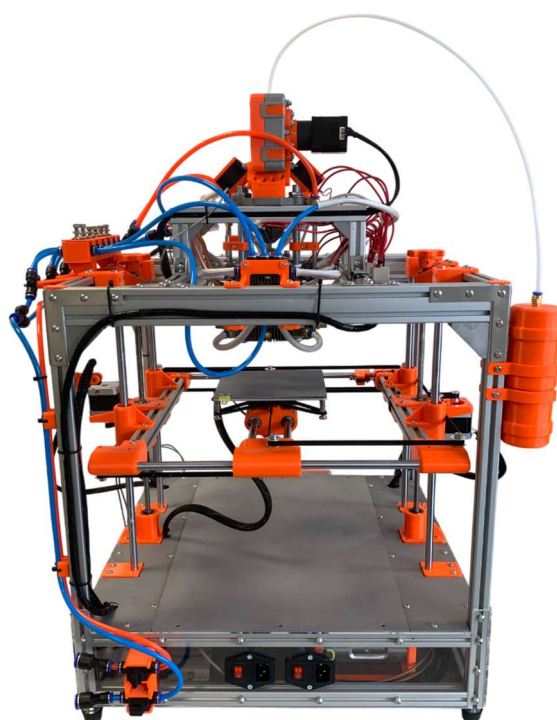
D1 Fotodokumentácia extrudéra a 3D tlačiarne



