



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV TISKOVÝCH STRATEGIÍ NA MIKROSTRUKTURU OBJEMOVÝCH DÍLŮ VYRÁBĚNÝCH TECHNOLOGIÍ WAAM Z HOŘČÍKOVÉ SLITINY AZ61

INFLUENCE OF PRINTING STRATEGIES ON THE MICROSTRUCTURE OF VOLUMETRIC PARTS PRODUCED
BY WAAM TECHNOLOGY FROM MAGNESIUM ALLOY AZ61

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Seidler

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Slavíček

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Filip Seidler**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Slavíček**
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:

Vliv tiskových strategií na mikrostrukturu objemových dílů vyráběných technologií WAAM z hořčikové slitiny AZ61

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie WAAM je charakteristická nízkou energetickou náročností a vysokou efektivitou navařování. Její širší aplikace je však omezena množstvím procesně zvládnutých materiálů. Komplexní díly vyrobené technologií WAAM z hořčikových slitin by díky svým dobrým mechanickým vlastnostem a nízké měrné hmotnosti mohly najít široké uplatnění v leteckém průmyslu. Takové komplexní díly se zpravidla skládají z částí tenkostěnných a objemových. Předpokladem zvládnutí procesu výroby objemových částí je navržení, otestování a analýza strategií a procesních parametrů vhodných pro takovou výrobu.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem této diplomové práce je zjistit vliv tiskových strategií na mikrostrukturu objemových dílů vyráběných technologií WAAM z hořčikové slitiny AZ61.

Dílčí cíle diplomové práce:

- vypracovat přehled současného stavu poznání v oblasti WAAM výroby slitiny AZ61,
- experimentálně stanovit vhodné procesní parametry pro výrobu objemových dílů,
- navrhnout a otestovat různé strategie navařování,
- analyzovat vliv tiskových strategií na mikrostrukturu vyráběných objemových dílů,
- navrhnout a vyrobit ukázkový objemový díl skládající se alespoň z deseti vrstev materiálu.

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:

Xu, X., J. Ding, S. Ganguly, et al. Preliminary Investigation of Building Strategies of Maraging Steel Bulk Material Using Wire + Arc Additive Manufacture. Journal of Material Engineering and Performance 28, 594–600 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3521-5>

Avedesian, M. and H. Baker. ASM Speciality Handbook - Magnesium and Magnesium Alloys. USA: ASM International Ohio, 1999, 314 s. ISBN 0-87170-138-3.

Nalla Madhuri, V. Jayakumar, M. Sathishkumar, Recent developments and challenges accompanying with wire arc additive manufacturing of Mg alloys: A review, Materials Today: Proceedings, 8573-8577, 2021, ISSN 2214-7853

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

Cílem této diplomové práce je analyzovat vliv tiskových strategií na mikrostrukturu objemových dílů vyrobených metodou WAAM. Hrubá zrna mohou výrazně zhoršit mechanické vlastnosti takto vyrobených dílů. Proto byla vytvořena simulační studie identifikující oblasti s pomalým chladnutím pro každou ze zkoumaných strategií nanášení. Tato simulace byla následně ověřena měřením velikosti zrn.

U všech strategií bylo možné identifikovat oblasti se zvětšenou velikostí zrn. Tyto extrémní hodnoty byly vzájemně porovnány a bylo zjištěno, že nejjemnější mikrostruktura vzniká při použití strategie nanášení S-pattern. Na základě těchto výsledků byla tato strategie zvolena pro výrobu ukázkového objemového dílu, inspirovaného součástí rámu letadla. Výsledný díl měl rozměry $190 \times 190 \times 50$ mm a byl vytvořen nanášením 20 vrstev.

KLÍČOVÁ SLOVA

WAAM, objemové díly, mikrostruktura, velikost zrn, hořčíková slitina

ABSTRACT

The aim of this thesis is to analyze the influence of deposition strategies on the microstructure of volumetric components manufactured using the WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) method. Coarse grains can significantly deteriorate the mechanical properties of such components. Therefore, a simulation study was conducted to identify regions of slow cooling for each of the examined deposition strategies. This simulation was subsequently validated by measuring grain size.

Areas with increased grain size were successfully identified for all strategies. These extreme values were compared, and it was found that the finest microstructure was achieved using the S-pattern deposition strategy. Based on these results, this strategy was selected for the production of a demonstration volumetric component inspired by an aircraft frame structure. The resulting part had dimensions of $190 \times 190 \times 50$ mm and was produced by depositing 20 layers.

KEYWORDS

WAAM, volumetric components, microstructure, grain size, magnesium alloy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEIDLER, Filip. *Vliv tiskových strategií na mikrostrukturu objemových dílů vyráběných technologií WAAM u hořčíkové slitiny AZ61* Brno, 2025, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Slavíček.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jakubu Slavičkovi za odborné rady a připomínky.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Rešeršní metody	16
2.2	Hořčíkové slitiny	18
2.2.1	Mikrostruktura Mg-Al-Zn slitin	19
2.2.2	Tepelně-fyzikální vlastnosti Mg-Al-Zn slitin	25
2.3	WAAM metody	26
2.4	Procesní parametry	28
2.4.1	Parametry CMT charakteristiky	28
2.4.2	Parametry manipulačního ramene	32
2.4.3	Přehřev	33
2.4.4	Používané procesní parametry pro Mg-Al-Zn slitiny	34
2.5	Objemové díly	35
2.5.1	Trajektorie nanášení	36
2.5.2	Tepelná analýza trajektorií	40
2.6	Defekty	42
2.6.1	Defekty objemových dílů	42
2.6.2	Defekty navařování hořčíkových slitin	43
2.7	Shrnutí hlavních zjištění	44
2.8	Mezery v poznání	46
3	CÍL PRÁCE	47
3.1	Výzkumné otázky	47
3.2	Cíle výzkumu	47
3.3	Hypotézy	47
4	MATERIÁL A METODY	48
4.1	Metodika	48
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	49
4.3	Materiál a testovací podmínky	50
4.4	Metody	51
4.4.1	Příprava navařování	51
4.4.2	Stanovení procesních parametrů	52

4.4.3	Analýza trajektorií	54
4.4.4	Analýza mikrostruktury	59
4.5	Testované predikce	61
5	VÝSLEDKY	62
5.1	Procesní parametry	62
5.1.1	Parametry svařovacího zařízení	62
5.1.2	Rychlost posuvu hořáku a teplota předehřevu	64
5.1.3	Vybrané parametry	68
5.2	Analýza trajektorie	69
5.2.1	ZigZag trajektorie	71
5.2.2	Spiral trajektorie	72
5.2.3	S-pattern trajektorie	73
5.2.4	Kritické oblasti trajektorie	74
5.3	Analýza mikrostruktury	74
5.3.1	Analyzované oblasti	74
5.3.2	Výroba objemových dílů	76
5.3.3	Příprava vzorků	81
5.3.4	Porozita vzorků	82
5.3.5	Velikost zrn	84
5.4	Ukázkový objemový díl	86
6	DISKUZE	87
6.1	Interpretace výsledků	87
6.1.1	Procesní parametry pro výrobu objemových dílů	87
6.1.2	Analýza trajektorií	90
6.1.3	Analýza mikrostruktury	91
6.1.4	Problémy výroby	95
6.2	Verifikace hypotéz	97
7	ZÁVĚR	99
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	100
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	107
9.1	Seznam použitých zkratk	107
9.2	Seznam použitých veličin	107
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	109

11	SEZNAM TABULEK	114
12	SEZNAM PŘÍLOH	115

1 ÚVOD

Hořčík je nejlehčí konstrukční kov, který nachází široké uplatnění v automobilovém, leteckém i kosmickém průmyslu. Hlavní výhodou dílů vyrobených z hořčíkové slitiny je nízká hmotnost v kombinaci s dobrými mechanickými vlastnostmi. Využití hořčíkových slitin na aditivní výrobou optimalizovaných tvarů umožňuje další odlehčení v aplikacích, kde hmotnost je kritická. Jednou z takových aditivních technologií je WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing).

WAAM je rychlý a efektivní způsob aditivní výroby kovů. Mezi hlavní charakteristiky tohoto procesu výroby patří vysoká rychlost nanášení materiálu a relativně špatné geometrické tolerance vytisknutého dílu, což by do budoucna mohlo vést k nahrazení malosériového odlévání. Odlévání hořčíkových slitin je samo o sobě komplikované z důvodu vysoké reaktivity hořčíku a nízké teploty tavení a varu. Odléváním hořčíkových slitin často vznikají defekty jako jsou póry, praskliny a hrubá zrna. Tyto defekty jsou minimalizovány využitím aditivních technologií. Aditivní technologie zajišťují výrazně větší rychlost chladnutí, proto výsledný díl obsahuje méně defektů.

Vyrobené díly metodou WAAM se většinou skládají z tenkostěnných a objemových částí. Výroba objemových dílů není tak rozsáhle studována jako tenkostěnných díly. Tenkostěnné díly se skládají z jediného navařeného perimetru, zatímco objemové díly se skládají z více návarů umístěných vedle sebe. Problematika výroby objemových dílů je rozsáhlejší o zajištění dostatečného provaření sousedních návarů na vrstvě. V závislosti na použité strategii nanášení může dojít k tepelné koncentraci, pomalejšímu chladnutí, a tvorbě podobných defektů jako je tomu u odlévání.

Stupeň provaření je zajištěn zejména volbou vhodných procesních parametrů. Koncentraci tepla je možné ovlivnit volbou vhodné strategie nanášení. Strategií nanášení, nebo také trajektorií, je možné distribuovat teplo na po celé rovině a předcházet tak tepelné koncentraci.

Tato práce se zabývá volbou procesních parametrů a analýzou možných trajektorií pro WAAM výrobu objemových dílů z hořčíkové slitiny AZ61. Aby bylo možné nahradit konvenční odlévání WAAM výrobou, je nutné zamezit tvorbě pórů a hrubých zrn. Tvorbě pórů lze zamezit volbou vhodných procesních parametrů, ale pro zajištění konsistentní velikosti zrn, které mají velký dopad na mechanické vlastnosti, je nutné zvolit vhodnou trajektorii navařování.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

Systematická rešerše byla rozdělena na tři části. V systematické rešerši je potřeba zjistit prvky ovlivňující mikrostrukturu vyrobeného dílu z hořčíkové slitiny, rozsah vhodných parametrů svařovacího zařízení využívané pro hořčíkové slitiny a strategie pro nanášení materiálu za účelem výroby objemových dílů.

Pro zjištění těchto informací byly sestaveny rešeršní otázky.

1. Jakým způsobem lze ovlivnit mikrostrukturu hořčíkových slitin?

Pro analýzu mikrostruktury je nutné stanovit prvky, které mohou ovlivnit velikost zrn ve vytvořeném dílu. Dále by bylo vhodné stanovit míru vlivu na velikost zrn u těchto prvků. Tyto vlivy jsou hledány pro případ WAAM výroby s hořčíkovými slitinami. Kromě mikrostruktury je také vyhledáván vliv na velikost zrn.

(waam OR wire AND arc AND additive AND manufacturing) AND
(magnesium) AND (microstructure OR grain)

2. Jaké procesní parametry se využívají pro WAAM výrobu z hořčíkové slitiny AZ61?

Zvolení nevhodných parametrů může mít za následek nestabilní elektrický oblouk při procesu, nebo nekonsistentní geometrii návaru. Proto je nutné stanovit rozsah ověřených parametrů, které nabízí konsistentní kvalitu návaru. Z důvodu malého množství výsledku specificky pro AZ61, byly vyhledány všeobecně hořčíkové slitiny.

(waam OR wire AND arc AND additive AND manufacturing) AND
(magnesium) AND (parameter*)

3. Jaké strategie jsou využívány pro WAAM výrobu objemových dílů?

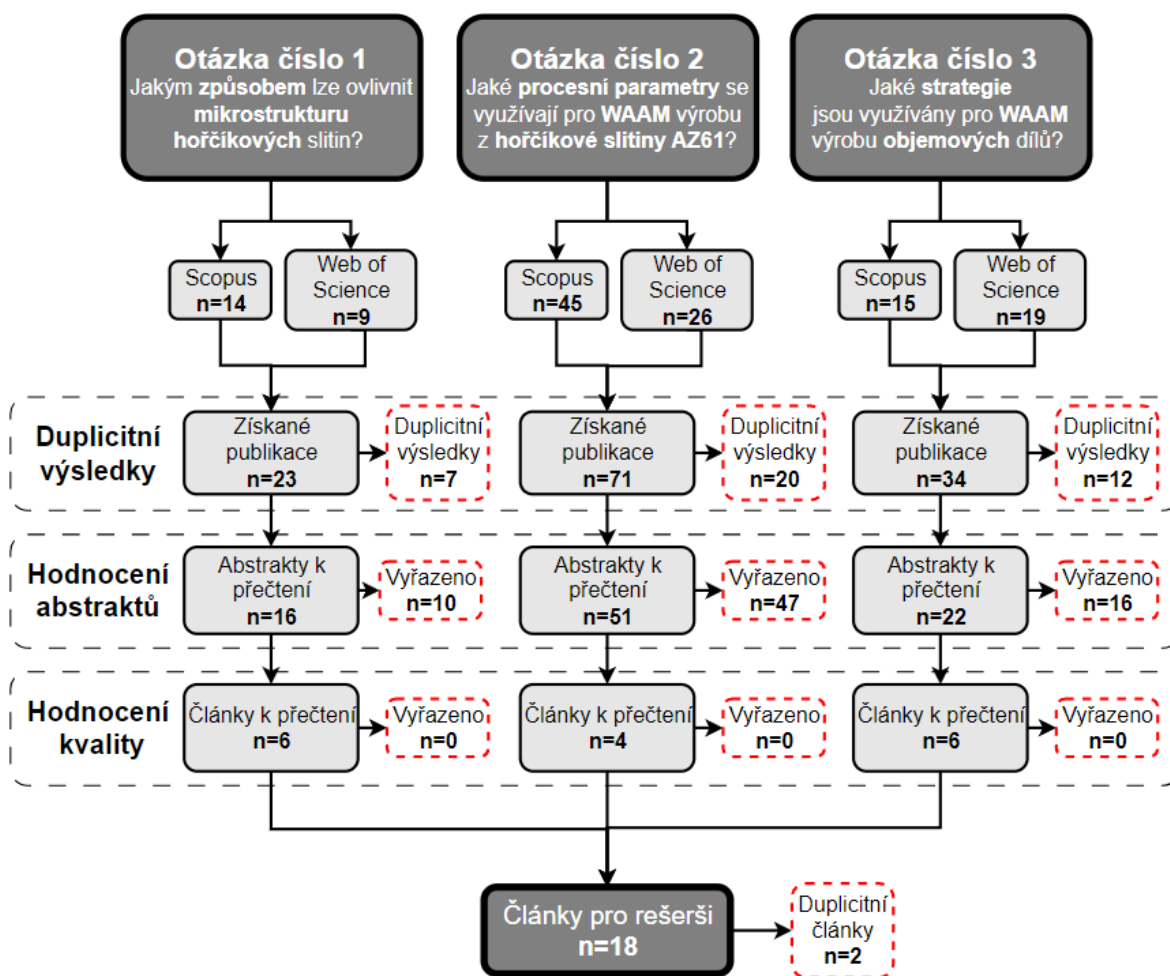
Strategiemi se rozumí možné trajektorie navařování jednotlivých vrstev, nebo postupy použité při procesu. Trajektorie mají velký vliv na koncentraci tepla při procesu navařování a celkovou geometrickou přesnost vyrobeného dílu. Při vyhledávání je použita řada alternativ pro „objemové díly“.

(waam OR wire AND arc AND additive AND manufacturing) AND (path
OR trajectory OR strategy) AND (volumetric OR multibead OR multi-bead
OR mlmb OR mb OR thick)

Na základě sestavených otázek v předchozí kapitole byly vytvořeny rešeršní dotazy pro vyhledávání na webových stránkách Scopus a Web of Science. Součástí vyhledávání byl také Google Scholar, ale tato stránka vyhledávala příliš velké množství zdrojů neshodujících se s vyhledávaným dotazem, proto tato stránka byla z vyhledávání vyřazena.

Rešeršní dotazy byly postupně iterovány pro zajištění zpracovatelného množství co nejpřesnějších zdrojů. Prvním krokem bylo vyřazení duplicitních výsledků. U zbylých článků byl přečten abstrakt, na základě kterého jsou odstraněny další publikace, které nejsou přínosné pro tuto práci. Všechny zbylé články měly dostatečnou kvalitu, proto v tomto kroku nebyly žádné odstraněny. Pro kritickou rešerši bylo vybráno 16 článků.

Tento postup byl zaznamenán do Prisma diagramu.



Obr. 2-1 Prisma diagram

2.2 Hořčíkové slitiny

Čistý polykrystalický hořčík má hexagonální mřížku (HCP). V této mřížce je přítomen skluzový systém v rovině $\{0001\}$ ve směru $\langle 1120 \rangle$, což způsobuje nízkou tažnost a plastickou deformaci hořčíkových slitin při pokojových teplotách. Při zvýšených teplotách se projevuje nový skluzový systém ve směru $\langle 1120 \rangle$ na pyramidálních rovinách $\{1011\}$, díky čemuž se hořčík stává lépe tvárný. Hořčík je nejrozsáhleji používán jako legující prvek hliníkových nebo zinkových slitin, ale samotné hořčíkové slitiny mají značnou výhodu z pohledu hustoty kovu a celkové hmotnosti vytvořeného dílu. Při pokojové teplotě je hustota hořčíku $1,738 \text{ g/cm}^3$. Teplota tavení je $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Při této teplotě má tuhá složka hustotu $1,65 \text{ g/cm}^3$ a tekutá $1,58 \text{ g/cm}^3$. Teplota varu při atmosférickém tlaku je $1090 \text{ }^\circ\text{C}$. Hořčík je vysoce reaktivní kov, což způsobuje určitá úskalí při jeho zpracování, zvláště v kombinaci s nízkou teplotou tavení a varu [1, 2].

Kromě hexagonální mřížky hořčíku je pro vytváření hořčíkových slitin také důležitá atomická velikost ($0,320 \text{ nm}$), díky které je hořčík vhodný pro vytváření tuhých roztoků s velkým množstvím dalších prvků. Binární slitiny hořčíku a dalšího prvku vytváří peritektické, nebo nejčastěji eutektické systémy. Fyzikální vlastnosti hořčíkové slitiny jsou do velké míry ovlivněny legujícím prvkem. Různé prvky mění různé vlastnosti hořčíkové slitiny a ve většině případů s rostoucím množstvím tohoto prvku ve slitině roste i vliv na fyzikální vlastnosti [2].

Mg-Al

Hliník je velmi populární legující prvek, který zlepšuje odlévatelnost slitiny. Při koncentracích pod $6 \text{ hm.}\%$ je výrazně zlepšena pevnost a tažnost hořčíkové slitiny. Při překročení $6 \text{ hm.}\%$ je slitinu možné tepelně zpracovat. Všeobecně je koncentrace $6 \text{ hm.}\%$ hliníku považována za optimální poměr pevnosti a tažnosti. Významnou výhodou využití hliníku ve slitině je zvýšení odolnosti proti korozi (pasivace povrchu). Přidáním malého množství Zn do slitiny je vytvořena velmi oblíbená slitina označena jako AZ série [2, 3].

Tab. 2-1 Složení vybraných hořčíkových slitin z AZ série [2]

Slitina	Al	Mn	Zn	Pevnost	Tvrdość
AZ31	3,0	0,2	1,0	255	49
AZ61	6,5	0,15	1,0	305	60
AZ91	8,7	0,13	0,7	275	66

Mg-RE

Přidání vzácných zemin (RE) zlepšuje pevnost díky efektu tuhých roztoků a precipitace. Oproti Zn a Al některé vzácné zeminy vedou k výrazně lepšímu zpevnění tuhých roztoků, což má pozitivní dopady na odolnost proti korozi a mechanické vlastnosti. Naopak, pokud je přítomna intermetalická fáze obsahující RE, může docházet ke snížení odolnosti proti korozi [3].

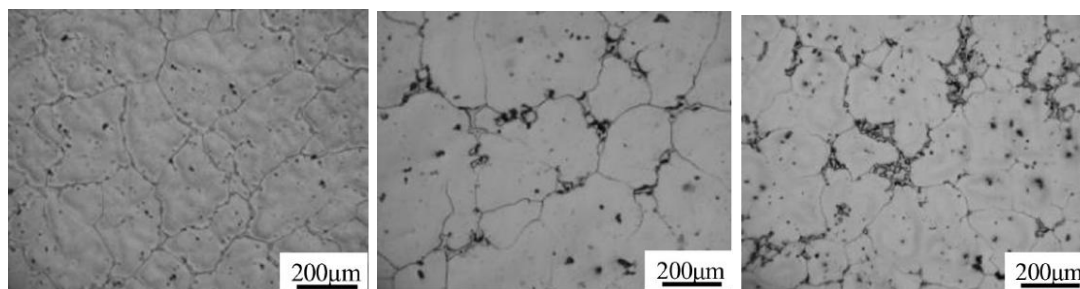
Mg-Zn

Přidání Zn vede ke zpevnění roztoku a k celkovému zjemnění vytvořených zrn. Jemnější zrna výrazně zvyšují pevnost, tažnost a odolnost proti korozi. Vysoký obsah Zn však vede k tvorbě eutektických složek, což zhoršuje mechanické vlastnosti. Přidání zirkonia (Zr) do této slitiny vede k dalšímu zjemnění zrn. Tyto slitiny jsou označeny jako ZK série [3].

2.2.1 Mikrostruktura Mg-Al-Zn slitin

Tato práce se zaměřuje na slitiny Mg-Al-Zn, specificky hořčíkové slitiny ze série AZ. Mechanické vlastnosti hořčíkových slitin jsou závislé na velikosti zrn a precipitátech v daném dílu. Zmenšování velikosti zrn vede k lepší pevnosti výsledného dílu, avšak při velikostech zrn mezi 2 μm a 8 μm většina hořčíkových slitin dosahuje maximální tažnosti. Proto se tento rozsah velikostí zrn považuje za „optimální“ z pohledu poměru pevnosti a tažnosti [4].

Při chladnutí odlitku z Mg-Al slitiny se vytváří eutektikum. Toto eutektikum může mít dvě podoby v závislosti na přítomnosti zinku ve slitině. Jestliže ve slitině není zinek, eutektikum tvoří masivní sloučeninu obsahující ostrůvky tuhého roztoku. V tomto případě jsou precipitáty ve formě $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Pokud je ve slitině zinek (např. AZ slitiny), eutektikum má zcela oddělenou formu, částice sloučeniny jsou rozptýlené v tuhém roztoku a splývají s okolním primárním tuhým roztokem. Precipitáty mohou být ve formě $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, nebo $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$ [2]. Množství precipitátů ve slitině je závislé na množství přidaného hliníku, což lze sledovat při porovnání mikrostruktur slitin AZ31 (3 hm.% Al), AZ61 (6 hm.% Al.) a AZ91 (9 hm.% Al) (Obr. 2-2). Precipitáty ovlivňují mechanické vlastnosti slitiny zamezením skluzu mezi jednotlivými zrny, protože zprostředkovávají tvarový styk [5].



Obr. 2-2 Mikrostruktura a) AZ31, b) AZ61, c) AZ91 [5]

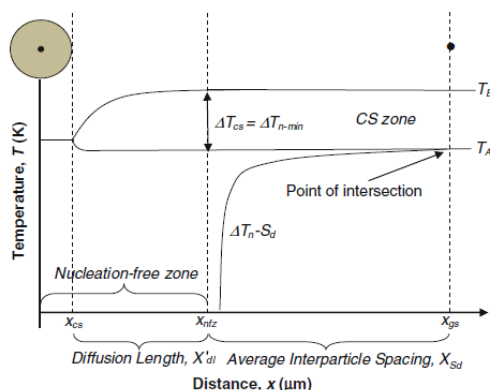
Velikost zrn má velký vliv na mechanické vlastnosti z podobných důvodů jako precipitáty v materiálu. Menší zrna vytváří větší odpor skluzu na hranicích zrn. Velikost zrn je závislá na složení slitiny a rychlosti chladnutí, příp. na následném tepelném zpracování. S rostoucím obsahem hliníku v Mg-Al slitině se zmenšují i zrna, protože vzniklé precipitáty $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ mohou působit jako jádra zrn, nebo inhibiční prvky omezující růst zrn [6].

Velikost zrn lze do velké míry také ovlivnit rychlostí chladnutí a tepelným zpracováním. Velikost zrn v závislosti na rychlosti chladnutí lze predikovat dle teorie vzájemné závislosti (rovnice 1). Tato teorie byla postavena na předpokladu, že nukleace (tvorba prvních krystalů) a růst zrn jsou součástí cyklu tuhnutí. Teorie předpokládá, že růst zrna vytváří dostatečné chemické podchlazení pro další nukleační událost. Vzdálenost mezi jednotlivými nukleačními událostmi určuje výslednou velikost zrn dílu (Obr. 2-3) [7].

$$d_{gs} = x_{cs} + x'_{dl} + x_{sd} = \frac{D \cdot z \cdot \Delta T_{n-min}}{v \cdot Q} + \frac{4,6 \cdot D}{v} \cdot \frac{C_l - C_0}{C_l \cdot (1 - k)} + x_{sd} \quad (1)$$

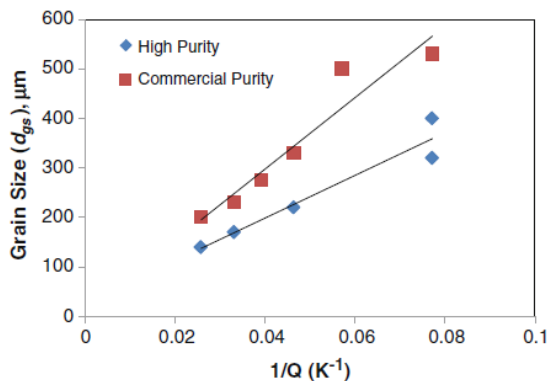
Kde:

- d_{gs} predikovaná velikost zrna
- x_{cs}, x'_{dl}, x_{sd} jednotlivé regiony přispívající k výsledné velikosti zrn
- D difuzní koeficient
- z parametr související s redistribucí legur
- ΔT_{n-min} minimální podchlazení potřebné pro nukleaci
- v rychlost tuhnutí
- Q rychlost odvodu tepla
- C_l koncentrace legur v kapalně fázi
- C_0 celková koncentrace legur
- k koeficient rozdělení



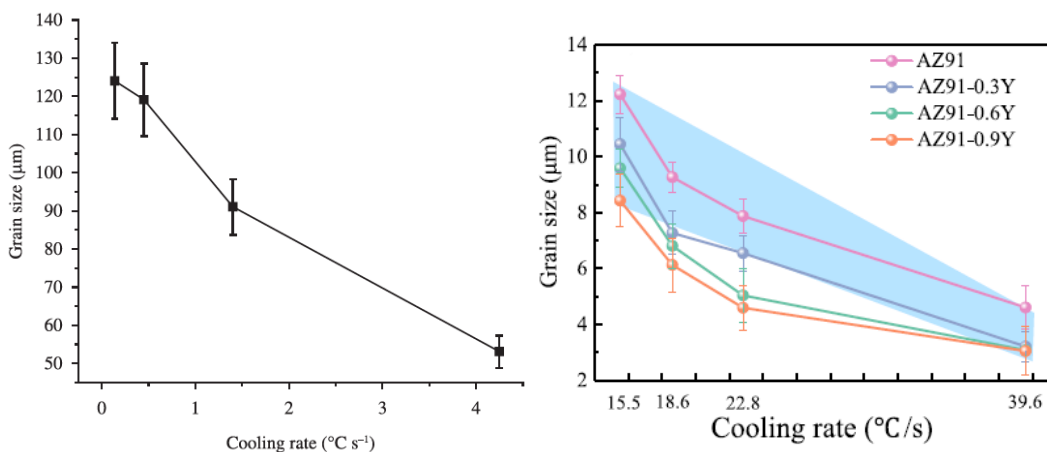
Obr. 2-3 Repräsentace třech oblastí, které dohromady vytváří nukleační vzdálenost a velikost zrn [7]

Tento výpočet je komplexní a v odborné literatuře je velké množství vzájemně si odporujících poznatků. To je způsobeno výrazným rozdílem mezi komerčně dostupnými slitinami a čistými vzorky (Obr. 2-4). U komerčně dostupných slitin se nachází nečistoty jako je Fe a Mn. Zvláště, sami o sobě Fe a Mn vedou na menší velikosti zrn, ale jestliže jsou oba tyto prvky obsaženy ve slitině, může dojít k tvorbě výrazně hrubších zrn [7].



Obr. 2-4 Porovnání závislostí velikostí zrn u komerčních a čistých slitin na rychlosti chladnutí[7]

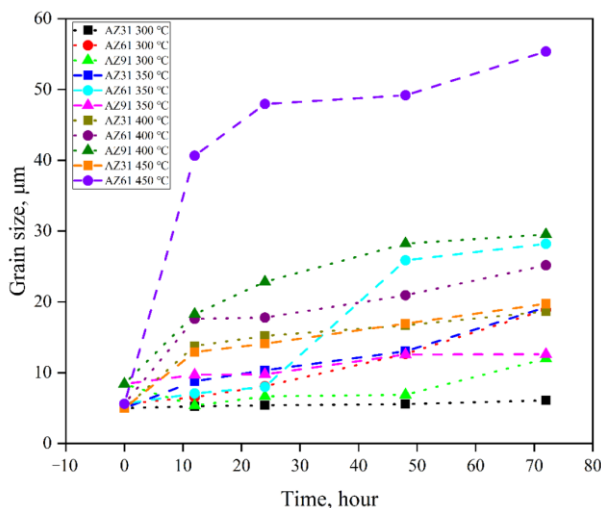
Pokud je přesné složení použité slitiny včetně nečistot neznámé, je vhodné se spíše zaměřit na data získaná z odborných článků, ve kterých je popsáno zpracování slitiny za podobných podmínek. To znamená, že dochází k rapidnímu ochlazení a určitému přehřátí, které lze předpokládat při navařování. Existuje řada studií zabývajících se vlivem rychlosti chladnutí na velikost zrn slitiny AZ91. T. Chen přehřál slitinu AZ91 na teplotu 790 °C, kterou následně chladil a analyzoval mikrostrukturu výsledného odlitku (Obr. 2-5, a)) [8]. H. Cai studoval vliv přidání vzácných zemin do slitiny AZ91 a dopad na mikrostrukturu při různých rychlostech chladnutí. Relevantními výsledky pro tuto práci je prokázání závislosti velikosti zrn na rychlosti chladnutí pro čistou slitinu AZ91 (Obr. 2-5, b)) [9].



Obr. 2-5 Závislost velikosti zrn AZ91 na rychlosti chladnutí a) při pomalejších chladnutích [8], b) při rychlejších[9]

Rychlost chladnutí při WAAM může být však až stovky stupňů za sekundu [10].

Velikost zrn je ovlivnitelná tepelným zpracováním. Při delších časových intervalech za vyšších teplot dochází k tvorbě hrubších zrn. Na tento jev je citlivější slitina AZ61, oproti slitinám AZ31 a AZ91. R. Chen analyzoval mikrostrukturu těchto slitin po tepelném zpracování při teplotách 300, 350, 400 a 450 °C po dobu 12, 24, 48 a 72 h. Z výsledných měření je patrné, že při nejnižší teplotě 300 °C po dobu 12 hodin je rozdíl velikostí zrn malý, a to i přesto, že AZ61 je nejvíce citlivá na růst zrn tepelným zpracováním. Zatímco původní velikost zrn byla 5,6 μm, po tepelném zpracování byla v průměru 6,54 μm. Závislost velikosti zrn různých materiálů na teplotě a době tepelného zpracování je vyznačena v grafu (Obr. 2-6) [11].

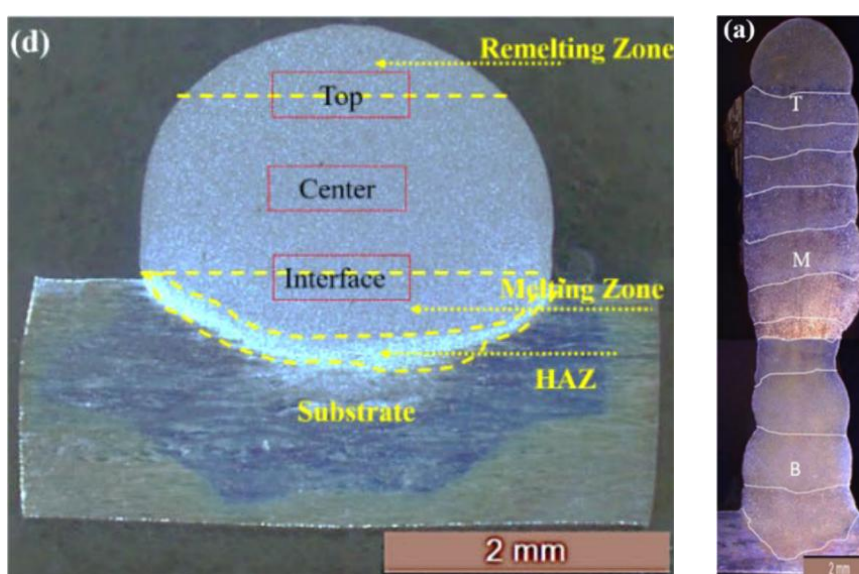


Obr. 2-6 Závislost velikosti zrn AZ31, AZ61 a AZ91 na teplotě a době tepelného zpracování [11]

Mikrostruktury hořčíkových slitin při WAAM zpracování

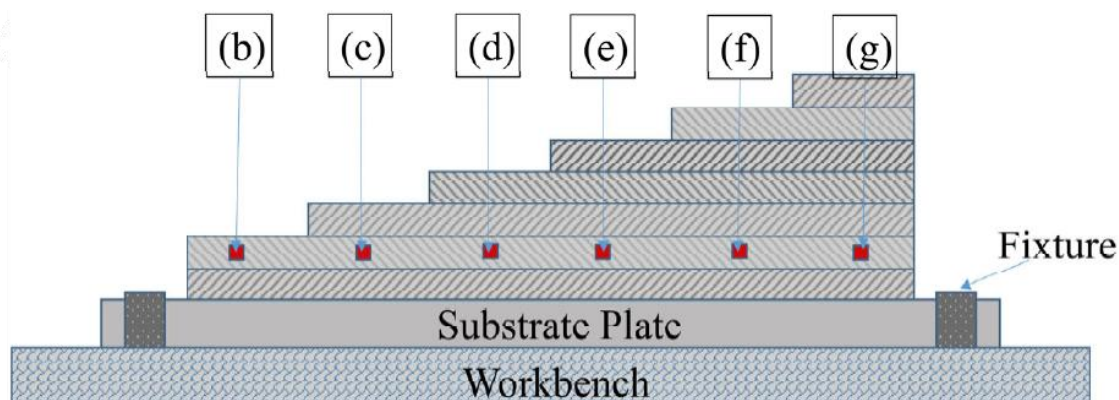
Velikost zrn ve vyrobeném dílu metodou WAAM je závislá na rychlosti chladnutí nanášeného materiálu a působení opakovaného natavení při nanášení dalších vrstev. Rychlost chladnutí a případně intenzitu opakovaného natavení lze do velké míry ovlivnit regulací vkládaného tepla do procesu. Ying T. testoval parametry, které vkládají teplo 96, 103, 114 a 120 J/mm a výsledná struktura ukazovala průměrnou velikost zrn 22, 32, 25, 45 μm. Tyto výsledky ukazují závislost mezi rostoucím vkládaným teplem a velikostí zrn, která roste také. Vedlejším dopadem vyšších teplot při procesu navařování je vznik většího množství defektů [12].

Rychlost chladnutí není ve všech oblastech dílu a návaru stejná. Pro vytvořený díl i samotný návar platí, že s rostoucí vzdáleností od podložky je pomalejší i rychlost chladnutí. U jednoduchého návaru (tzv. singletrack) je možné sledovat velký rozdíl velikostí zrn. Pro slitinu AZ31 je v horní oblasti návaru (Top, Obr. 2-7, a)) průměrná velikost zrn $60\ \mu\text{m}$, ve střední (Center, Obr. 2-7, a)) je $42\ \mu\text{m}$ a ve spodní (Interface, Obr. 2-7, a)) $35\ \mu\text{m}$ [13]. Podobnou závislost lze sledovat i u tenkostěnných dílů ze slitiny AZ31. Ve spodní oblasti (B, Obr. 2-7, b)) je velikost zrn $38\ \mu\text{m}$, ve střední (M, Obr. 2-7, b)) je $63\ \mu\text{m}$ a v horní (T, Obr. 2-7, b)) je $58\ \mu\text{m}$ [14]. Rozdíl velikosti zrn mezi horní a střední oblastí není velký, což poukazuje na fakt, že se při větších vzdálenostech od podložky rychlost chladnutí nemění. Zajímavostí je, že ve střední oblasti jsou hrubší zrna než v horní oblasti. To může být vysvětleno nepřesností měření nebo působením opakovaného natahování a zahřívání při nanášení dalších vrstev.



Obr. 2-7 a) Oblasti jednoduchého návaru [13], b) Oblasti tenkostěnného dílu [14]

Vliv dalších nanesených vrstev na velikost zrn byl testován se slitinou AZ91. Experiment byl navržen pro tenkostěnný díl. U každé další nanesené vrstvy byl vytvořen „schod“ pro analýzu vlivu jednotlivých vrstev (Obr. 2-8). Po navaření dvou vrstev prošel díl tepelným zpracováním pro homogenizaci mikrostruktury. Druhá vrstva dílu byla analyzována v oblasti všech „schodů“ později nanesených vrstev (b-d, Obr. 2-8). Oblast bez dalších nanesených vrstev (b, Obr. 2-8) měla průměrnou velikost zrna $15,60\ \mu\text{m}$, oblast s jednou další nanesenou vrstvou (c, Obr. 2-8) měla velikost zrn $18,98\ \mu\text{m}$ a s dvěma dalšími vrstvami (d, Obr. 2-8) měla velikost $20,45\ \mu\text{m}$. V dalších oblastech (e-g, Obr. 2-8) již nedocházelo ke změně velikosti zrna. Velikost zrna je ovlivněna pouze dvěma dalšími nanesenými vrstvami, poté tepelný výkon není dostatečný pro výraznou změnu mikrostruktury u tenkostěnných dílů pro slitinu AZ91 [15].



Obr. 2-8 Vzorek experimentu pro analýzu vlivu později nanesených vrstev na mikrostrukturu [15]

Podobný efekt působení dalšího navařování lze předpokládat i u objemových dílů. Mikrostruktura je u nich ovlivněna nejen dalšími nanesenými vrstvami, ale i návarý, které jsou navařovány vedle původního. Byl analyzován objemový díl z hořčikové slitiny AZ91, kde vnitřní oblast návaru měla velikost zrn $9,14 \mu\text{m}$ a oblasti dotýkající se vedlejšího a horního návaru měly velikost zrn $12,85 \mu\text{m}$. Oblast, kde se všechny tyto tři návarý dotýkaly, měla však zdaleka největší velikost zrna $25,82 \mu\text{m}$. To poukazuje na zásadní vliv kombinace dalších, později navařených návarů [16].

Souhrn zjištěných velikostí zrn je zanesen do tabulky (Tab. 2-2). Hořčikové slitiny AZ31 měly všeobecně největší velikosti zrn, zatímco slitina AZ91 měla nejmenší. Pro slitinu AZ61 lze odhadnout velikost zrn okolo $20 - 30 \mu\text{m}$.

Tab. 2-2 Souhrn velikostí zrn hořčikových slitin po WAAM výrobě

Metoda navařování	Typ vzorku	Materiál	Průměrná velikost zrna	Zdroj	
CMT	Tenkostěnný	AZ31	Vrchní oblast	$58 \mu\text{m}$	[14]
			Střední oblast	$63 \mu\text{m}$	
			Spodní oblast	$38 \mu\text{m}$	
CMT	Singletrack	AZ31	Vrchní oblast	$35 \mu\text{m}$	[13]
			Střední oblast	$42 \mu\text{m}$	
			Spodní oblast	$60 \mu\text{m}$	
CMT	Tenkostěnný	AZ61	$27 \mu\text{m}$	[17]	
GTAW	Tenkostěnný	AZ61	$22,0 - 45,2 \mu\text{m}$	[12]	
			(v závislosti na procesních parametrech)		
GTAW	Tenkostěnný	AZ91	Vrchní oblast	$27 \mu\text{m}$	[18]
			Střední oblast	$33 \mu\text{m}$	
CMT	Tenkostěnný	AZ91	$15,6 \mu\text{m}$	[15]	
CMT - Weaving	Objemový	AZ91	$6,52 - 25,82 \mu\text{m}$	[16]	
			(v závislosti na zkoumané oblasti)		

2.2.2 Tepelně-fyzikální vlastnosti Mg-Al-Zn slitin

Znalost tepelně-fyzikálních vlastností hořčkových slitin, použitých v této práci, jsou důležité pro porozumění problematice technologie WAAM. Tepelně-fyzikální vlastnosti hořčkových slitin jsou ovlivněny zejména jejich hexagonální (HCP) mřížkou. Mají relativně vysokou tepelnou vodivost a nízkou tepelnou kapacitu. Dalšími důležitými prvky, které ovlivňují tyto vlastnosti, jsou velikosti zrn a složení slitiny [19].

U Mg-Al slitiny je zásadní množství hliníku ve slitině pro chování termo-fyzikálních vlastností při zvýšených teplotách. Jestliže slitina obsahuje méně jak 0,5 hm.% hliníku, tepelná vodivost s teplotou klesá, při 0,9 hm.% hliníku, tepelná vodivost zůstává stejná a při 1,5 hm.% hliníku tepelná vodivost roste s rostoucí teplotou [19]. Velikost zrn dokáže vlivem precipitátů na okrajích zrn ovlivnit tepelnou vodivost hořčkových slitin. Okraje zrn zamezují vodivosti tepla, proto jsou v případě menších zrn okraje hustější a tepelná vodivost je menší [20, 21].

V této práci je slitina AZ61 ve formě svařovacího drátu použita pro WAAM aditivní výrobu dílu na podložce vyrobené ze slitiny AZ91, nebo AZ31. Jedná se o sesterské slitiny, u kterých je zaručena jejich vzájemná svařitelnost [2]. Zjištěné tepelně-fyzikální vlastnosti budou použity pro simulaci navařovací metody, proto je nutné vybrat tepelně-fyzikální vlastnosti odpovídající skutečným vlastnostem. U vytvářeného dílu ze slitiny AZ61 se předpokládají jemná zrna v rozsahu 20 – 30 μm (viz předchozí kapitola). Nejblíže odpovídají tepelně-fyzikální vlastnosti odlitku slitiny AZ61 z odborné literatury, kde odlitek měl velikost zrn 10 – 20 μm (Tab. 2-3) [22]. Podložka vyrobená ze slitiny AZ31 je vyrobena válcováním a podložka z AZ91 odléváním. Válcování výrazně zjemňuje a deformuje zrna výsledného dílu, zatímco odlévání vede na tvorbu větších zrn. Tepelně-fyzikální vlastnosti takto vyrobených dílů ze slitiny AZ31 a AZ91 jsou vypsány v tabulce.

Tab. 2-3 Termofyzikální vlastnosti AZ31, AZ61 a AZ91

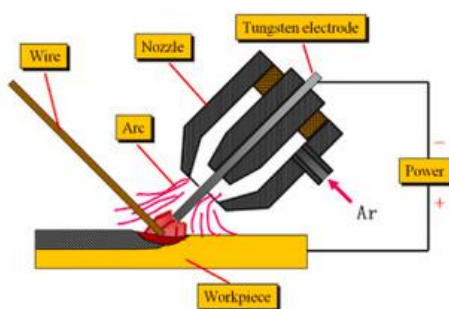
Teplota (°C)	AZ31 [19] (Válcované)		AZ61 [22] (10-20 μm)		AZ91 [23] (Odlitek)	
	Vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Kapacita ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Kapacita ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Kapacita ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
25	80,1	1002	63,2	1,0066	44,43884	0,97
50	84,5	1037	-	-	46,92472	0,99
100	89,5	1070	70,0	1,0188	51,677	1,02
150	95,0	1107	-	-	56,13663	1,05
200	97,6	1120	76,9	1,0372	60,3036	1,08
250	99,2	1113	-	-	64,17793	1,11
300	102,8	1146	81,4	1,0762	67,75961	1,14
350	105,5	1166	-	-	71,04864	1,18
400	-	-	83,5	1,0986	74,04502	1,21

2.3 WAAM metody

WAAM je aditivní technologie fungující na principu postupného nanášení vrstev kovového materiálu metodou navařování. WAAM se vyznačuje svojí relativně nízkou pořizovací cenou v porovnání s dalšími aditivními technologiemi a vysokou rychlostí nanášení materiálu. Materiál je nanášen prostřednictvím svařovacího hořáku a svařovacího zařízení. Tepelným zdrojem je zde elektrický oblouk a vstupní materiál je svařovací drát. Navařování lze realizovat třemi metodami: svařování wolframovou elektrodou (WIG), plazmové obloukové svařování (PAW), nebo svařování v inertní atmosféře (MIG).

WAAM WIG

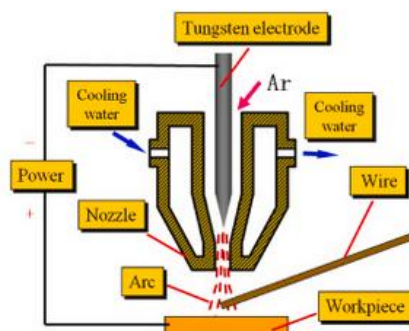
Navařování wolframovou elektrodou je energeticky efektivní metoda. Kovový drát je taven pomocí nespolečné wolframové elektrody, kde podložka funguje jako anoda pro elektrický oblouk. K zavedení svařovacího drátu je nutné využití externího podavače, který zavádí drát pod úhlem k elektrodě. V tomto procesu je nutné využití inertního plynu (nejčastěji Argon) pro ochranu roztaveného materiálu proti oxidaci [24, 25].



Obr. 2-9 WAAM MIG metoda [24]

WAAM PAW

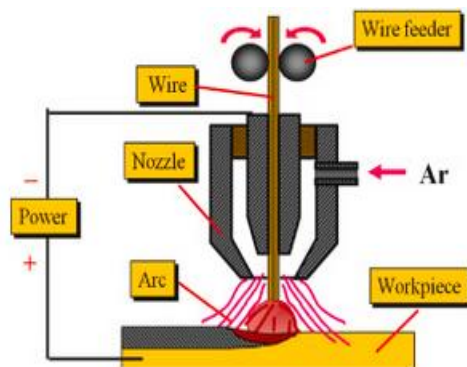
PAW využívá plazmový hořák pro navařování materiálu a externí podavač pro zavedení svařovacího drátu. Při procesu je nutné využití inertní atmosféry. Výhodou plazmového hořáku je možnost vkládání velkého množství tepla, což vede k rychlejšímu nanášení, nebo navařování náročnějších materiálů [24, 25].



Obr. 2-10 WAAM PAW metoda [24]

WAAM MIG

MIG navařování materiálu je dvakrát až třikrát rychlejší než u předchozích metod. MIG je také nejpoužívanější metodou pro WAAM[26]. Při MIG navařování je elektrický oblouk vytvořen mezi podložkou a odtavitelnou elektrodou v podobě kovového svařovacího drátu. Oproti ostatním metodám je svařovací drát nejčastěji orientován kolmo k podložce a není nutné využití dalších prvků pro vytvoření elektrického oblouku [24, 25]. Kromě konvenčních MIG metod jsou často využívány modifikace MIG navařování jako například CMT. Výhodou metody CMT oproti ostatním metodám je až o 33% menší množství vkládaného tepla při procesu navařování [14].



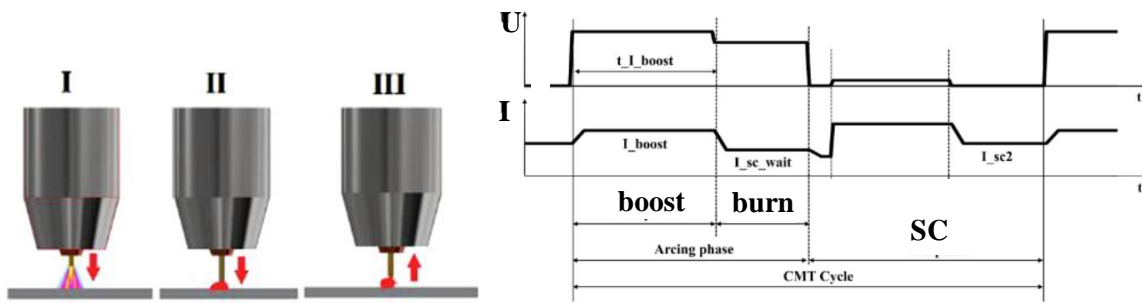
Obr. 2-11 WAAM MIG metoda [24]

V současné době je MIG s modifikací CMT považován za nejvhodnější metodu pro WAAM výrobu hořčíkových slitin. CMT snižuje vstup tepla oproti konvenční metodě MIG a také zlepšuje stabilitu oblouku a minimalizuje rozstřík[27]. CMT modifikace dovoluje ovládané nanášení roztavených kovových kapek. Metoda funguje na principu opakujících se cyklů proudu a napětí, které jsou synchronizovány s kmitáním drátu.

. Proces se skládá z periodicky se opakujících fází:

- natavení konce drátu pomocí elektrického oblouku
- následuje vysunování drátu až po dotyk s nataveným základním materiálem,
- nanesení roztavené kapky při přerušeném elektrickém oblouku.

Toto přerušení elektrického oblouku snižuje teplo vnesené do procesu a je hlavní výhodou této metody. Poté je drát oddálen od základního materiálu a cyklus se opakuje[26]. Tento proces je rozdělen do několika fází, ke kterým se vztahují nastavitelné parametry. Mezi tyto fáze patří Boost fáze, při níž vrcholí proud a napětí a drát je natavován ve vzdálené pozici od podložky (Obr. 2-12, a), I). Následuje Burn fáze, drát se pohybuje směrem k podložce (Obr. 2-12, a), II). V této fázi jsou hodnoty proudu a napětí sníženy (Obr. 2-12, b)). Při dotyku drátu s natavenou kapkou a podložky je započata třetí fáze a to Short-circuit fáze. Při třetí fázi jsou hodnoty proudu a napětí minimalizovány a po krátkém časovém intervalu je započata retrakce drátu (Obr. 2-12, a))[28].



Obr. 2-12 a) CMT metoda[26], b) CMT proudová charakteristika [29]

2.4 Procesní parametry

Pro proces WAAM výroby objemových dílů je možné nastavit řadu parametrů. Tyto parametry lze rozdělit na parametry svařovacího zařízení, parametry manipulačního ramena a parametry předehřevu podložky. Všechny tyto druhy parametrů mají vliv na geometrii návarů, stupeň provaření a množství a druh defektů.

2.4.1 Parametry CMT charakteristiky

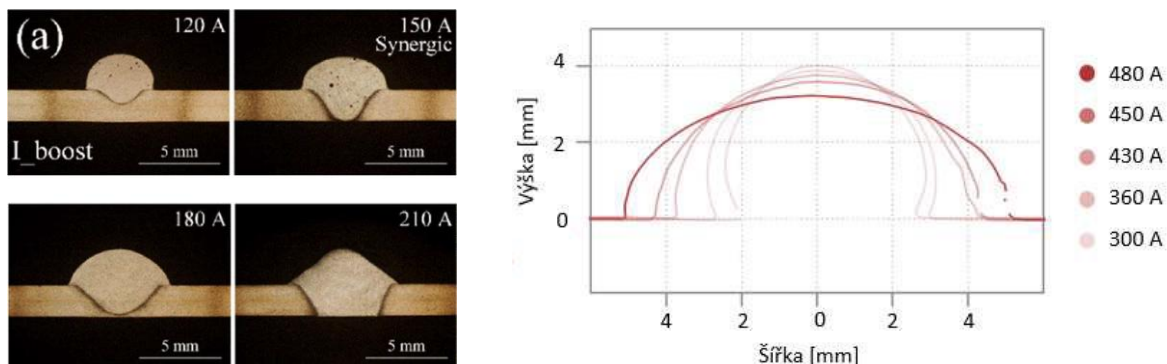
Svařovací zdroj Fronius 3200 CMT, který je dále použit v této práci využívá technologie MIG s modifikací CMT.

Tvorba a modifikace CMT parametrů je komplexní úloha, která vyžaduje rozsáhlou znalost problematiky a speciální měřicí zařízení, jako je vysokorychlostní kamera, osciloskop atd. Výrobce svařovacích zařízení Fronius upozorňuje na tyto rizika ve své příručce, ale uznává, že při procesu musí být určité CMT parametry modifikovány pro specifické využití. Doporučená metodika od výrobce pro určení vhodných parametrů je „pokus a omyl“ [28].

Pro proces CMT navařování je možné nastavit 9 parametrů, z toho 5 parametrů určují specifické hodnoty CMT cyklu, zatímco zbylé 4 charakterizují přechod mezi těmito hodnotami. Tyto 4 parametry nemají zásadní vliv na výsledný návar a stabilitu procesu. Stabilního procesu lze dosáhnout pomocí 5 níže uvedenými parametry.

I_{boost} [A]

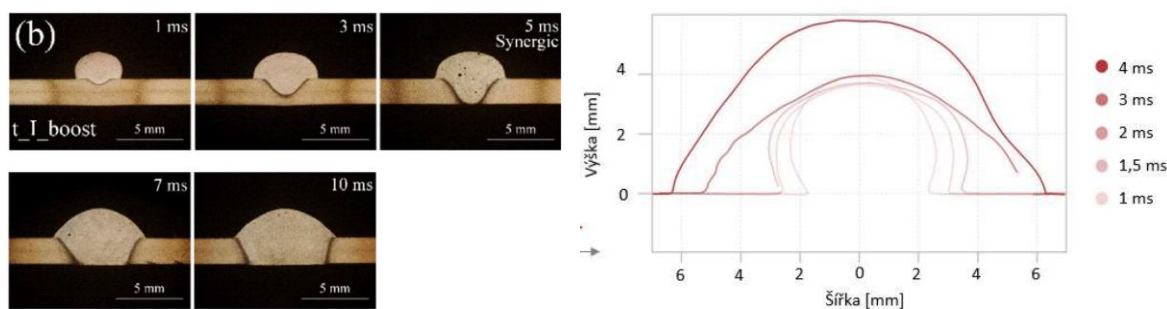
I_{boost} popisuje velikost proudu při Boost fázi. Tento parametr popisuje velikost proudu při hlavní tavící fázi celého CMT cyklu, proto má zásadní vliv na množství vnášeného tepla, geometrii provaření a stupeň provaření. S rostoucím parametrem I_{boost} roste i stupeň provaření, šířka návaru a snižuje se výška návaru. Zatímco u hliníkových slitin se také projevuje velký vliv na kontaktní úhel (Obr. 2-13, a)) [30], u hořčíkových slitin tento parametr nemá tak zásadní vliv na kontaktní úhel návaru (Obr. 2-13, b)) [31].



Obr. 2-13 Vliv I_{boost} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny[31], b) hořčíkové slitiny AZ61[30]

$t_{I_{\text{boost}}}$ [ms]

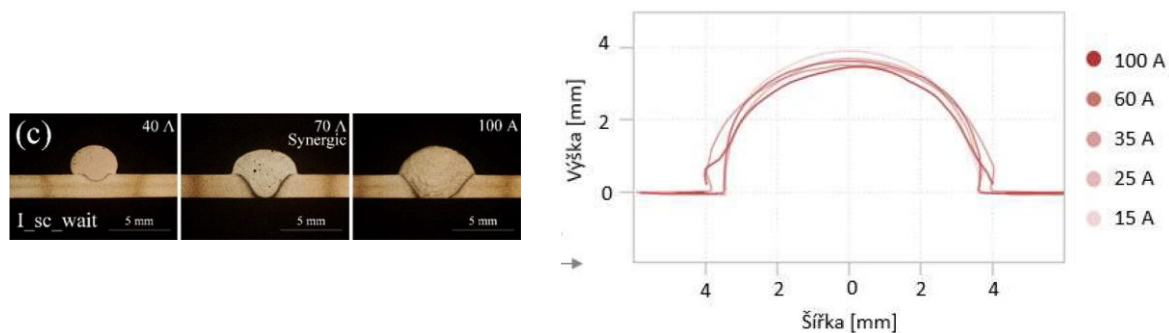
$t_{I_{\text{boost}}}$ je časový interval, který popisuje dobu, po kterou působí proud Boost fáze. Podobně jako parametr I_{boost} , tento parametr má velký vliv na vkládané teplo, geometrii návaru a stupeň provaření (Obr. 2-14, a)). Při vyšších hodnotách tohoto parametru se zlepšuje provaření, zvyšuje šířka a kontaktní úhel návaru [30, 31]. Při navařování slitiny AZ61 byla zjištěna vysoká nestabilita procesu při parametrech vyšších jak 4 ms (Obr. 2-14, b)) [31].



Obr. 2-14 Vliv $t_{I_{\text{boost}}}$ na průřez návaru z a) hliníkové slitiny [31], b) hořčíkové slitiny AZ61 [30]

I_{sc_wait} [A]

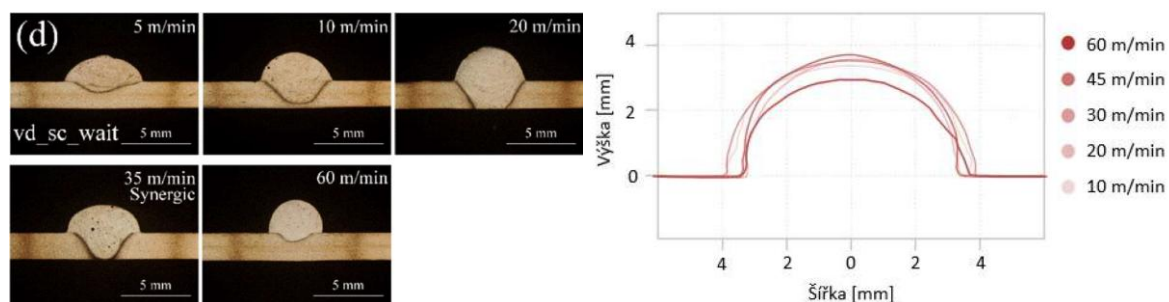
I_{sc_wait} charakterizuje proud při Burn fázi, při níž dochází k posuvu drátu směrem k podložce. Tento proud udržuje teplotu roztavené kapky při tomto posuvu. Jestliže je tento parametr příliš vysoký, dochází k oddělení kapky příliš brzy a také k celkově nestabilnímu navařování. Při testování na hliníkových slitinách se projevil velký vliv na geometrii návaru (Obr. 2-15, a)) [30], avšak u hořčíkové slitiny AZ61 nebyl nalezen zásadní vliv na geometrii návaru i při širokém rozsahu parametrů (Obr. 2-15, b)) [31].



Obr. 2-15 Vliv I_{sc_wait} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny[31], b) hořčíkové slitiny AZ61[30]

vd_{sc_wait} [m/min]

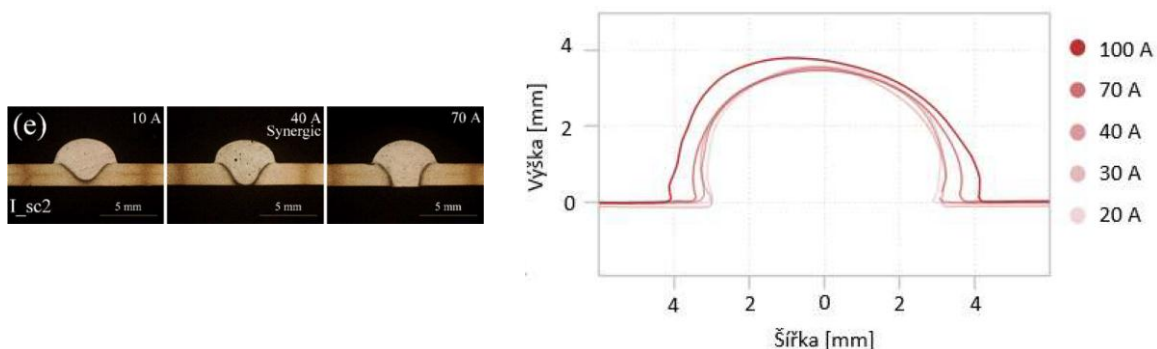
vd_{sc_wait} popisuje rychlost posuvu drátu při Burn fázi, při níž dochází k nanášení roztavené kapky. Tento parametr má zásadní vliv na rychlost CMT cyklu a tím pádem frekvenci proudových pulsů. S vyššími parametry se zvyšuje provaření. U hliníkových slitin se projevuje určitý vliv na geometrii průřezu návaru (Obr. 2-16, a)) [30], u hořčíkové slitiny AZ61 tento vliv není tak zásadní (Obr. 2-16, b)) [31]. Zajímavostí je, že u hliníkových slitin s tímto parametrem nastaveným na 60 m/min došlo k výraznému poklesu provaření návaru.



Obr. 2-16 Vliv vd_{sc_wait} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny[31], b) hořčíkové slitiny AZ61[30]

I_{sc2} [A]

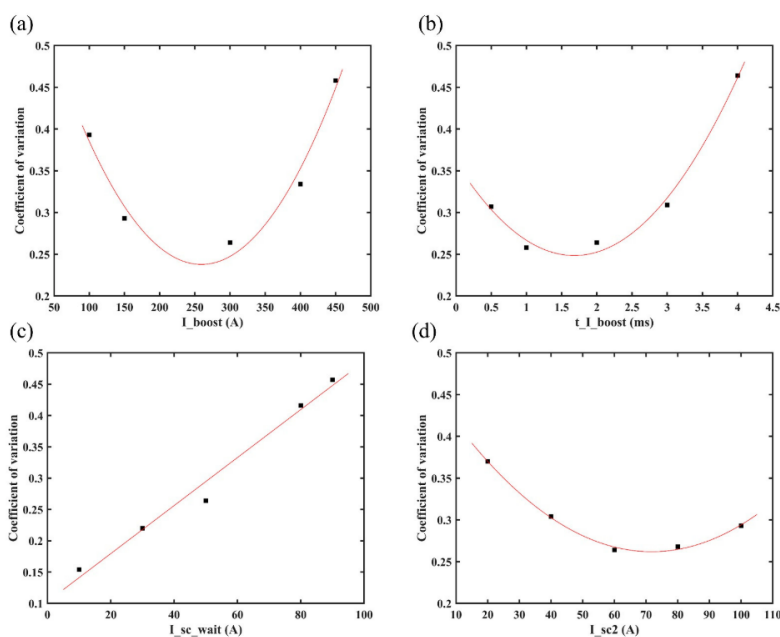
I_{sc2} popisuje proud při Short-circuit fázi, při níž dochází k propojení kapky s návarovou lázní. Tento proud má vliv na provaření (Obr. 2-17, a)) a rychlost chlazení návarové lázně. S tímto rostoucím parametrem roste i provaření a zpomaluje se rychlost ochlazování návaru. Tento parametr nemá zásadní vliv na geometrii návaru u hořčíkových, ani u hliníkových slitin (Obr. 2-17) [30, 31].



Obr. 2-17 Vliv I_{sc2} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny [31], b) hořčíkové slitiny AZ61 [30]

Stabilita navařování je závislá na dalších parametrech a konfiguracích navařování, jako je průměr svařovacího drátu a případně přehřev podložky pro navařování.

Stabilita jednotlivých parametrů lze vyšetřit pomocí Vilarinho indexu stability. Toto vyšetření pro slitinu AZ91 ukazuje lineární stoupající charakteristiku pro parametr I_{sc_wait} , proto je vhodné pro tento parametr zvolit nižší hodnoty. Další parametry ukazují kvadratickou charakteristiku a jejich hodnoty je nutné zvolit na základě individuálních podmínek (Obr. 2-18) [29].

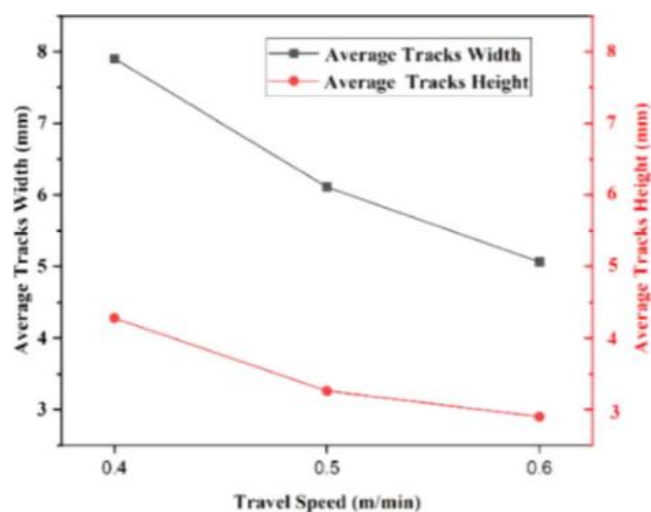


Obr. 2-18 Koeficient stability hlavních parametrů [29]

2.4.2 Parametry manipulačního ramene

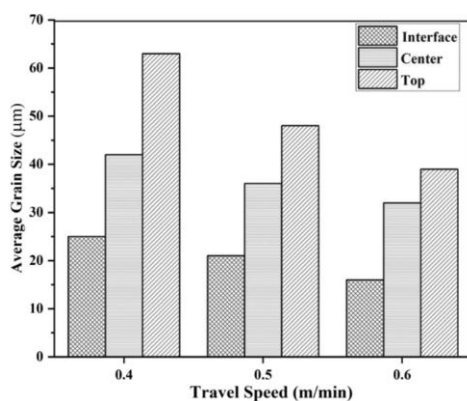
Rychlost posuvu hořáku

Změnou rychlosti posuvu hořáku lze významně ovlivnit geometrii návaru. Rozsah rychlostí, které jsou použitelné, musí být stanoveny pro specifické parametry svařovacího zařízení a další provozní podmínky. Při příliš vysokých rychlostech posuvu, v kombinaci s nízkými parametry svařovací charakteristiky, dochází k tvorbě nekonsistentní geometrie návaru. Kromě tohoto omezení není změnou rychlosti posuvu zásadně ovlivněna kvalita nebo stabilita návaru. Zvýšením rychlosti posuvu hořáku dojde ke zmenšení výšky a šířky návaru [32].



Obr. 2-19 Závislost výšky a šířky návaru na rychlosti posuvu hořáku [32]

Rychlost posuvu hořáku má také vliv na mikrostrukturu naneseného návaru. Při vyšších rychlostech dochází ke zjemňování velikosti zrn. Menší velikost zrn je způsobena rychlejším chlazením návaru při vyšších rychlostech posuvu [32].

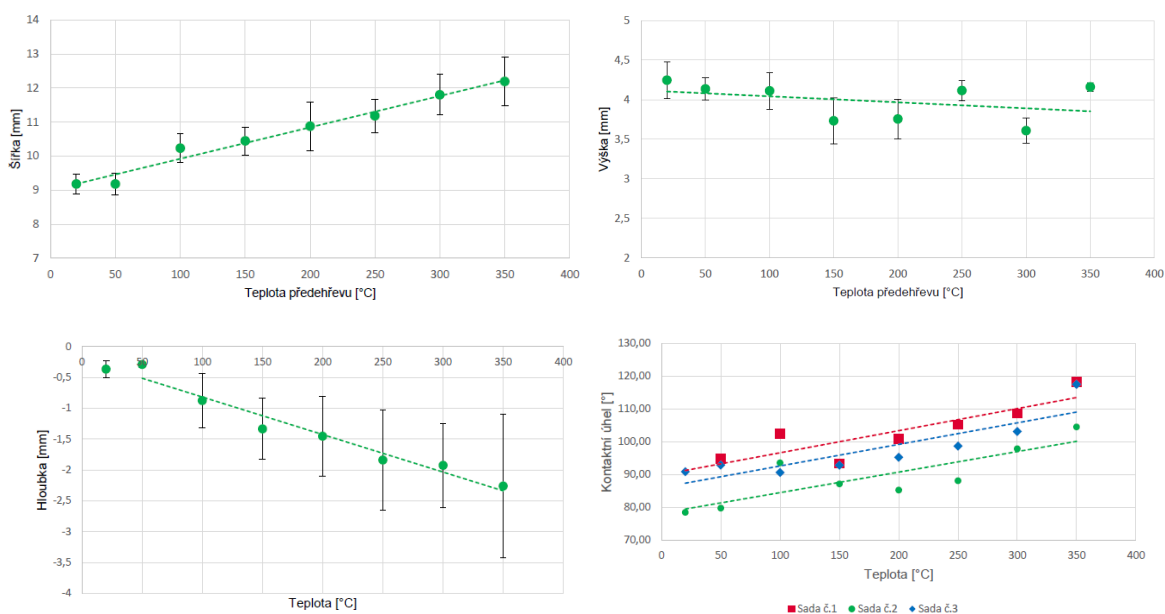


Obr. 2-20 Průměrné velikosti zrn v závislosti na rychlosti posuvu hořáku [32]

2.4.3 Předehřev

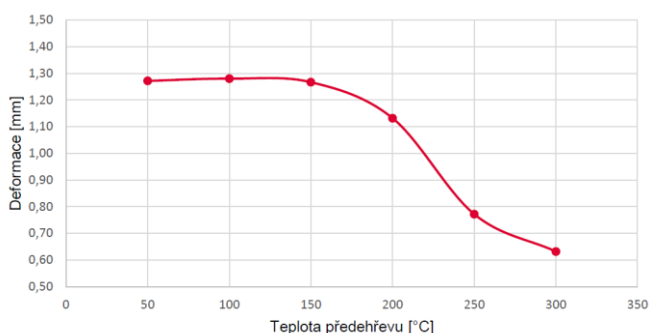
Předehřev má velký vliv na výslednou geometrii, provaření, i mikrostrukturu návaru. S rostoucím předehřevem roste i pevnost v tahu a tvrdost návaru z hořčíkové slitiny AZ61. Zlepšení mechanických vlastností je způsobeno zvýšením množství precipitátů $Mg_{17}Al_{12}$ na hranicích zrn [33].

Zvýšení předehřevu také ovlivňuje geometrii průřezu a provaření návaru. S růstem teploty předehřevu se zvyšuje šířka, kontaktní úhel a provaření návaru, zatímco výška návaru klesá (Obr. 2-21). Stupeň ovlivnění závisí na specifických procesních parametrech a původní geometrii návaru [34].



Obr. 2-21 Vliv předehřevu na a) šířku návaru, b) výšku návaru, c) hloubku provaření, d) kontaktní úhel[34]

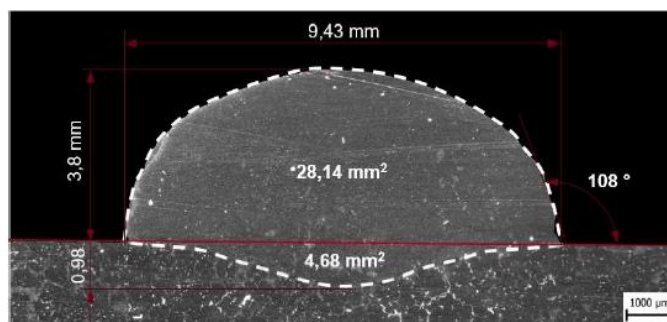
Zvýšení předehřevu také vede ke zmenšení vnitřních napětí vytvořeného návaru (Obr. 2-22). Do předehřevu 150 °C nedochází k žádné změně vnitřních napětí, avšak při předehřevu 200 °C a vyšším dochází k jejich výraznému snížení [34].



Obr. 2-22 Vliv předehřevu na deformaci návaru[34]

2.4.4 Používané procesní parametry pro Mg-Al-Zn slitiny

V odborné literatuře jsou uvedeny procesní parametry, které byly použity při WAAM výrobě jednoduchých návarů (sigletracků) nebo tenkostěnných dílů. Velké množství odborné literatury nezmiňuje specifické procesní parametry navařování Mg-Al-Zn slitiny a žádný z nalezených zdrojů nezmiňuje procesní parametry pro výrobu objemových dílů z této slitiny. Procesní parametry, které nejbližší odpovídají podmínkám této práce jsou uvedeny v diplomové práci Ing. Švába (2023) na VUT v Brně v níž jsou nalezeny nejvhodnější procesní parametry pro výrobu tenkostěnných dílů ze slitiny AZ61. Průměr svařovacího drátu v této práci je 1,6 mm, což odpovídá technologickým možnostem při řešení této práce [31].



Obr. 2-23 Návar vhodný pro výrobu tenkostěnných dílů ze slitiny AZ61 [31]

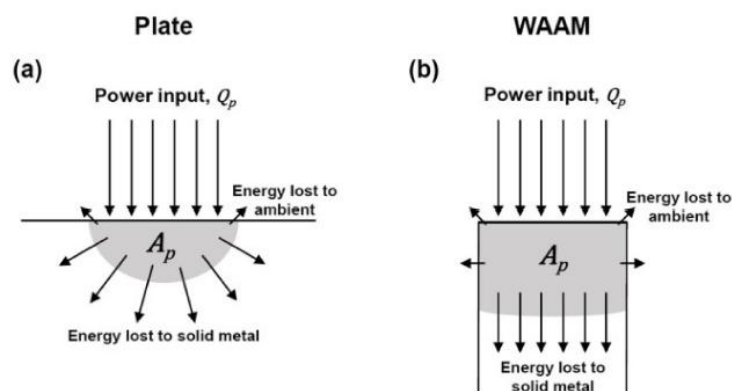
Zjištěné parametry CMT charakteristiky pro hořčikové slitiny jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 2-4 Používané CMT parametry pro WAAM

Materiál Průměr drátu	Stav	I_boost [A]	t_I_boost [ms]	I_sc_wait [A]	vd_sc_wait [m/min]	I_sc2 [A]	Rychlost posuvu [mm/s]
AZ31 Ø1,2 mm [35]	Použité parametry (tenkostěnné díly)	180	-	70	-	-	10
AZ31 Ø1,2 mm [36]	Nejlepší parametry (tenkostěnné díly)	350	2	35	40	60	10
AZ91 Ø1,2 mm [29]	Stabilní rozsah	170 - 330	1 - 2,5	10	-	50 - 90	
	Nejstabilnější parametry (návar)	312,5	2,5	10	-	75,5	9
AZ61 Ø1,6 mm [37]	Funkční rozsah	360 - 480	1,7 - 3	15 - 100	10 - 60	20 - 100	
	Nejlepší parametry (tenkostěnné díly)	430	2,5	3,5	30	50	10

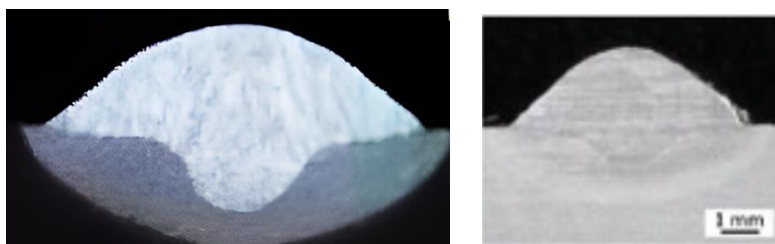
2.5 Objemové díly

Na rozdíl od tenkostěnných dílů je objemový díl tvořen více návary vedle sebe. Při navařování objemových dílů je nutné zvolit vhodnou strategii nanášení a správně zvolit procesní parametry. Tenkostěnné a objemové díly mají odlišné požadavky na procesní parametry a charakteristiku návary. U objemových dílů dochází k výrazně rychlejšímu odvodu tepla z důvodu většího objemu již naneseného materiálu. Při navařování musí dojít k provaření nejen materiálu pod návarem, ale i vedle návary. Objemové díly lze porovnat spíše s konvenčním svařováním než k tenkostěnným dílům, jelikož dochází k odvodu tepla ve více směrech (Obr. 2-24).