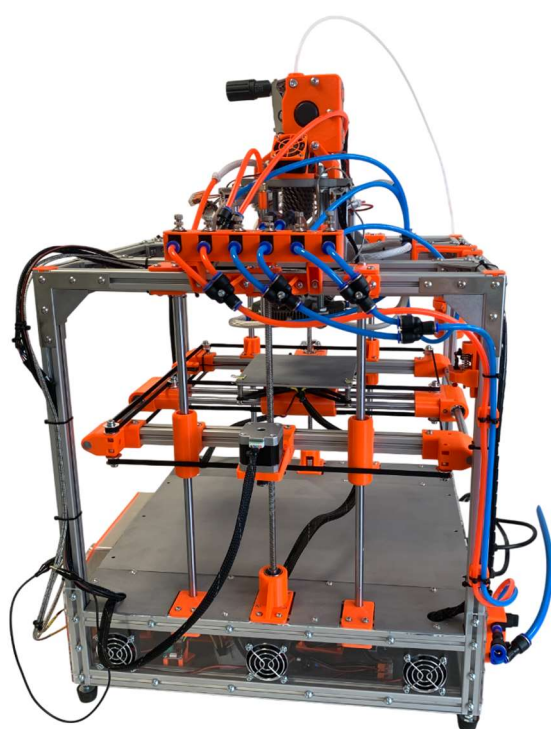
3D TLAČIAREŇ S OSADENÝM EXTRUDÉROM



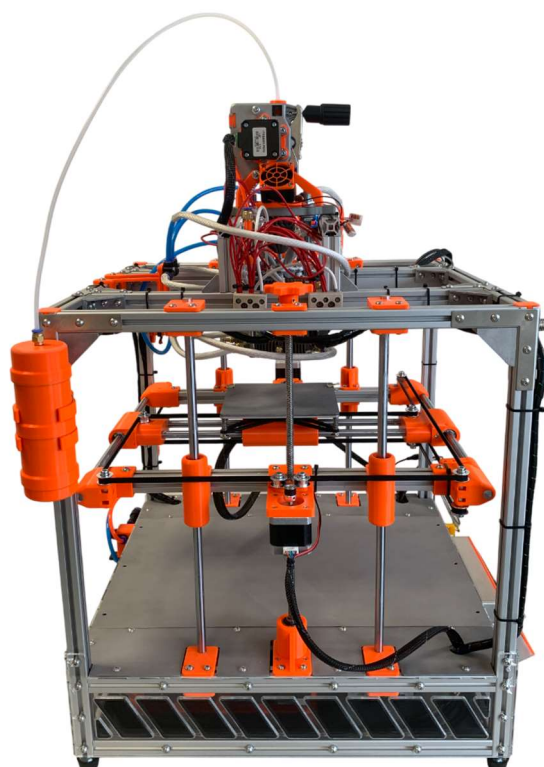
POHĽAD SPREDU



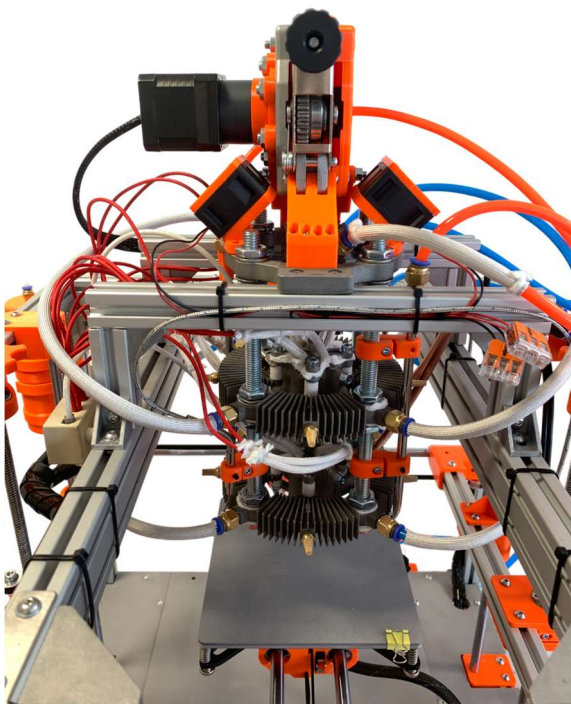
POHĽAD ZOZADU



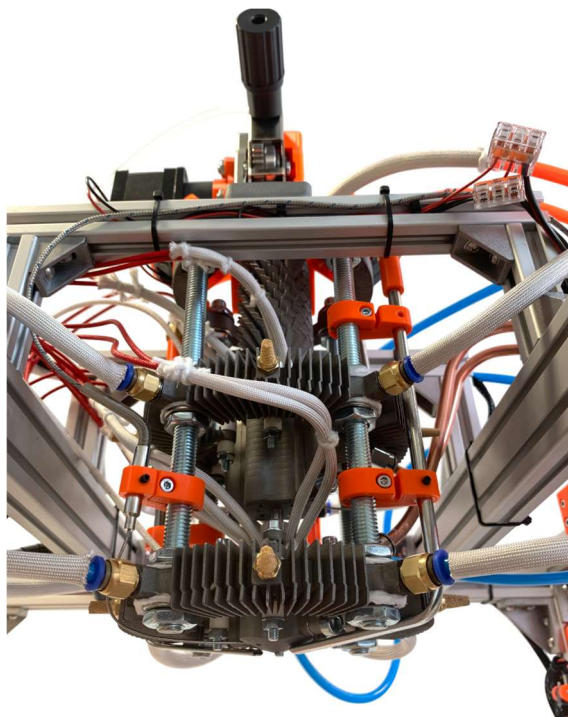
POHĽAD SPRAVA



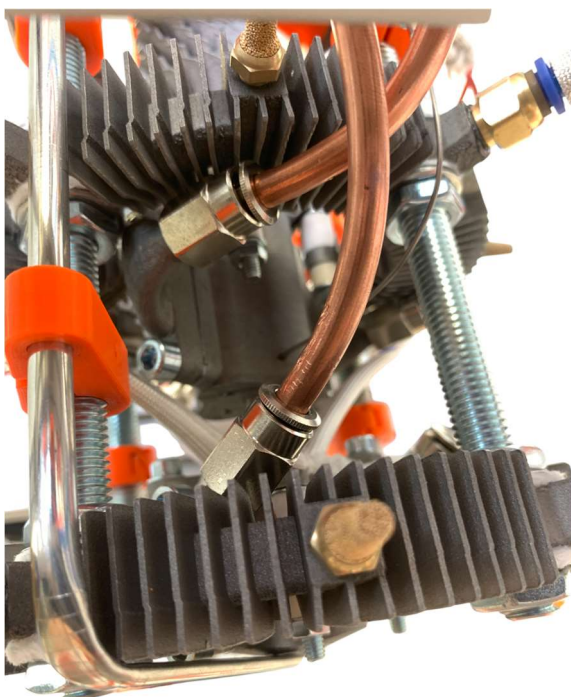
POHĽAD ZĽAVA



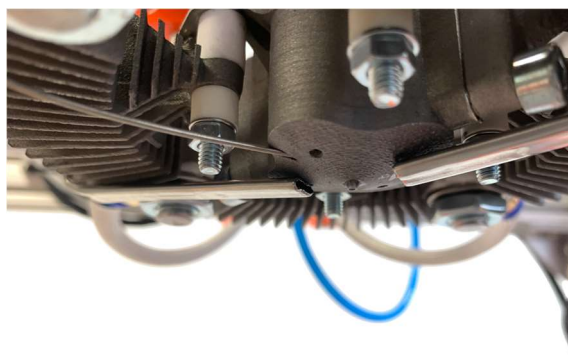
POHĽAD NA EXTRUDÉR SPREDU



POHĽAD NA EXTRUDÉR ZOSPODU



**PRÍVOD STLAČENÉHO VZDUCHU
NA TELESO PREDOHREVVU
A TAVNÉ TELESO**



**DETAIL TRYSKY A PRÍVODU
INERTNEJ ATMOSFÉRY**