Obr. 2-24 Odvod tepla u a) normálního svařování, b) WAAM tenkostěnných dílů[38]

Saham (2023) testoval různé návary pro využití na výrobu objemových dílů se závěrem, že je nutné využít nízké, široké návary, které mají velký kontaktní úhel a dobré provaření (Obr. 2-25, a))[39]. Podobného závěru dosáhl i Müller (2022) (Obr. 2-25, b))[40].



Obr. 2-25 Návar vhodný pro objemové díly a) Saham[39], b) Müller[40]

2.5.1 Trajektorie nanášení

Existuje velké množství trajektorií a strategií nanášení, které jsou používány pro výrobu objemových dílů. Pro všechny trajektorie je nutné dopočítat rozteč mezi návarý, aby docházelo k dostatečnému provaření mezi návarý a zajištění co nejlepší geometrické přesnosti.

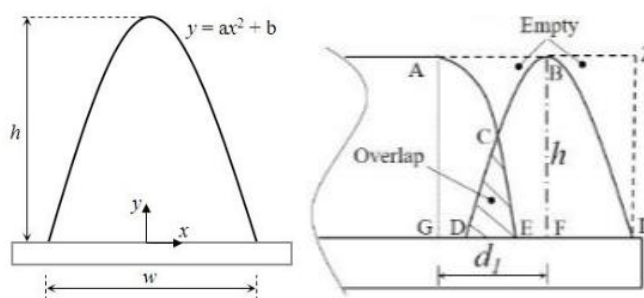
Rozteč mezi návarý

Výpočet roztečí je zjednodušen nahrazením geometrie průřezu návaru parabolickou, obloukovou, nebo cosinovou funkcí. Vhodná funkce pro návar se volí dle specifického průřezu návaru [41].

Tab. 2-5 Funkce rovnic pro popis průřezu návaru[41]

Funkce	Rovnice	Výška návaru h	Šířka návaru w
Parabola	$y = a \cdot x^2 + c$	c	$2 \cdot \sqrt{\frac{c}{-a}}$
Cosin	$y = a \cdot \cos(b \cdot x)$	a	$\frac{\pi}{b}$
Oblouk	$y = \sqrt{a^2 - x^2} + b$	a - b	$2 \cdot \sqrt{a^2 - b^2}$

Výpočet vychází z potřeby vytvoření horní rovinné plochy na každé nanesené vrstvě. Proto je výpočet vytvořen na základě předpokladu, že oblast překrytí dvou návarů (Obr. 2-26, oblast CDE) se rovná prázdné oblasti mezi vrcholy návarů (Obr. 2-26, oblast ABC). Pro zjednodušení výpočtů je geometrie průřezu návaru předpokládána jako parabola (Obr. 2-26, a)), nicméně postup u všech funkcí rovnic je stejný [42].



Obr. 2-26 a) Parabolický průřez návaru, b) Schematické znázornění překrytí dvou návarů [42]

Rozteče lze rozdělit na tři druhy: rozteče mezi vnitřními návarů, rozteče okrajových návarů rovnoběžných s vnitřními a rozteče okrajových návarů, které jsou kolmé k trajektorii vnitřních návarů. Rozteče mezi vnitřními návarů trajektorie jsou vypočteny čistě na základě překrytí dvou návarů a prázdné oblasti mezi nimi. S šířkou paraboly návaru w a výškou paraboly h lze rozteč dopočítat následovně [42]:

Výpočet vychází z rovnic:

$$S_{CDE} = 2 \cdot \int_{d/2}^{w/2} (a \cdot x^2 + c) dx \quad (2)$$

$$S_{AEG} = S_{BDF} = \int_0^{w/2} (a \cdot x^2 + c) dx \quad (3)$$

$$S_{ABC} = S_{ABFG} + S_{CDE} - S_{AEG} - S_{BDF} \quad (4)$$

Vyřešením těchto rovnic lze výpočet zjednodušit až na následující aproximaci pro Parabolickou funkci:

$$l \approx 0,738 \cdot w \quad (5)$$

Do výpočtu rozteče krajního návaru rovnoběžného s vnitřními návarů se dále zanáší prázdná oblast v okrajové části vytvářeného dílu (Obr. 2-26, oblast ZLB). Touto úpravou se předchází geometrické nepřesnosti v okrajové oblasti způsobené nedostatkem materiálu (Obr. 2-27). Výsledný vzorec vypadá následovně [42]:

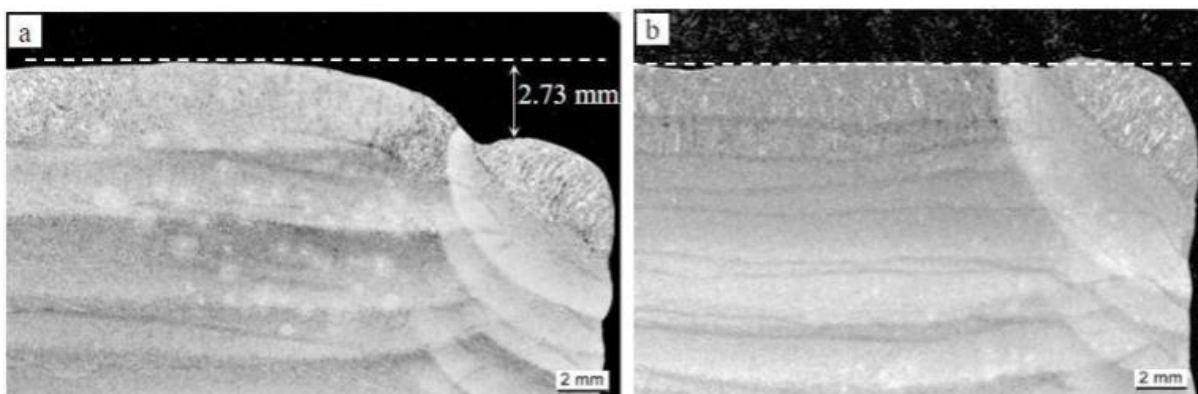
Výpočet vychází z rovnic:

$$S_{ZLB} = S_{ZLFB} - S_{BDF} \quad (6)$$

$$S_{ABC} + S_{ZLB} = S_{ABFG} + S_{CDE} - S_{AEG} - S_{BDF} \quad (7)$$

Vyřešením těchto rovnic lze výpočet zjednodušit až na následující aproximaci pro Parabolickou funkci:

$$d_2 = 0,5 \cdot w \quad (8)$$



Obr. 2-27 a) Nemodifikovaná rozteč okrajového návaru, b) Modifikovaná rozteč okrajového návaru [42]

Rozteč krajního návaru kolmého k vnitřním je dále upravena o započtení prázdné oblasti vzniklé zaoblením trajektorie vnitřních návarů (Obr. 2-28, oblast I). Tento výpočet je určen zejména pro ZigZag trajektorii [42].

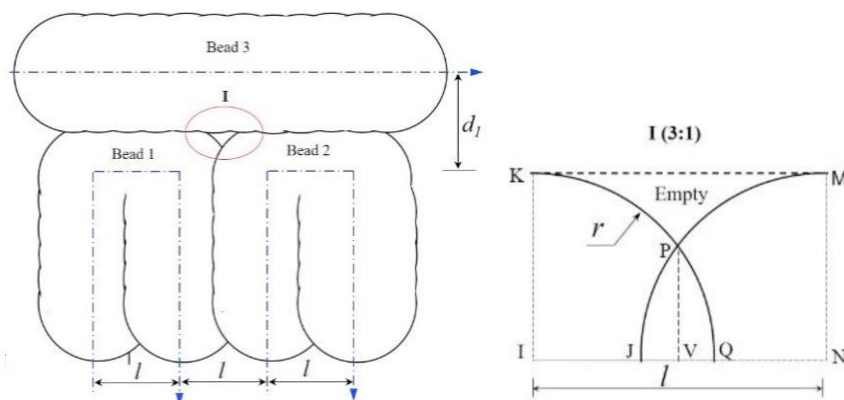
Výpočet vychází z rovnic:

$$S_{KMP} = S_{KMNI} + 2 \cdot S_{PQV} - 2 \cdot S_{IKQ} \quad (9)$$

$$2L \cdot S_{ABC} + 2L \cdot S_{ZLB} + H \cdot S_{KMP} = 2L \cdot S_{ABFG} + 2L \cdot S_{CDE} - 2L \cdot S_{AEG} - 2L \cdot S_{BDF}$$

Vyřešením těchto rovnic lze výpočet zjednodušit až na následující aproximaci pro Parabolickou funkci:

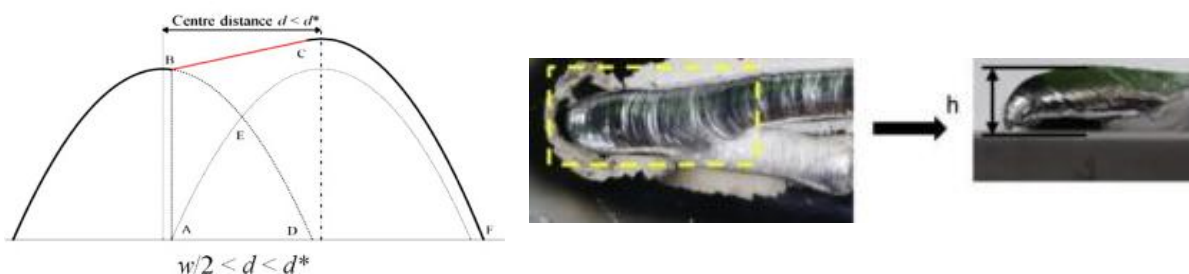
$$d_1 \approx 0,47 \cdot w \quad (10)$$



Obr. 2-28 Krajní návar kolmý k vnitřním [42]

Nepřesnosti roztečí

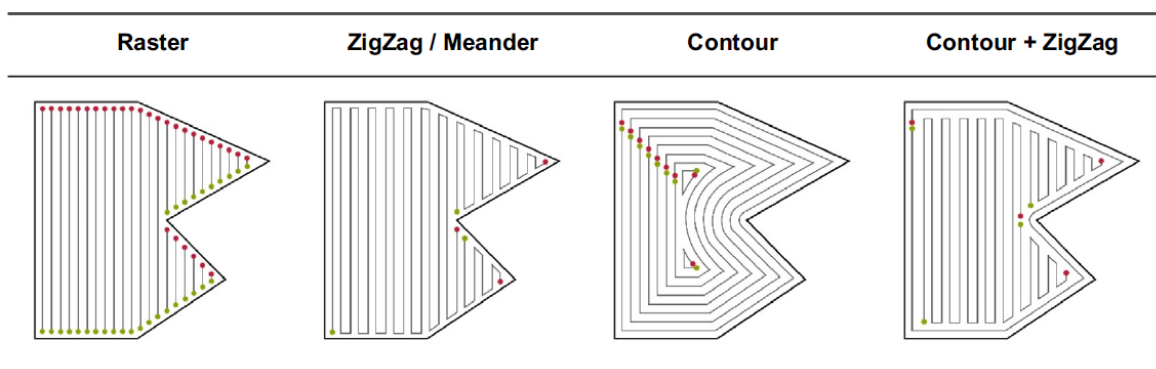
Výpočet v předchozí kapitole dopočítává teoreticky ideální rozteč dvou návarů pro vytvoření geometricky přesného dílu. Může však docházet k tvorbě určité nepřesnosti způsobené tendencí nanášení návaru na již vytvořený návar. Takto může dojít k posunutí středu návaru směrem k již vytvořenému návaru a vytvoření vertikálního výstupku v dílu (Obr. 2-29, a))[41]. Tato nepřesnost se projevuje nejvíce v rozích trajektorie, kde předchozí návary mají stále vysokou teplotu (Obr. 2-29, b)) [43].



Obr. 2-29 a) geometrie druhého nanášeného návaru [41], b) Roh trajektorie [43]

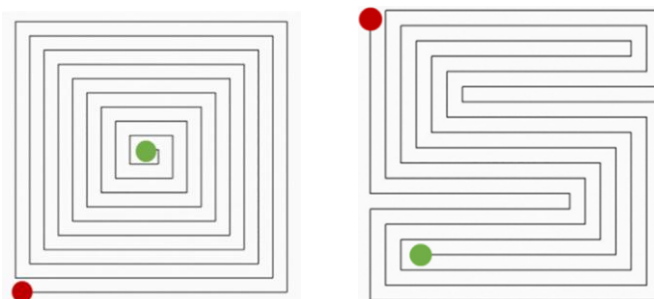
Trajektorie navařování

Trajektorie navařování je 2D křivka, po které se pohybuje hořák svářečky při nanášení materiálu a po dokončení pohybu po této křivce je také dokončena výroba jedné vrstvy tisknutého dílu. Mezi nanášením jednotlivých vrstev je obvykle přestávka pro zchladnutí naneseného materiálu. Existuje řada strategií pro trajektorii navařování při výrobě objemových dílů. Mezi často používané patří: Rastrová trajektorie, ZigZag trajektorie, Contour (Spiral) trajektorie, nebo hybridní trajektorie, kde je využita ZigZag trajektorie s jedním perimetrem (Obr. 2-30) [44].



Obr. 2-30 Často používané trajektorie [44]

Při volbě vhodné trajektorie pro WAAM je nutné brát v potaz, že začátky a konce návarů mají velmi nízkou geometrickou přesnost [45]. Proto například Rasterová trajektorie nemusí být vhodná pro aplikaci na WAAM z důvodu velkého množství začátků a konců návarů. Pro WAAM jsou vhodné trajektorie s kontinuálním procesem navařování. Například Contour trajektorie je nahrazována Spiral trajektorií (Obr. 2-31, a)), která dovoluje kontinuální návar. Ze zmíněných kontinuálních trajektorií má nejhorší geometrickou přesnost ZigZag trajektorie, nicméně tento nedostatek lze nahradit navařením jednoho perimetru kolem trajektorie, tedy vytvořením hybridní trajektorie[44]. Novým přístupem ke kontinuálním trajektoriím je S-pattern trajektorie (Obr. 2-31, b)). Tato trajektorie byla navržena na snížení vnitřního pnutí, ale dosahuje i dobré geometrické přesnosti [46].

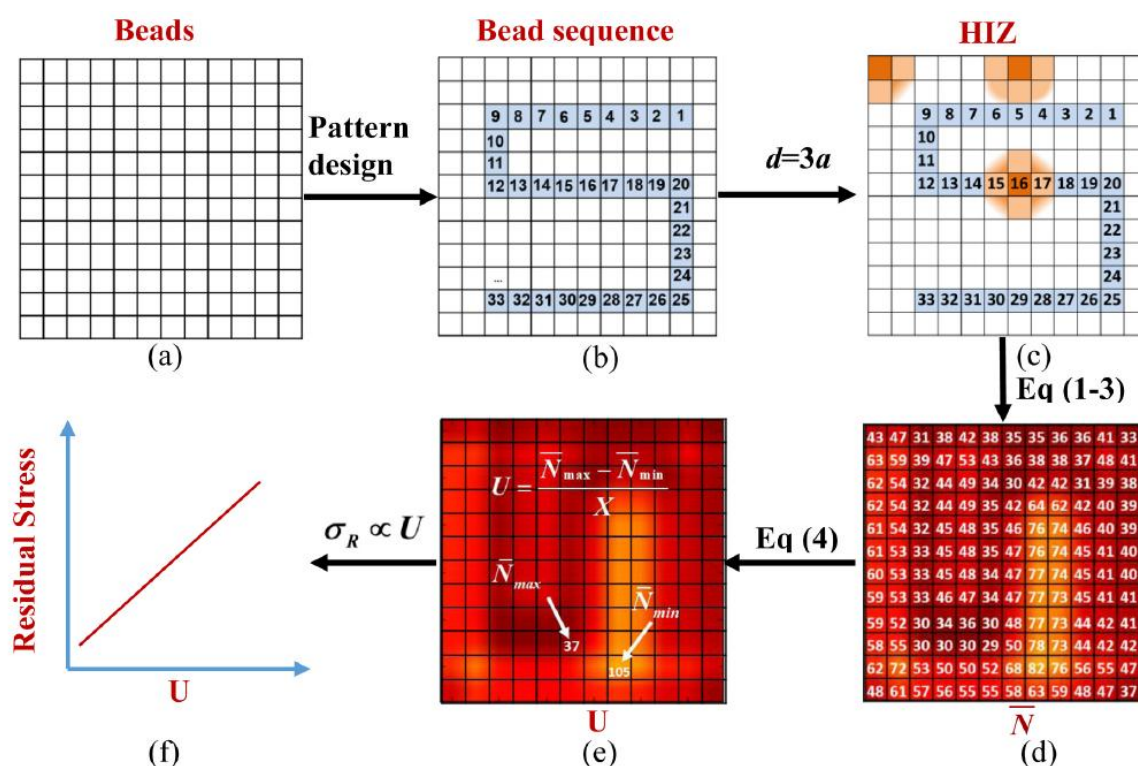


Obr. 2-31 a) Spiral trajektorie, b) S-pattern trajektorie [44]

Trajektorie Spiral a S-pattern má určité omezení. S oběma trajektoriemi lze dosáhnout pouze čtvercové, nebo obdélníkové tvary profilu [46].

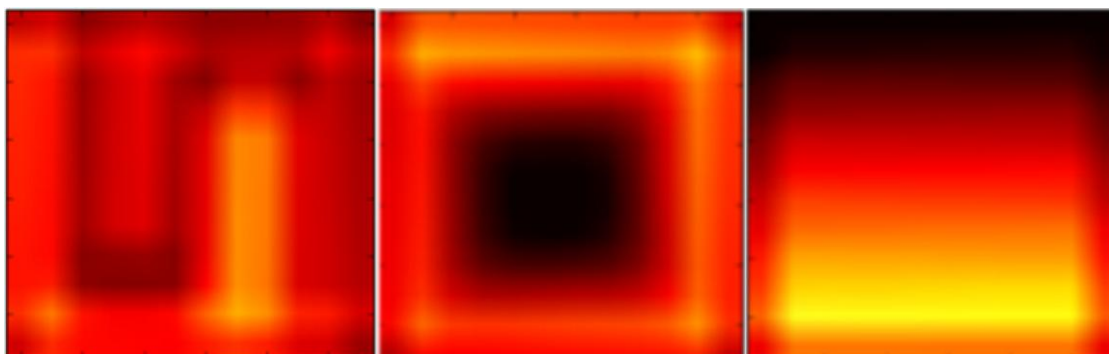
2.5.2 Tepelná analýza trajektorií

U trajektorie lze analyzovat geometrickou přesnost a tepelnou distribuci. Z pohledu mikrostruktury je zásadní tepelná distribuce, která má velký vliv na velikost zrn a vnitřní napětí. Trajektorii je možné analyzovat pomocí metody konečných prvků, nebo pomocí „Bead sequence-driven deposition pattern evaluation“. Tato analýza funguje na principu rozdělení plochy pomocí mřížky (Obr. 2-32, a)), kde je následně do políček vynesena trajektorie (Obr. 2-32, b)). Důležitým parametrem této analýzy je velikost oblasti ovlivněné vkládaným teplem jednoho políčka trajektorie (Obr. 2-32, c)). Políčku trajektorie a oblasti ovlivněné teplem je přiřazeno určité číslo, které se postupně přičítá v určitých bodech mřížky dle zvolené trajektorie (Obr. 2-32, d)). Analýzou těchto čísel je možné stanovit tepelnou distribuci (Obr. 2-32, e)) a následně odhadnout vnitřní napětí (Obr. 2-32, f)) [47].



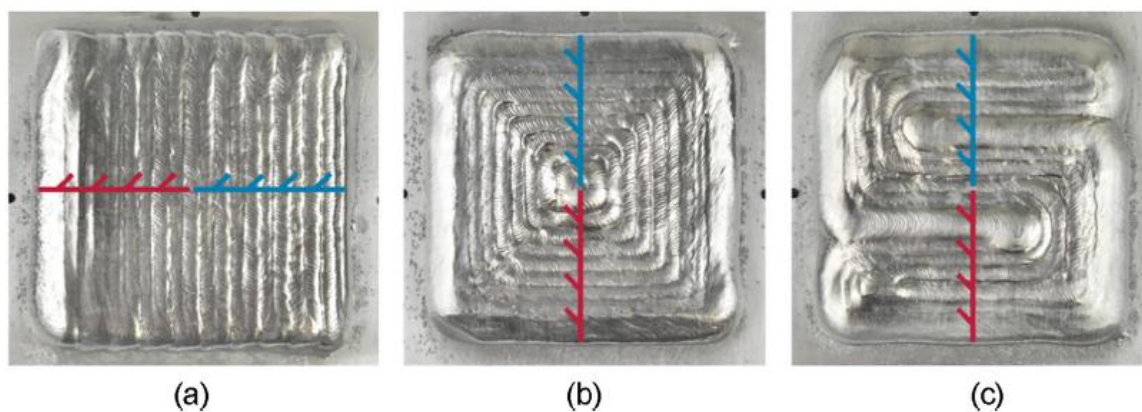
Obr. 2-32 a) mřížka, b) trajektorie, c) ovlivnění teplem, d) tepelná distribuce, e) vyhodnocení, f) napětí [47]

Touto metodou byla analyzována ZigZag trajektorie, Spiral trajektorie a S-pattern trajektorie. U Spiral trajektorie je analyzován postup, při němž začátek návaru je uprostřed dílu a postup, kde návar začíná na kraji dílu. U druhého postupu se projevuje zásadní tepelná koncentrace uprostřed dílu. S-pattern trajektorie má nejlepší tepelnou distribuci, druhou nejlepší tepelnou distribuci má Spiral trajektorie se začátkem uprostřed dílu a nejhorší tepelnou distribuci z těchto tří strategií má ZigZag trajektorie (Obr. 2-33) [47].



Obr. 2-33 Tepelná distribuce a) S trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) ZigZag trajektorie[47]

Tyto trajektorie byly testovány na hliníkové slitině Al-4046. Byla provedena analýza velikostí zrn v jedné oblasti na všech trajektoriích (Obr. 2-34, červeně). Průměrná velikost zrn této oblasti byla 26 μm u trajektorie ZigZag, 34 μm u trajektorie Spiral a 27 μm u trajektorie S-pattern. Je nutné poznamenat že se jedná o průměrné hodnoty z více pozic v označené analyzované rovině. Všechny pozice se nacházely na rozmezí dvou návarů [44].



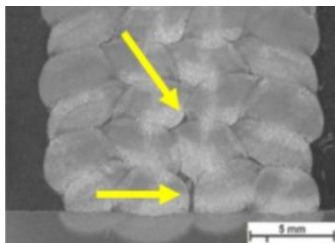
Obr. 2-34 Oblast zkoumání mikrostruktury (červeně) u a) ZigZag trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) S-pattern trajektorie [44].

2.6 Defekty

Možné defekty WAAM výroby dílů z hořčíkových slitin jsou v následujících kapitolách rozděleny na defekty specifické pro WAAM výrobu a defekty specifické pro hořčíkové slitiny.

2.6.1 Defekty objemových dílů

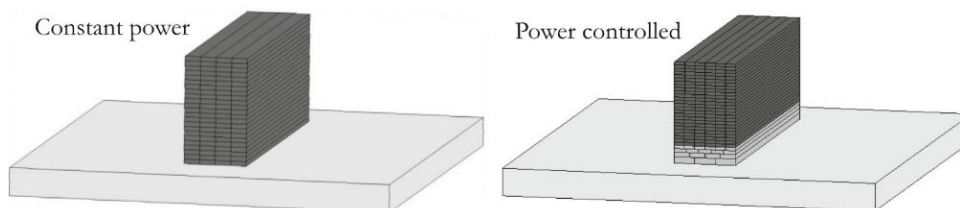
Rychlost odvodu tepla se mění v závislosti na množství nanesených vrstev. U prvních vrstev dochází k velmi rychlému odvodu tepla. To může způsobovat nedostatečné provaření a prázdné dutiny u objemového dílu na prvních vrstvách (Obr. 2-35). Rychlejší odvod tepla zároveň způsobuje změnu geometrie návaru. V prvních vrstvách jsou návary vyšší a užší, což má za následek špatnou geometrickou přesnost [39].



Obr. 2-35 Neprovařené oblasti objemových dílů[39]

Těmto defektům je možné předcházet několika způsoby. Při zvolení vhodných procesních parametrů dojde k dostatečnému provaření i na prvních nanesených vrstvách, ale ke zlepšení geometrické přesnosti nedojde. Pro zlepšení geometrické přesnosti je možné využít přehřev. Pro navařování tenkostěnných dílů ze slitiny AZ61 byl určen optimální přehřev v rozsahu 200 – 250 °C. S tímto přehřevem lze dosáhnout konsistentní šířky vrstev napříč celým dílem [34].

Další strategií pro redukci těchto defektů je využití rozdílných procesních parametrů pro každou nanesenou vrstvu. Israr (2021) navrhl použití procesních parametrů s různými geometriemi návaru pro prvních pět nanesených vrstev. První nanesená vrstva má největší návary a dále jsou návary zmenšovány až po pátou vrstvu, u níž je rychlost chlazení relativně konstantní (Obr. 2-36). Návary jsou vytvořeny nastavením parametrů svařovacího zařízení a změnou rychlosti posuvu drátu [48].

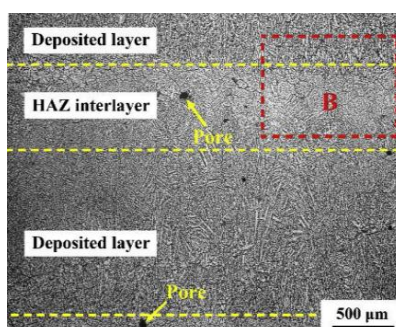


Obr. 2-36 a) Konstantní parametry navařování, b) Upravené parametry navařování [48]

2.6.2 Defekty navařování hořčkových slitin

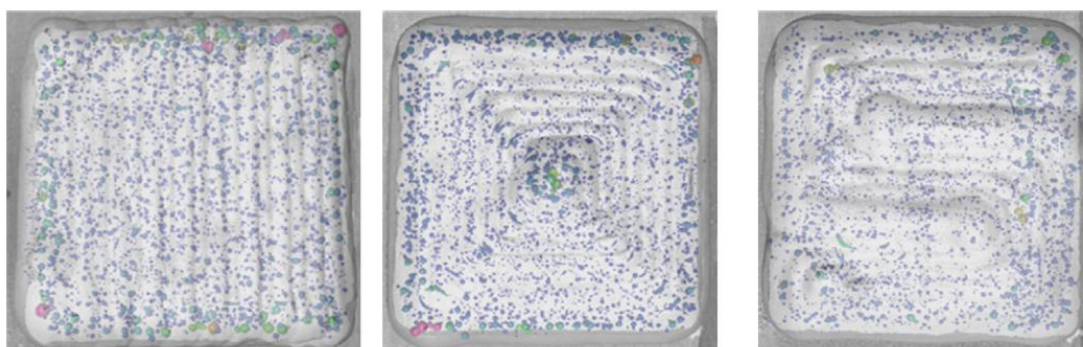
Hořčík je tepelně citlivý, vysoce reaktivní kov. Proto na základě charakteristik tepelného zdroje nebo koncentrace tepla může dojít k tvorbě defektů jako jsou póry a mikropraskliny.

Póry a mikropraskliny jsou způsobeny vkládáním nebo koncentrací velkého množství tepla při procesu navařování. Takto vzniklé póry se často nachází ve spodní části vytvořeného návaru nebo na rozmezí dvou návarů (Obr. 2-37). Omezení vzniku těchto defektů je možné provést snížením množství vkládaného tepla do procesu navařování. Návary vytvořené s nízkým množstvím vkládaného tepla jsou charakterizovány relativně velkou výškou vůči šířce, malým kontaktním úhlem, a nízkým stupněm provaření. U takových návarů však často nedochází k dostatečnému stupni provaření pro WAAM výrobu [49].



Obr. 2-37 Defekty vznikající na rozmezí dvou návarů [49]

Při porovnání trajektorií dochází k největší koncentraci porozity v oblastech s největší procesní teplotou, nebo na začátcích a koncích trajektorie. K nejmenší tvorbě pórů dochází při S-pattern trajektorii z důvodu nejmenší tepelné koncentrace, trochu více pórů se nachází u Spiral trajektorie a nejvíce pórů bylo u trajektorie ZigZag (Obr. 2-38)) [44].



Obr. 2-38 Porozita v a) ZigZag trajektorii, b) Spiral trajektorii, c) S-pattern trajektorii [44]

Pomalejší chladnutí při navařování vrstev dále od podložky způsobuje větší koncentraci tepla a tím pádem tvorbu většího množství defektů jako jsou póry a praskliny, které se nachází na rozmezí dvou návarů ovlivněné vkládaným teplem (HAZ) (Obr. 2-37). Kombinace hrubších zrn a těchto defektů v této oblasti je hlavním důvodem pro anisotropické vlastnosti vyrobeného dílu [49].

Vznik defektů je regulován množstvím vkládaného tepla, nebo zvýšením rychlosti chlazení aktivním chlazením. Regulování těchto prvků nám také dovoluje zlepšení geometrické přesnosti vyrobeného dílu. Hořčík má v roztaveném stavu velmi nízkou viskozitu, proto je tato regulace zásadní [50].

Aktivní chlazení

Chlazení obvyklým způsobem probíhá disipací tepla do podložky a do okolního prostředí. Toto chlazení probíhá již při navařování materiálu, ale nejčastěji se používá v kombinaci s přestávkou navařování mezi jednotlivými vrstvami. Aktivní chlazení se snaží časový interval pro zchladnutí zkrátit nebo zcela eliminovat. Pro aplikaci aktivního chlazení je však zapotřebí dalších dílů a přístrojů, které značně komplikují proces výroby. Mezi ně patří například měděné bloky na okrajích návaru, zařízení, které postupně potápí výrobek do kapaliny, chladicí podložka, nebo stlačený dusík [51].

2.7 Shrnutí hlavních zjištění

Čistý hořčík má HCP mřížku, což způsobuje nízkou tažnost a plastickou deformaci. Hořčík je velmi reaktivní kov s teplotou tavení 650 °C a teplotou varu 1090 °C při atmosférickém tlaku. Fyzikální a mechanické vlastnosti jsou do velké míry ovlivněny legujícím prvkem. Tento vliv je zprostředkován změnou koncentrace a typu precipitátů ve slitině a změnou velikostí zrn. Přidání hliníku do slitiny vede ke zlepšení pevnosti slitiny. Koncentrace 6 % hliníku v hořčíkové slitině je všeobecně považována za ideální poměr pevnosti a tažnosti. Přidáním zinku do této slitiny dojde ke zjemnění zrn a také je tak vytvořena základní skladba slitiny AZ61.

Precipitáty ovlivňují mechanické vlastnosti vytvořením tvarových styků na okrajích zrn. Podobný mechanismus se týká i velikosti zrn - čím menší je velikost zrn, tím vyšší je pevnost a tažnost slitiny. Zatímco množství precipitátů je závislé zejména na složení slitiny, velikost zrn je kromě složení slitiny do velké míry závislá i na rychlosti chlazení. Některé odborné zdroje uvádějí, že velký vliv má i tepelné zpracování. Pro znatelný vliv na velikost zrn je zapotřebí dosáhnout teplot vyšších jak 300 °C po dlouhý časový interval.

Velikost zrn lze predikovat pomocí analytického výpočtového modelu dle složení materiálu a rychlosti chlazení. Tento výpočet není přesný z důvodu nečistot obsažených v komerčně dostupných slitinách. Řada zdrojů experimentálně analyzuje velikost zrn hořčíkových slitin v závislosti na rychlosti chlazení. Tyto analýzy jsou provedeny pro odlévání, při němž je regulována rychlost chlazení na relativně nízké hodnoty. Rychlost chlazení při WAAM však může být až stovky stupňů za sekundu.

Pro WAAM výrobu může být použita řada svařovacích technologií. Nejvhodnější pro hořčikové slitiny je technologie MIG s modifikací CMT. CMT má 5 hlavních parametrů, které mají velký vliv na geometrii a průvar návaru. Největší vliv na geometrii návaru mají parametry I_{boost} a $t_{I_{boost}}$. S rostoucím parametrem I_{boost} se zvětšuje šířka a zmenšuje výška, zatímco s rostoucím $t_{I_{boost}}$ se zvětšuje šířka a kontaktní úhel a výška zůstává konstantní. $t_{I_{boost}}$ je limitován hodnotou 4 ms, jelikož při větších hodnotách již dochází k nestabilnímu navařování. Pro tenkostěnné díly ze slitiny AZ61 byla již vyvinuta sada funkčních CMT parametrů, které mají dobrou geometrii návaru a stabilitu procesu. Průřez návaru z těchto CMT parametrů je vysoký a úzký, s malým kontaktním úhlem. Pro objemové díly je zapotřebí nízkých, širokých návarů s velkým kontaktním úhlem. Pro dosažení takového průřezu je zapotřebí upravit určité procesní parametry. Zvýšením parametru I_{boost} je možné rozšířit a snížit návar a zvýšením I_{boost} je možné dosáhnout i požadovaného kontaktního úhlu.

Kromě CMT parametrů je pro proces WAAM výroby také možné nastavit rychlost posuvu hořáku a předehřev podložky. Zvýšená rychlost posuvu hořáku má pozitivní vliv na velikost zrn, jelikož dochází k rychlejšímu chladnutí návaru. Se zvýšenou rychlostí posuvu se mění i geometrie průřezu návaru. Výhodou změny rychlosti posuvu hořáku je, že nemá zásadní vliv na stabilitu CMT navařování. Použitím předehřevu je však možné stabilitu procesu ještě zlepšit. Navíc s rostoucím předehřevem se zvětšuje šířka, hloubka provaření a kontaktní úhel a zmenšuje se výška návaru a vnitřní napětí.

Pro výrobu objemových dílů je nutné na nanášení vrstvy zvolit vhodnou 2D trajektorii. Pro rozteče mezi jednotlivými návarými je nutné použít analytický výpočtový model. Použitím tohoto výpočtového modelu je možné dosáhnout dobré rovinnosti každé nanesené vrstvy. Nejčastěji používané jsou Rastrové, ZigZag a Spiral trajektorie. Technologie WAAM má velký problém s geometrickou přesností začátků a konců návarů, proto Rastrová trajektorie není vhodná pro tuto technologii. ZigZag a Spiral jsou kontinuální trajektorie, u nichž je minimalizován počet začátků a konců navařování. Novým přístupem je S-pattern trajektorie, která byla speciálně navržena na dobrou tepelnou distribuci. Dobrá tepelná distribuce předchází tepelné koncentraci, která způsobuje hrubší zrna a tvorbu pórů. S-pattern má nejlepší tepelnou distribuci, Spiral má horší a ZigZag nejhorší. Tyto trajektorie již byly porovnávány z pohledu velikosti zrn na hliníkové slitině. Velikosti zrn byly zkoumány ve stejné oblasti na všech trajektoriích, v oblastech kontaktu dvou návarů. Výsledky ukazovaly největší velikosti zrn u Spiral trajektorie, menší u S-pattern a nejmenší u ZigZag trajektorie.

2.8 Mezery v poznání

K navařování objemových dílů z hořčíkové slitiny AZ61 i hořčíkových slitin existuje jen velmi málo odborných článků. Žádné z nich nepopisují jejich procesní parametry. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout vlastní procesní parametry, se kterými bude možné vytvářet objemové díly z hořčíkové slitiny AZ61. Při vytváření procesních parametrů je možné vycházet z již vyvinutých parametrů pro tenkostěnné díly z dané slitiny.

Mezi vhodné trajektorie pro WAAM patří ZigZag, Spiral a S-pattern trajektorie. Tyto trajektorie byly analyzovány a seřazeny z pohledu tepelné distribuce. U těchto trajektorií byla analyzována i velikost zrn na hliníkové slitině. Tato analýza však nebyla provedena v oblastech koncentrace tepla každé z trajektorií, což mohlo vést ke zkreslujícím výsledkům. Zkoumání velikostí zrn v kontaktu dvou návarů mohlo přinášet další zkreslení. Pro skutečné porovnání těchto trajektorií by měla být provedena analýza velikosti zrn v kritických oblastech každé z trajektorií, vždy uprostřed návaru. Pro analýzu tepelné distribuce je nutné stanovit specifická místa, ve kterých dochází ke kritickým tepelným koncentracím. Analýza oblastí, kde dochází ke kritické koncentraci tepla je zvláště relevantní pro hořčíkové slitiny. Hořčík je velmi citlivý na koncentraci tepla a může dojít k tvorbě velkého množství pórů a hrubých zrn. Při stanovení kritických oblastí je nutné brát v potaz termo-fyzikální vlastnosti hořčíkových slitin.

3 CÍL PRÁCE

3.1 Výzkumné otázky

O1: Do jaké míry ovlivní volba strategie nanášení velikost zrn v objemovém díle?

3.2 Cíle výzkumu

Hlavním cílem této diplomové práce je zjistit vliv tiskových strategií na mikrostrukturu objemových dílů vyráběných technologií WAAM z hořčíkové slitiny AZ61.

Dílčí cíle diplomové práce:

- stanovit vhodné parametry svařovacího zařízení, které vkládají malé množství tepla, ale dosahují dostatečného provaření,
- analyzovat trajektorie navařování objemových dílů,
- analyzovat mikrostrukturu a určit velikost zrn u vybraných vzorků,
- navrhnout a vyrobit ukázkový objemový díl skládající se alespoň z deseti vrstev.

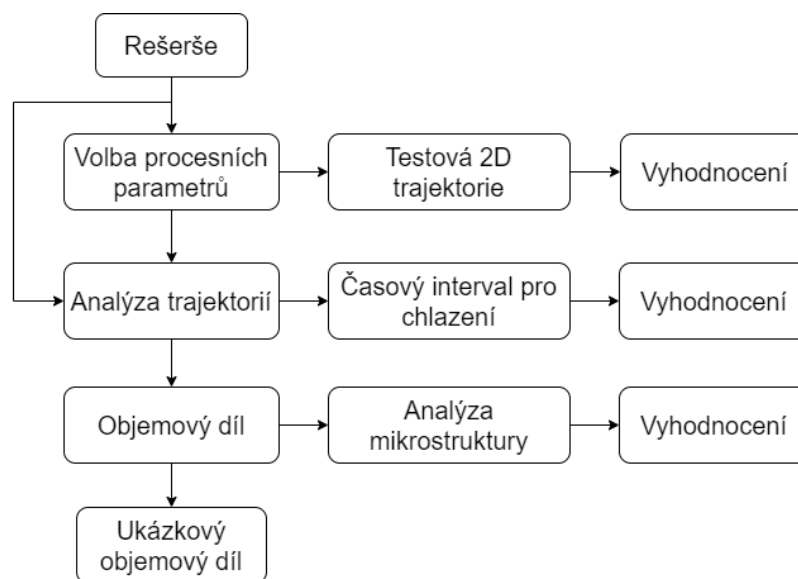
3.3 Hypotézy

H1: Vlastnosti vyrobeného dílu jsou závislé na výsledné mikrostrukturu. Čím menší jsou zrna, tím lepší jsou vlastnosti dílu. Velikost zrn je závislá na rychlosti chladnutí materiálu. U všech trajektorií jsou určité oblasti, kde dochází k tepelné koncentraci. V těchto oblastech dochází k pomalejšímu chladnutí a tvorbě hrubších zrn. Velikost tepelné koncentrace u jednotlivých trajektorií je možné do určité míry stanovit analýzou tepelné distribuce. Tuto analýzu provedl L. Sun [52]. Nejlepší tepelnou distribuci má S-pattern trajektorie, poté Spiral a nejhorší má ZigZag. M. Kohler [53] provedl analýzu mikrostruktury u těchto trajektorií na hliníkové slitině. Výsledky ukázaly největší velikost zrn u Spiral trajektorie, menší u S-pattern a nejmenší u ZigZag trajektorie. To je v rozporu s poznatkem, že nejlepší tepelnou distribuci má S-pattern, která by měla mít také nejmenší zrna. Trajektorie ZigZag by měla mít naopak největší zrna. M. Kohler [53] provedl analýzu u všech trajektorií v jedné oblasti a vždy na rozmezí dvou návarů, proto jeho výsledek může být nepřesný. Jestliže se u každé trajektorie vezme oblast největšího tepelného koncentrátoru, poté největší velikost zrna je u trajektorie ZigZag, menší u Spiral a nejmenší velikost u S-pattern. Průměrná velikost těchto zrn se pohybuje v rozmezí 20 – 65 μm (Tab. 2-2).

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

Řešení této práce bylo rozděleno do pěti částí. V první části byla vytvořena rešerše, na kterou navazovaly další kroky řešení-testování parametrů svařovacího zdroje, předehřevu a rychlosti posuvu hořáku. Druhá část byla provedena otestováním sad parametrů svařovacího zařízení a dalších parametrů jako jsou předhřev a rychlost posuvu hořáku. Byly vytvořeny jednoduché návary (tzv. singletracky) pro každý z parametrů, u kterých byl měřen tepelný výkon pomocí dat ze svařovacího zařízení a rychlosti chladnutí pomocí termokamery. Vytvořené návary byly naskenovány a následně byla provedena analýza geometrie průřezů návarů. U vybraných parametrů byla analyzována hloubka provaření. Na základě zjištěné geometrie návaru, tepelného výkonu, vkládaného tepla a provaření, byla vybrána vhodná kombinace parametrů. S těmito parametry byl vytvořen testový 2D návar. Tento návar testuje provaření daných parametrů, proto parametry, u kterých bylo provaření zkoumáno individuálně, nebyly použity pro tuto trajektorii. Pro další část řešení byla vybrána sada parametrů, která vytváří co nejrovnější horní rovinu testového 2D návaru, nebo mají dostatečné provaření dle individuálního vyhodnocení. Touto další částí bylo testování malých objemových dílů. Parametry, které vytvoří vyhovující malý objemový díl jsou dále použity pro analýzu různých možných trajektorií. Testování bylo provedeno jak pomocí simulace, tak i experimentální metodou. Vybrané trajektorie se zvolenými parametry byly použity pro čtvrtou část, kde byly vytvořeny objemové díly. V objemových dílech byly pomocí simulace stanoveny kritické oblasti, u kterých je následně analyzována mikrostruktura. V poslední části je vytvořen ukázkový objemový díl.

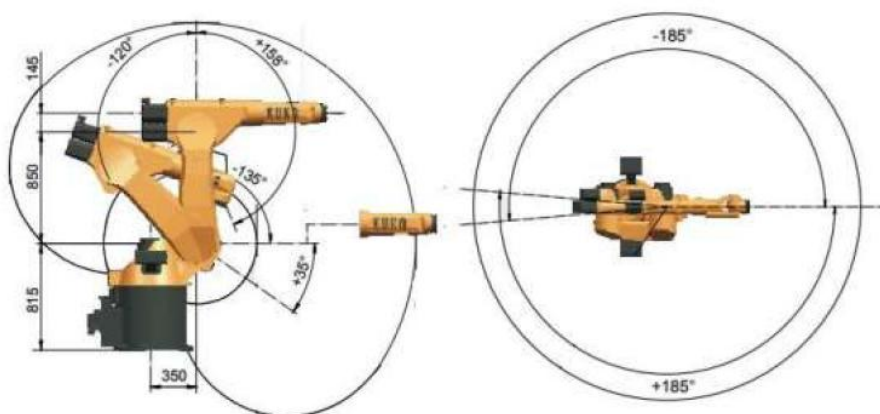


Obr. 4-1 Metodika práce

4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

Robotické rameno

Veškeré pohyby svařovacího hořáku byly zajištěny robotickým ramenem Kuka KR 60 HA. Toto rameno má nosnost 60 kg, s maximálním dosahem 2033 mm, rychlostí rotace 120 až 322 °/s a přesností $\pm 0,05$ mm. Vysoká přesnost a dostatečná rychlost pohybu zajišťují vhodnost využití tohoto robotického ramena pro účely této práce.



Obr. 4-2 Kuka KR 60 HA

Svařovací zařízení

Samotné navařování materiálu bylo zajištěno zařízením Fronius TPS 3200 CMT. Toto zařízení podporuje metody MIG, MAG a WIG. Kromě těchto obecných metod však umožňuje i využití metody MIG s modifikací CMT, která je vhodná pro WAAM výrobu. Zařízení dovoluje maximální proud až 550 A a maximální rychlost posuvu drátu až 16 m/min. Na zařízení je možné nastavit veškeré CMT charakteristiky i minimální potřebnou spotřebu plynu ochranné atmosféry.

Vyhřívavý stůl

Základní materiál pro navařování je zahříván pomocí vyhřívavého stolu. Toto zařízení není komerčně dostupné a je vytvořeno specificky pro účely WAAM výroby. Je možné dosáhnout přehřevu až 400 °C.

Skener ATOS

Pro vyhodnocení geometrie vytvořených dílů a návarů je nutné tyto díly naskenovat. Za tímto účelem sloužil skener ATOS Triple Scan III. Skener funguje pomocí metody „Blue Light“. Proužky modrého světla jsou projektovány na skenovaný díl a dvě odsazené kamery vyhodnocují deformaci těchto proužků na povrchu dílu. Tato technologie však není vhodná pro lesklé povrchy, proto je díl před samotným skenováním ošetřen matným sprejem.

Metalografická leštička

Kromě geometrie dílu bylo nutné také vyhodnotit mikrostrukturu a provaření v kritických oblastech dílu. Pro přípravu vzorků byla využita dvoukotoučová metalografická leštička SAPHIR 250 A2-ECO. Tento přístroj leští vzorky pomocí automatického dávkování mikro-abrazivní pasty. Takto připravené vzorky byly následně naleptány a vyhodnoceny pod mikroskopem.

Mikroskop

Pro vyhodnocení mikrostruktury byl použit digitální mikroskop VHX-6000 s objektivem Z250R, který umožňuje přiblížení 250x až 2500x. Pomocí tohoto zařízení bylo vyhodnoceno provaření a mikrostruktura zvolených vzorků.

Laboratorní váha

Laboratorní váha Radwag PS 600.X2 v kombinaci se sadou pro stanovení hustoty slouží ke zjištění porozity u vybraných vzorků. Maximální hmotnost na této váze je 600 g a vybraný vzorek musí být menší, než 350 ml kádinka sloužící k ponoření vzorku do ethanolu.

4.3 Materiál a testovací podmínky

Pro navařování materiálu je použit svařovací drát ze slitiny AZ61 o průměru 1,6 mm. Z důvodu vysoké reaktivity hořčíku s okolím je nutné drát očistit před samotným navařováním od povrchové koroze. Za tímto účelem byl vytvořen přípravek, který čistí drát pomocí řetězce abrazivních a čistících členů.

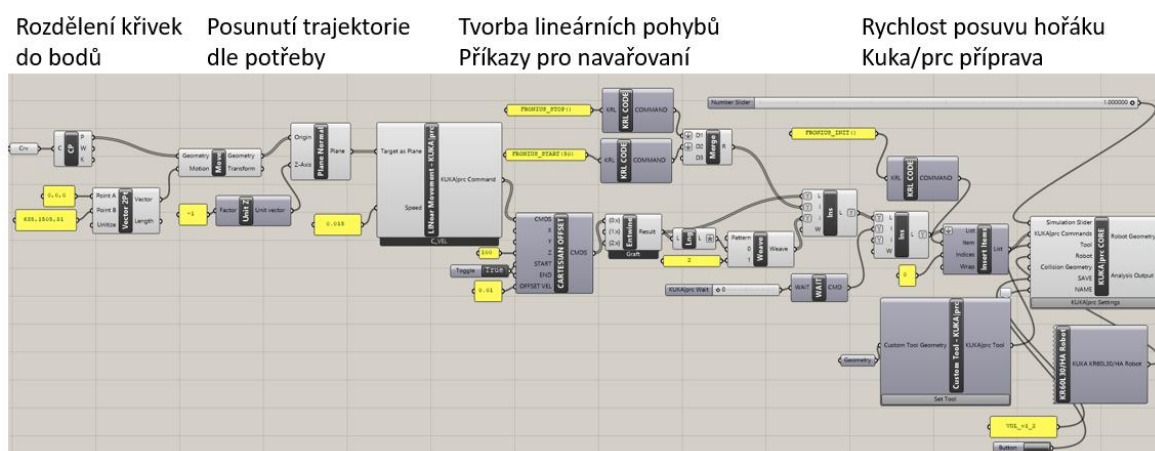
Samotné navařování probíhalo v laboratoři s pokojovou teplotou. Teplota se pohybovala v rozmezí 18 °C až 23 °C. Vlhkost atmosféry nebyla kontrolována.

4.4 Metody

Pro zjištění mikrostruktury v objemových dílech z hořčikové slitiny AZ61 bylo v první řadě nutné zvolit vhodné procesní parametry. V další fázi byla provedena analýza trajektorií, kde byly zjištěny kritické oblasti, a nakonec byla provedena analýza velikostí zrn v těchto oblastech. Před vlastní realizací bylo nutné popsat přípravy na experimenty.

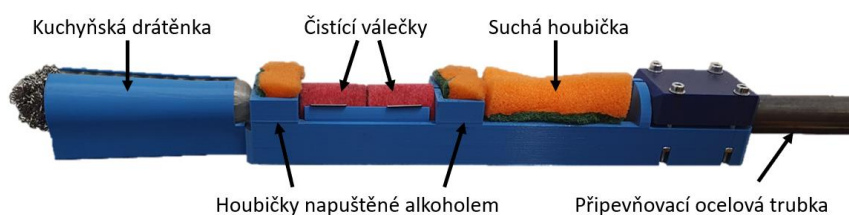
4.4.1 Příprava navařování

Při vytváření jednoduchých návarů a dílů bylo zapotřebí v první řadě vytvořit SRC-kód pro ovládání robotického ramena. Tento kód byl vytvořen pomocí skriptu v programu Grasshopper s Pluginem Kuka/prc.



Obr. 4-3 Skript pro přípravu SRC kódu

Povrchová koroze na svařovacím drátu je nepřijatelná při procesu navařování hořčikových slitin. Koroze může způsobovat zvýšenou porozitu nebo výrazně sníženou spolehlivost procesu. Hořčík je navíc vysoce reaktivní, proto je nutné očistit drát bezprostředně před procesem navařování. Z důvodu vysoké reaktivity materiálu, bezpečnosti provozu a snadné přístupnosti čistící sestavy je umístěna mimo prostor podavače drátu. Tato sestava čistí hořčikový svařovací drát pomocí samotného posuvu svařovacího zařízení. Hlavními čistícími prvky byla kuchyňská drátěnka a čistící válečky vyrobené z brusné vlny (Obr. 4-4). Povrch drátu byl také očištěn pomocí houbiček napuštěných alkoholem a následně vysušen pomocí suché houbičky (Obr. 4-4).



Obr. 4-4 Čistící sestava pro hořčikový svařovací drát

4.4.2 Stanovení procesních parametrů

Parametry svařovacího zařízení

Podmínkám této práce nejbližší odpovídají parametry svařovacího zařízení vycházející z diplomové práce Č. Švába [31]. V práci Č. Švába jsou popsány parametry pro svařovací drát AZ61 o průměru 1,6 mm, stejně jako v této práci. Parametry použité v práci Č. Švába jsou vypsány v Tab. 4-1. Tyto parametry mají ověřenou stabilitu procesu, nicméně jsou navrženy pro tenkostěnné díly. Parametry pro tenkostěnné díly sloužily jako základ, který byl dále modifikován, aby byl dosažen průřez návaru vhodný pro objemové díly. Byly modifikovány parametry I_{boost} a $t_{I_{boost}}$, které mají největší vliv na geometrii návaru. Z rešerše bylo zjištěno, že se zvyšováním hodnot I_{boost} a $t_{I_{boost}}$ jsou vytvářeny nižší a širší návary s lepším kontaktním úhlem. Dále byl zjištěn stabilní rozsah těchto parametrů, který byl použit pro další analýzy.

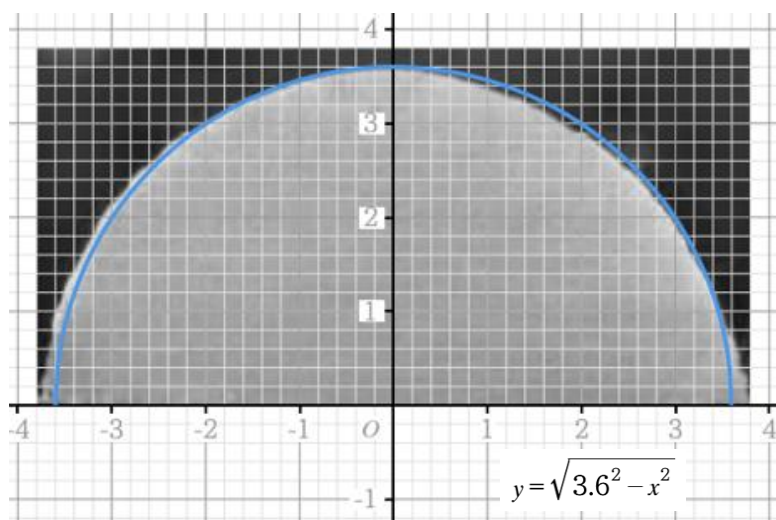
Tab. 4-1 Parametry navržené pro tenkostěnné díly

Materiál Průměr drátu	Stav	I_{boost} [A]	$t_{I_{boost}}$ [ms]	$I_{sc_{wait}}$ [A]	$vd_{sc_{wait}}$ [m/min]	I_{sc2} [A]	Rychlost posuvu [mm/s]
AZ61 Ø1,6 mm [37]	Stabilní rozsah	360 - 480	1,7 - 3	15 - 100	10 - 60	20 - 100	
	Nejlepší parametry (tenkostěnné díly)	430	2,5	35	30	50	10

Parametr I_{boost} vhodný pro tenkostěnné díly je blízký horní hraně funkčního rozsahu, proto byly testovány i hodnoty nižší než hodnota I_{boost} pro tenkostěnné díly v kombinaci se zvýšenými hodnotami parametru $t_{I_{boost}}$. Pro testování byly vytvořeny 40 mm dlouhé jednoduché návary (tzv. singletracky) pro všechny kombinace parametrů I_{boost} – 380; 400; 430; 450 [A] a $t_{I_{boost}}$ 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,7 [ms].

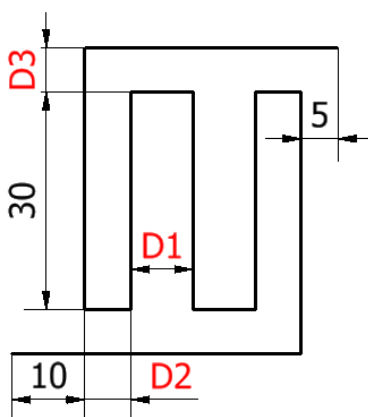
Všechny návary byly naskenovány a byla analyzována jejich geometrie průřezu. Pro účel výroby objemových dílů bylo nutné zvolit parametry navařování, které vytváří nízké a široké návary s malým kontaktním úhlem. Ze zjištěných geometrií návarů bylo vybráno 8 kombinací parametrů, které mají nejlepší poměr výšky/šířce návaru.

Vybrané parametry byly dále otestovány pomocí 2D trajektorie. Tato trajektorie testuje dopočítané rozteče návarů a stupeň provaření parametrů. Pro dopočet rozteče návaru je zapotřebí odhadnout rovnici popisující geometrii návaru. Za tímto účelem byla využita webová aplikace Classpad.net, která dovoluje vykreslování rovnic, zatímco na pozadí je obrázek průřezu návaru (Obr. 4-5).



Obr. 4-5 Nahrazení geometrie průřezu návaru geometrickým modelem

Po navaření testové 2D trajektorie (Obr. 4-6), byly návaru naskenovány a následovalo jejich vyhodnocení. Při vyhodnocování byla sledována rovinnost horní plochy návaru a zda-li došlo k dostatečnému provaření ve všech částech návaru. Současně byly vyřazeny parametry, u kterých evidentně dochází k přehřátí návaru.



Obr. 4-6 Testová 2D trajektorie

Procesní parametry, které mají vyhovující geometrii průřezu a dobrou rovinnost 2D trajektorie, byly nakonec otestovány na malém objemovém díle.

Rychlost posuvu hořáku a předeřev

Standartní rychlost posuvu hořáku je 10 mm/s. Tato rychlost posuvu je použita i v diplomové práci Č. Švába v kombinaci se zvolenými CMT parametry. Pro zkoumání vlivu rychlosti hořáku byly zvoleny rychlosti 5, 10, 15 mm/s do mapy parametrů v kombinaci s parametry vhodnými pro tenkostěnné prvky.

Druhým prvkem v mapě parametrů byl předehřev. Dostupný vyhřívaný stůl má možnost předehřevu až na 400 °C, nicméně v rešerši bylo zjištěno, že při předehřevu nad 300 °C dochází k výraznému přehřátí návaru a špatné geometrické přesnosti dílu. Proto byly do mapy parametrů zvoleny předehřevy 0, 100, 200, 250, 300 °C.

Při navařování singletracků byly měřeny napěťové a proudové charakteristiky na svařovacím zařízení. Pomocí těchto hodnot bylo možné dopočítat vkládané teplo. Po dokončení návaru byla sledována rychlost chladnutí pomocí termokamery.

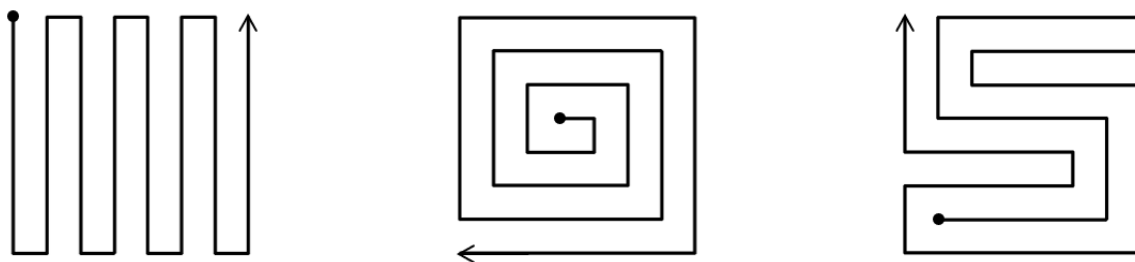
Na rozdíl od testování parametrů svařovacího zařízení, u předehřevu a rychlosti posuvu bylo vizuálně zkoumáno i provaření. U CMT parametrů lze očekávat výrazně lepší provaření zvyšováním parametrů I_{boost} a $t_{I_{boost}}$, nicméně u předehřevu a rychlosti posuvu je nutné podrobněji prozkoumat stupeň vlivu na provaření.

Pro zkoumání provaření návarů je nutné je rozřezat a vytvořit z nich metalografické vzorky, které jsou následně broušeny. Aby bylo možné je rozřezat, návary byly vytvořeny na hořčíkové desce ze slitiny AZ31 o tloušťce 10 mm.

4.4.3 Analýza trajektorií

Simulace trajektorií

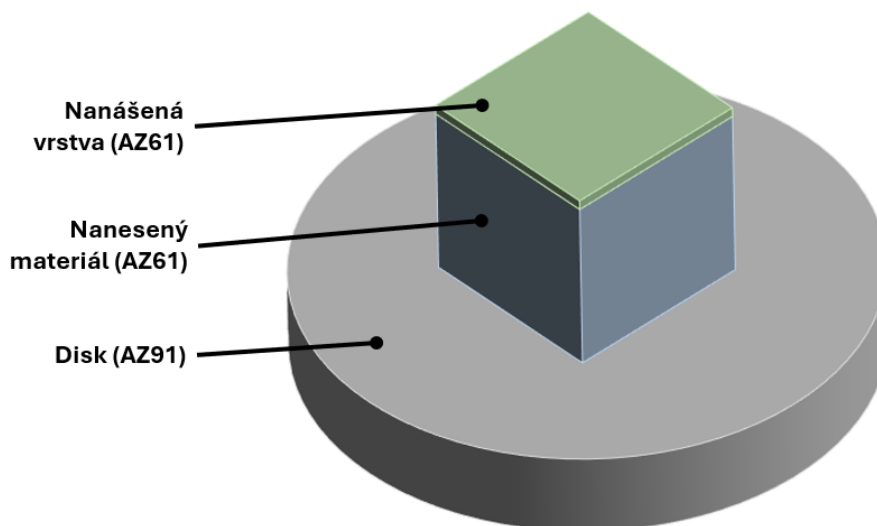
Pro analýzu trajektorií byla vytvořena simulace v programu Ansys Workbench s vybranými trajektoriemi. Těmito trajektoriemi byly: ZigZag, Spiral a S-pattern. Pro simulaci a následnou výrobu byly vytvořeny co nejmenší a nejjednodušší verze těchto trajektorií (Obr. 4-7). Nejvíce omezující trajektorií je S-pattern, kde je zapotřebí aspoň 8 návarů vedle sebe k vytvoření všech prvků trajektorie, které lze očekávat i u větších dílů.



Obr. 4-7 a) ZigZag trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) S-pattern trajektorie

Simulace byla vytvořena na horní vrstvě objemového dílu tvaru krychle. Tato oblast představuje nejkritičtější oblast z pohledu rychlosti chladnutí u dílů tvaru krychle. Tato krychle byla navařována na disku, který byl vyrobený ze slitiny AZ91, což bylo promítnuto také do simulace.

Model byl tvořen třemi tělesy (Obr. 4-8). Prvním tělesem byl disk ze slitiny AZ91 o průměru 160 mm a výšce 25 mm, dalším tělem byl již nanesený materiál (ne celá krychle) ze slitiny AZ61 a třetím tělem byla poslední vrstva krychle ze které byla generována trajektorie. Ke každému dílu byl přidělen materiál, který byl upraven dle fyzikálně-tepelných vlastností z kap. 2.2.2.



Obr. 4-8 Model pro simulaci trajektorie

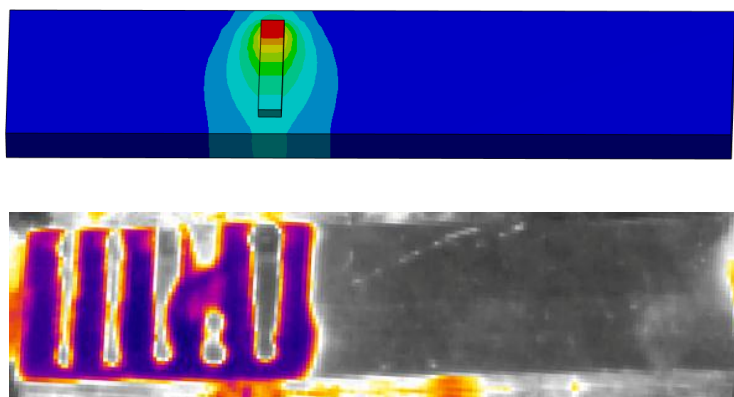
Velikost krychle vycházel z velikosti jednoduchého návaru. Každý z rozměrů krychle odpovídal osmi roztečím mezi návaru. Průřez návaru v simulaci byl tvaru obdélníku, proto šířka návaru v simulaci byla rovna rozteči mezi návaru. Velikost návaru musí být ve všech oblastech simulace stejná pro vygenerování trajektorie a rozměry návaru musí být dělitelné velikostí sítě (mesh) simulovaného objektu pro vhodné vygenerování shluku objektů. Proto bylo nutné využít pouze rozteč mezi vnitřními návaru a ideálně zaokrouhlit velikost návaru na celé číslo pro jeho jednoduchou dělitelnost.

Simulace navařování v programu Ansys Workbench byla provedena pomocí funkce DED Wizard. Tato funkce zprostředkovává rychlé nastavení simulace DED aditivní výroby. Kromě nastavení materiálů, typu a velikosti mřížky, je v této funkci možné nastavit prvky jako Cluster Volume, metoda vytváření Cluterů, Material Deposition Rate, předehřev, plocha předehřevu, předehřev zapnutý při tisku, tepelný výkon při tisku, pokojová teplota, konvekce a radiace. Tyto prvky jsou popsány v tabulce.

Tab. 4-2 Nastavitelné prvky DED Wizard

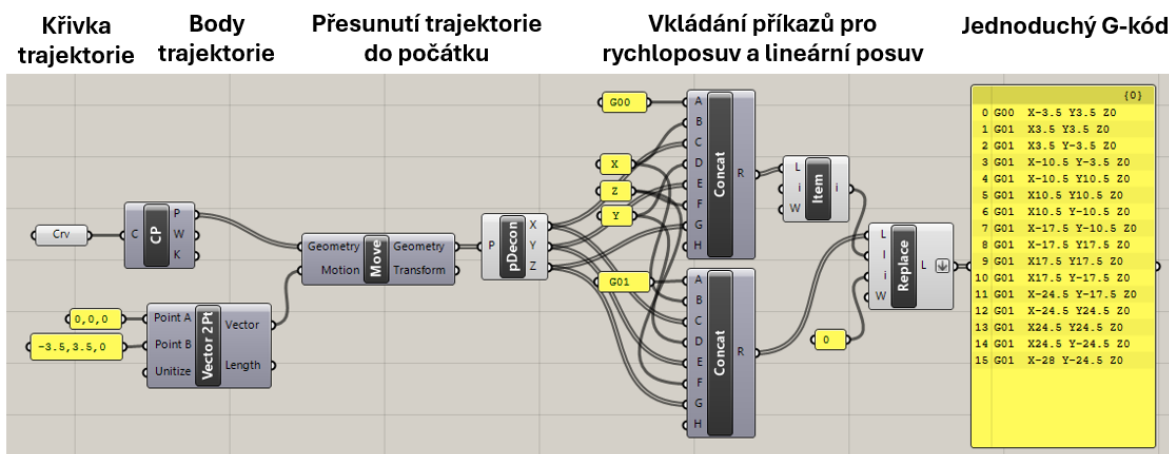
Nastavitelný prvek	Jednotka	Popis
Cluster Volume	mm^3	Při postupném přidávání materiálu v simulaci, Cluster Volume určuje jak velké prvky jsou v každém kroku přidávány. Pro přesnější výsledky by bylo vhodné tyto kroky udělat co nejmenší.
Metoda tvorby clusteru	Manual, G-Code	Aby simulace věděla, kde generovat další materiál, tedy nastavení přesné trajektorie, je možné manuálně vytvořit každou lineární část návaru zvlášť, nebo použít automatickou funkci programu pro vytvoření trajektorie dle G-kódu.
Material Deposition Rate	$\frac{mm^3}{s}$	Tato veličina určuje objem naneseného materiálu za sekundu. Specifickou hodnotu je nutné dopočítat z průřezu návaru a rychlosti navařování.
Předehřev	$^{\circ}C$	Je možné nastavit teplotu předehřevu podložky.
Plocha předehřevu	-	Je možné stanovit plochu podložky, která udržuje teplotu předehřevu při tisku.
Předehřev zapnutý při tisku	On, Off	Při zapnutí této funkce je teplota předehřevu udržována na zvolené ploše. Aby nedocházelo k chladnutí podložky během dílu, je vhodné, aby tato funkce byla zapnutá. Pevně nastavená teplota na určité části dílu může způsobovat rychlejší chladnutí dílu. Tento prvek zamezuje přehřátí dílu na vyšší teplotu, než je teplota předehřevu.
Tepelný výkon	W	Tepelný výkon určuje množství vkládaného tepla. Specifická hodnota může být zjištěna z měřených proudových a napěťových charakteristik při navařování singletracků.
Pokožová teplota	$^{\circ}C$	Pokožová teplota by měla být nastavena na 22 $^{\circ}C$.
Konvekce	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Tato veličina popisuje tepelnou ztrátu způsobenou okolním vzduchem.
Radiace	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Tato veličina popisuje množství tepla vyzářeného do prostředí.

Před samotnou simulací byly zvolené prvky ověřeny na rychlostech chladnutí experimentálně zjištěných při navařování singletracků pomocí termokamery. Toto porovnání vedlo i k případné modifikaci volených prvků.



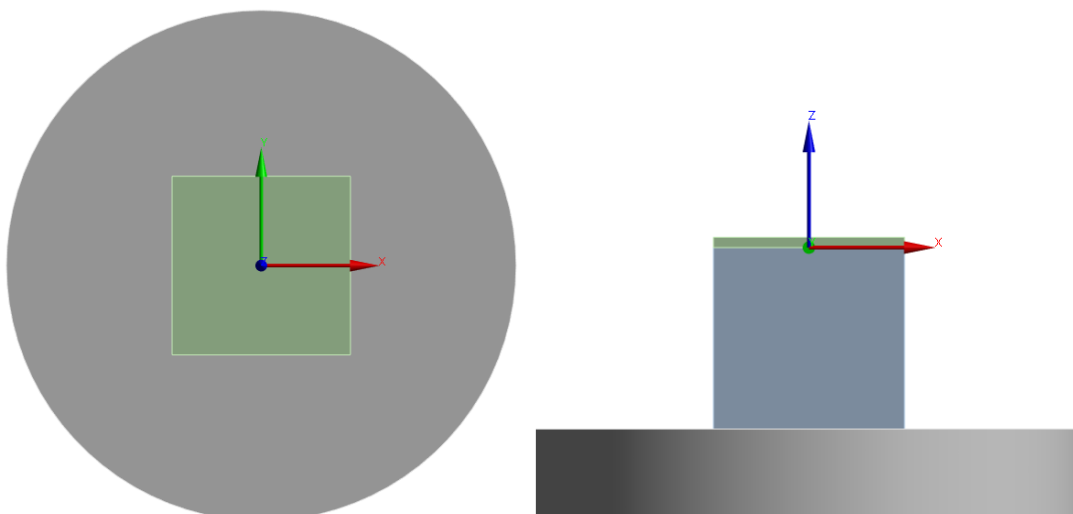
Obr. 4-9 a) Simulace návaru, b) Záběr z termokamery

Bylo zapotřebí simulace několika trajektorií, které jsou příliš komplexní na manuální tvorbu trajektorií. SRC-kód vytvořený pro robotické rameno nelze vložit do Ansys WB z důvodu nevhodného formátu, proto byl vytvořen skript v programu Grasshopper (Obr. 4-10). Tento skript vytváří jednoduchý G-kód dle ručně namalovaných trajektorií v programu Rhinoceros.



Obr. 4-10 Skript pro tvorbu jednoduchého G-kódu

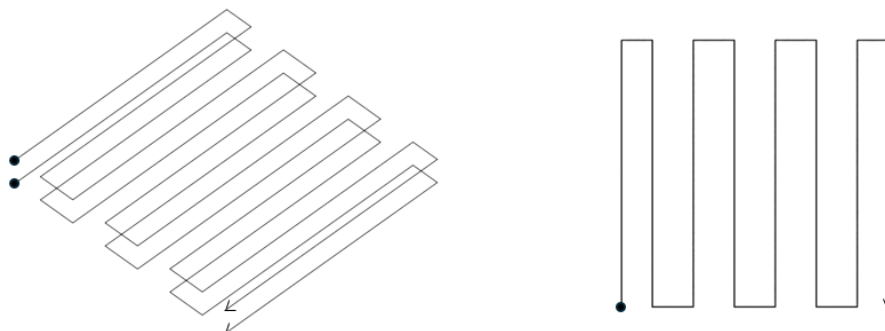
Počátek použitý pro tvorbu G-kódu musí být stejný jako počátek v programu Ansys WB. Model v programu Ansys WB má počátek uprostřed horní vrstvy již naneseného materiálu (Obr. 4-11). V programu Rhino není jednoduché nakreslit trajektorii s počátkem ve středu čtverce, proto prvním krokem skriptu bylo posunutí křivky trajektorie do pozice se středem uprostřed čtverce.



Obr. 4-11 Počátek v modelu pro simulaci trajektorií

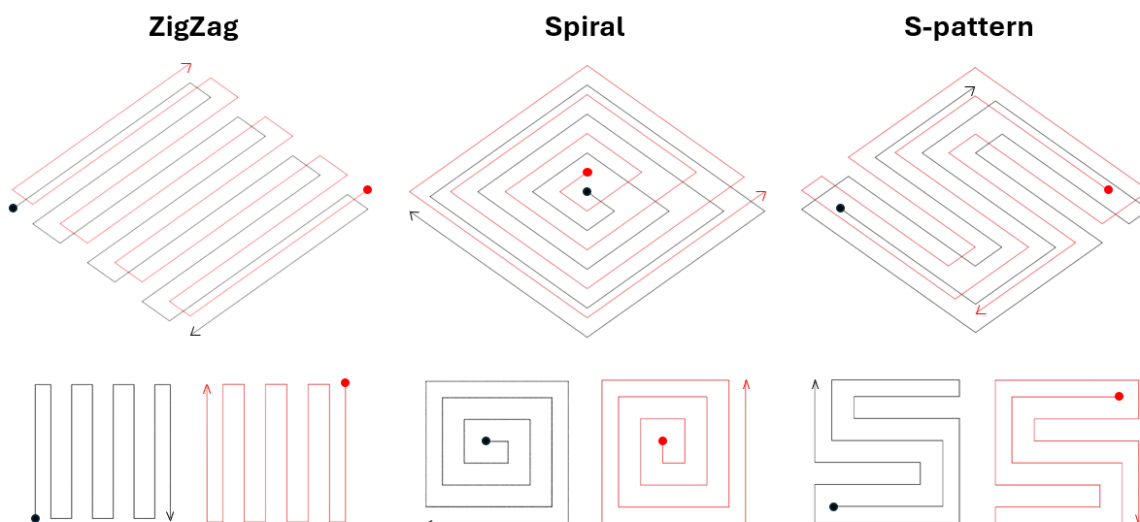
4.4.4 Analýza mikrostruktury

Pomocí vhodných procesních parametrů zjištěných z experimentů v předchozích kapitolách, byly vytvořeny objemové díly ze zmíněných trajektorií. Pro analýzu mikrostruktury by bylo vhodné, aby objemové díly byly vytvořeny vždy pomocí stejné trajektorie na každé nanesené vrstvě. To však způsobovalo opakované násobení geometrických defektů trajektorie s každou nanesenou vrstvou a nebezpečí nespolehlivého nanášení materiálu. Pro otestování geometrických defektů a spolehlivosti navařování v případě opakované trajektorie byl vyroben objemový díl pomocí trajektorie ZigZag.



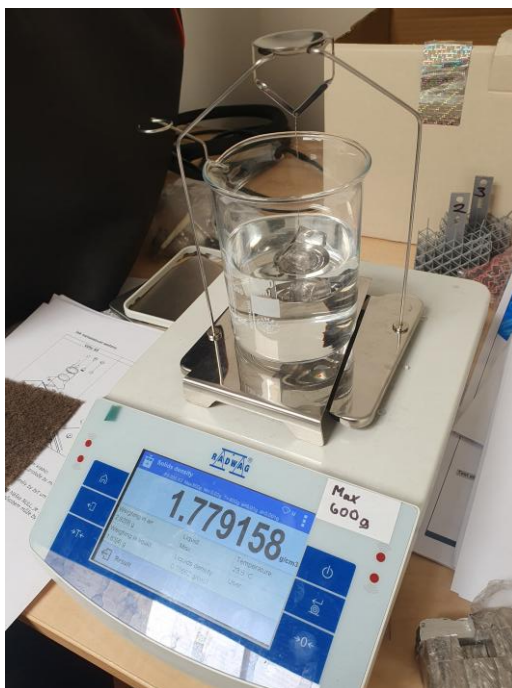
Obr. 4-13 Stejná trajektorie na každé vrstvě

Vytvořený objemový díl vyrobený pomocí opakované trajektorie měl natolik špatnou geometrickou přesnost, že výrobu dílu nebylo možné dokončit. Proto pro výrobu objemových dílů byla zvolena rozdílná trajektorie pro liché a sudé vrstvy. U ZigZag a S-pattern byla trajektorie jednoduše otočena o 180° na každé nanesené vrstvě. U Spiral trajektorie byl otočen směr spirály, v kombinaci s otočením konce navařování o 180° .



Obr. 4-14 Trajektorie pro výrobu objemového dílu pro a) ZigZag, b) Spiral, c) S-pattern

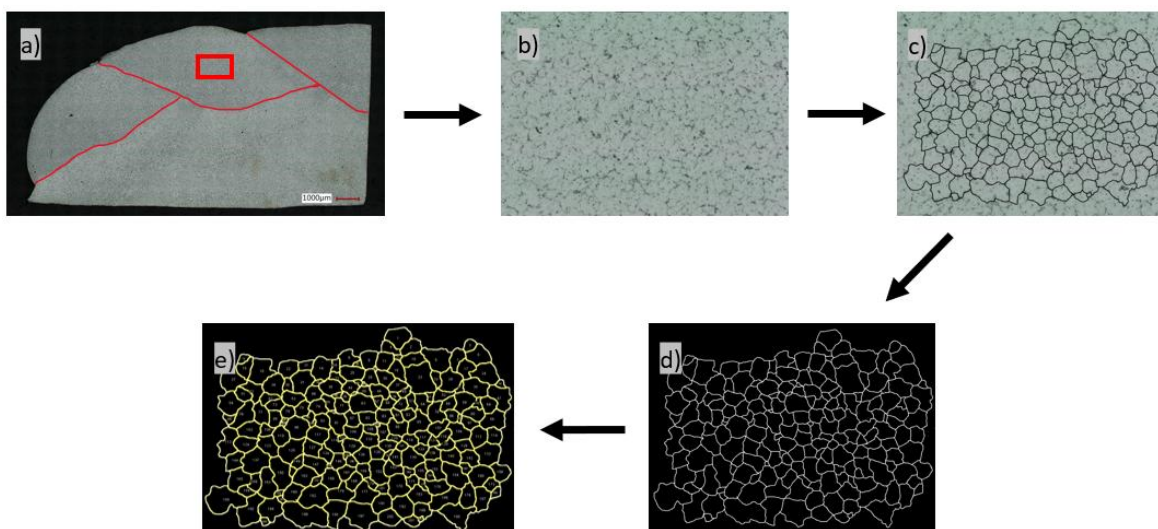
Ze simulací trajektorií byly zjištěny oblasti, kde dochází k nejpomalejšímu chladnutí. Tyto oblasti byly vyříznuty z dílu. Kromě vzorků z koncentrátorů tepla, byly také odebrány vzorky z jiných oblastí trajektorie pro ověření simulace. Pro stanovení vlivu množství nanášených vrstev na velikost zrn, byly odebrány vzorky ze stejné oblasti v různých výškách od podložky na objemovém díle se ZigZag trajektorií. U nařezaných vzorků bylo provedeno měření hustoty podle Archimédovy metody pro stanovení porozity jednotlivých oblastí.



Obr. 4-15 Archimédova metoda měření hustoty

Po měření hustoty byly vzorky připraveny do podoby lisovaných metalografických vzorků, které upevňují vzorky pro broušení a leštění. Všechny tyto vzorky byly postupně broušeny na brusném papíru s drsností 320, 600, 1000, 2500 a 4000. Při broušení byla neustále zaváděna voda do procesu a po posledním broušení byl vzorek očištěn isopropyl alkoholem. Dalším krokem bylo leštění, které bylo provedeno pomocí diamantové pasty. Mazivo na bázi alkoholu bylo do procesu zavedeno místo vody. Každý vzorek byl leštěn 3 minuty. Následně byly vzorky naleptány pomocí octového Pikrálu po dobu 50 - 90 s. Naleptané vzorky byly následně vyfoceny na digitálním mikroskopu.

První byl vytvořen obrazový záznam celého vzorku pro identifikaci jednotlivých návarů (Obr. 4-16, a)). U analyzovaného návaru byla vybrána střední oblast pro analýzu zrn (Obr. 4-16, b)). Okraje zrn byly v této oblasti obtaženy v programu Gimp (Obr. 4-16, c)). Vyhodnocování velikostí zrn bylo provedeno pomocí programu ImageJ, který měří obsah všech zrn a lze z něj dopočítat průměrnou velikost zrn. Tento program upravil obrázek, aby byly vidět pouze okraje zrn (Obr. 4-16, d)) a následně analyzoval obsah jednotlivých zrn (Obr. 4-16, e)). Výpočet průměru zrn využívá přepočtu ekvivalentní plochy kruhu. Nakonec je vypočítán vážený průměr těchto hodnot, kde váha jednotlivých průměrů je dodávána obsahem zrn.



Obr. 4-16 Postup analýzy velikostí zrn a) Celý vzorek, b) Vyhodnocovaná oblast, c) Obtáhlé hranice zrn, d) Úprava obrázku v ImageJ, e) Vyhodnocení v ImageJ

4.5 Testované predikce

Hypotéza predikuje závislost velikostí zrn na tepelné distribuci trajektorie. S-pattern bude mít nejmenší průměrnou velikost zrn. Spiral a ZigZag trajektorie budou mít maximální průměrnou velikost zrn do 65 μm .

Kontrolované proměnné: množství vkládaného tepla, pozice mikrostruktury v dílu, teplota vyhřívací podložky

Nezávislé proměnné: trajektorie navařování

Závislé proměnné: průměrná velikost zrn

5 VÝSLEDKY

5.1 Procesní parametry

Procesní parametry byly testovány navařováním jednoduchých návarů nebo 2D trajektorií na disk ze slitiny AZ91 (Obr. 5-1, a,b)). Některé návary byly vytvořeny pro analýzu provaření. Tyto návary jsou vytvořeny na plechu ze slitiny AZ31 (Obr. 5-1, c)).























Obr. 5-1 a) Jednoduché návary, b) 2D trajektorie, c) Návary pro analýzu provaření

5.1.1 Parametry svařovacího zařízení

Prvním krokem byla analýza vlivu parametrů svařovacího zařízení na geometrii návaru. Dle řešerše byly zvoleny parametry I_{boost} – 380; 400; 430; 450 [A] a $t_{I_{\text{boost}}}$ 2,8; 3; 3,3; 3,5; 3,7 [ms] při konstantní rychlosti posuvu 10 mm/s. Mapa geometrie návarů pro tyto parametry je v níže uvedené tabulce (Tab. 5-1). Celkově bylo nutné vytvořit 20 jednoduchých návarů. Na mapě geometrií průřezů návarů lze sledovat rostoucí průřez návaru se zvyšujícími se hodnotami parametrů I_{boost} a $t_{I_{\text{boost}}}$.

Tab. 5-1 Geometrie průřezů návarů

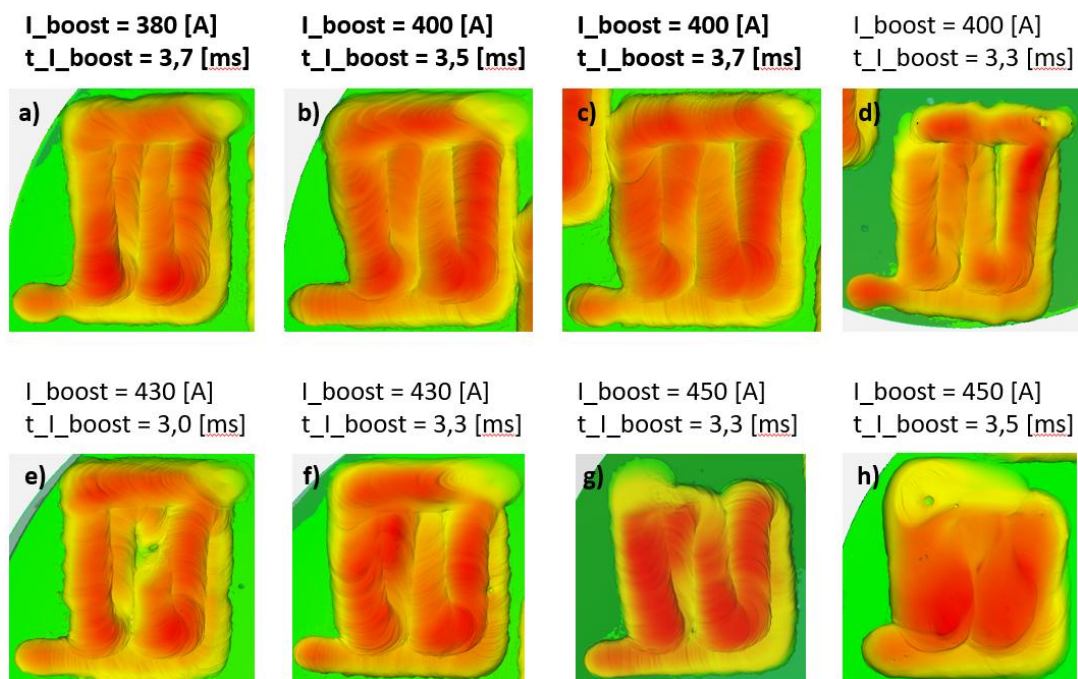
		I_{boost} [A]			
		380	400	430	450
$t_{I_{\text{boost}}}$ [ms]	2,8				
	3				
	3,3				
	3,5				
	3,7				

U těchto geometrií byla změřena šířka a výška návaru. Byl dopočítán poměr šířky ku výšce pro vyhodnocení geometrie návarů. Tento poměr je uveden v níže uvedené tabulce (Tab. 5-2). Červeně označené hodnoty mají největší poměr šířky ku výšce. Vysoký poměr šířky ku výšce u návaru je dle rešerše vhodný pro výrobu objemových dílů.

Tab. 5-2 Poměr šířky ku výšce u geometrií průřezů návarů

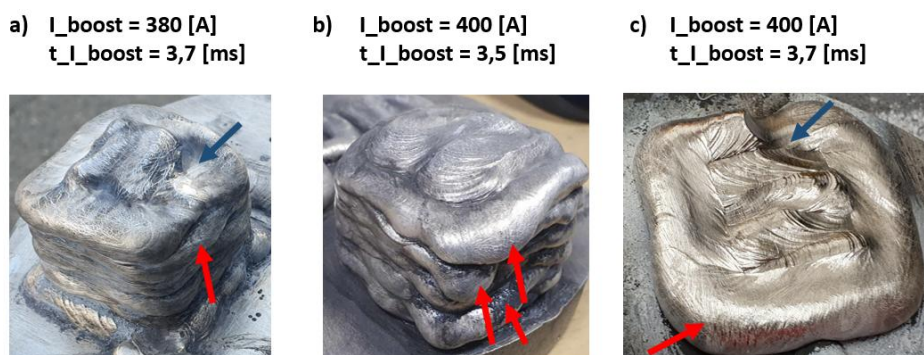
		I_boost [A]			
		380	400	430	450
t_I_boost [ms]	2,8	2,30	2,29	2,89	2,74
	3	2,12	2,67	2,95	2,55
	3,3	2,35	2,93	2,73	2,84
	3,5	2,49	2,78	2,49	2,83
	3,7	2,59	2,74	2,37	2,58

Parametry těchto červeně označených hodnot byly použity pro testovací 2D trajektorii, která je definována v kap. 4.4.2. Na Obr. 5-2 jsou obrázky 2D trajektorií, které byly vyhodnoceny z pohledu rovinnosti vrchu vrstvy v programu GOM Inspect. Pouze parametry a), b) a c) (Obr. 5-2) byly vybrány jako vhodné pro objemové díly. Parametry d) nesplnily podmínky pro objemové díly z důvodu nedostatečného provaření, naopak parametry g) a h) byly vyřazeny z důvodu příliš vysokého provaření. Parametry e) a f) by mohly být použity pro objemové díly, ale při navařování se projevila nízká stabilita procesu. Návar f) na Obr. 5-2 bylo možné vytvořit až na třetí pokus.



Obr. 5-2 Vyhodnocení testovacích 2D trajektorií

Tři sady parametrů byly vybrány pro výrobu objemového dílu. Těmito parametry byl vyroben objemový díl tvaru krychle pomocí trajektorie ZigZag s jednoduchým perimetrem. Vytvořené díly jsou zobrazeny v obrázku (Obr. 5-3). Všechny objemové díly měly velké množství defektů, které byly způsobeny přehřátím dílu. V obrázcích jsou červeně znázorněny oblasti kde docházelo k přetékání návaru přes okraj dílu a modře označené oblasti kde docházelo k tvorbě výrazných prohlubní na koncích návaru. Parametry c) byly natolik nestabilní, s natolik velkým množstvím vkládaného tepla, že byly navařeny jen první tři vrstvy, u kterých stejně docházelo k přehřátí. Dosažení požadované geometrie návaru pomocí nastavení parametrů svařovacího zařízení se projevilo jako nedostatečné pro vytvoření vhodných návarů pro výrobu objemových dílů. Byly by nutné rozsáhlé studie jednotlivých parametrů CMT proudové charakteristiky.



Obr. 5-3 Defekty objemových dílů způsobené přehřátím

5.1.2 Rychlost posuvu hořáku a teplota přehřevu

Při testování parametrů svařovacího zařízení se množství vkládaného tepla projevilo jako klíčové. Proto v dalším kroku byly použity parametry použité pro tenkostěnné prvky, které mají již ověřenou stabilitu. V této kapitole jsou variovány pouze parametry, které prostřednictvím CMT cyklu mají nepřímý vliv na množství vkládaného tepla. Z tohoto důvodu byly při navařování jednoduchých návarů sledovány průměrné hodnoty proudu a napětí z čehož lze dopočítat tepelný výkon a množství vkládaného tepla. Současně byla měřena i rychlost chladnutí po dokončení návaru.

Tepelný výkon:

$$P = U \cdot I \text{ [W]} \quad (11)$$

Množství vkládaného tepla:

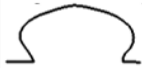














$$Q = \eta \cdot \frac{P}{v} \text{ [J/mm]} \quad (12)$$

Množství vkládaného tepla představuje energii přepočtenou na jednotku délky. Do této rovnice je zakomponována i účinnost. Skutečná účinnost tohoto procesu je neznáma proto je tato veličina pro úvodní výpočty nastavena na 100% účinnost.

Následně byly testovány parametry posuvu hořáku a teploty předehřevu.



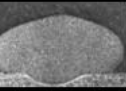
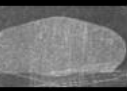
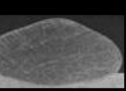

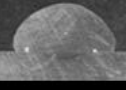


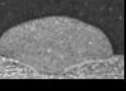

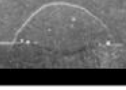

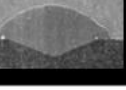
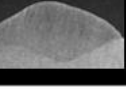
Byly zkoumány rychlosti 5, 10 a 15 mm/s. Byla vytvořena mapa geometrií návarů v kombinaci s předehřevem 0, 100, 200, 250 a 300 °C. Celkově bylo vytvořeno 15 jednoduchých návarů u kterých byla zjištěna geometrie průřezu návaru. Mapa geometrií návarů je uvedena v tabulce (Tab. 5-3).

Tab. 5-3 Geometrie návarů pro různé rychlosti posuvů a předehřevů

	0 °C	100 °C	200 °C	250 °C	300 °C
5 mm/s					
10 mm/s					
15 mm/s					

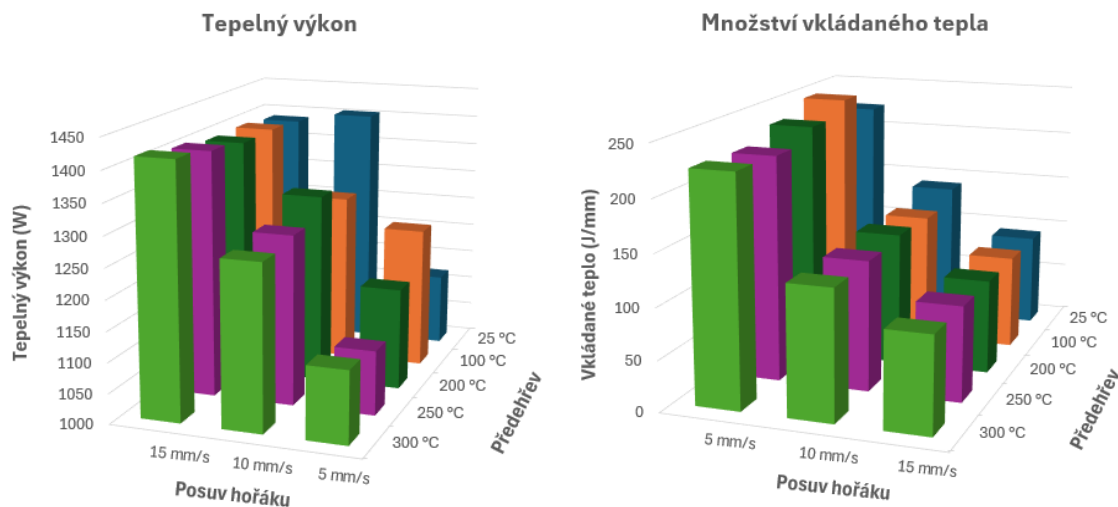
Pro podrobnější analýzu bylo zkoumáno provaření u těchto vzorků. U předchozí kapitoly zabývající se parametry svařovacího zařízení šlo předpokládat dostatečné provaření. Tento předpoklad byl možný z důvodu zvyšování parametrů, které zvětšují provaření. Fotografie návarů s provařením jsou uvedeny v tabulce (Tab. 5-4).

Tab. 5-4 Provaření návarů pro různé rychlosti posuvů a předehřevů

	0 °C	100 °C	200 °C	250 °C	300 °C
5 mm/s					
10 mm/s					
15 mm/s					

Při rychlosti posuvu hořáku 15 mm/s docházelo k tvorbě nízkých, širokých návarů, které jsou vhodné pro výrobu objemových dílů. Při předehřevu 200 °C a výše docházelo k dostatečnému provaření. Provaření bylo vyhodnoceno dle geometrie návaru zjištěné z rešerše (kap. 2.5). V rámci dosud nepublikované studie založené na části výsledků z diplomové práce S. Zemana [34] bylo zjištěno, že při předehřevu 250 °C a výše dochází k redukci nadměrné porozity.

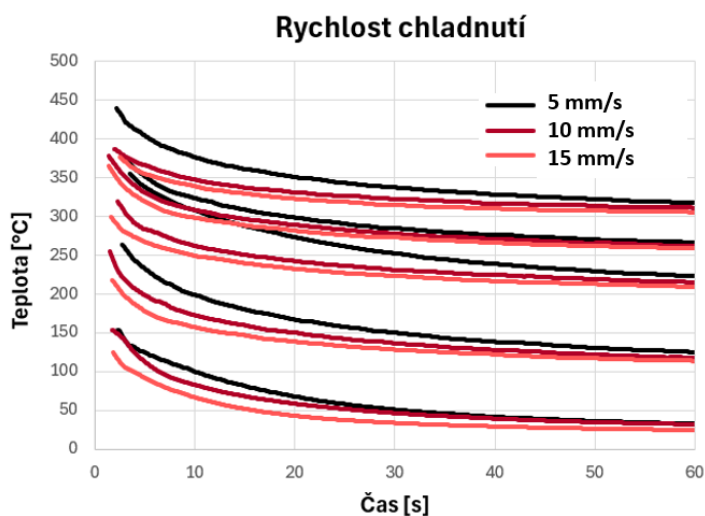
Při procesu navařování jednoduchých návarů byly zaznamenávány průběhy proudu a napětí. Z těchto hodnot byl dopočten tepelný výkon a množství vkládaného tepla se 100% efektivitou. Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v grafech (Obr. 5-4).



Obr. 5-4 a) Tepelný výkon, b) Množství vkládaného tepla v závislosti na rychlost posuvu a přehřevu

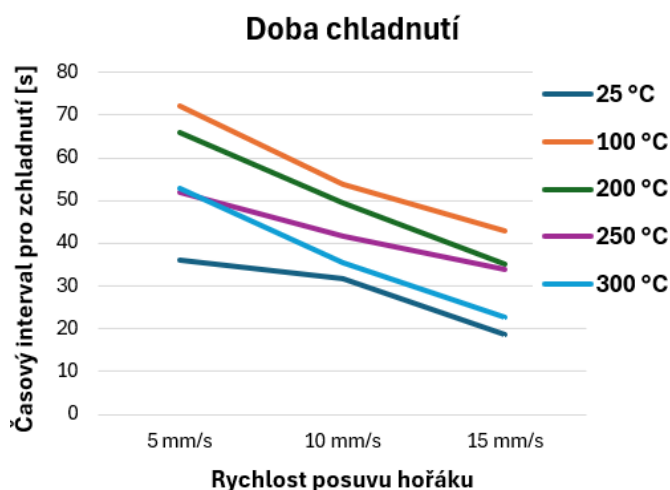
U těchto grafů je nutné zdůraznit obrácenou osu popisující rychlost posuvu hořáku. Osa byla otočena pro přehlednost grafu. V těchto grafech lze sledovat velmi nízká závislost tepelného výkonu a množství vkládaného tepla na přehřevu. Naopak je velmi vysoká závislost na posuvu hořáku. Se zvyšováním rychlosti hořáku dochází ke zvyšování tepelného výkonu při navařování a snižování vkládaného tepla ve vztahu na jednotku délky. Nejmenšího množství tepla na jednotku délky dosahuje rychlost posuvu 15 mm/s.

Po dokončení návarů byla termokamerou měřena závislost teploty na čase ihned po dokončení návarů. Křivky chladnutí pro různé teploty přehřevů (25°C, 100°C, 200°C, 250°C, 300°C) byly vyneseny do grafu (Obr. 5-5).



Obr. 5-5 Rychlosti chladnutí návarů

Z těchto závislostí byl zjištěn časový interval nutný pro zchladnutí na původní teplotu + 20 °C. Tyto hodnoty jsou vyneseny do grafu (Obr. 5-6).



Obr. 5-6 Časový interval pro zchladnutí na původní teplotu + 20 °C

S rostoucí rychlostí posuvu se výrazně zvyšuje i rychlost chladnutí. K nejrychlejšímu chladnutí na původní teplotu + 20 °C docházelo bez předehřevu a při předehřevu 300 °C.

Dle zjištění v této kapitole je jednoznačné, že nejvhodnější je rychlost posuvu 15 mm/s. Dostatečného provaření lze dosáhnout teplotou předehřevu 200 °C a výše. Při přihlédnutí na dosud nepublikovanou studii založenou na části výsledků z diplomové práce S. Zemana [34], by bylo vhodné zvolit předehřev 250 °C a výše. Předehřev 300 °C má rychlejší chladnutí na původní teplotu + 20 °C, než předehřev na teplotu 250 °C. Z pohledu tepelné distribuce by bylo vhodnější zvolit předehřev 300 °C, ale zvýšený předehřev může naopak způsobovat jednodušší přehřátí dílu a zhoršenou mikrostrukturu výsledného dílu. Proto pro další postup byl vybrán předehřev 250 °C.

Kombinace rychlosti posuvu hořáku 15 mm/s a předehřevu na teplotu 250 °C byla otestována pomocí malého objemového dílu. Tento díl je na obrázku (Obr. 5-7). Na tomto díle se neprojeví žádné známky lokálního přehřátí, proto byl tento parametr vybrán pro další řešení práce.



Obr. 5-7 Malý testový objemový díl

5.1.3 Vybrané parametry

V této kapitole byly vybrány parametry svařovacího zařízení použité pro tenkostěnné díly v kombinaci se zvýšenou rychlostí posuvu hořáku na 15 mm/s a přehřevem na 250 °C.

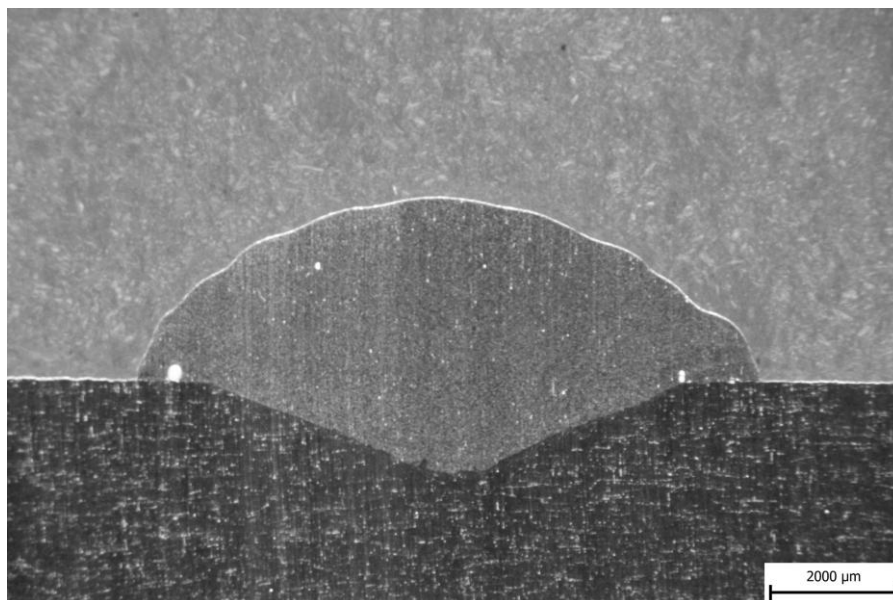
Tab. 5-5 Vybrané procesní parametry

I_boost [A]	t_I_boost [ms]	I_sc_wait [A]	vd_sc_wait [m/min]	I_sc2 [A]	Rychlost posuvu [mm/s]	Přehřev [°C]
430	2,5	35	30	50	15	250

Při procesu navařování jednoduchého návaru s těmito parametry a z vytvořeného návaru byly změřeny a dopočteny následující charakteristiky vč. rozteče potřebné při vytváření trajektorií.

Tab. 5-6 Charakteristiky vybraného návaru

Tepelný výkon [W]	Vkládané teplo [J/mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Rozteč návarů D1 [mm]	Rozteč návarů D2 [mm]	Rozteč návarů D3 [mm]
1404,51	93,63	10,46	3,01	6,97	5,23	4,95



Obr. 5-8 Návar vytvořený zvolenými parametry

5.2 Analýza trajektorie

Výška vybraného návaru je 3,01 mm a vnitřní rozteč návarů je 6,97 mm. Pro účely simulace byly hodnoty zaokrouhleny. Výsledný teoretický návar pro simulaci má rozměry 7 x 3 mm. Simulovaná krychle má rozměry 56 x 56 x 56 mm. Tato krychle byla rozdělena na dvě tělesa - těleso s již naneseným materiálem s rozměry 56 x 56 x 53 mm a těleso nanášené vrstvy s rozměry 56 x 56 x 3 mm. Velikost roztečí kartézské sítě těchto těles byla zvolena 1 mm.

Pro simulaci byly zvoleny následující parametry:

Tab. 5-7 Zvolené nastavitelné prvky pro simulaci

Nastavitelný prvek	Jednotka	Zvolená hodnota
Cluster Volume	mm^3	21
Metoda tvorby clusteru	Manual, G-Code	G-code vytvořený pomocí skriptu v Grasshopper
Material Deposition Rate	$\frac{mm^3}{s}$	315
Předehřev	$^{\circ}C$	250
Plocha předehřevu	-	Plocha předehřevu ze spodu disku
Předehřev zapnutý při tisku	On, Off	On
Tepelný výkon	W	1400
Pokožová teplota	$^{\circ}C$	22 $^{\circ}C$
Konvekce	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	10
Radiace	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	-

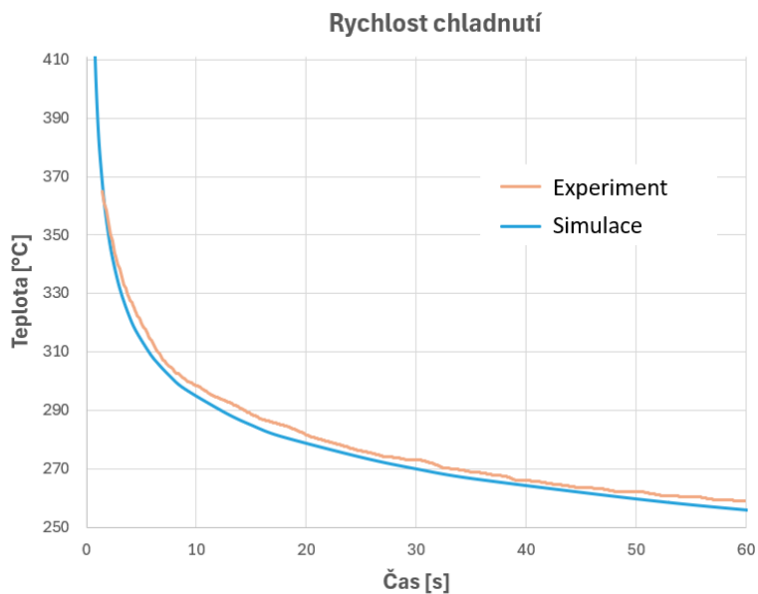
Cluster Volume nastavený na hodnotu 21 mm^3 znamená, že bude provedena simulace po každém jednom milimetru naneseného materiálu podél trajektorie.

Material Deposition Rate je roznásobený průřez návaru a rychlosti posuvu hořáku.

Tepelný výkon je nastavený na 1400 W. Tato hodnota byla zjištěna z vypočtených hodnot v předchozí kapitole. Při výpočtu se předpokládala efektivita 100 %. Taková efektivita je nereálná, avšak může sloužit jako počáteční odhad.

Do simulace není zanesena radiace, odvod tepla do okolí byl zprostředkován pouze konvekcí.

Pro ověření zvolených hodnot byla provedena simulace singletracku, který byl již vytvořen v předchozím experimentu (kap. 5.1) a jsou u něj známy rychlosti chladnutí. Na simulaci byla sledována teplota ve stejné oblasti, kde byla sledována při předchozím experimentu. Do všech simulací byly zaneseny materiálové vlastnosti zjištěné v rešerši. Porovnání závislosti je na grafu.



Obr. 5-9 Validace zvolených prvků simulace

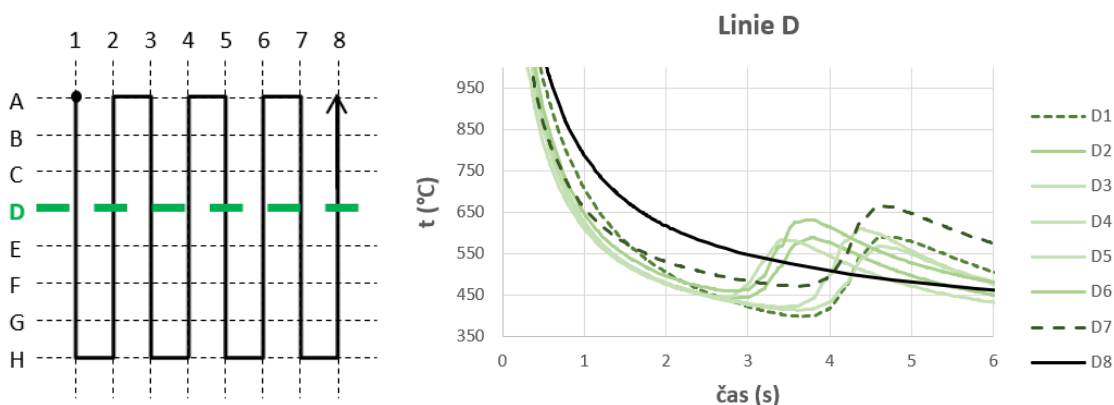
Graf ukazuje mírné podhodnocování simulace oproti experimentu. Pro simulaci byl nastaven tepelný výkon se 100 % efektivitou a byla i zanedbána radiace do prostředí. Jestliže by se brala v úvahu reálná efektivita a radiace, rozdíl by byl ještě větší. Vybrané parametry pro simulaci jsou dostatečně přesné pro další řešení práce.

Dalším krokem řešení je využití zvolených parametrů simulace na různé trajektorie navařování horní vrstvy objemového dílu tvaru krychle.

5.2.1 ZigZag trajektorie

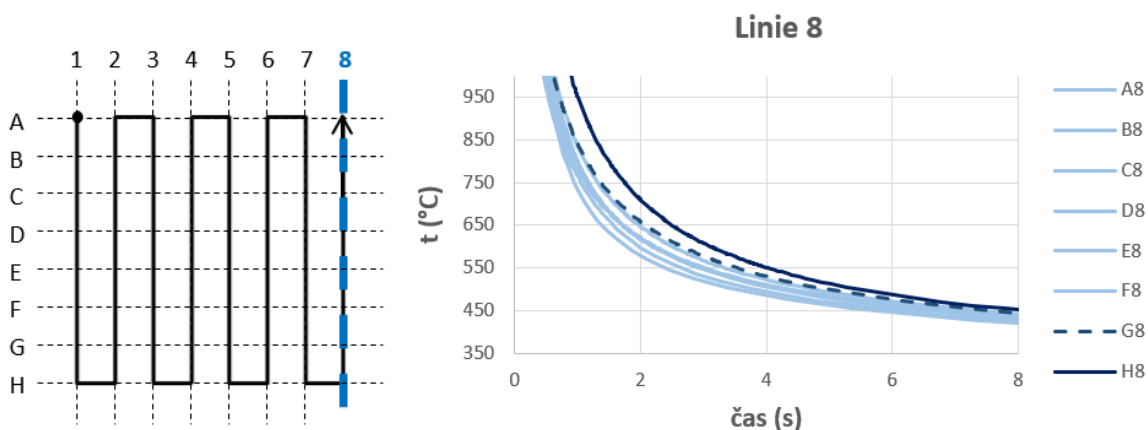
První byla simulována trajektorie ZigZag. Vykreslení všech 64 bodů do grafu by bylo nepřehledné, proto byly postupně analyzovány určité oblasti trajektorie.

První zvolenou oblastí byla linie D (Obr. 5-10, a)). Tato linie přestupuje přes dlouhé přímé části trajektorie. K nejpomalejšímu chladnutí docházelo na krajích dílu, v oblastech D1, D7 a D8 (Obr. 5-10, b)). Zejména oblasti ke konci návaru (D8 a D7) měly nízkou rychlost chladnutí.



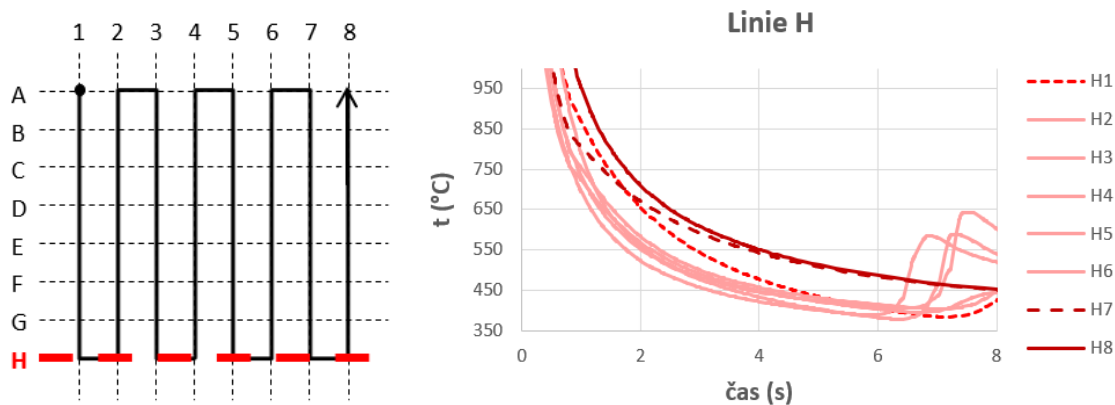
Obr. 5-10 a) Linie D, b) Body analýzy na linii D

S poznatkem že rychlost chladnutí je pomalejší na konci trajektorie, další zvolenou oblastí byla linie 8 (Obr. 5-11, a)). Tato oblast je umístěna podél dlouhého přímého segmentu na konci trajektorie. K nejpomalejšímu chladnutí docházelo v oblastech bodů G8 a H8 (Obr. 5-11, b)). To je pravděpodobně způsobeno tepelným koncentrátorem v oblasti trajektorie, kde dochází ke změně směru navařování o 180° (H7, H8).



Obr. 5-11 a) Linie 8, b) Body na linii 8

Poslední zvolenou oblastí pro strategii ZigZag byla linie H (Obr. 5-12, a)). Tato linie prochází okrajem dílu, kde se nachází tepelné koncentrátoři. K nejpomalejšímu chladnutí docházelo v oblastech H1, H7 a H8 (Obr. 5-12, b)). Oblast H1 je na začátku trajektorie, což by mělo zaručovat rychlejší chladnutí, avšak tento bod je umístěn v rohu dílu, což způsobuje pomalejší odvod tepla. H7 a H8 měly ještě pomalejší rychlost chladnutí, což bylo způsobeno kombinací umístění ke konci trajektorie a v rohu objemového dílu. Další oblasti v této linii měly relativně konsistentní rychlosti chladnutí.



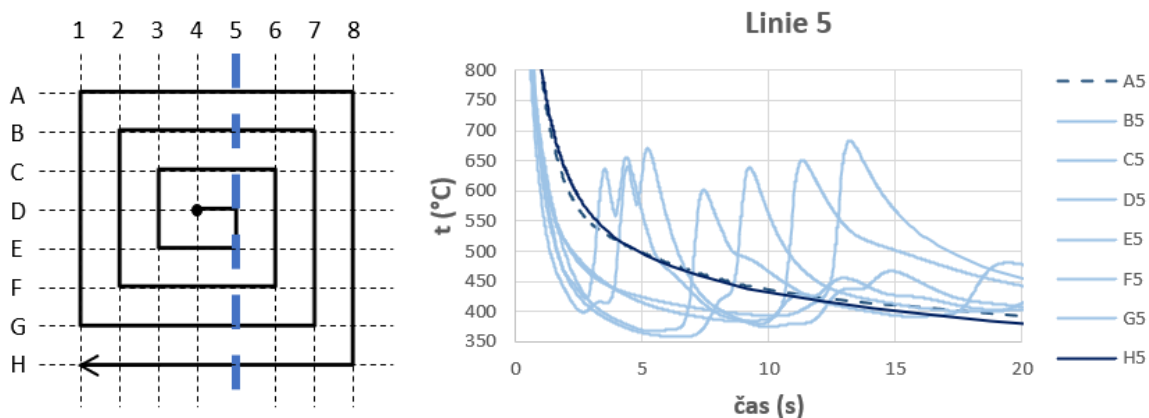
Obr. 5-12 a) Linie H, b) Body na linii H

Na základě analyzovaných oblastí bylo možné zvolit oblasti H7 a H8 jakožto kritické oblasti kde dochází k nejpomalejšímu chladnutí.

5.2.2 Spiral trajektorie

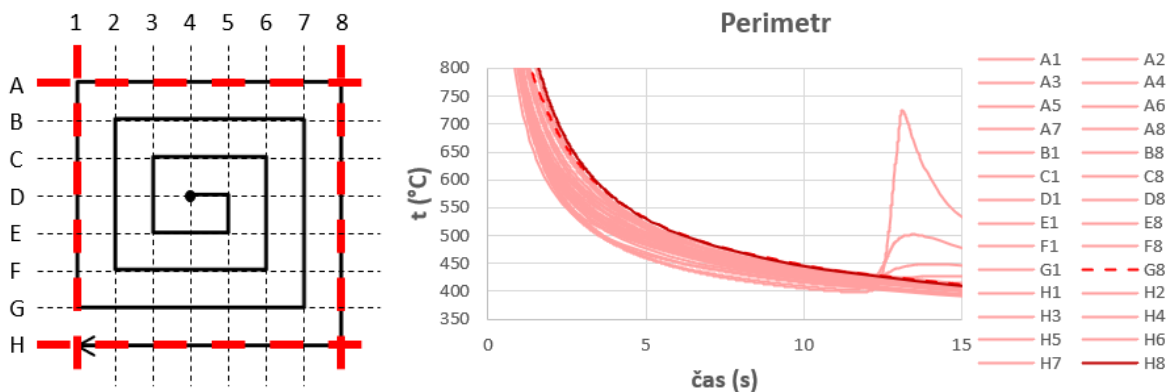
Dále byla provedena simulace Spiral trajektorie. Podobně jako u předchozí kapitoly byly z důvodu přehlednosti zvoleny určité oblasti pro hlubší analýzu.

První analyzovanou oblastí byla linie 5 (Obr. 5-13, a)). Tato linie prochází střední rovinou dílu. K nejpomalejšímu chladnutí docházelo v bodech A5 a H5 (Obr. 5-13, b)), tedy na okrajích dílu. Tyto 2 body měly téměř totožnou rychlost chladnutí.



Obr. 5-13 a) Linie 5, b) Body na linii 5

K nejpomalejšímu chladnutí docházelo na kraji dílu, proto další zvolenou oblastí byl celý obrys trajektorie (Obr. 5-14, a)). K nejpomalejšímu chladnutí docházelo v oblastech G8 a H8 (Obr. 5-14, b)). Největší tepelná koncentrace se vyskytovala v oblasti „rohů“ trajektorie a to zejména v oblastech které jsou poblíž konce trajektorie. Oblast H8 chladla pomaleji než oblast G8.

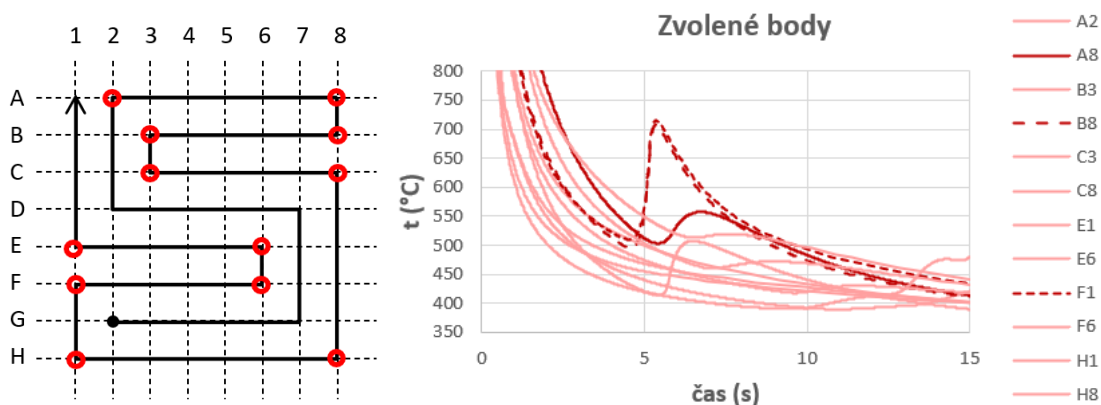


Obr. 5-14 a) Obrys trajektorie, b) Body na obrysu trajektorie

Na základě analyzovaných oblastí byla oblast H8 označena jako kritická.

5.2.3 S-pattern trajektorie

Při analýze předchozích trajektorií byly zjištěny následující poznatky: k nejpomalejšímu chladnutí dochází na okrajích dílu, v rozích trajektorie a ke konci trajektorie. Na základě těchto poznatků byly pro analýzu vybrány pouze oblasti v rozích trajektorie na okraji dílu (Obr. 5-15, a)) a také body B3, C3, E6 a F6, jelikož se jedná o dva rohy umístěné bezprostředně za sebou. K nejpomalejšímu chladnutí docházelo v bodech A8, B8 a F1 (Obr. 5-15, b)). Chladnutí je u těchto bodů prodlouženo pomocí opakovaného zahřívání dalším navařováním bezprostředně po nanesení.

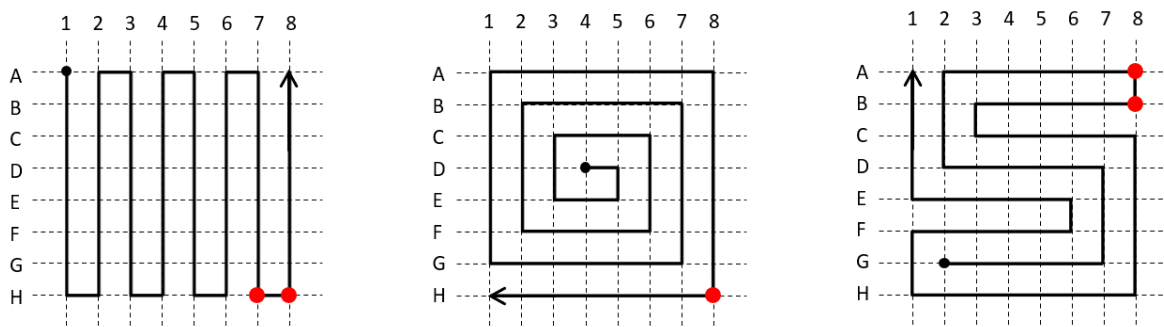


Obr. 5-15 a) Zvolené oblasti trajektorie, b) Body ve zvolených oblastech

Na základě analýzy těchto bodů byla vybrána oblast A8 a B8 jako kritická.

5.2.4 Kritické oblasti trajektorie

Na základě simulací byly zvoleny oblasti pro každou z trajektorií, kde dochází k nejpomalejšímu chladnutí návaru (Obr. 5-16). U ZigZag trajektorie byly vybrány body H7 a H8. U Spiral trajektorie byl vybrán bod H8. U S-pattern trajektorie byly vybrány body A8 a B8.



Obr. 5-16 Kritické oblasti u a) ZigZag trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) S-pattern trajektorie

5.3 Analýza mikrostruktury

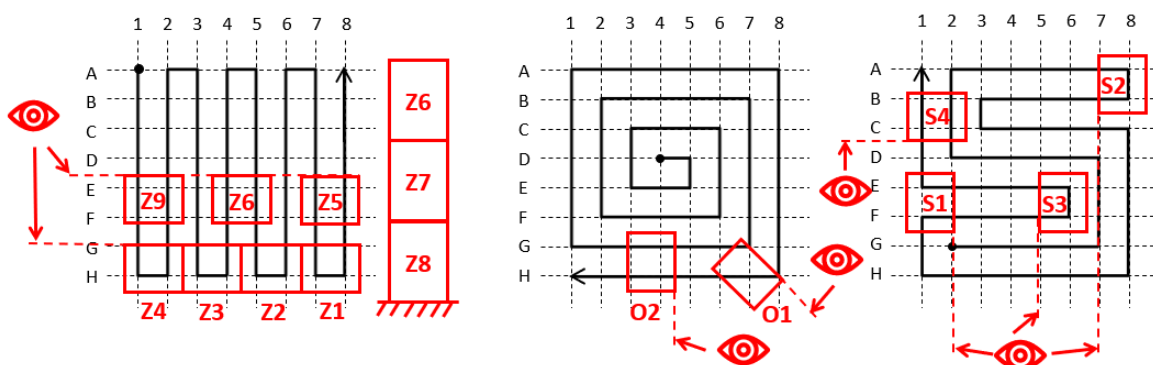
5.3.1 Analyzované oblasti

Na základě simulací a provedených experimentů byly vybrány kritické oblasti, kde dochází k nejpomalejšímu chladnutí dílu. Pro ověření simulace je však zapotřebí analyzovat trajektorii i v dalších oblastech. Proto bylo vybráno celkově 15 vzorků pro analýzu velikosti zrn. Vzorky jsou vždy orientovány kolmo ke směru nanášení materiálu.

Kritickou oblastí u trajektorie ZigZag je oblast vzorku Z1. Vzorky Z2, Z3 a Z4 (Obr. 5-17, a)) jsou ve stejných oblastech koncentrátorů tepla jako vzorek Z1 a slouží k ověření poznatku, že k nejpomalejšímu chladnutí dochází na konci trajektorie. Vzorky Z5, Z6 a Z9 (Obr. 5-17, a)) slouží k ověření poznatku že Z1, Z2, Z3 a Z4 nachází v oblasti koncentrace tepla. Tyto 3 vzorky dále do určité míry kvantifikují rozdíl ve velikosti zrn mezi začátkem návaru na okraji dílu, prostředkem dílu a koncem trajektorii na okraji dílu. Pod vzorkem Z6 jsou dále umístěny vzorky Z7 a Z8 (Obr. 5-17, a)), které slouží pro ověření vlivu nanášení dalších vrstev na mikrostrukturu dílu. V jednotlivých vrstvách uprostřed dílu (vzorek Z6) jsou identické podmínky navařování, které jsou nezávislé na směru navařování dané vrstvy. Navazující vrstvy se liší pouze orientací směru navařování (jedna vrstva zprava doleva, následná vrstva zleva doprava, ...). Zejména z důvodu konsistentní charakteristiky jednotlivých vrstev návarů byla pro analýzu vybrána i oblast pod vzorkem Z6 trajektorie ZigZag. V této oblasti je vždy nanášena polovina trajektorie.

U Spiral trajektorie je kritická oblast ve vzorku O1. Kromě kritické oblasti H8 tento vzorek také zahrnuje oblast G7 (Obr. 5-17, b)). Poznatkem z této simulace je, že v rožích trajektorie dochází k pomalejšímu chladnutí než na přímých částech. Další vzorek slouží k verifikaci tohoto tvrzení a je umístěn na přímé části (Obr. 5-17, b)). U vzorku O1 jsou předpokládány větší zrna než u O2. K potvrzení poznatku, že dochází k pomalejšímu chladnutí v rohu trajektorie, byl vzorek O2 umístěn blíž ke konci trajektorie. Tímto způsobem byl potlačen případný vliv předpokládaného pomalejšího chladnutí na konci trajektorie.

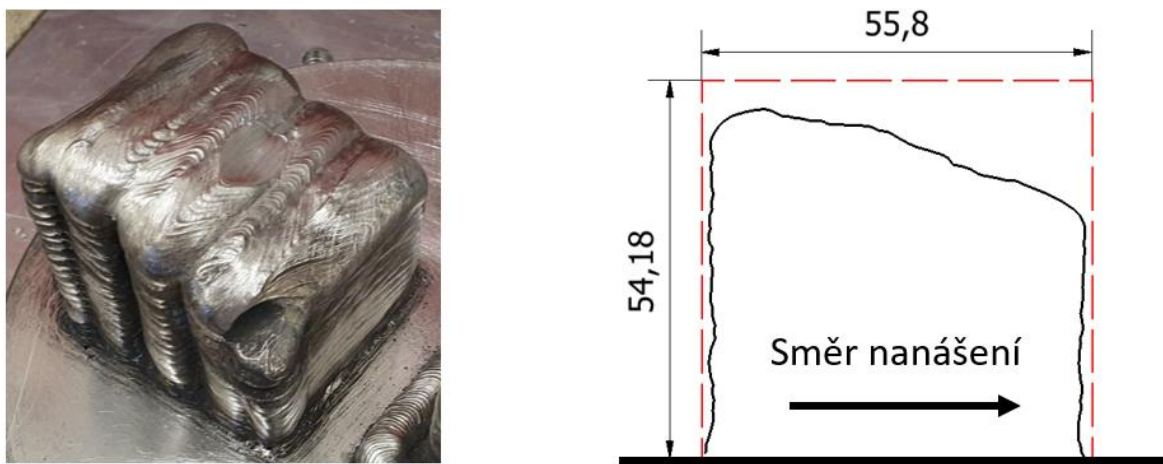
U S-pattern trajektorie je kritická oblast ve vzorku S2. Vzorek S1 je umístěn v oblasti, kde docházelo také k pomalému chladnutí, ne však až tak pomalému jako ve vzorku S2. Vzorek S3 je v oblasti koncentrátoru tepla, který má 2 rohy vedle sebe (Obr. 5-17, c)). Tento druh tepelného koncentrátoru je v kritické oblasti u trajektorie S-pattern a ZigZag s tím rozdílem, že kritické oblasti jsou na okraji dílu, zatímco S3 je uprostřed vrstvy. Pro vzorek S3 byly vybrány body E6 a F6, jelikož tyto body oproti bodům B3 a C3 se nachází blíž ke konci trajektorie. Vzorek S4 byl vybrán pro izolaci vlivu koncentrace tepla u vzorku S2.



Obr. 5-17 Analyzované oblasti a) ZigZag trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) S-pattern trajektorie

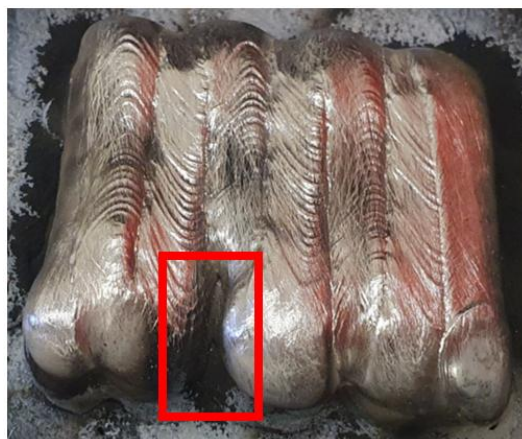
5.3.2 Výroba objemových dílů

Pro analýzu mikrostruktury je vhodné, aby byl vytvořen objemový díl, kde je použita stejná trajektorie navařování na každé nanesené vrstvě. Z tohoto důvodu byl první vytvořen objemový díl pomocí trajektorie ZigZag, která měla začátek a konec ve stejné oblasti na každé nanesené vrstvě (Obr. 5-18, a)). Takto vytvořený díl měl výrazně větší výšku v oblasti začátku trajektorie, oproti konci trajektorie (Obr. 5-18, b)). Vytvořený díl nebyl navržen pro geometrickou přesnost, proto tato charakteristika nevadila následujícímu vyhodnocení. Výrobu tohoto dílu nebylo možné dokončit z důvodu výrazně zhoršené stability navařování při tak rozdílných vzdálenostech mezi hořákem a dílem. Výroba byla dokončena na 18. vrstvě, proto předpokládané rozměry dílu byly 55,8 x 55,8 x 54,18 mm.



Obr. 5-18 a) Objemový díl vyrobený stejnou trajektorií ZigZag, b) Porovnání s předpokládanou geometrií

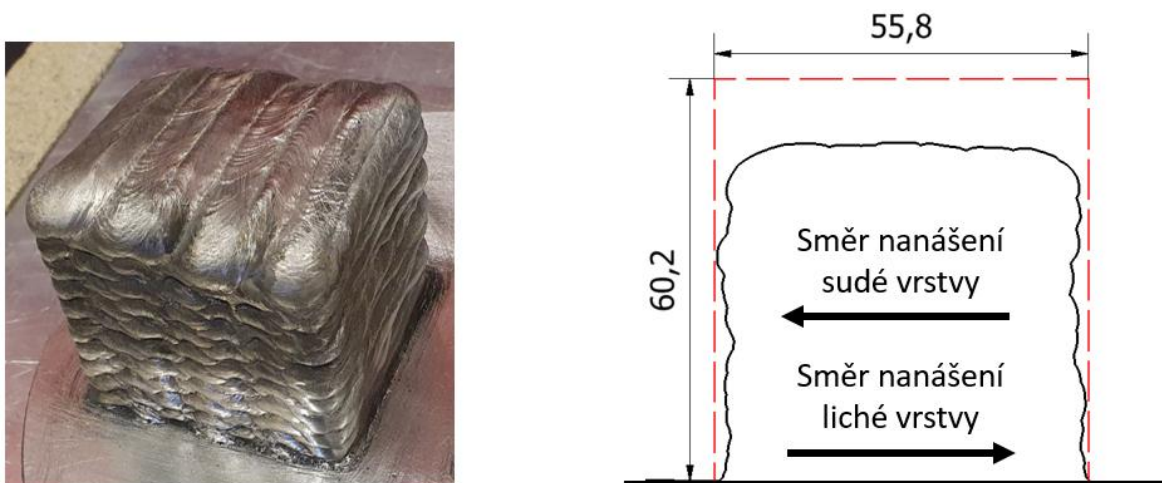
Dalším defektem způsobeným opakováním stejné trajektorie byla separace návarů (Obr. 5-19). Tato separace by mohla působit jako tepelný koncentrátor. Z těchto důvodů byla při výrobě dalších objemových dílů použita jiná trajektorie navařování na sudé a liché nanesené vrstvy.



Obr. 5-19 Separace objemového dílu

ZigZag Trajektorie

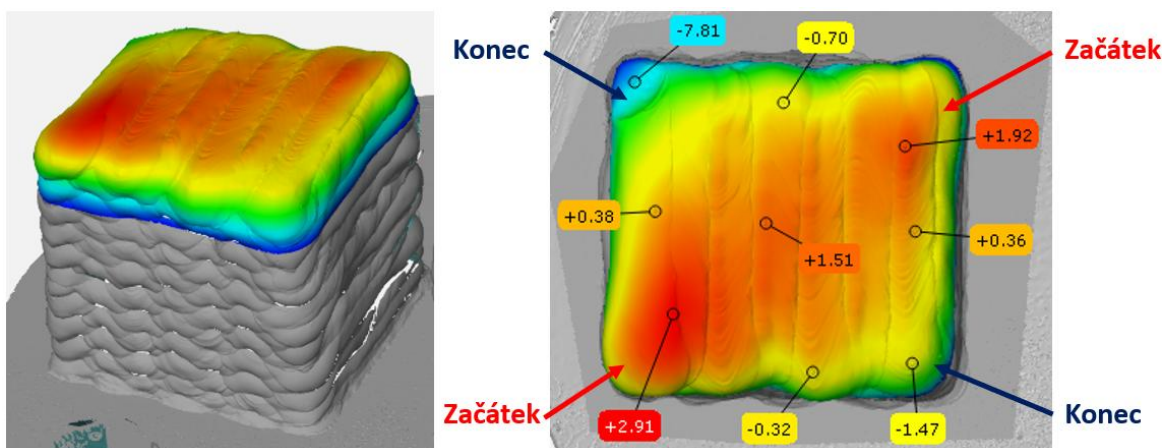
Objemový díl vyrobený pomocí ZigZag trajektorie byl vyroben dvěma trajektoriemi různě orientovanými na sudé a liché vrstvě popsanými v kap. 4.4.4. Rozteče a další rozměry trajektorie jsou blíže popsány v Příloze 1. Na každé nanesené vrstvě byl začátek a konec návaru vždy v protějším rohu oproti předchozí. Takto vyrobený díl měl dostatečně dobrou geometrickou přesnost pro dokončení výroby (Obr. 5-20, b)). Bylo vytvořeno všech 20 vrstev, proto předpokládané rozměry dílu jsou 55,8 x 55,8 x 60,2 mm.



Obr. 5-20 a) Objemový díl vyrobený střídavou trajektorií ZigZag, b) Porovnání s předpokládanou geometrií

Pro vyhodnocení horní plochy vytvořeného dílu bylo stanoveno těžiště této plochy v programu Gom Inspect, do kterého byla vložena rovina rovnoběžná s podložkou. Na Obr. 5-21 je určena barva dle odchylky od této roviny, stejně jako specifické hodnoty odchylky na Obr. 5-21, b).

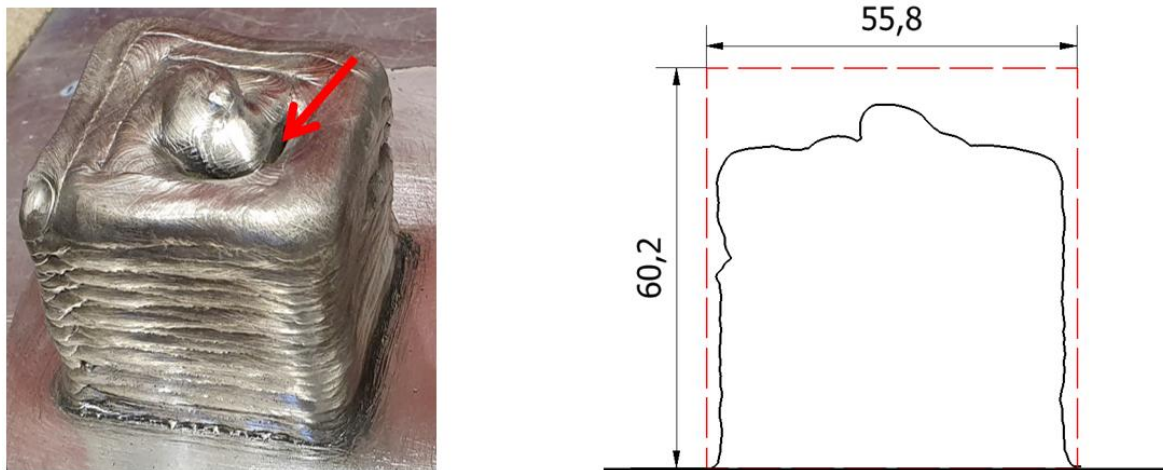
U vytvořeného dílu lze sledovat mírně zvýšenou výšku v rozích, kde jsou začátky návarů a mírně sníženou výšku v místech konce návarů.



Obr. 5-21 a) Rovinnost horní plochy trajektorie ZigZag, b) Odchylky v určitých bodech

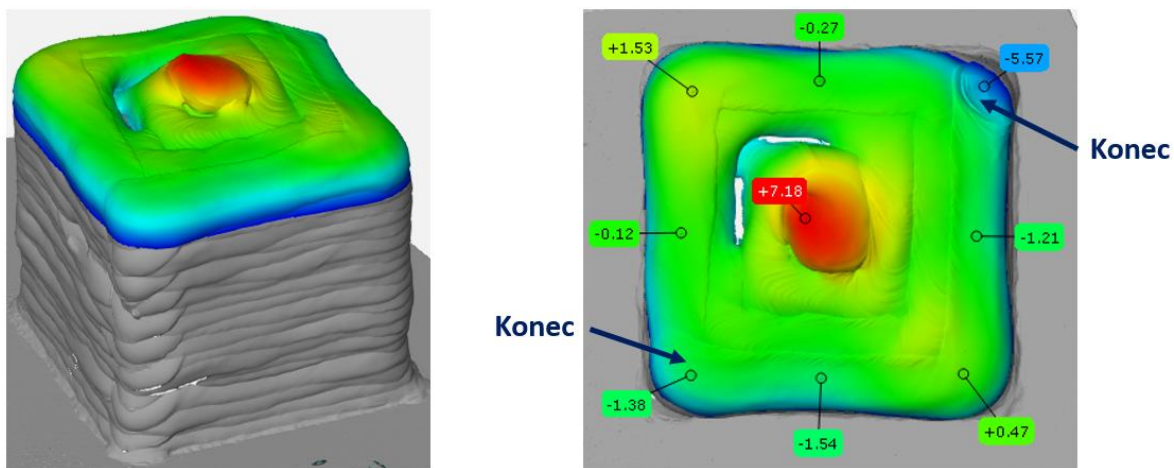
Spiral Trajektorie

Podobně jako u ZigZag trajektorie, tak i Spiral trajektorie jsou popsány v kap. 4.4.4 a specifické rozměry trajektorie jsou v Příloze 1. Začátek návaru je vždy uprostřed dílu. To způsobuje výrazné zvýšení a separaci dílu na začátku návaru (Obr. 5-22, a), červeně). Výrobu tohoto dílu však bylo možné dokončit. Teoreticky vypočtené rozměry tohoto dílu jsou 55,8 x 55,8 x 60,2 mm.



Obr. 5-22 a) Objemový díl vyrobený střídavou trajektorií Spiral, b) Porovnání s předpokládanou geometrií

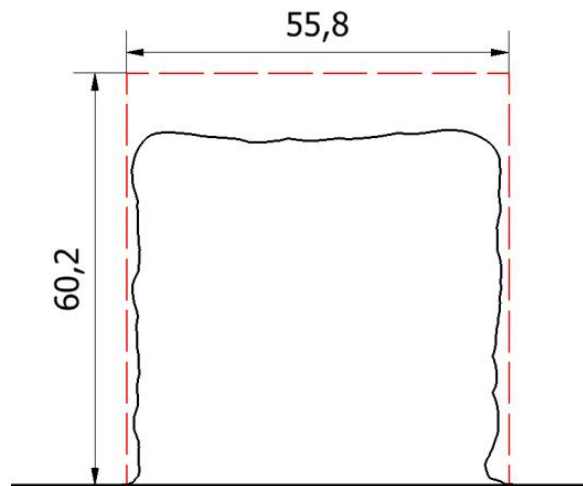
Rovinnost horní plochy byla vyhodnocena stejně jako u předchozí trajektorie. Kromě počátků trajektorie uprostřed dílu měly ostatní oblasti dobrou rovinnost. V rozích trajektorie, kde se nacházely konce trajektorií, docházelo k mírnému snížení výšky (Obr. 5-23, b)). Ostatní rohy měly naopak mírně zvýšenou výšku od podložky.



Obr. 5-23 a) Rovinnost horní plochy trajektorie Spiral, b) Odchylky v určitých bodech

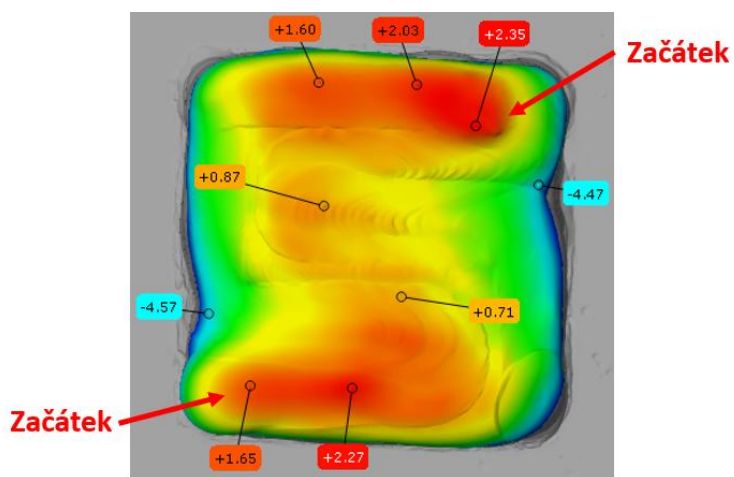
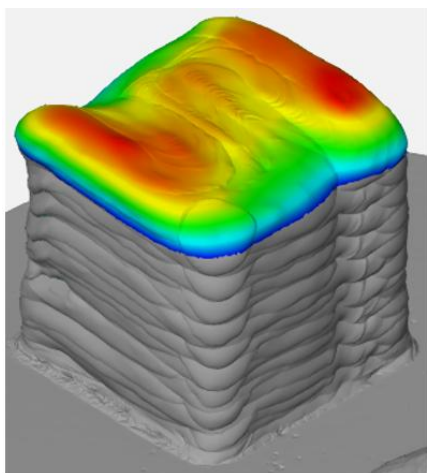
S-pattern trajektorie

Použité trajektorie pro výrobu objemového dílu pomocí S-pattern trajektorie jsou popsány v kap. 4.4.4 a Příloze 1. Tento objemový díl měl dobrou geometrickou přesnost (Obr. 5-24, b)). Výroba tohoto dílu byla dokončena. Teoretické rozměry vytvořeného dílu byly 55,8 x 55,8 x 60,2 mm.



Obr. 5-24 a) Objemový díl vyrobený střídavou trajektorií S-pattern, b) Porovnání s předpokládanou geometrií

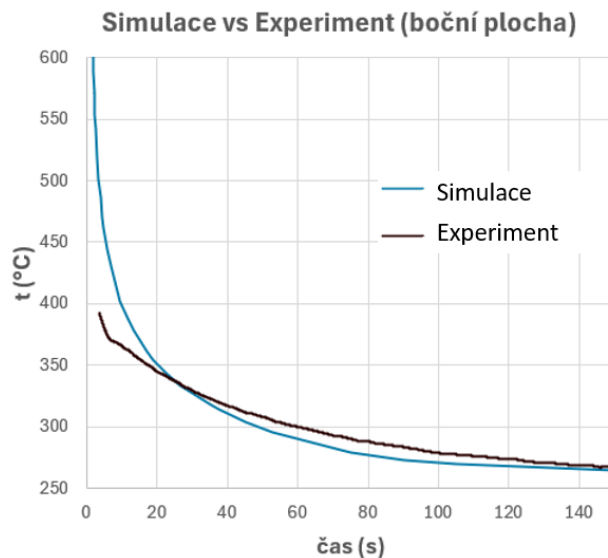
Rovinnost horní plochy byla vyhodnocena stejně jako u předchozích trajektorií. K nárůstu výšky dílu dochází zejména v oblastech začátků návarů (Obr. 5-25, b)). Naopak ke snížení výšky dílu dochází v oblastech obrácení trajektorie z navařování obrysu k navařování vnitřní oblasti.



Obr. 5-25 a) Rovinnost horní plochy trajektorie S-pattern, b) Odchytky v určitých bodech

Validace simulace

Při výrobě objemových dílů byla sledována rychlost chladnutí pomocí termokamery. U poslední vrstvy byla maximální teplota sledována na boční straně objemového dílu. Stejná plocha byla označena v simulaci. V grafu je porovnána rychlost chladnutí této plochy při experimentu a rychlost chladnutí v simulaci (Obr. 5-26).



Obr. 5-26 Porovnání simulace a experimentu u objemového dílu

U simulace lze sledovat výrazné nadhodnocování teploty bezprostředně po dokončení návaru a po 30 sekundách je teplota mírně podhodnocována. Nadhodnocování teploty simulací na začátku chladnutí může být způsobené efektivnější schopností hledat maximální teplotu na ploše u simulace. Rychlost chladnutí po 30 sekundách je konsistentní s validací provedenou kap. 5.2, kde byla provedena validace na jednoduchém návaru (singletracku).

5.3.3 Příprava vzorků

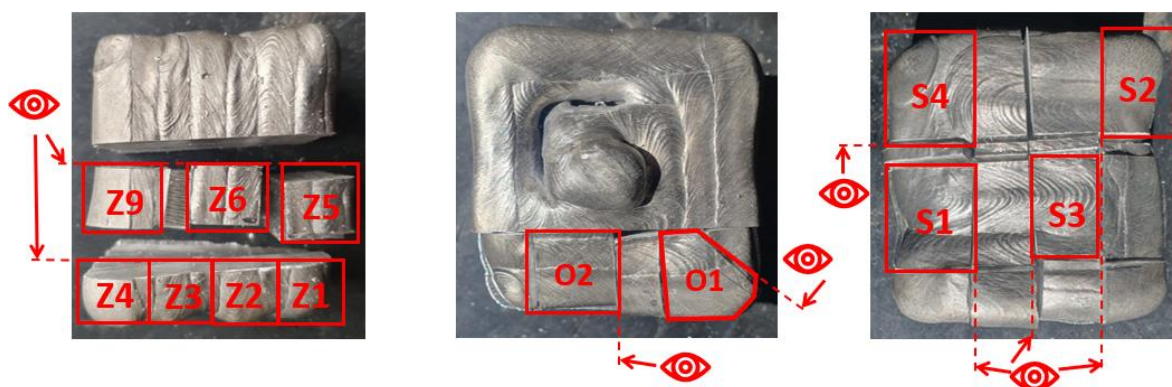
Vzorky slouží pro analýzu specifických oblastí na objemovém díle. Vzorek není možné vyříznout přímo z této oblasti, jelikož analyzovaná plocha musí být broušena a leštěna. Z tohoto důvodu bylo nutné vzorek vyříznout vždy s přídavkem na broušení. Pro určení velikosti potřebného přídavku, byl znovu proveden celý cyklus broušení na třech vzorcích s jednoduchými návary z kap. 5.1.2. Byla měřena odbroušená výška vzorku při broušení se zrnitostí 320 až 2500. Aby byla zachována vrstva materiálu pro možnost opakovaného leptání, kdy by bylo nutné vzorek znovu přebrousit na papíře se zrnitostí 4000, byla zvlášť měřena materiálová ztráta při broušení se zrnitostí 4000. Zvlášť bylo měřeno broušení se zrnitostí 4000, Měření bylo provedeno pom, ocí posuvného měřidla s přesností 0,05 mm.

Tab. 5-8 Měření ztrát na vzorku způsobené broušením

Vzorek	Původní výška	Broušení se zrnitostí od 320 do 2500	Ubroušená výška do zrnitosti 2500	Broušení se zrnitostí 4000	Ubroušená výška zrnitostí 4000	Ubroušená výška
1	16,6	14,95	1,65	14,9	0,05	1,7
2	17,25	15,5	1,75	15,5	0	1,75
3	18,05	16,35	1,7	16,35	0	1,7

Cyklem broušení do zrnitosti 2500 bylo odebráno v průměru 1,7 mm materiálu (Tab. 5-8). Následným broušením se zrnitostí 4000 bylo odebráno méně jak 0,05 mm materiálu. Při případném opakovaném leptání nehrozí odstranění příliš velkého množství materiálu, kde by mohlo dojít k zásadnímu posunutí analyzované plochy. Při řezání vzorků z objemových dílů byl zvolen přídavek 1,7 mm. Tento přídavek je kritický zejména u vzorku O1, kde je důležité, aby byla provedena analýza ve zvoleném bodě.

Z vyrobených objemových dílů byly vyříznuty vzorky se zvoleným přídavkem (Obr. 5-27).



Obr. 5-27 Nařezané objemové díly z a) ZigZag trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) S-pattern trajektorie

5.3.4 Porozita vzorků

Pro určení hustoty dílu byla použita Archimédova metoda. Porovnáním této hustoty s reálnou hustotou materiálu AZ61 je možné získat procentuální hustotu vzorků. Hustota této slitiny byla změřena na svařovacím drátu $\approx 1,795724 \text{ g/cm}^3$.

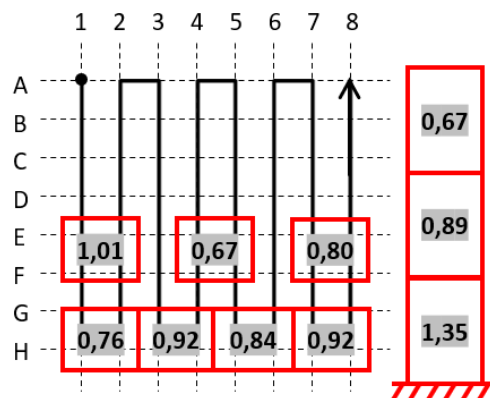
ZigZag

Porozita 9 vzorků u objemového dílu vyrobeného trajektorií ZigZag.

Tab. 5-9 Porozita vzorků u trajektorie ZigZag

Vzorek	Hustota [g/cm ³]	Porozita [%]
Z1	1.779161	0.922358
Z2	1.780640	0.839995
Z3	1.779158	0.922525
Z4	1.781989	0.764873
Z5	1.781377	0.798954
Z6	1.783709	0.669089
Z7	1.779742	0.890003
Z8	1.771441	1.352268
Z9	1.777637	1.007226

Zjištěné hodnoty porozity byly pro přehlednost vykresleny do trajektorie navařování (Obr. 5-28). I přesto že tyto hodnoty jsou vykresleny způsobem popisující trajektorii návaru, je nutné poznamenat, že součástí vzorku jsou mimo měřenou vrstvu i další vrstvy vzorku.



Obr. 5-28 Porozita vzorků na trajektorii ZigZag

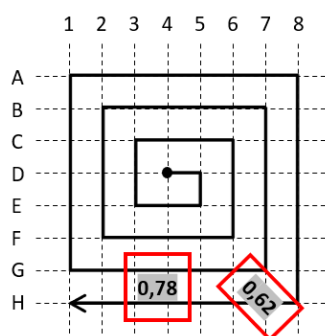
Spiral

U objemového dílu vyrobeného trajektorií Spiral byly 2 vzorky pro analýzu.

Tab. 5-10 Porozita vzorků u trajektorie Spiral

Vzorek	Hustota [g/cm ³]	Porozita [%]
O1	1.784607	0.619081774
O2	1.781661	0.783138166

U trajektorie Spiral se porozita projevuje více u přímých částí než v rozích trajektorie (Obr. 5-29).



Obr. 5-29 Porozita vzorků na trajektorii Spiral

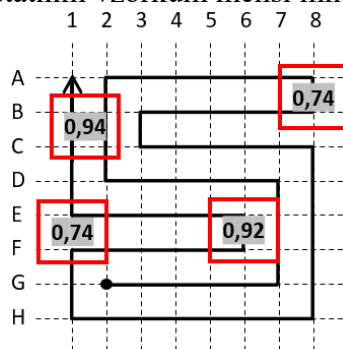
S-pattern

U objemového dílu vyrobeného trajektorií S-pattern jsou 4 vzorky pro analýzu.

Tab. 5-11 Porozita vzorků u trajektorie S-pattern

Vzorek	Hustota [g/cm ³]	Porozita [%]
S1	1.782408	0.741539
S2	1.782428	0.740426
S3	1.779260	0.916845
S4	1.778829	0.940846

U vzorků S1 a S2 bylo oproti ostatním vzorkům menší množství porozity (Obr. 5-30).



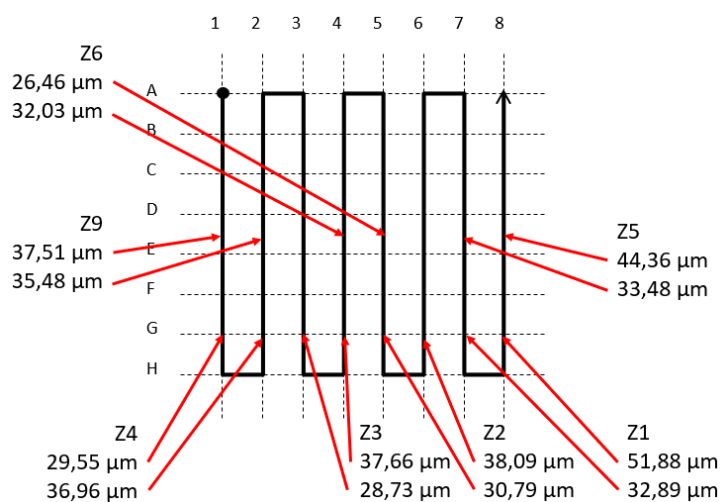
Obr. 5-30 Porozita vzorků na trajektorii S-pattern

5.3.5 Velikost zrn

Z vyříznutých částí byly připraveny metalografické vzorky, které byly obroušeny, vyleštěny a naleptány. Následně byly pořízeny snímky pomocí digitálního mikroskopu. V těchto snímcích byly identifikovány okraje zrn, které byly v programech Gimp obkresleny. Velikost zrn byla vyhodnocena v programu ImageJ. Tento program měří obsah zrn. Průměr zrn bylo možné dopočítat přes ekvivalentní obsah kruhu. Průměr velikostí zrn v jedné oblasti vzorku byl vytvořen pomocí váženého průměru, kde váhu plnil změřený obsah zrna.

ZigZag

U objemového dílu vyrobeného pomocí trajektorie ZigZag byly zkoumány nejen oblasti trajektorie, ale i závislost velikostí zrn na tom v jaké výšce od podložky se v objemu nachází. Velikosti zrn pro analýzu trajektorie byly zakresleny do obrázku (Obr. 5-31).



Obr. 5-31 Velikosti zrn v oblastech trajektorie ZigZag

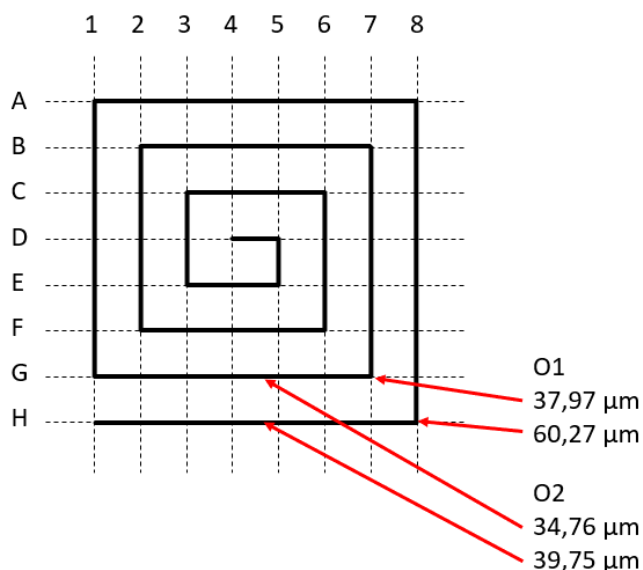
Velikosti zrn v závislosti na nanesené vrstvě jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 5-12 Velikost zrn v závislosti na nanesených vrstvách

Vrstva	Průměrná velikost zrn [μm]	Vrstva	Průměrná velikost zrn [μm]	Vrstva	Průměrná velikost zrn [μm]
20	30,55	13	45,60	7	34,37
19	40,57	12	35,93	6	29,73
18	33,18	11	42,08	5	37,01
17	33,19	10	39,99	4	31,63
16	25,49	9	32,64	3	40,67
15	41,32	8	33,64		

Spiral

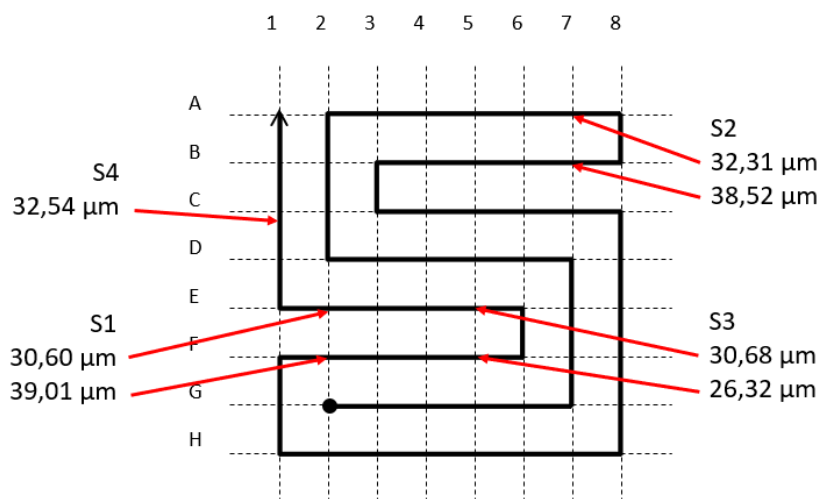
Kritickou oblastí u Spiral trajektorie byl bod H8, kde docházelo k nejpomalejšímu chladnutí. V této oblasti se také nachází největší zrna, což potvrdil závěr zjištěný ze simulace (Obr. 5-32).



Obr. 5-32 Velikosti zrn v oblastech trajektorie Spiral

S-pattern

Kritickou oblastí u S-pattern byla oblast vzorku A8 a B8. Tato oblast měla relativně hrubá zrna, ale větší zrna se nacházela na pozici vzorku S1 (Obr. 5-33). Simulace ukazovala podobné rychlosti chladnutí u těchto dvou vzorků, což validuje danou simulaci. Simulace dále ukazovala pomalejší chladnutí v oblastech vzorků S3 a S4, což bylo také potvrzeno.



Obr. 5-33 Velikosti zrn v oblastech trajektorie S-pattern

5.4 Ukázkový objemový díl

Posledním krokem práce byla výroba ukázkového objemového dílu. Geometrie pro ukázkový díl byla vybírána s ohledem na potenciální uplatnitelnost výhod WAAM při výrobě dílů ze slitiny AZ61. Výsledná geometrie dílu je inspirována ze součásti rámu letadla (Obr. 5-34). V tomto dílu se nachází jak objemové, tak i tenkostěnné části. Pro výrobu byla vybrána oblast s objemovou částí a nejbližší tenkostěnné prvky. Trajektorie navařování tohoto dílu je blíže popsána v Příloze 1.



Obr. 5-34 Součást rámu letadla tvaru C [54]

Ukázkový objemový díl měl rozměry 190 x 190 x 50 mm. Tento díl měl 20 vrstev. Pro objemový díl byla vybrána trajektorie S-pattern z důvodu nejmenších velikostí zrn, tedy nejlepších mechanických vlastností.

Tento díl byl vyroben na 20 mm tlusté podložce ze slitiny AZ31. Podložka musela být robustně upnuta ke svařovacímu stolu pro prevenci deformace způsobené vnitřním napětím. Vytvořený ukázkový díl je na Obr. 5-35.



Obr. 5-35 Ukázkový objemový díl

6 DISKUZE

6.1 Interpretace výsledků

6.1.1 Procesní parametry pro výrobu objemových dílů

V této práci byly testovány parametry svařovacího zařízení, přehřev podložky a rychlost posuvu hořáku.

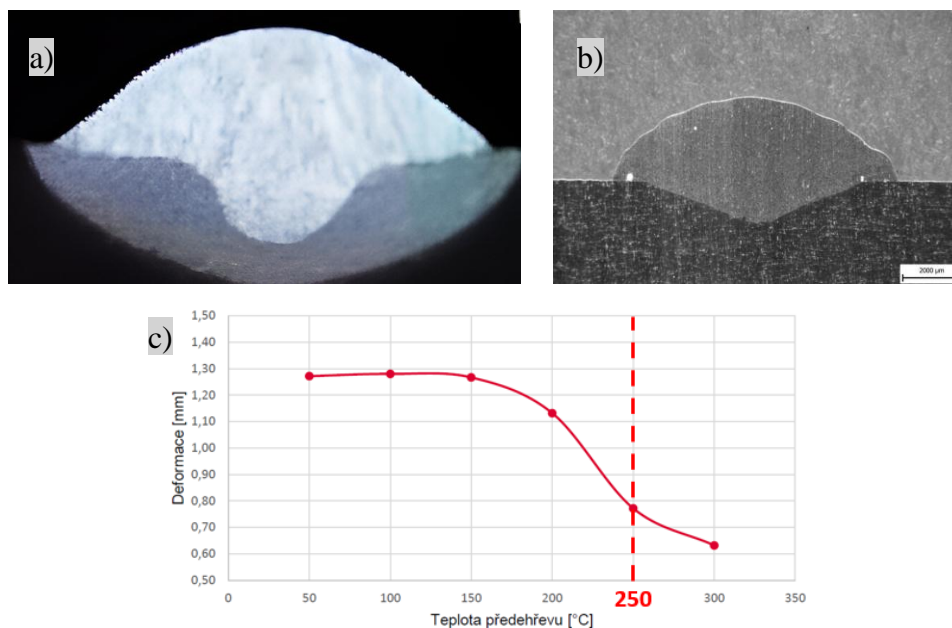
Na základě rešerše byly identifikovány dva hlavní parametry svařovacího zařízení, které nejvýznamněji ovlivňují geometrii návaru. Č. Šváb zkoumal vliv těchto parametrů na geometrii návaru[31]. Zvyšování parametru I_{boost} mělo vytvářet širší, nižší návary. To se však při testování v této práci neprojevovalo. Jsou vytvářeny širší návary, ne však nižší. Naopak v extrémních hodnotách byla výška zvětšena. Zvýšení parametru $t_{I_{boost}}$ mělo zlepšovat kontaktní úhel a zvyšovat šířku návaru. Při testování v této práci lze sledovat rostoucí šířku. Zlepšující se kontaktní úhel lze sledovat pouze na několika geometriích návarů. V této práci byly použity extrémní kombinace hodnot CMT parametrů oproti testování, které provedl Č. Šváb. Z tohoto rozdílu výsledků je možné dojít k závěru že vlivy CMT parametrů zjištěné Č. Švábem se nedají uplatnit na všechny kombinace CMT parametrů v celém rozsahu. P. Wang zmínil rostoucí množství vkládaného tepla se zvyšujícími se těmito parametry[30]. Se zvýšenými parametry I_{boost} a $t_{I_{boost}}$ byl proveden pokus o výrobu objemového dílu. Docházelo však k přehřívání tohoto dílu, proto je možné potvrdit závislost množství vkládaného tepla na těchto parametrech. Na základě tohoto experimentu bylo zvyšování hodnot parametru I_{boost} a $t_{I_{boost}}$ identifikováno jako nevhodný přístup k modifikaci geometrie návaru pro objemové díly.

Experiment zaměřený na testování 2D trajektorie s využitím navržených parametrů ověřoval provaření sousedních návarů a homogenitu vrchní plochy navařené vrstvy. Pomocí této trajektorie byly vyřazeny jak parametry dosahující příliš velkého provaření, tak i parametry, které dosahovaly příliš nízkého provaření. Problémem tohoto typu testování bylo umístění návaru hned na podložce, což znamenalo testování navařování pouze první vrstvy. Pomocí testové 2D trajektorie byly nalezeny parametry, které byly vhodné pro výrobu první vrstvy objemového dílu. Na první vrstvě docházelo k výrazně rychlejšímu odvodu tepla, proto při výrobě objemových dílů na pozdějších vrstvách docházelo k lokálnímu přehřívání. Zvolenou strategií nebyly nalezeny parametry svařovacího zařízení, které by měly dostatečné provaření na první vrstvě a zároveň nepřehřívaly díl na pozdějších vrstvách. Pomocí úpravy parametrů svařovacího zařízení nebylo možné dosáhnout vhodných parametrů pro výrobu objemových dílů, proto v dalším řešení této práce bylo nutné se zaměřit na jiné procesní parametry.

Dalšími testovanými procesními parametry byly rychlost posuvu hořáku a přehřev podložky. Dle S. Manjhi [32] zvyšování rychlosti posuvu hořáku vede na zmenšení výšky a šířky návaru a zrychlení chladnutí vytvořeného dílu. Při řešení této práce byla sledována změna výšky a kontaktního úhlu návaru při zvyšování rychlosti posuvu hořáku. Nebyla však sledována významná změna v šířce návaru. Po vytvoření návaru byla vždy sledována rychlost chladnutí. K nejrychlejšímu chladnutí dochází u návarů s nejrychlejším posuvem hořáku, což potvrzuje závěr S. Manjhiho [32]. S. Zeman [34] zkoumal vliv přehřevu na návar. S růstem teploty přehřevu se má zvyšovat šířka, kontaktní úhel a provaření návaru, zatímco klesá výška návaru. Při testování v této práci bylo sledováno snižování návaru, zlepšování kontaktního úhlu a provaření, avšak nebyl sledován výrazný vliv na šířku návaru. Tyto mírně odlišné výsledky mohou být způsobeny odlišnými procesními parametry. S. Zeman také došel k závěru, že vliv přehřevu na návar částečně závisí na dalších procesních parametrech. Výsledky v této práci takový závěr potvrzují.

Metodika vyhodnocování vhodnosti parametrů rychlosti posuvu hořáku a teploty přehřevu byla oproti předchozím experimentům rozšířena o analýzu provaření. Z každého návaru byl vytvořen metalografický vzorek, na kterém bylo sledováno provaření. Tyto vzorky byly následně porovnávány s geometrií návaru označenou jako vhodnou pro výrobu objemových dílů z hliníkové slitiny (Obr. 6-1, a)). Nejlepší geometrie návaru je dosahováno pomocí rychlosti posuvu hořáku 15 mm/s. Při této rychlosti posuvu jsou vytvářeny široké, nízké návary s dobrým kontaktním úhlem. Při přehřevu na teplotu 200 °C a výše bylo dosaženo dostatečného provaření v porovnání s návarem pro objemové díly z hliníku (Obr. 6-1, a)).

Tyto návary byly vyhodnoceny i na základě rychlosti chladnutí, tepelného výkonu při navařování a množství vkládaného tepla na jednotku délky. Teplota přehřevu nemá zásadní vliv na tepelný výkon a množství vkládaného tepla, avšak při měření rychlosti chladnutí je možné sledovat zvláštní výsledky. Rychlost chladnutí byla kvantifikována jako časový interval nutný pro zchladnutí na původní teplotu + 20 °C. Od 100 °C přehřevu a výše klesá tento časový interval s rostoucí teplotou, tedy roste rychlost chladnutí relativně k teplotě přehřevu. Bez přehřevu však dochází k ještě rychlejšímu chladnutí než při přehřevu na 300 °C. Fenomén rostoucí rychlosti chladnutí při zvyšování teploty přehřevu lze vysvětlit zvýšenou tepelnou vodivostí hořčkových slitin při vyšších teplotách (kap. 2.2.2) a zvětšením teplotního gradientu mezi dílem a okolím. Při vyšších teplotách přehřevu se návar celkově pohybuje na vyšších teplotách, proto může docházet k odvodu většího množství tepla pomocí konvekce a sálání. Nejvyšší rychlost chladnutí u návaru bez přehřevu lze vysvětlit teplotním gradientem a celkově nižšími teplotami navařování. To by však nevysvětlovalo takový rozdíl mezi návarem bez přehřevu a návarem s přehřevem na 100 °C. Proto jediným možným vysvětlením je sloupec stoupajícího teplého vzduchu, který by do určité míry blokoval odvod tepla u návarů, které měly při procesu výroby zapnutý vyhřívaný stůl.



Obr. 6-1 a) Geometrie návaru pro hliníkové slitiny [39], b) Zvolená geometrie návaru, c) Závislost deformace návaru na předehřevu [34]

Na rozdíl od předehřevu, rychlost posuvu hořáku měla velký vliv na tepelný výkon, množství vkládaného tepla i rychlost chladnutí. Při zvýšených rychlostech posuvu dochází ke zvýšení tepelného výkonu při navařování. Výpočet množství vkládaného tepla na jednotku délky tento zvýšený tepelný výkon kompenzuje rychlostí posuvu hořáku. Proto u zvýšených rychlostí posuvu hořáku dochází ke snižování množství vkládaného tepla na jednotku délky trajektorie. To je potvrzeno nejrychlejším chladnutím návarů s maximální rychlostí posuvu hořáku. Nízké vkládané teplo na jednotku délky znamená lepší tepelnou distribuci a snížení lokálních přehřátí. Vysoký tepelný výkon však znamená vkládání většího množství tepla na celé vrstvě. Proto v případě přehřívání celé vrstvy by nebylo vhodné používat rychlost posuvu 15 mm/s, ale v případě lokálního přehřívání by tato rychlost posuvu vhodná byla. Při testování parametrů svařovacího zařízení docházelo zejména k lokálnímu přehřátí, proto je rychlost posuvu 15 mm/s vhodná.

Na základě geometrie návaru, rychlosti chladnutí a tepelné distribuce byla vybrána rychlost posuvu 15 mm/s jako vhodná. Teplota předehřevu od 200 °C a výše vytváří dostatečné provaření. Při teplotě 250 °C dochází k výraznému snížení vnitřního pnutí a redukci porozity návaru, jak popsal ve své práci S. Zemana [34] (Obr. 6-1, c)) a odstranění sloupcové porozity ve vyrobeném dílu. Příliš vysoký předehřev by mohl způsobovat zvýšenou citlivost na přehřátí a tvorbu hrubších zrn, proto byl vybrán předehřev 250 °C jako vhodný. Tato kombinace parametrů byla otestována na malém objemovém díle. Malý objemový díl měl dobrou geometrickou přesnost, proto zvolené procesní parametry byly zvoleny jako vhodné. Geometrie průřezu návaru vyrobeného těmito parametry je na Obr. 6-1, b).

Tento návar dosahoval dostatečného provaření na první vrstvě a na vrstvách dále od podložky nezpůsobil přehřátí dílu. Je možné dojít k závěru, že jeden, nebo oba změřené parametry minimalizují rozdíl rychlosti chladnutí mezi první vrstvou a vrstvami dále od podložky. Zodpovědným parametrem je pravděpodobně předhřev, protože S. Zeman byl schopný dosáhnout předehřevu, kde geometrie návaru byla stejná v různých vzdálenostech od podložky. To poukazuje na konstantnější rychlost chladnutí u různých vzdálenostech od podložky.

6.1.2 Analýza trajektorií

Pro analýzu trajektorií byla vytvořena simulace v programu Ansys WB. Byla sledována rychlost chladnutí ve středech návarů v mřížce bodů 8 x 8. Pro simulaci byl vybrán tepelný výkon zjištěný z navařování singletracku se 100% účinností. Validace simulace byla provedena na rychlosti chladnutí zjištěné z navařování singletracku a poslední vrstvy objemového dílu. Rychlost chladnutí u simulace poslední vrstvy na objemovém dílu zpočátku nadhodnocovala teplotu vůči experimentu, ale po 30 sekundách jí začala mírně podhodnocovat. Úvodní nadhodnocování lze vysvětlit efektivnějším vyhledáváním maximální teploty u simulace. Poté co byla teplota do určité míry homogenizována, křivka chladnutí simulace vykazovala stejný trend jako u experimentu. Validace na singletracku ukazovala podobné podhodnocování již od začátku měření. Jelikož je do simulace vložen tepelný výkon se 100% účinností, k takovému podhodnocování vůči experimentu by nemělo docházet. Jediným vysvětlením je zapnutý výhřev v simulaci. Tato okrajová podmínka udržuje teplotu předehřevu na určité ploše podložky. Aby podložka nezchladla při nanášení materiálu, je nutné, aby tento prvek byl zapnutý. Tato okrajová podmínka udržuje pevnou teplotu na zvolené ploše. Proto může docházet i k odvodu tepla v případě, že by návar způsobil přehřátí, které by se přeneslo až na danou plochu.

Vytvořené validace ukázaly dostatečnou přesnost pro simulaci trajektorií. Ke každé z trajektorií byly vyhledány kritické oblasti, kde docházelo k nejpomalejšímu chladnutí. Body byly vyhodnoceny na základě původní rychlosti chladnutí, ne podle opakovaného zahřívání. Jedinou výjimkou je trajektorie S-pattern, kde docházelo k opakovanému zahřívání bezprostředně po nanášení návaru. Ve výsledcích této práce byl popsán systematický postup hledání kritických oblastí u jednotlivých trajektorií. Tento postup byl ověřen zobrazením všech křivek chladnutí.

Byly zjištěny určité poznatky ze simulací trajektorií:

- Rychlost chladnutí postupně klesá po délce trajektorie
- K pomalejšímu chladnutí dochází na okrajích dílu
- K pomalejšímu chladnutí dochází v rozích trajektorie

Zdrojem nepřesností u této simulace může také být obdélníkový průřez návaru a analýza provedená pouze uprostřed návaru. Více bodů pro analýzu by bylo velmi časově náročné, ale lze předpokládat, že by mohlo docházet k extrémně pomalé rychlosti chladnutí na vnitřní straně rohu trajektorie.

6.1.3 Analýza mikrostruktury

Výroba objemových dílů

Krychle vytvořené střídavými trajektoriemi měly určité geometrické nepřesnosti. Všechny krychle byly přibližně o 17 % nižší, než předpokládal analytický výpočet. V této fázi byla také zjištěna citlivost procesu na vzdálenost mezi výtiskem a kontaktní špičkou hořáku. Proto byly pohyby ramene na každé vrstvě odstupňovány po 2,5 mm (původně 3 mm).

Horní plocha dokončených dílů měla také určité nepřesnosti. U všech trajektorií se projevovaly začátky návarů jako mírně zvýšené oblasti na ploše. Tyto výstupky se prokreslily i do následně nanesených vrstev, proto lze na horní rovině sledovat i výstupky z dříve nanesených vrstev. Nejlepší geometrickou přesnost horní plochy měla trajektorie ZigZag. U trajektorie S-pattern byl problém s propadáním v oblastech, kde dochází k obrácení trajektorie z navařování obrysu k navařování vnitřní oblasti. Nejhorší geometrickou přesnost měla trajektorie Spiral, jelikož na každé vrstvě je začátek trajektorie ve stejné oblasti. To mělo za následek výrazný výstupek v této oblasti.

Porozita vzorků

Na základě literatury lze předpokládat, že porozita v objemovém díle by se měla vyskytovat zejména v oblastech tepelné koncentrace [44]. Pro analýzu porozity byly použity vzorky pro analýzu velikosti zrn. Vzorky byly rozmístěny po trajektoriích takovým způsobem, že v jedné boční ploše vzorku se nacházel tepelný koncentrátor k analýze mikrostruktury. Vzorek tedy neobsahoval celý tepelný koncentrátor, ale tepelné koncentrátory byly rozříznuty na kraji vzorku. Vytvořené vzorky obsahovaly kromě horní vrstvy také pár předešlých vrstev, proto by změřená porozita u určitého vzorku nepředstavovala oblast horní trajektorie, ale i oblast na trajektorií pod ní.

Z těchto důvodů je možné tímto způsobem otestovat jen všeobecné poznatky které platí pro každou nanesenou vrstvu jako jsou:

- K pomalejšímu chladnutí dochází na okrajích dílu
- K pomalejšímu chladnutí dochází v rozích trajektorie

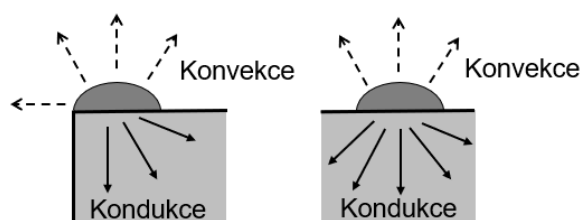
Ve střední oblasti trajektorie ZigZag je možné sledovat porozitu 0,67 %, zatímco na stejné úrovni, na krajích krychle, je porozita 0,8 % a 1,01 %. Tyto měření potvrzují poznatek, že k většímu přehřátí a pomalejšímu chladnutí dochází na okrajích dílu. U trajektorie ZigZag je také možné vyhodnotit porozitu u vzorků, které jsou umístěny ve středu dílu v různých výškách. Celá výška dílu je rozdělena do 3 vzorků. Nejmenší porozita je na horním vzorku (0,67 %), na středním vzorku bylo více porozity (0,89 %) a na spodním vzorku je nejvíce porozity (1,35 %). K tvorbě porozity by mělo docházet v oblastech tepelné koncentrace a rychlost chladnutí by měla klesat se vzdáleností od podložky. Teoreticky by tedy mělo být nejvíce porozity v horní oblasti. Možným vysvětlením je koroze naneseného materiálu. Povrchové oxidy při vystavení atmosféře se mění na hydroxidy. Tyto hydroxidy je možné dehydratovat zpět na oxidy za tvorby plynů. Dehydratace probíhá zvýšením teploty. Při výrobě spodních vrstev celý proces navařování probíhá za nižších teplot. Tím pádem k dehydrataci může docházet až v tavné lázni. Při pozdějších vrstvách může docházet až k takovému přehřátí, že dochází k dehydrataci již před tavnou lázní. Do tavné lázně se tudíž dostanou pouze dehydratované oxidy.

Na vzorcích z trajektorie Spiral by mělo být možné validovat poznatek, že k pomalejšímu chladnutí dochází v rozích trajektorie. Vzorek v rohu trajektorie má porozitu 0,62 %, zatímco vzorek z přímé oblasti má porozitu 0,78 %. Toto měření nepotvrzuje tento poznatek. Je nutné poznamenat, že vzorek z rohu trajektorie má pouze polovinu tohoto tepelného koncentrátoru a vzorek z přímé části je natolik dlouhý že dosahuje téměř do dalšího rohu trajektorie. Vzorek z přímé části trajektorie se navíc nachází v oblasti blízko ke konci návaru, kde se dle M. Köhlera také nachází koncentrace porozity[44].

Velikost zrn

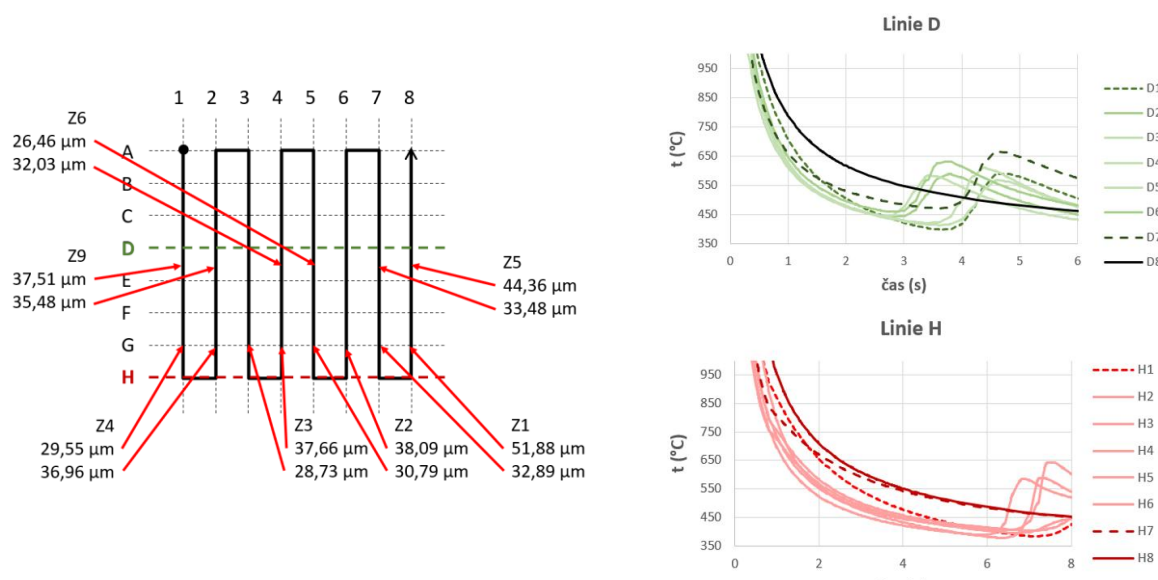
Na základě kritických oblastí zjištěných při simulaci trajektorií a poznatků, které byly zjištěny při vyhodnocování simulace, je vytvořena sada vzorků sloužící k ověření těchto poznatků a k validaci kritických oblastí. U některých kritických oblastí je analyzovaný průřez posunut na nejbližší přímou oblast, protože průřez musí být vždy analyzován kolmo ke směru nanášení. Zrna jsou orientovaná podle směru chladnutí, proto by bylo vhodné vybrat jeden směr, ze kterého by bylo možné návary analyzovat. Pro případ této práce byl vybrán směr kolmo ke směru nanášení.

U trajektorie ZigZag byl pozorován trend snižující se rychlosti chladnutí s množstvím naneseného materiálu. Tento poznatek je způsoben postupným ohříváním naneseného materiálu a podložky během procesu navařování. Dalším poznatkem je že rychlost chladnutí je pomalejší na okraji dílu. To může být způsobeno odváděním menšího množství tepla na okraji dílu pomocí kondukce (Obr. 6-2).



Obr. 6-2 Porovnání disipace tepla uprostřed a na okraji dílu.

Pro ověření poznatku, že rychlost chladnutí zpomaluje s množstvím naneseného materiálu, jsou vybrány 4 vzorky, včetně jednoho vzorku s kritickou oblastí (Z1, Z2, Z3, Z4, Obr. 6-3). Z4 je nejbližší začátku trajektorie a má nejmenší velikosti zrn. Z1 je kritická oblast, která se nachází ke konci trajektorie a má největší zrna. Z3 má větší zrna jak Z4 a Z2 má ještě mírně větší zrna než Z3. Toto potvrzuje poznatek, že rychlost chladnutí klesá s naneseným materiálem. Rozdíl mezi velikostmi zrn Z2 a Z3 je minimální, avšak simulace také neukazuje zásadní rozdíl mezi těmito oblastmi (Obr. 6-3, Linie H).

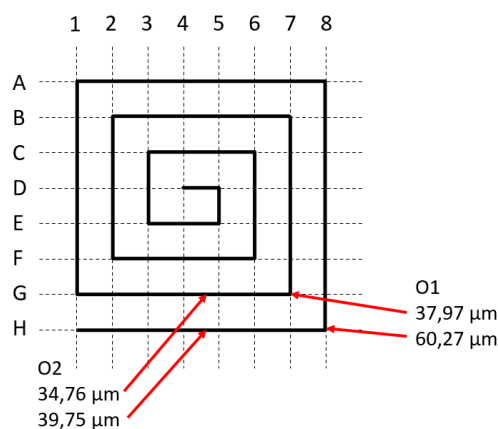


Obr. 6-3 Porovnání skutečné velikosti zrn a rychlosti chladnutí v simulaci

Dalším ověřovaným poznatkem je pomalejší chladnutí na okraji dílu. Za tímto účelem je zkoumána oblast přesně uprostřed dílu (Z6) a další oblasti na okraji dílu (Z5 a Z9). Z9 je umístěn na začátku návaru a Z5 je umístěn ke konci trajektorie. Na vzorku Z9 na kraji dílu je průměrná velikost zrna 37,51 μm . Na vzorku Z5 na kraji dílu je průměrná velikost zrna 44,36 μm . Průměrná velikost zrn na vzorku Z6 je 32,03 μm . Na vzorku Z6 se nachází nejmenší zrna, to potvrzuje poznatek, že k rychlejšímu chladnutí dochází uprostřed dílu. Velikost zrn na konci trajektorie je větší jako na začátku, obě velikosti jsou však větší než uprostřed dílu.

Kritická oblast (Z1) u trajektorie ZigZag měla největší velikosti zrn, stejně jak simulace predikovala. Tato oblast měla největší průměrnou velikost zrn 51,88 μm .

Při analýze trajektorie Spirál byl zjištěn poznatek, že dochází k pomalejšímu chladnutí v rozích trajektorie. Pro ověření tohoto poznatku je kromě vzorku s kritickou oblastí, vytvořen také vzorek na přímé části trajektorie. Při vytváření vzorku s kritickou oblastí bylo nutné udělat výjimku a udělat řez v rohu trajektorie pod úhlem 45 °.



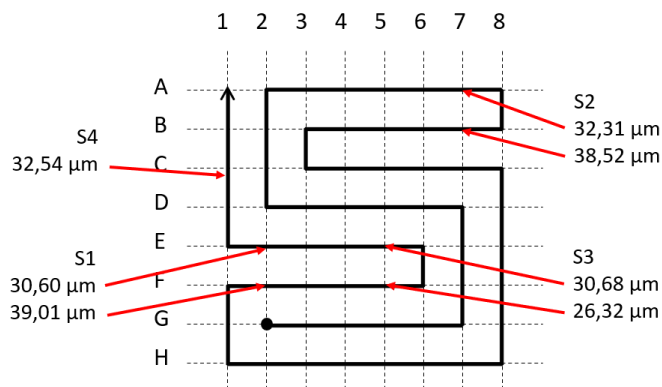
Obr. 6-4 Velikosti zrn na vzorcích ze Spirál trajektorie

Dle očekávání největší průměrná velikost zrn jsou v rozích trajektorie na vzorku O1 (Obr. 6-4). To potvrzuje poznatek, že v rozích trajektorie dochází k pomalejšímu chladnutí. Největší velikost zrn je v predikované oblasti a má průměrnou hodnotu 60,27 μm.

U trajektorie S-pattern byly 2 oblasti s nízkou rychlostí chladnutí (S1, S2, Obr. 6-5). Pro skutečné porovnání těchto oblastí byly obě vybrány pro analýzu velikostí zrn. Oblast S3 byla vybrána z důvodu přítomnosti koncentrátoru tepla, i přesto že simulace tuto oblast nepředstavovala jako kritickou. K nejpomalejšímu chladnutí mělo docházet v oblasti S2.

Dle zjištěných velikostí zrn (Obr. 6-5) lze říct, že největší průměrná velikost zrn je v oblasti vzorku S1. Nicméně rozdíl velikostí zrn mezi S1 a S2 je minimální, stejně jak tomu bylo u rychlosti chladnutí těchto oblastí v simulaci. Oblast tepelného koncentrátoru S3 měla skutečně menší zrna, než predikovala simulace.

Největší velikost zrn u trajektorie S-pattern byla v oblasti vzorku S1 a měla průměrnou velikost 39,01 μm.

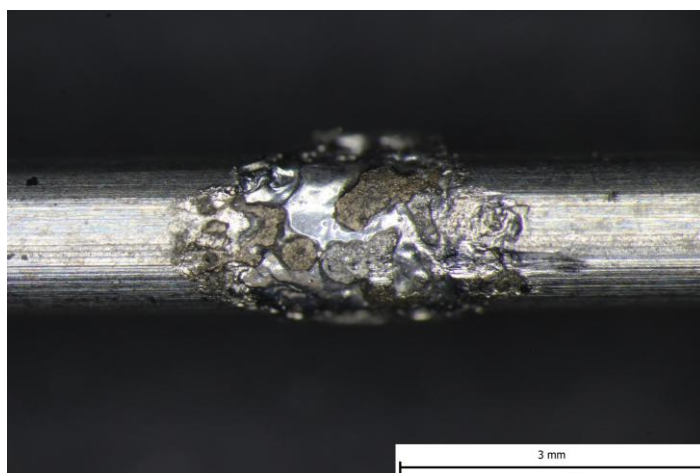


Obr. 6-5 Velikosti zrn na vzorcích z S-pattern trajektorie

Oblast S4 na S-pattern trajektorii, O2 na Spiral trajektorii, a Z5 na ZigZag trajektorii všechny představují velmi podobnou oblast na těchto trajektoriích. Všechny jsou na kraji dílu, všechny jsou přibližně 20 mm před koncem trajektorie, všechny jsou z oblasti přímé části trajektorie. Pozice těchto vzorků vyhovuje všem třem poznatkům ze simulace pro stanovení stejných podmínek chladnutí. Jediným rozdílem mezi těmito vzorky je tepelná distribuce již naneseného materiálu. Proto by tímto způsobem bylo možné stanovit, jak dobře je teplo distribuováno různými trajektoriemi. Průměrná velikost zrn této oblasti u ZigZag trajektorie je 44,36 μm . U Spiral trajektorie je průměrná velikost 39,75 μm a u S-pattern 32,54 μm . Dle této metodiky k nejlepší tepelné distribuci dochází u S-pattern trajektorie, poté u Spiral trajektorie a nejhorší tepelnou distribuci má ZigZag trajektorie.

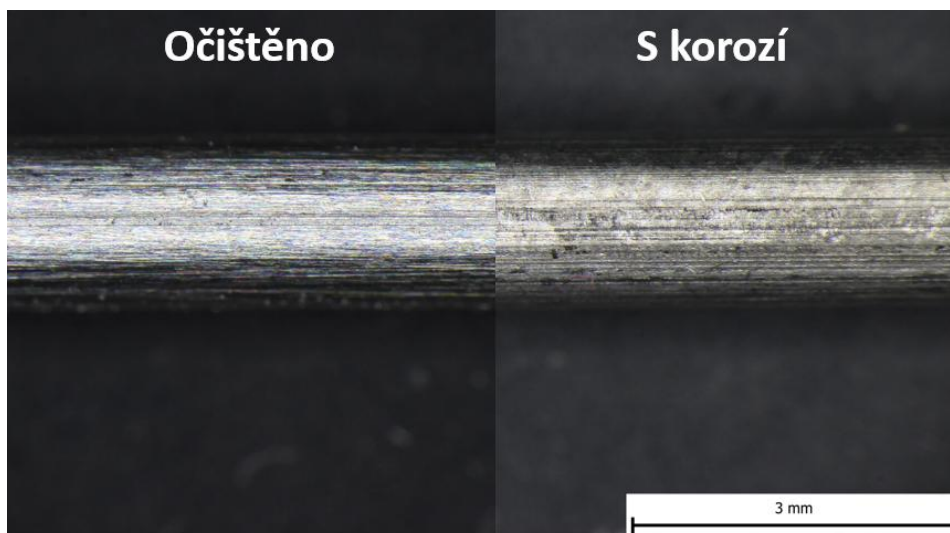
6.1.4 Problémy výroby

Při procesu výroby docházelo k občasnému přerušení svařovacího oblouku. Přerušení bylo často způsobováno přivařením drátu ke kontaktní špičce hořáku. Při tomto přivaření byl poškozen svařovací drát i samotná tryska. Na Obr. 6-6 je možné vidět kusy trysky přivařené ke svařovacímu drátu (žluté).



Obr. 6-6 Tryska přivařená na svařovací drát

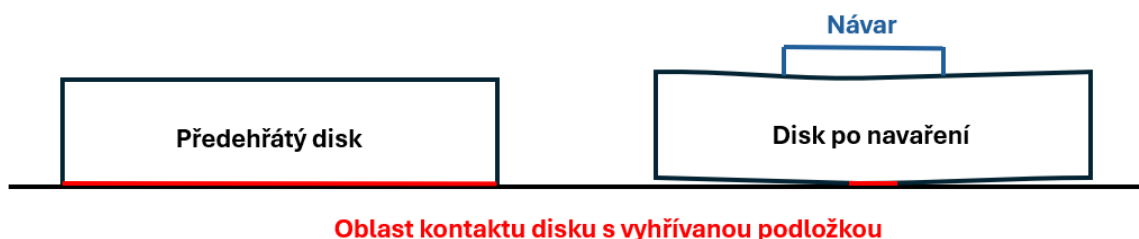
Za toto přivaření je často zodpovědná povrchová koroze svařovacího drátu. Tato koroze způsobuje špatný elektrický kontakt mezi drátem a tryskou, proto proud procházející z trysky do drátu je často koncentrován do jediného bodu. Za tímto účelem byla navržena čistící sestava (kap. 4.4). Tato sestava dokáže do velké míry očistit drát (Obr. 6-7), ale stále se na drátu můžou nacházet oblasti s velkým množstvím koroze, nebo s defektem z výroby.



Obr. 6-7 Porovnání očištěného drátu a původního drátu s korozí

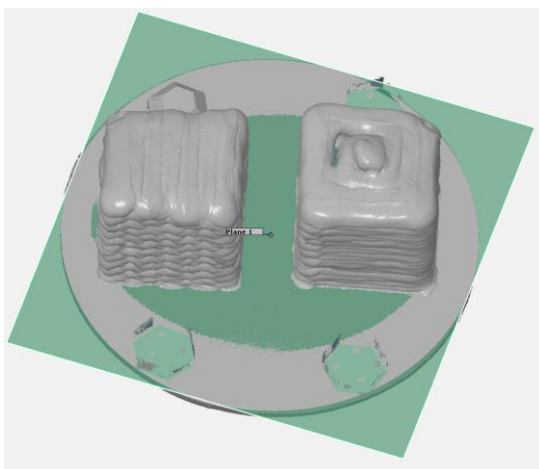
Kromě povrchové koroze je nízká stabilita procesu sledována také v případě, kdy je hořák příliš vysoko nad navařovaným dílem. Při výšce hořáku 15 mm nad dílem dochází ke zvýšenému počtu přerušením, avšak při výšce 12 mm nad dílem dochází k minimálnímu počtu přerušením.

Teplota disku ze slitiny AZ91 sloužícímu k navařování dílu, byla sledována pomocí termočlánku. Dosažení požadované teploty bylo bezproblémové ještě před navařováním. Jakmile na disku už byl vytvořen nějaký návar, docházelo k poklesu teploty disku až pod teplotu vyhřívacího stolu. To může být způsobeno zkroucením disku a tím pádem zmenšením kontaktní plochy (Obr. 6-8).



Obr. 6-8 Deformace podložky při navařování

Průhyb disku je potvrzen při vyhodnocování naskenovaných objemových dílů. Zelená plocha označuje Gaussian Best Fit na horní plochu disku (Obr. 6-9). Z naskenovaného povrchu je patrné, že okraje jsou výš jak tato plocha, zatímco prostředek dílu je níže.



Obr. 6-9 Průhyb disku po navařování

6.2 Verifikace hypotéz

Hypotéza predikovala největší velikost zrn u trajektorie ZigZag, menší u Spiral a nejmenší u trajektorie S-pattern. Dále byl předpokládán rozsah velikostí zrn 20 – 65 μm . Predikovaný rozsah byl stanoven na základě velikostí zrn zjištěných v kap. 2.2.1.

Skutečný rozsah velikostí zrn odpovídal předpokládaným hodnotám. ZigZag trajektorie měla rozsah velikostí zrn 26,46 – 51,88 μm , Spiral měla rozsah 34,76 – 60,27 μm a S-pattern měla rozsah 26,32 – 39,01 μm . U S-pattern trajektorie je zdaleka nejmenší rozsah velikostí zrn.

Na základě simulace byly stanoveny 3 poznatky.

- Rychlost chladnutí klesá s nanášením materiálu.
- Návar chladne nejpomaleji na okraji dílu.
- K nejpomalejšímu chladnutí dochází v rozích trajektorie

Tyto 3 poznatky byly experimentálně verifikovány na zjištěných velikostech zrn. Na jejich základě byla zvolena oblast na každé z trajektorií, která má teoreticky stejné podmínky chladnutí. Jedinou rozdílnou podmínkou byla tepelná distribuce již naneseného materiálu. Takto získané výsledky měly hodnotu 44,36 μm u ZigZag trajektorie, 39,75 μm u Spiral trajektorie, a 32,54 μm u S-pattern trajektorie. Tyto výsledky jsou ve shodě s navrženou hypotézou. Hypotéza predikuje úzkou závislost velikostí zrn na tepelné distribuci. Zjištěné velikosti zrn odpovídají tepelné distribuci u jednotlivých trajektorií.

Simulace trajektorií sloužila pro stanovení kritických oblastí. Tyto oblasti u trajektorie ZigZag a Spiral byly následně experimentálně ověřeny jako kritické, jelikož měly největší velikosti zrn. U trajektorie S-pattern se kritická oblast mírně lišila od predikované oblasti simulací.

V kritických oblastech každé z trajektorií byly určeny velikosti zrn. ZigZag trajektorie měla velikosti zrn 51,88 μm , Spiral měla velikost 60,27 μm a S-pattern měla velikost 39,01 μm . U S-pattern trajektorie se nachází zdaleka nejmenší velikost zrn. Spiral trajektorie má největší velikost zrn (60,27 μm) a to i přesto, že tato trajektorie má mít lepší tepelnou distribuci než trajektorie ZigZag. Může se jednat o silné lokální přehřátí u trajektorie Spiral, ale pravděpodobnější možností je nepřesnost při vyhodnocování vzorku. Tento vzorek u trajektorie Spiral byl jako jediný vyříznut z dílu pod náklonem 45° vůči směru nanášení. To mohlo způsobovat deformovaný pohled na velikosti zrn.

V této práci byla částečně potvrzena hypotéza týkající se závislosti velikostí zrn na tepelné distribuci. K tvorbě nejmenších velikostí zrn, s nejmenším rozsahem, dochází u trajektorie S-pattern. Tato trajektorie má nejlepší tepelnou distribuci. Trajektorie Spiral má lepší tepelnou distribuci než ZigZag, ale také větší velikost zrn v kritických oblastech. Tyto protichůdné výsledky částečně vylučují vytvořenou hypotézu, ale jen v případě, že tyto výsledky jsou přesné.

7 ZÁVĚR

V této práci byl zkoumán vliv tiskových strategií na velikost zrn v objemových dílech vytvořených metodou WAAM z hořčikové slitiny AZ61. Řešení této práce bylo rozděleno do čtyřech fází.

V první fázi bylo nutné zvolit vhodné procesní parametry pro výrobu objemových dílu. Byl vybrán parametr I_{boost} a $t_{\text{I_boost}}$ svařovacího zařízení. Úpravou těchto parametrů nebylo možné dosáhnout dostatečného provaření na první vrstvě a zároveň nedosahovat příliš velkého provaření na pozdějších vrstvách. Z tohoto důvodu se práce zaměřila na rychlost posuvu hořáku a předeřev podložky. Byla provedena podrobná analýza vlivu těchto parametrů na geometrii návaru, tepelný výkon, množství vkládaného tepla a rychlost chladnutí. Na základě těchto zjištění byly vybrány parametry, které byly následně otestovány na malém objemovém díle. Tímto způsobem byla zvolena sada parametrů vhodná pro WAAM výrobu objemových dílů ze slitiny AZ61.

Pomocí simulace byly určeny kritické oblasti, ve kterých dochází k nejpomalejšímu chladnutí a tím pádem i ke tvorbě největších zrn. Tyto oblasti byly následně analyzovány na vytvořeném dílu. Byly analyzovány také další oblasti trajektorií pro verifikaci simulace. Výsledky velikostí zrn z velké části potvrzují simulace. Docházelo pouze k drobným nepřesnostem mezi skutečnými velikostmi zrn a simulací trajektorie. Při porovnání velikostí zrn, nejmenší velikosti vycházely u S-pattern trajektorie, tedy teoreticky i nejlepší mechanické vlastnosti. S-pattern měla navíc nejmenší rozsah velikostí zrn napříč dílem. Spirál a ZigZag mají oproti S-pattern hrubší zrna v kritických oblastech. Jediná výhoda ZigZag trajektorie je velmi dobrá geometrická přesnost vytvořeného dílu. Trajektorie Spirál nemá žádné výhody, má nejhrubší zrna a nejhorší geometrickou přesnost.

Pro ukázkový objemový díl byla vybrána trajektorie S-pattern díky svým malým velikostem zrn. Tento díl vycházel ze segmentu dílu rámu letadla. Díl měl rozměry 190 x 190 x 50 mm a měl 20 vrstev. Tímto způsobem byla ověřena aplikovatelnost této trajektorie. Získanými výsledky byly splněny všechny naplánované cíle diplomové práce.

Pro další řešení této tematiky by bylo vhodné ověřit skutečné mechanické vlastnosti takto vytvořených dílů. Při řešení této práce byla zkoumána porozita na vzorcích, ale tyto vzorky nebyly navrženy pro zkoumání porozity. Bylo by tedy vhodné následně ověřit porozitu na specializovaných vzorcích. V současné době jsou nalezeny procesní parametry pro tenkostěnné a objemové díly, není však zatím vytvořena strategie nanášení převisů dílu. Dalším krokem by tedy měl být také výzkum strategií nanášení převisů. Při výrobě ukázkového objemového dílu byl identifikován defekt v oblasti navazování tenkostěnných a objemová dílů, proto by tato návaznost měla být také předmětem zkoumání.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ÇAM, Gürel a Ali GÜNEN. *Challenges and opportunities in the production of magnesium parts by directed energy deposition processes* [online]. B.m.: KeAi Communications Co. 1. květen 2024. ISSN 22139567. Dostupné z: doi:10.1016/j.jma.2024.05.004
- [2] BLAU, Peter J, Dennis D HUFFMAN, Lawrence J KORB, Rockwell INTERNATIONAL, David V NEFF, • S Lee SEMIATIN, Wright LABORATORY, George F VANDER a Harry W WALTON. *ASM Speciality handbook* 2. nedatováno.
- [3] MOTALLEBI, Reza, Zeinab SAVAEDI a Hamed MIRZADEH. *Post-processing heat treatment of lightweight magnesium alloys fabricated by additive manufacturing: a review* [online]. B.m.: Elsevier Editora Ltda. 1. září 2022. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2022.07.154
- [4] CARVALHO, Amanda P. a Roberto B. FIGUEIREDO. *An Overview of the Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Magnesium and Its Alloys* [online]. B.m.: Japan Institute of Metals (JIM). 2023. ISSN 13459678. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.MT-MF2022005
- [5] SUN, Lifeng, Zhongyu GAO, Zhongchao HU, Huyan CHEN, Jianwen CAI a Xiaoou CAI. Study on the grain refinement mechanism of Mg-Al alloy based on carbon addition. *PLoS ONE* [online]. 2022, **17**(8 August). ISSN 19326203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0271583
- [6] MOSES, Marie, Madlen ULLMANN a Ulrich PRAHL. Influence of Aluminum Content on the Microstructure, Mechanical Properties, and Hot Deformation Behavior of Mg-Al-Zn Alloys. *Metals* [online]. 2023, **13**(9). ISSN 20754701. Dostupné z: doi:10.3390/met13091599
- [7] STJOHN, David H, M A QIAN, Mark A EASTON, Peng CAO a Zoë HILDEBRAND. *Grain Refinement of Magnesium Alloys*. nedatováno.
- [8] CHEN, Ti Jun, Xiang Dong JIANG, Ying MA, Rui Quan WANG a Yuan HAO. Grain refinement of AZ91D magnesium alloy by MgCO₃. *Materials Research* [online]. 2011, **14**(1), 124–133. ISSN 15161439. Dostupné z: doi:10.1590/S1516-14392011005000017
- [9] CAI, Huisheng, Zhenzhu WANG, Liang LIU, Juan SU, Yuguang LI a Feng GUO. Grain Refinement Mechanism of Rare Earth Elements (Ce, Y and Gd) on AZ91 Magnesium Alloy at Different Cooling Rates. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2023. ISSN 21633193. Dostupné z: doi:10.1007/s40962-023-01204-5

- [10] PONOMAREVA, Taisiya, Mikhail PONOMAREV, Arseniy KISAREV a Maxim IVANOV. Wire arc additive manufacturing of Al-Mg alloy with the addition of scandium and zirconium. *Materials* [online]. 2021, **14**(13). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14133665
- [11] CHEN, Ruinan, Qinghua CHEN, Xu HUANG, Qingsong HE, Jian SU, Bin TAN, Chao XU, Huahong DENG a Qingwei DAI. Effect of Al Content on the Microstructural and Grain Growth Kinetics of Magnesium Alloys. *Metals* [online]. 2022, **12**(11). ISSN 20754701. Dostupné z: doi:10.3390/met12111955
- [12] YING, Tao, Zhixian ZHAO, Pengfei YAN, Jingya WANG a Xiaoqin ZENG. Effect of fabrication parameters on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured AZ61 alloy. *Materials Letters* [online]. 2022, **307**. ISSN 18734979. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2021.131014
- [13] Effect of CMT-WAAM Process Parameters on Bead Geometry, Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Mg Alloy. nedatováno.
- [14] MANJHI, Shambhu Kumar, Prithvirajan SEKAR, Srikanth BONTHA a A. S.S. BALAN. Effect of equiaxed grains and secondary phase particles on mechanical properties and corrosion behaviour of CMT- based wire arc additive manufactured AZ31 Mg alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2023, **46**, 48–64. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2023.07.008
- [15] ZHANG, Zhongrui, Junqi SHEN, Ji BI, Shengsun HU, Yahui ZHEN a Xianzheng BU. Microstructure and Mechanical Properties of Weaving Wire and Arc Additive Manufactured AZ91 Magnesium Alloy Based on Cold Metal Transfer Technique. *Materials* [online]. 2023, **16**(11). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma16114047
- [16] YIN, Chengxuan, Junqi SHEN, Shengsun HU a Zhongrui ZHANG. Microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy fabricated by multi-layer and multi-pass CMT based WAAM technique. *Results in Engineering* [online]. 2023, **18**. ISSN 25901230. Dostupné z: doi:10.1016/j.rineng.2023.101065
- [17] KLEIN, Thomas, Aurel ARNOLDT, Martin SCHNALL a Stefan GNEIGER. Microstructure Formation and Mechanical Properties of a Wire-Arc Additive Manufactured Magnesium Alloy. *JOM* [online]. 2021, **73**(4), 1126–1134. ISSN 15431851. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-021-04567-4
- [18] CAI, Xiaoyu, Fukang CHEN, Bolun DONG, Sanbao LIN a Chunli YANG. Microstructure and mechanical properties of GTA-based wire arc additive manufactured AZ91D magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys* [online]. 2022. ISSN 22139567. Dostupné z: doi:10.1016/j.jma.2022.11.018

- [19] TROJANOVÁ, Zuzanka, Kristýna HALMEŠOVÁ, Zdeněk DROZD, Vladimír ŠÍMA, Pavel LUKÁČ, Ján DŽUGAN a Peter MINÁRIK. Thermal conductivity of an AZ31 sheet after accumulative roll bonding. *Crystals* [online]. 2018, **8**(7). ISSN 20734352. Dostupné z: doi:10.3390/cryst8070278
- [20] OH, Gun Young, Young Kyun KIM, Shae K. KIM, Hyun Kyu LIM a Young Jig KIM. Effects of grain size and texture on thermal conductivity of AZ31 during static recrystallization. *Materials Transactions* [online]. 2017, **58**(8), 1241–1243. ISSN 13459678. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.M2017126
- [21] ZHOU, Ying Long, Jie LIU a Dong Mei LUO. Microstructure, Mechanical and Thermal Properties of Mg-0.5Ca-xZr Alloys. *Crystals* [online]. 2022, **12**(2). ISSN 20734352. Dostupné z: doi:10.3390/cryst12020209
- [22] LEE, Sanghyun, Hye Jeong HAM, Su Yong KWON, Sok Won KIM a Chang Min SUH. Thermal conductivity of magnesium alloys in the temperature range from -125 C to 400 C. *International Journal of Thermophysics* [online]. 2013, **34**(12), 2343–2350. ISSN 0195928X. Dostupné z: doi:10.1007/s10765-011-1145-1
- [23] AGAZHANOV, A. Sh, D. A. SAMOSHKIN, Yu M. KOZLOVSKII a S. V. STANKUS. Thermophysical properties of ML5 casting magnesium alloy. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. B.m.: IOP Publishing Ltd, 2020. ISSN 17426596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1677/1/012162
- [24] LI, Yan, Chen SU a Jianjun ZHU. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. *Results in Engineering* [online]. 2022, **13**, 100330 [vid. 2023-11-11]. ISSN 2590-1230. Dostupné z: doi:10.1016/J.RINENG.2021.100330
- [25] SIDDIQUI, Nabeel Ahmed, Muhammad MUZAMIL, Tariq JAMIL a Ghulam HUSSAIN. *Heat sources in wire arc additive manufacturing and their impact on macro-microstructural characteristics and mechanical properties – An overview* [online]. B.m.: KeAi Communications Co. 1. leden 2025. ISSN 27728102. Dostupné z: doi:10.1016/j.smmf.2024.100059
- [26] SRIVASTAVA, Manu, Sandeep RATHEE, Ankit TIWARI a Mehul DONGRE. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2023, **294**, 126988 [vid. 2023-11-11]. ISSN 0254-0584. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATCHEMPHYS.2022.126988

- [27] ZENG, Zhuoran, Mojtaba SALEHI, Alexander KOPP, Shiwei XU, Marco ESMAILY a Nick BIRBILIS. Recent progress and perspectives in additive manufacturing of magnesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys* [online]. 2022, **10**(6), 1511–1541 [vid. 2023-11-11]. ISSN 2213-9567. Dostupné z: doi:10.1016/J.JMA.2022.03.001
- [28] *RCU 5000i Operating Instructions Spare parts list Remote control EN*. nedatováno.
- [29] ZHANG, Zhongrui, Junqi SHEN, Shengsun HU, Yang CHEN, Chengxuan YIN a Xianzheng BU. Optimization of CMT Characteristic Parameters for Swing Arc Additive Manufacturing of AZ91 Magnesium Alloy Based on Process Stability Analysis. *MATERIALS* [online]. 2023, **16**(8). Dostupné z: doi:10.3390/ma16083236
- [30] Characterization the contribution and limitation of the characteristic processing parameters in cold metal transfer deposition of an Al alloy. nedatováno.
- [31] *Vývoj WAAM procesních parametrů pro tenkostěnné díly z hořčíkové slitiny AZ61; Ing. Čeněk Šváb (FSI 2022 - 145867) – VUT* [online]. [vid. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145867>
- [32] MANJHI, S K, P SEKAR, S BONTHA a A S S BALAN. Effect of CMT-WAAM Process Parameters on Bead Geometry, Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Mg Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2023. ISSN 10599495 (ISSN). Dostupné z: doi:10.1007/s11665-023-08498-w
- [33] SHEN, Jun a Nan XU. Effect of preheat on TIG welding of AZ61 magnesium alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* [online]. 2012, **19**(4), 360–363. ISSN 16744799. Dostupné z: doi:10.1007/s12613-012-0564-8
- [34] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav. *FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING PŘEDEHŘEV TISKOVÉ PODLOŽKY PŘI WAAM VÝROBĚ HOŘČÍKOVÉ SLITINY AZ61 PREHEATING OF THE BASE PLATE DURING WAAM PRODUCTION OF MAGNESIUM ALLOY AZ61* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>
- [35] YANG, X, J LIU, Z WANG, X LIN, F LIU, W HUANG a E LIANG. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2020, **774**. ISSN 09215093 (ISSN). Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2020.138942

- [36] WANG, P, H ZHANG, H ZHU, Q LI a M FENG. Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: Processing, microstructure, and mechanical behavior. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2021, **288**. ISSN 09240136 (ISSN). Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2020.116895
- [37] *Vývoj WAAM procesních parametrů pro tenkostěnné díly z hořčkové slitiny AZ61; Ing. Čeněk Šváb (FSI 2022 - 145867) – VUT* [online]. [vid. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145867>
- [38] TREUTLER, Kai a Volker WESLING. *The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review* [online]. B.m.: MDPI. 1. září 2021. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/app11188619
- [39] Selection of Parameters for Optimized WAAM Structures for Civil Engineering Applications. nedatováno.
- [40] WAAM of structural components—building strategies for varying wall thicknesses _ Enhanced Reader. nedatováno.
- [41] DING, Donghong, Zengxi PAN, Dominic CUIURI a Huijun LI. *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)* P□□□□□□□□□□ D□□□□□□□□□□ *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)* A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). nedatováno.
- [42] NGUYEN, L, J BUHL a M BAMBACH. Multi-bead overlapping models for tool path generation in wire-arc additive manufacturing processes. In: M BAMBACH, ed. *Procedia Manufacturing* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 2020, s. 1123–1128. ISBN 23519789 (ISSN). Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2020.04.129
- [43] DING, Donghong, Runzhuo ZHAO, Qinghua LU, Zengxi PAN, Huijun LI, Kai WANG a Kuanfang HE. A shape control strategy for wire arc additive manufacturing of thin-walled aluminium structures with sharp corners. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, **64**, 253–264. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2021.01.029
- [44] KÖHLER, Markus, Li SUN, Jonas HENSEL, Sakari PALLASPURO, Jukka KÖMI, Klaus DILGER a Zhiliang ZHANG. Comparative study of deposition patterns for DED-Arc additive manufacturing of Al-4046. *Materials and Design* [online]. 2021, **210**. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2021.110122
- [45] MÜLLER, J a J HENSEL. WAAM of structural components—building strategies for varying wall thicknesses. *Welding in the World* [online]. 2023, **67**(4), 833–844. ISSN 00432288 (ISSN). Dostupné z: doi:10.1007/s40194-023-01481-y

- [46] SUN, Li, Xiaobo REN, Jianying HE a Zhiliang ZHANG. Numerical investigation of a novel pattern for reducing residual stress in metal additive manufacturing. *Journal of Materials Science and Technology* [online]. 2021, **67**, 11–22. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2020.05.080
- [47] SUN, Li, Xiaobo REN, Jianying HE a Zhiliang ZHANG. A bead sequence-driven deposition pattern evaluation criterion for lowering residual stresses in additive manufacturing. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, **48**. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.102424
- [48] ISRAR, R, J BUHL a M BAMBACH. A study on power-controlled wire-arc additive manufacturing using a data-driven surrogate model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2021, **117**(7–8), 2133–2147. ISSN 02683768 (ISSN). Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-07358-y
- [49] WANG, P, H ZHANG, H ZHU, Q LI a M FENG. Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: Processing, microstructure, and mechanical behavior. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2021, **288**. ISSN 09240136 (ISSN). Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2020.116895
- [50] NAGAMATSU, H a H SASAHARA. Improvement of Cooling Effect and Dimensional Accuracy of Wire and Arc Additive Manufactured Magnesium Alloy by Active-Cooling-Based Contacting Copper Blocks. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2022, **6**(2). ISSN 25044494 (ISSN). Dostupné z: doi:10.3390/jmmp6020027
- [51] DA SILVA, L J, H N FERRARESI, D B ARAÚJO, R P REIS a A SCOTTI. Effect of thermal management approaches on geometry and productivity of thin-walled structures of er 5356 built by wire + arc additive manufacturing. *Coatings* [online]. 2021, **11**(9). ISSN 20796412 (ISSN). Dostupné z: doi:10.3390/coatings11091141
- [52] SUN, Li, Xiaobo REN, Jianying HE a Zhiliang ZHANG. A bead sequence-driven deposition pattern evaluation criterion for lowering residual stresses in additive manufacturing. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, **48**. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.102424
- [53] KÖHLER, Markus, Li SUN, Jonas HENSEL, Sakari PALLASPURO, Jukka KÖMI, Klaus DILGER a Zhiliang ZHANG. Comparative study of deposition patterns for DED-Arc additive manufacturing of Al-4046. *Materials and Design* [online]. 2021, **210**. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2021.110122
- [54] *Machining Application / Aerospace Industry - Vision Wide Bridge Type Machines Maker* [online]. [vid. 2025-05-21]. Dostupné z: https://www.visionwide-tech.com/en/work_16.html

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých zkratk

WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
CMT	Cold Metal Transfer
HAZ	Heat Affected Zone
HCP	Hexagonal Close Packed
MIG	Metal Inert Gas
PAW	Plasma Arc Welding
RE	Rare Earth metals
SC	Short circuit
TIG	Tungsten Inert Gas
WFS	Wire Feed Speed
WS	Wire Speed

9.2 Seznam použitých veličin

d_{gs}	predikovaná velikost zrna
x_{cs}, x'_{dl}, x_{sd}	jednotlivé regiony přispívající k výsledné velikosti zrn
D	difuzní koeficient
z	parametr související s redistribucí legur
ΔT_{n-min}	minimální podchlazení potřebné pro nukleaci
V	rychlost tuhnutí
Q	rychlost odvodu tepla
C_l	koncentrace legur v kapalně fázi
C_0	celková koncentrace legur
k	koeficient rozdělení

d1, d2, d3	rozteč návarů
Sabc, Szlb...	oblasti průřezu návaru
w	šířka návaru
h	výška návaru
P	výkon
Q	množství vkládaného tepla
U	napětí
I	proud
v	rychlost posuvu hořáku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Prisma diagram	17
Obr. 2-2	Mikrostruktura a) AZ31, b) AZ61, c) AZ91 [5]	19
Obr. 2-3	Reprezentace třech oblastí, které dohromady vytváří nukleační vzdálenost a velikost zrn [7]	20
Obr. 2-4	Porovnání závislostí velikostí zrn u komerčních a čistých slitin na rychlosti chladnutí[7].....	21
Obr. 2-5	Závislost velikosti zrn AZ91 na rychlosti chladnutí a) při pomalejších chladnutích [8], b) při rychlejších[9].....	21
Obr. 2-6	Závislost velikosti zrn AZ31, AZ61 a AZ91 na teplotě a době tepelného zpracování [11]	22
Obr. 2-7	a) Oblasti jednoduchého návaru [13], b) Oblasti tenkostěnného dílu [14]	23
Obr. 2-8	Vzorek experimentu pro analýzu vlivu později nanesených vrstev na mikrostrukturu [15].....	24
Obr. 2-9	WAAM MIG metoda [24]	26
Obr. 2-10	WAAM PAW metoda [24].....	26
Obr. 2-11	WAAM MIG metoda [24].....	27
Obr. 2-12	a) <i>CMT metoda</i> [26], b) CMT proudová charakteristika [29]	28
Obr. 2-13	Vliv I_{boost} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny[31], b) hořčíkové slitiny AZ61[30].....	29
Obr. 2-14	Vliv $t_{I_{boost}}$ na průřez návaru z a) hliníkové slitiny [31], b) hořčíkové slitiny AZ61 [30].....	29
Obr. 2-15	Vliv I_{sc_wait} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny[31], b) hořčíkové slitiny AZ61[30].....	30
Obr. 2-16	Vliv vd_{sc_wait} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny[31], b) hořčíkové slitiny AZ61[30].....	30
Obr. 2-17	Vliv I_{sc2} na průřez návaru z a) hliníkové slitiny [31], b) hořčíkové slitiny AZ61 [30]	31
Obr. 2-18	Koeficient stability hlavních parametrů [29]	31
Obr. 2-19	Závislost výšky a šířky návaru na rychlosti posuvu hořáku [32].....	32
Obr. 2-20	Průměrné velikosti zrn v závislosti na rychlost posuvu hořáku [32]	32

Obr. 2-21 Vliv přehřevu na a) šířku návaru, b) výšku návaru, c) hloubku provaření, d) kontaktní úhel[34].....	33
Obr. 2-22 Vliv přehřevu na deformaci návaru[34]	33
Obr. 2-23 Návar vhodný pro výrobu tenkostěnných dílů ze slitiny AZ61 [31].....	34
Obr. 2-24 Odvod tepla u a) normálního svařování, b) WAAM tenkostěnných dílů[38] ...	35
Obr. 2-25 Návar vhodný pro objemové díly a) Saham[39], b) Müller[40].....	35
Obr. 2-26 a) Parabolický průřez návaru, b) Schematické znázornění překrytí dvou návarů [42]	36
Obr. 2-27 a) Nemodifikovaná rozteč okrajového návaru, b) Modifikovaná rozteč okrajového návaru [42].....	37
Obr. 2-28 Krajní návar kolmý k vnitřním [42].....	38
Obr. 2-29 a) geometrie druhého nanášeného návaru [41], b) Roh trajektorie [43]	38
Obr. 2-30 Často používané trajektorie [44].....	39
Obr. 2-31 a) Spirál trajektorie, b) S-pattern trajektorie [44].....	39
Obr. 2-32 a) mřížka, b) trajektorie, c) ovlivnění teplem, d) tepelná distribuce, e) vyhodnocení, f) napětí [47]	40
Obr. 2-33 Tepelná distribuce a) S trajektorie, b) Spirál trajektorie, c) ZigZag trajektorie[47]	41
Obr. 2-34 Oblast zkoumání mikrostruktury (červeně) u a) ZigZag trajektorie, b) Spirál trajektorie, c) S-pattern trajektorie [44].....	41
Obr. 2-35 Neprovařené oblasti objemových dílů[39].....	42
Obr. 2-36 a) Konstantní parametry navařování, b) Upravené parametry navařování [48]	42
Obr. 2-37 Defekty vznikající na rozmezí dvou návarů [49].....	43
Obr. 2-38 Porozita v a) ZigZag trajektorii, b) Spirál trajektorii, c) S-pattern trajektorii [44]	43
Obr. 4-1 Metodika práce	48
Obr. 4-2 Kuka KR 60 HA	49
Obr. 4-3 Skript pro přípravu SRC kódu.....	51
Obr. 4-4 Čistící sestava pro hořčikový svařovací drát	51
Obr. 4-5 Nahrazení geometrie průřezu návaru geometrickým modelem.....	53
Obr. 4-6 Testová 2D trajektorie.....	53
Obr. 4-7 a) ZigZag trajektorie, b) Spirál trajektorie, c) S-pattern trajektorie	54

Obr. 4-8	Model pro simulaci trajektorie	55
Obr. 4-9	a) Simulace návaru, b) Záběr z termokamery.....	56
Obr. 4-10	Skript pro tvorbu jednoduchého G-kódu	57
Obr. 4-11	Počátek v modelu pro simulaci trajektorií	57
Obr. 4-12	Analyzované body a) ZigZag trajektorie, b) Spirál trajektorie, c) S-pattern trajektorie	58
Obr. 4-13	Stejná trajektorie na každé vrstvě	59
Obr. 4-14	Trajektorie pro výrobu objemového dílu pro a) ZigZag, b) Spirál, c) S-pattern	59
Obr. 4-15	Archimédova metoda měření hustoty.....	60
Obr. 4-16	Postup analýzy velikostí zrn a) Celý vzorek, b) Vyhodnocovaná oblast, c) Obtáhlé hranice zrn, d) Úprava obrázku v ImageJ, e) Vyhodnocení v ImageJ	61
Obr. 5-1	a) Jednoduché návary, b) 2D trajektorie, c) Návary pro analýzu provaření.	62
Obr. 5-2	Vyhodnocení testovacích 2D trajektorií	63
Obr. 5-3	Defekty objemových dílů způsobené přehřátím	64
Obr. 5-4	a) Tepelný výkon, b) Množství vkládaného tepla v závislosti na rychlost posuvu a přehřevu	66
Obr. 5-5	Rychlosti chladnutí návarů	66
Obr. 5-6	Časový interval pro zchladnutí na původní teplotu + 20 °C	67
Obr. 5-7	Malý testový objemový díl	67
Obr. 5-8	Návar vytvořený zvolenými parametry	68
Obr. 5-9	Validace zvolených prvků simulace.....	70
Obr. 5-10	a) Linie D, b) Body analýzy na linii D	71
Obr. 5-11	a) Linie 8, b) Body na linii 8.....	71
Obr. 5-12	a) Linie H, b) Body na linii H	72
Obr. 5-13	a) Linie 5, b) Body na linii 5.....	72
Obr. 5-14	a) Obrys trajektorie, b) Body na obrysu trajektorie.....	73
Obr. 5-15	a) Zvolené oblasti trajektorie, b) Body ve zvolených oblastech.....	73
Obr. 5-16	Kritické oblasti u a) ZigZag trajektorie, b) Spirál trajektorie, c) S-pattern trajektorie	74

Obr. 5-17	Analyzované oblasti a) ZigZag trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) S-pattern trajektorie.....	75
Obr. 5-18	a) Objemový díl vyrobený stejnou trajektorií ZigZag, b) Porovnání s předpokládanou geometrií.....	76
Obr. 5-19	Separace objemového dílu.....	76
Obr. 5-20	a) Objemový díl vyrobený střídavou trajektorií ZigZag, b) Porovnání s předpokládanou geometrií.....	77
Obr. 5-21	a) Rovinnost horní plochy trajektorie ZigZag, b) Odchytky v určitých bodech	77
Obr. 5-22	a) Objemový díl vyrobený střídavou trajektorií Spiral, b) Porovnání s předpokládanou geometrií.....	78
Obr. 5-23	a) Rovinnost horní plochy trajektorie Spiral, b) Odchytky v určitých bodech	78
Obr. 5-24	a) Objemový díl vyrobený střídavou trajektorií S-pattern, b) Porovnání s předpokládanou geometrií.....	79
Obr. 5-25	a) Rovinnost horní plochy trajektorie S-pattern, b) Odchytky v určitých bodech	79
Obr. 5-26	Porovnání simulace a experimentu u objemového dílu.....	80
Obr. 5-27	Nařezané objemové díly z a) ZigZag trajektorie, b) Spiral trajektorie, c) S-pattern trajektorie.....	81
Obr. 5-28	Porozita vzorků na trajektorii ZigZag	82
Obr. 5-29	Porozita vzorků na trajektorii Spiral	83
Obr. 5-30	Porozita vzorků na trajektorii S-pattern.....	83
Obr. 5-31	Velikosti zrn v oblastech trajektorie ZigZag	84
Obr. 5-32	Velikosti zrn v oblastech trajektorie Spiral	85
Obr. 5-33	Velikosti zrn v oblastech trajektorie S-pattern.....	85
Obr. 5-34	Součást rámu letadla tvaru C [54].....	86
Obr. 5-35	Ukázkový objemový díl	86
Obr. 6-1	a) Geometrie návaru pro hliníkové slitiny [39], b) Zvolená geometrie návaru, c) Závislost deformace návaru na předeřevu [34]	89
Obr. 6-2	Porovnání disipace tepla uprostřed a na okraji dílu.	93
Obr. 6-3	Porovnání skutečné velikosti zrn a rychlosti chladnutí v simulaci	93
Obr. 6-4	Velikosti zrn na vzorcích ze Spiral trajektorie.....	94

Obr. 6-5	Velikosti zrn na vzorcích z S-pattern trajektorie.....	94
Obr. 6-6	Tryska přivařená na svařovací drát.....	95
Obr. 6-7	Porovnání očištěného drátu a původního drátu s korozí	96
Obr. 6-8	Deformace podložky při navařování	96
Obr. 6-9	Průhyb disku po navařování	97

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Složení vybraných hořčíkových slitin z AZ série [2]	18
Tab. 2-2 Souhrn velikostí zrn hořčíkových slitin po WAAM výrobě.....	24
Tab. 2-3 Termofyzikální vlastnosti AZ31, AZ61 a AZ91	25
Tab. 2-4 Používané CMT parametry pro WAAM.....	34
Tab. 2-5 Funkce rovnic pro popis průřezu návaru[41]	36
Tab. 4-1 Parametry navržené pro tenkostěnné díly	52
Tab. 4-2 Nastavitelné prvky DED Wizard.....	56
Tab. 5-1 Geometrie průřezů návarů	62
Tab. 5-2 Poměr šířky ku výšce u geometrií průřezů návarů	63
Tab. 5-3 Geometrie návarů pro různé rychlosti posuvů a přehřevů.....	65
Tab. 5-4 Provaření návarů pro různé rychlosti posuvů a přehřevů.....	65
Tab. 5-5 Vybrané procesní parametry	68
Tab. 5-6 Charakteristiky vybraného návaru	68
Tab. 5-7 Zvolené nastavitelné prvky pro simulaci	69
Tab. 5-8 Měření ztrát na vzorku způsobené broušením	81
Tab. 5-9 Porozita vzorků u trajektorie ZigZag	82
Tab. 5-10 Porozita vzorků u trajektorie Spiral	83
Tab. 5-11 Porozita vzorků u trajektorie S-pattern.....	83
Tab. 5-12 Velikost zrn v závislosti na nanesených vrstvách	84

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Trajektorie použité pro výrobu objemových dílů a ukázkového objemového dílu.